



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

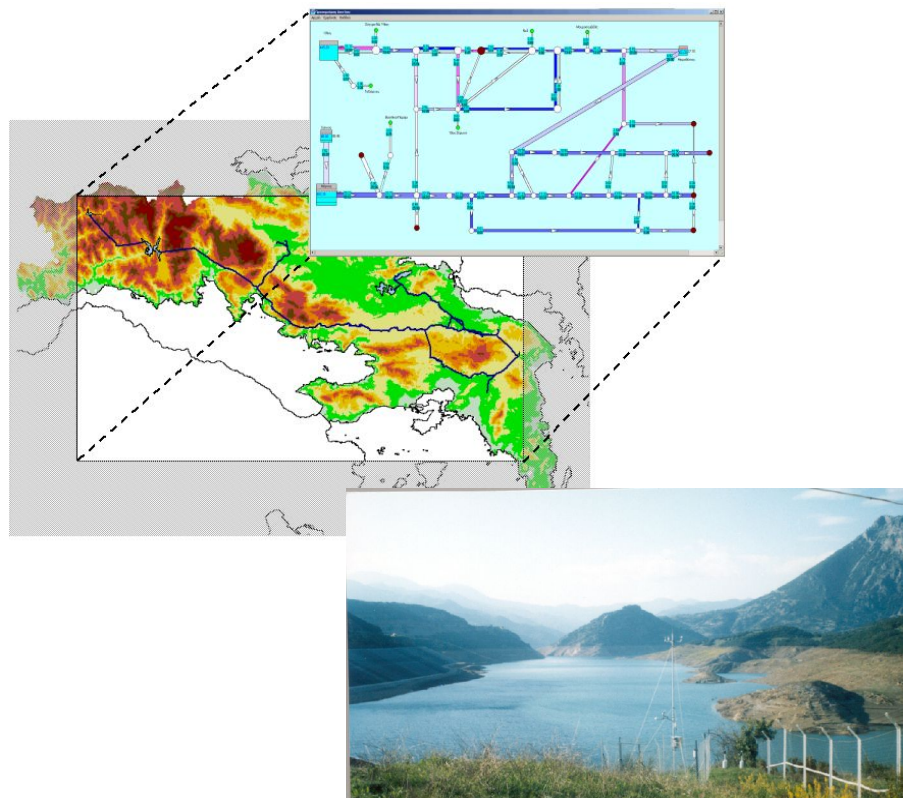
ΕΚΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΠΟΠΤΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

Τεύχος 17:

Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες

Επιστημονικός
υπεύθυνος:
Δ. Κουτσογιάννης,
Αν. Καθηγητής

Σύνταξη:
Α. Ευστρατιάδης,
Ν. Μαμάσης



Αθήνα, Ιανουάριος 2004

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Περιγράφονται οι υδρολογικές επεξεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εκτίμηση των επιφανειακών βροχοπτώσεων και εξατμίσεων, καθώς και τον υπολογισμό των παροχών σε υδρομετρικούς σταθμούς. Ακόμη, παρουσιάζονται τα μηνιαία υδατικά ισοζύγια των ταμιευτήρων, τα οποία καταρτίστηκαν με στόχο την εκτίμηση των εισροών ή των υπόγειων διαφυγών τους.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται η ανάλυση και η επεξεργασία των μηνιαίων βροχομετρικών δεδομένων, η επεξεργασία των υδρομετρικών δεδομένων με στόχο την εξαγωγή δειγμάτων απορροής στις τρεις κύριες λεκάνες (Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού), η εκτίμηση των μηνιαίων εξατμίσεων από την επιφάνεια των ταμιευτήρων, και η κατάρτιση των μηνιαίων ισοζυγίων των ταμιευτήρων Ευήνου, Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα. Όλες οι πρωτογενείς και παράγωγες υδρολογικές χρονοσειρές έχουν καταχωρηθεί στην κεντρική βάση δεδομένων.

ABSTRACT

The hydrometeorological data analysis for the estimation of the areal rainfall, the evaporation and the runoff at specific discharge measurement stations is described. Also, the reservoir water balances are presented, which were established for the estimation of the inflows or leakage losses of the system's reservoirs (Evinos, Mornos, Yliki, Marathonas).

Specifically, we present the processing of the monthly rainfall data, the estimation of monthly evaporation from the reservoirs, the calculation of the discharge at the three main watersheds (Evinos, Mornos, Boeticos Kefissos) and the setting up of the monthly water balance components. All raw and processed hydrologic time series are stored in the central database.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ιστορικό	1
1.2	Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους	1
2	Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες	3
2.1	Σκοπός	3
2.2	Βροχομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	3
2.3	Έλεγχοι ομογένειας δεδομένων	4
2.3.1	Μέθοδος διπλής αθροιστικής καμπύλης	4
2.3.2	Έλεγχος ομογένειας βροχομετρικών δεδομένων	4
2.4	Συμπλήρωση ελλείψεων και επέκταση δειγμάτων	6
2.4.1	Μεθοδολογία γραμμικής παλινδρόμησης	6
2.4.2	Συμπλήρωση σημειακών δειγμάτων βροχόπτωσης	7
2.5	Υψομετρική αναγωγή βροχοπτώσεων	11
2.5.1	Μεθοδολογία	11
2.5.2	Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου λεκάνης Ευήνου	12
2.5.3	Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού	13
2.6	Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης ταμιευτήρων	15
2.6.1	Ταμιευτήρας Ευήνου	15
2.6.2	Ταμιευτήρας Μόρνου	16
2.6.3	Λίμνη Υλίκη	16
2.6.4	Ταμιευτήρας Μαραθώνα	17
3	Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες	18
3.1	Σκοπός	18
3.2	Μεθοδολογία	18
3.2.1	Γενικά	18
3.2.2	Μέτρηση παροχής	18
3.2.3	Μέτρηση στάθμης	19
3.2.4	Σχέσεις στάθμης-παροχής	20
3.2.5	Εκτίμηση χρονοσειρών παροχής από χρονοσειρές στάθμης	22
3.3	Απορροή λεκάνης Ευήνου	22
3.3.1	Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	22
3.3.2	Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής στον Πόρο Ρηγαίου	23
3.3.3	Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Ευήνου	25
3.4	Απορροή λεκάνης Μόρνου	27
3.4.1	Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	27
3.4.2	Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Μόρνου	28

3.5	Απορροή λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.....	29
3.5.1	Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	29
3.5.2	Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης	30
3.6	Απορροή λεκάνης Υλίκης	32
3.7	Απορροή λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας.....	32
3.7.1	Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα	32
3.7.2	Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Μαραθώνα.....	32
3.8	Εκτίμηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού υδροσυστήματος	33
4	Εκτίμηση απωλειών ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης	35
4.1	Σκοπός	35
4.2	Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης	35
4.2.1	Γενικά.....	35
4.2.2	Φυσικό πλαίσιο	35
4.2.3	Εκτίμηση εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια με την μέθοδο Penman	38
4.2.4	Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων εξάτμισης	39
4.3	Χρονοσειρές εξάτμισης ταμιευτήρων	40
4.3.1	Γενικό πλαίσιο εργασιών	40
4.3.2	Μετεωρολογικοί σταθμοί και δεδομένα.....	40
4.3.3	Επεξεργασία πρωτογενών μετεωρολογικών δεδομένων.....	42
4.3.4	Εφαρμογή μεθόδου Penman	43
4.3.5	Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων	43
4.3.6	Εκτιμήσεις με βάση τα στοιχεία των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών	45
4.3.7	Δεδομένα εξατμισίμετρου μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα.....	47
5	Υδατικά ισοζύγια ταμιευτήρων	49
5.1	Σκοπός	49
5.2	Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων	50
5.2.1	Γενικά χαρακτηριστικά	50
5.2.2	Μεθοδολογία κατασκευής καμπυλών ταμιευτήρων	51
5.3	Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων	52
5.3.1	Ταμιευτήρας Ευήνου.....	52
5.3.2	Ταμιευτήρας Μόρνου.....	53
5.3.3	Λίμνη Υλίκη.....	55
5.3.4	Ταμιευτήρας Μαραθώνα.....	58
5.4	Πλαίσιο επικαιροποίησης υδατικών ισοζυγίων ταμιευτήρων	61
	Αναφορές	66

1 Εισαγωγή

1.1 Ιστορικό

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

Το τεύχος αυτό καλύπτει το τμήμα των δυναμικών πληροφοριών (δηλαδή αυτών που μεταβάλλονται στο χρόνο), στις οποίες περιλαμβάνονται όλα τα πρωτογενή και παράγωγα υδρομετεωρολογικά δεδομένα του συστήματος. Παρόλο που οι εργασίες που περιγράφονται στο τεύχος δεν εντάσσονται άμεσα σε κανένα από τα υποσυστήματα του έργου, σχετίζονται τουλάχιστον έμμεσα με τρία από αυτά, και συγκεκριμένα:

- το υποσύστημα 1, με τίτλο «*Ανάπτυξη συστήματος γεωγραφικής πληροφορίας για την απεικόνιση και εποπτεία του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ*», που έχει ως στόχο, μεταξύ άλλων, την υλοποίηση μιας κεντρικής βάσης δεδομένων και ενός συστήματος διαχείρισης και επεξεργασίας των υδρολογικών χρονοσειρών (λογισμικό *Υδρογνώμων*).
- το υποσύστημα 2, με τίτλο «*Υποστήριξη της ανάπτυξης συστήματος μέτρησης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*», που έχει ως στόχο την υλοποίηση ενός τηλεμετρικού δικτύου αυτόματης μέτρησης των υδρομετεωρολογικών μεταβλητών και την επιχειρησιακή αξιοποίηση των μετρήσεων στην διαχείριση των υδατικών πόρων του υδροσυστήματος.
- το υποσύστημα 3, με τίτλο «*Ανάπτυξη συστήματος εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*», που έχει ως στόχο την υλοποίηση ενός συστήματος στοχαστικής προσομοίωσης των εισροών και απωλειών των ταμιευτήρων Εύηνου, Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα (λογισμικό *Κασταλία*), καθώς και μοντέλων εκτίμησης και πρόγνωσης των υδατικών πόρων των περιοχών Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης.

1.2 Αντικείμενο και διάρθρωση του τεύχους

Στο τεύχος αυτό περιγράφονται οι εργασίες συλλογής, ανάλυσης και επεξεργασίας των πρωτογενών υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων της ευρύτερης περιοχής μελέτης, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου συνολικά, χωρίς να γίνεται διάκριση ανάμεσα στην πρώτη και δεύτερη φάση. Βεβαίως, οι εργασίες αποκλειστικά της πρώτης φάσης περιγράφονται στο τεύχος 8 των παραδοτέων του έργου (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Σκοπός των εργασιών είναι η κατάρτιση αξιόπιστων ιστορικών δειγμάτων επιφανειακής υδρολογίας, τα οποία αναφέρονται στους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας (Εύηνος, Μόρνος, Υλίκη, Μαραθώνας) καθώς και τις λεκάνες απορροής τους. Όλα τα πρωτογενή και επεξεργασμένα δείγματα έχουν καταχωρηθεί στην κεντρική βάση δεδομένων του συστήματος (*Παπακόστας*, 2004).

Το τεύχος περιλαμβάνει εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), τέσσερα κεφάλαια. Στα Κεφάλαια 2, 3 και 4 παρουσιάζονται η επεξεργασία των βροχομετρικών, υδρομετρικών και μετεωρολογικών δεδομένων, αντίστοιχα, καθώς και το αναγκαίο θεωρητικό υπόβαθρο, με τελικό

προϊόν την κατάρτιση ιστορικών δειγμάτων βροχόπτωσης, απορροής και εξάτμισης στις θέσεις των ταμιευτήρων του υδροσυστήματος. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύεται η μεθοδολογία υπολογισμού των μηνιαίων υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων Εύηνου, Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα, και ο τρόπος επικαιροποίησης αυτών, βάσει των στοιχείων που λαμβάνονται από το μετρητικό δίκτυο που κατασκευάστηκε στα πλαίσια του έργου.

2 Βροχομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

2.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι εργασίες υποδομής, ήτοι η συλλογή, ανάλυση και επεξεργασία των βροχομετρικών δεδομένων, καθώς και οι σχετικές μεθοδολογίες, με σκοπό την εκτίμηση της μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης στους ταμειωτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, που είναι μία από τις συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου τους (βλ. Κεφάλαιο 5), και την εκτίμηση της μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Ειδικότερα, για την διαδικασία υπολογισμού της τελευταίας ο αναγνώστης παραπέμπεται στο οικείο τεύχος (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004). Οι εργασίες που περιγράφονται στο παρόν τεύχος αναφέρονται τόσο στην πρώτη όσο και στην δεύτερη φάση του έργου, χωρίς να γίνεται διαχωρισμός τους.

2.2 Βροχομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Για τις ανάγκες του έργου συλλέχθηκαν και καταχωρήθηκαν στην βάση δεδομένων τα μηνιαία και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ημερήσια βροχομετρικά στοιχεία 26 σταθμών της Στερεάς Ελλάδας, οι περισσότεροι εκ των οποίων ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης. Τα χαρακτηριστικά των σταθμών συνοψίζονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2. Επισημαίνεται ότι τα στοιχεία μέχρι το υδρολογικό έτος 1993-94 ελήφθησαν από προηγούμενα ερευνητικά έργα του ΕΜΠ (*Χριστοφίδης και Μαμάσης*, 1995).

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά βροχομετρικών σταθμών περιοχής Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης.

Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Διαθέσιμο δείγμα	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Αγία Τριάδα	ΥΠΕΧΩΔΕ	400	1/1963 – 12/2000	998.8
Αλίαρτος	ΕΜΥ	110	1/1907 – 12/2000	576.2
Άνω Μπράλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	600	12/1969 – 12/2000	971.4
Αταλάντη	ΥΠΕΧΩΔΕ	110	1/1967 – 12/2000	558.7
Γραβιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	450	1/1955 – 12/2000	916.6
Δαύλεια	ΥΠΕΧΩΔΕ	380	10/1962 – 12/2000	839.6
Δρυμαία	ΥΠΕΧΩΔΕ	580	11/1962 – 12/2000	724.1
Επτάλοφος	ΥΠΕΧΩΔΕ	830	12/1969 – 12/2000	1105.4
Κάτω Τιθορέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	170	11/1962 – 12/2000	670.8
Καλλιθέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	333	12/1954 – 12/2000	595.9
Λειβαδιά	ΥΠΕΧΩΔΕ	200	12/1954 – 12/2000	760.8
Μουρίκι	ΥΠΕΧΩΔΕ	85	3/1958 – 9/2002	447.4
Παύλος	ΥΠΕΧΩΔΕ	200	11/1962 – 12/2000	497.3
Πυρά	ΥΠΕΧΩΔΕ	1140	8/1963 – 10/2000	1325.6
Συκέα	ΥΠΕΧΩΔΕ	780	1/1967 – 12/2000	1237.5
Τανάγρα	ΕΜΥ	139	10/1956 – 7/2001	453.5
Υλίκη	ΕΥΔΑΠ		7/2002 – 9/2003	

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικά λοιπών βροχομετρικών σταθμών περιοχής μελέτης. Σε παρένθεση αναγράφεται η λεκάνη απορροής στην οποία ανήκει κάθε σταθμός.

Όνομασία	Υπηρεσία	Υψόμετρο (m)	Διαθέσιμο δείγμα	Μέση ετήσια τιμή (mm)
Άμφισσα (Πλειστού & Σκίτσας)	ΥΠΕΧΩΔΕ	180	12/1954 – 12/2000	771.5
Δεσφίνα (Υπόλ. Ανατ. Στερεάς)	ΕΜΥ	590	1/1971 – 9/1997	415.1
Δρυμόνας (Ευήνου)	ΔΕΗ	900	10/1970 – 6/2000	1301.1
Ζηλευτό (Σπερχειού)	ΥΠΕΧΩΔΕ	120	12/1954 – 12/2000	518.7
Θίσβη (Περμισσού)	ΥΠΕΧΩΔΕ	174	12/1954 – 12/2000	455.5
Καρούτες (Μόρνου)	ΥΠΕΧΩΔΕ	1040	1/1966 – 12/2000	1265.8
Λιδορίκι (Μόρνου)	ΥΠΕΧΩΔΕ	537	6/1950 – 1/2002	940.2
Φράγμα Ευήνου (Ευήνου)	ΥΠΕΧΩΔΕ		4/2001 – 1/2003	
Φράγμα Μαραθώνα (Χάραδρου)	ΕΥΔΑΠ		2/1933 – 9/2003	
Φράγμα Μόρνου (Μόρνου)	ΕΥΔΑΠ		2/2002 – 9/2003	

2.3 Έλεγχοι ομογένειας δεδομένων

2.3.1 Μέθοδος διπλής αθροιστικής καμπύλης

Οι έλεγχοι ομογένειας των υδρολογικών χρονοσειρών (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1997, σ. 107-119) είναι εμπειρικές τεχνικές εντοπισμού τεχνητών αλλαγών στις συνθήκες μέτρησης (π.χ. λόγω αντικατάστασης ή μεταφοράς του οργάνου), οι οποίες επηρεάζουν συστηματικά το αποτέλεσμα της μέτρησης. Οι εν λόγω έλεγχοι αποσκοπούν στην *συνόρθωση* των δεδομένων, ήτοι στην τροποποίηση των μετρήσεων με τρόπο ώστε να αρθούν οι συνέπειες των συστηματικών σφαλμάτων. Επιπλέον, αποτελούν μια αξιόπιστη μέθοδο αξιολόγησης της ποιότητας των δεδομένων.

Η πλέον διαδεδομένη τεχνική για έλεγχο ομογένειας βροχομετρικών δεδομένων βασίζεται στην *διπλή αθροιστική καμπύλη* (double mass curve), που είναι μια εύχρηστη ημιεμπειρική μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται για τα ετήσια ύψη βροχής. Συγκεκριμένα, πρόκειται για την γραφική απεικόνιση της σημειοσειράς που προκύπτει από τα αθροιστικά ετήσια ύψη βροχής δύο σταθμών, αφού τα τελευταία μετατραπούν σε αθροιστικές σειρές. Στον οριζόντιο άξονα παρίσταται το αθροιστικό ύψος βροχής του βροχομετρικού σταθμού βάσης, ο οποίος θεωρείται αξιόπιστος, ενώ στον κατακόρυφο άξονα παρίστανται τα αντίστοιχα αθροιστικά ύψη του υπό έλεγχο σταθμού. Στην περίπτωση που οι μετρήσεις του τελευταίου σταθμού είναι συνεπείς, η σημειοσειρά σχηματίζει μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, διαφορετικά παρουσιάζονται θλάσεις ή άλματα. Η διαδικασία συνόρθωσης μιας χρονοσειράς συνίσταται σε μια απλή διαδικασία αναγωγής.

Η συνόρθωση πρέπει να εφαρμόζεται με προσοχή. Εφόσον η αλλαγή στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της καμπύλης είναι εμφανώς εντοπισμένη και, πολύ περισσότερο, μπορεί να ερμηνευτεί με βάση το ιστορικό λειτουργίας του σταθμού, η εφαρμογή της μεθόδου θεωρείται αξιόπιστη. Διαφορετικά, αν η γεωμετρία της διπλής αθροιστικής καμπύλης παρουσιάζει τυχαία και μη συστηματική μορφή, τότε τα σφάλματα μέτρησης είναι μη συστηματικά, και δεν έχει νόημα η διαδικασία συνόρθωσης.

2.3.2 Έλεγχος ομογένειας βροχομετρικών δεδομένων

Για τους περισσότερους βροχομετρικούς σταθμούς της περιοχής μελέτης έγινε έλεγχος ομογένειας με την μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης, με βάση τουλάχιστον δύο γειτονικούς τους. Επιπλέον, υπολογίστηκε ο συντελεστής προσδιορισμού r^2 της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Συσχετίσεις σταθμών με τη μέθοδο της διπλής αθροιστικής καμπύλης.

Υπό έλεγχο σταθμός	Σταθμός βάσης	Συντελεστής r^2	Συσχέτιση
Άνω Μπράλος	Πυρά	0.9490	Κακή
Καλλιθέα	Μουρίκι	0.9611	Κακή
Άνω Μπράλος	Δρυμαία	0.9643	Κακή
Άνω Μπράλος	Γραβιά	0.9649	Κακή
Άνω Μπράλος	Κάτω Τιθορέα	0.9679	Κακή
Καλλιθέα	Τανάγρα	0.9856	Κακή
Κάτω Τιθορέα	Επτάλοφος	0.9856	Κακή
Γραβιά	Επτάλοφος	0.9877	Κακή
Ζηλευτό	Συκέα	0.9907	Κακή
Δρυμαία	Κάτω Τιθορέα	0.9920	Μέτρια
Αταλάντη	Κάτω Τιθορέα	0.9921	Μέτρια
Θίσβη	Αγία Τριάδα	0.9936	Μέτρια
Μουρίκι	Τανάγρα	0.9938	Μέτρια
Αταλάντη	Παύλος	0.9940	Μέτρια
Δαύλεια	Αγία Τριάδα	0.9942	Μέτρια
Συκέα	Καρούτες	0.9956	Μέτρια
Ζηλευτό	Πυρά	0.9957	Μέτρια
Συκέα	Πυρά	0.9960	Καλή
Μουρίκι	Παύλος	0.9971	Καλή
Αγία Τριάδα	Αλιάρτος	0.9972	Καλή
Δαύλεια	Λειβαδιά	0.9972	Καλή
Καρούτες	Άμφισσα	0.9979	Καλή
Πυρά	Καρούτες	0.9979	Καλή
Λειβαδιά	Αλιάρτος	0.9987	Καλή
Λειβαδιά	Αγία Τριάδα	0.9987	Καλή
Λιδορίκι	Άμφισσα	0.9989	Καλή
Άμφισσα	Επτάλοφος	0.9992	Καλή
Λιδορίκι	Καρούτες	0.9994	Καλή
Κάτω Τιθορέα	Γραβιά	0.9994	Καλή
Δρυμαία	Γραβιά	0.9998	Καλή

Γενικά, ο έλεγχος ομογένειας κατέδειξε ότι τα βροχομετρικά δεδομένα των περισσότερων σταθμών είναι αξιόπιστα. Οι κυριότερες παρατηρήσεις αφορούν στα ακόλουθα:

- Τα δεδομένα του σταθμού Άνω Μπράλου εμφανίζουν πολύ κακή συσχέτιση με τα αντίστοιχα των γειτονικών σταθμών Δρυμαίας, Πυράς και Κάτω Τιθορέας.
- Ο σταθμός Καλλιθέας παρουσιάζει κακή συσχέτιση τόσο με το Μουρίκι όσο και με την Τανάγρα.
- Ο σταθμός Μουρικίου εμφανίζει κακή συσχέτιση με την Τανάγρα (διπλή θλάση) και καλή με τον Παύλο, ενώ είναι γνωστό ότι το βροχόμετρό του έχει τοποθετηθεί σε ακατάλληλη θέση (κάτω από υψηλά δέντρα). Θεωρητικά, ο σταθμός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της βροχόπτωσης στη λίμνη Υλίκη, αφού είναι ο πλέον κοντινός σε αυτήν. Εφόσον όμως κρίθηκε αναξιόπιστος, προτιμήθηκε ο σταθμός της Αλιάρτου, ο οποίος βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το σταθμό Μουρικίου και τα υψόμετά τους δεν διαφέρουν σημαντικά (110 έναντι 85 m).
- Η διπλή αθροιστική καμπύλη του σταθμού Ζηλευτού με αυτή των γειτονικών σταθμών Πυράς και Συκέας εμφανίζει μικρές θλάσεις. Δεδομένου ότι ανήκει ουσιαστικά σε άλλη υδρολογική λεκάνη, και συγκεκριμένα σε αυτή του Σπερχειού, δεν χρειάστηκε να ληφθεί για περαιτέρω ανάλυση.

- Η διπλή αθροιστική καμπύλη του σταθμού Επταλόφου με αυτή του σταθμού Λειβαδιάς εμφανίζει ικανοποιητική εικόνα, αλλά η διπλή αθροιστική καμπύλη του με τους σταθμούς Κάτω Τιθορέας και Γραβιάς παρουσίασε μικρές θλάσεις και μάλιστα παρόμοιας μορφής.
- Η διπλή αθροιστική καμπύλη του σταθμού Συκέας με τους γειτονικούς του εμφανίζει ελαφρές θλάσεις, που δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές ώστε ο σταθμός να θεωρηθεί αναξιόπιστος.

2.4 Συμπλήρωση ελλείψεων και επέκταση δειγμάτων

2.4.1 Μεθοδολογία γραμμικής παλινδρόμησης

Το πρόβλημα της σποραδικής έλλειψης μετρήσεων σε βροχομετρικά δείγματα είναι πολύ συχνό και οφείλεται, πρωτίστως, σε βλάβες οργάνων και αμέλειες ή κωλύματα παρατηρητών. Αντίστοιχη είναι η περίπτωση ανεπαρκούς περιόδου λειτουργίας ενός σταθμού, με αποτέλεσμα το χρονικό εύρος των παρατηρήσεων να μην καλύπτει πλήρως τον αντίστοιχο χρονικό ορίζοντα ενδιαφέροντος.

Η συμπλήρωση των ελλείψεων καθώς και η επέκταση των δειγμάτων γίνεται με βάση τα δεδομένα ενός ή περισσότερων γειτονικών βροχομετρικών σταθμών. Κατά κανόνα, και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζεται κοινή μεθοδολογία, που χρησιμοποιεί στατιστικές μεθόδους, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων και προσαρμόζουν κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα, με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται κάποιο σφάλμα εκτίμησης.

Η απλούστερη στατιστική τεχνική είναι η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Έστωσαν δυο μηνιαίες χρονοσειρές x_i και y_i , τα στοιχεία των οποίων προέρχονται από κοντινούς σταθμούς, και έστω n το πλήθος των ταυτόχρονων μετρήσεων. Η εκτίμηση της τιμής της προς συμπλήρωση μεταβλητής y_i συναρτήσει της γνωστής τιμής x_i γίνεται μέσω ενός γραμμικού μοντέλου της μορφής:

$$y_i = a + b x_i \quad (2.1)$$

όπου a και b παράμετροι, τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα της εκτίμησης. Η παράμετρος b , ήτοι η κλίση της ευθείας παλινδρόμησης, δίνεται από την σχέση:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

όπου \bar{x} , \bar{y} οι δειγματικές μέσες τιμές των χρονοσειρών. Από την άλλη πλευρά, η παράμετρος a , ήτοι η τομή της ευθείας παλινδρόμησης, δίνεται από την σχέση:

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (2.3)$$

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου θα πρέπει να δίνεται προσοχή, ώστε να μηδενίζονται οι αρνητικές τιμές που μπορεί να εμφανιστούν στην περίπτωση που προκύπτουν αρνητικοί συντελεστές.

Βαθμός καταλληλότητας ενός μοντέλου παλινδρόμησης είναι ο λεγόμενος *συντελεστής προσδιορισμού* (coefficient of determination), που συμβολίζεται με r^2 και ορίζεται ως:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.4)$$

Στην περίπτωση της παλινδρόμησης, η τετραγωνική ρίζα του συντελεστή προσδιορισμού, ήτοι η ποσότητα r , είναι γνωστή στην στατιστική ως *συντελεστής γραμμικής συσχέτισης*, και λαμβάνει τιμές από -1 έως 1 . Όσο πιο κοντά στα όρια του διαστήματος αυτού βρίσκεται η τιμή του εν λόγω δείκτη, τόσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση, ενώ μηδενική τιμή του r συνεπάγεται ανυπαρξία γραμμικής συσχέτισης. Ειδικά για την ανάλυση βροχομετρικών δεδομένων, θεωρείται επιθυμητή η ύπαρξη ισχυρής θετικής συσχέτισης, ήτοι η συσχέτιση δειγμάτων με τιμή του συντελεστή r όσο το δυνατό πιο κοντά στην μονάδα. Η εμφάνιση τυχόν αρνητικής συσχέτισης, έστω και ισχυρής, αποτελεί ισχυρή ένδειξη αναξιοπιστίας των δεδομένων, καθώς κάτι τέτοιο δεν ερμηνεύεται φυσικά.

Εκτός από τα απλά μοντέλα παλινδρόμησης, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πιο πολύπλοκων στατιστικών μοντέλων, γραμμικών και μη, και με περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι περιπτώσεις αυτές, με έμφαση στην εφαρμογή τους σε υδρολογικά δεδομένα, εξετάζονται από τον Κουτσογιάννη (1999, κεφ. 7).

2.4.2 Συμπλήρωση σημειακών δειγμάτων βροχόπτωσης

Τα πρωτογενή δείγματα ορισμένων βροχομετρικών σταθμών της περιοχής μελέτης παρουσιάζουν μικρό ποσοστό ελλείψεων, οι οποίες συμπληρώθηκαν μέσω γραμμικής συσχέτισης με τα δείγματα γειτονικών σταθμών, ώστε να μην υπάρχουν υδρολογικά έτη με κενά. Σημειώνεται ότι, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συμπληρώσεις αναφέρονται μόνο στα δεδομένα που επικαιροποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου, ήτοι μετά το υδρολογικό έτος 1993-94. Δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε μηνιαίες μεταβλητές, προσαρμόστηκαν διαφορετικά μοντέλα παλινδρόμησης, ήτοι διαφορετικές τιμές παραμέτρων a και b , για κάθε μήνα. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι επεξεργασίες που αφορούν τα εν λόγω δείγματα βροχόπτωσης.

Δρυμόνας

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Δρυμόνα χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Ευήνου, για την περίοδο προ της κατασκευής του φράγματος (βλ. 2.6.1). Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (9 συνολικά, όλες συγκεντρωμένες τα έτη 1994 και 1995) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης το Λιδορίκι και σε μία περίπτωση (Νοέμβριος 1995, που δεν υπάρχει μέτρηση στο Λιδορίκι) τους Καρούτες, που και οι δύο ανήκουν στην γειτονική λεκάνη του Μόρνου. Και τα δύο δείγματα παρουσιάζουν μέτρια γραμμική συσχέτιση. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Δρυμόνα, Λιδορικού, και Καρουτών.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Δρυμόνας (y), Λιδορίκι (x)												
b	0.786	1.129	1.066	1.040	1.045	0.955	1.194	0.912	0.487	0.525	0.679	0.749
a	38.1	34.3	58.9	26.2	44.0	37.2	30.7	28.1	25.4	12.3	16.6	27.1
r^2	0.356	0.572	0.688	0.760	0.446	0.408	0.452	0.456	0.228	0.297	0.510	0.403
Δρυμόνας (y), Καρούτες (x)												
b	0.747	0.764	0.750	0.792	0.687	0.682	0.756	0.485	0.533	0.459	0.435	0.780
a	26.5	74.5	69.5	13.7	50.8	29.6	34.7	36.6	19.0	16.8	19.4	22.7
r^2	0.494	0.438	0.528	0.703	0.386	0.581	0.371	0.282	0.346	0.110	0.262	0.497

Λιδορίκι

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Λιδορικού χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου, πριν την εγκατάσταση του τηλεμετρικού σταθμού (βλ. 2.6.2). Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (13 συνολικά κατά τα υδρολογικά έτη 1950-51 έως 1999-00) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης τους Καρούτες, που ανήκουν στην ίδια υδρολογική λεκάνη και παρουσιάζουν ισχυρή γραμμική συσχέτιση όλους σχεδόν τους μήνες του έτους. Ελέγχθηκε ακόμη η γραμμική συσχέτιση των δεδομένων με το δείγμα βροχόπτωσης του σταθμού Άμφισσας, που είναι χειρότερη σε σχέση με το Λιδορίκι, αφού ανήκει σε άλλη λεκάνη απορροής. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.5.

Πίνακας 2.5: Παράμετροι της ευθείας παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Λιδορικού, Καρουτών και Άμφισσας.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Λιδορίκι (y), Άμφισσα (x)												
<i>b</i>	0.812	0.998	0.882	1.133	0.803	0.774	0.827	0.636	0.929	0.638	1.041	1.093
<i>a</i>	23.2	30.8	47.9	10.3	39.2	25.4	26.7	28.6	15.5	9.1	9.0	11.4
<i>r</i> ²	0.692	0.690	0.626	0.735	0.488	0.586	0.478	0.306	0.486	0.447	0.408	0.571
Λιδορίκι (y), Καρούτες (x)												
<i>b</i>	0.765	0.749	0.728	0.803	0.565	0.419	0.600	0.474	0.654	0.520	0.506	0.778
<i>a</i>	2.8	18.0	8.3	-11.8	15.7	28.7	7.6	13.4	1.2	5.3	5.9	3.1
<i>r</i> ²	0.922	0.747	0.809	0.824	0.717	0.482	0.711	0.492	0.555	0.473	0.399	0.712

Αλιάρτος

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Αλιάρτου χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχόπτωσης στην επιφάνεια της λίμνης Υλίκης, καθώς και της επιφανειακής βροχόπτωσης στις λεκάνες απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και της Υλίκης. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (14 συνολικά από το 1997 μέχρι την παύση λειτουργίας του σταθμού) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Τανάγρα, που, αν και ανήκει σε διαφορετική λεκάνη, βρίσκεται σε σχετικά κοντινή απόσταση. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6.

Πίνακας 2.6: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Αλιάρτου (y) και Τανάγρας (x).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
<i>b</i>	1.073	0.956	0.968	0.931	1.059	0.834	1.134	0.949	0.730	0.445	0.710	0.624
<i>a</i>	15.8	16.6	20.2	16.9	18.4	22.1	7.3	5.6	5.9	2.2	6.6	9.6
<i>r</i> ²	0.825	0.668	0.658	0.822	0.500	0.595	0.839	0.574	0.341	0.371	0.344	0.399

Μαραθώνας

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού του φράγματος Μαραθώνα, που λειτουργεί από το 1933, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (17 συνολικά, από το 1983 και έπειτα) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Τανάγρα, που, αν και ανήκει σε διαφορετική λεκάνη, βρίσκεται σε σχετικά κοντινή απόσταση. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.7.

Πίνακας 2.7: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Μαραθώνα (y) και Τανάγρας (x).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
<i>b</i>	1.009	1.070	0.958	0.901	0.889	1.357	1.141	0.554	0.412	0.784	0.477	1.218
<i>a</i>	13.4	8.4	29.2	26.0	21.0	-7.1	5.1	12.3	7.4	0.0	0.9	-5.8
<i>r</i> ²	0.624	0.670	0.551	0.587	0.544	0.724	0.704	0.193	0.177	0.651	0.397	0.733

Δρυμαία

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Δρυμαίας χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (9 συνολικά κατά την περίοδο 1962-63 έως 2000-01) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Γραβιά, που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση. Ελέγχθηκε ακόμη η γραμμική συσχέτιση των δεδομένων με το δείγμα βροχόπτωσης του επίσης γειτονικού βροχομετρικού σταθμού Κάτω Τιθορέας, που είναι ελαφρά χειρότερη σε σχέση με την Γραβιά. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Δρυμαίας, Γραβιάς και Κάτω Τιθορέας.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Δρυμαία (y), Γραβιά (x)												
<i>b</i>	0.824	0.601	0.681	0.973	0.822	0.736	0.868	0.854	0.717	0.725	0.888	0.864
<i>a</i>	11.2	15.3	-1.3	-18.5	-6.2	15.4	-2.9	3.1	8.1	3.7	-0.2	-0.5
<i>r</i> ²	0.708	0.399	0.554	0.677	0.678	0.466	0.783	0.633	0.583	0.379	0.845	0.582
Δρυμαία (y), Κάτω Τιθορέα (x)												
<i>b</i>	0.763	0.846	0.937	1.183	0.861	0.737	0.919	0.910	0.525	0.629	0.823	0.813
<i>a</i>	27.5	21.7	1.3	-0.2	17.8	29.5	3.3	6.4	12.0	7.4	4.2	3.4
<i>r</i> ²	0.663	0.660	0.618	0.588	0.617	0.357	0.737	0.597	0.469	0.293	0.379	0.618

Πυρά

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Πυράς χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, παρόλο που ο εν λόγω σταθμός ανήκει σε άλλη υδρολογική λεκάνη, και συγκεκριμένα του Μόρνου. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (12 συνολικά μεταξύ των ετών 1997-1999) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Συκιά, που ανήκει στην ίδια λεκάνη και βρίσκεται σε κοντινή απόσταση. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.9.

Πίνακας 2.9: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Πυράς (y) και Συκίας (x).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
<i>b</i>	1.059	0.564	0.517	0.824	0.614	0.696	0.625	0.617	1.053	0.567	0.752	0.722
<i>a</i>	12.8	51.0	107.7	68.2	94.1	72.5	31.6	23.7	3.9	10.9	8.0	6.0
<i>r</i> ²	0.797	0.536	0.395	0.778	0.439	0.641	0.518	0.554	0.790	0.442	0.592	0.718

Συκία

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Συκίας χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (3

συνολικά κατά τους πρώτους μήνες του υδρολογικού έτους 1966-67) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Πυρά. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.10.

Πίνακας 2.10: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Συκέας (y) και Πυράς (x).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
b	0.752	0.949	0.764	0.944	0.715	0.920	0.828	0.899	0.750	0.779	0.787	0.995
a	10.2	40.0	43.9	-24.2	30.7	-18.0	14.7	5.0	3.5	8.1	4.0	3.9
r^2	0.797	0.536	0.395	0.778	0.439	0.641	0.518	0.554	0.790	0.442	0.592	0.718

Αταλάντη

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Αταλάντης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, παρόλο που ο εν λόγω σταθμός ανήκει σε άλλη υδρολογική λεκάνη. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (3 συνολικά κατά τους πρώτους μήνες του υδρολογικού έτους 1966-67) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Κάτω Τιθορέα. Ελέγχθηκε ακόμη η γραμμική συσχέτιση των δεδομένων με το δείγμα βροχόπτωσης του επίσης γειτονικού βροχομετρικού σταθμού Παύλο, που είναι χειρότερη σε σχέση με την Κάτω Τιθορέα για τους μήνες που ενδιαφέρουν. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.11.

Πίνακας 2.11: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Αταλάντης, Παύλου και Κάτω Τιθορέας.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Αταλάντη (y), Παύλος (x)												
b	0.900	0.807	0.694	0.890	0.818	0.810	0.963	0.894	0.882	0.333	0.444	0.611
a	19.6	14.5	26.3	10.7	22.5	17.4	6.1	6.3	4.5	8.1	9.6	6.8
r^2	0.588	0.590	0.646	0.712	0.560	0.612	0.653	0.759	0.472	0.095	0.303	0.445
Αταλάντη (y), Κάτω Τιθορέα (x)												
b	0.772	0.605	0.506	0.881	0.482	0.765	0.746	0.678	0.667	0.381	0.346	0.425
a	12.4	18.2	27.6	0.2	33.9	9.3	3.8	1.6	2.4	3.9	7.9	5.7
r^2	0.815	0.754	0.542	0.732	0.327	0.563	0.658	0.639	0.659	0.299	0.229	0.391

Τανάγρα

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Τανάγρας χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη της Υλίκης. Τα στοιχεία που ελήφθησαν από την ΕΜΥ εμφάνιζαν ορισμένες ελλείψεις κατά τη θερινή περίοδο. Μετά από σύγκριση που έγινε με τα αντίστοιχα δεδομένα γειτονικών σταθμών (Αλίαρτος, Καλλιθέα), οι κενές μετρήσεις θεωρήθηκαν μηδέν.

Επτάλοφος

Τα μηνιαία δεδομένα του σταθμού Επτάλοφου (Άνω Αγόριανης) χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού. Οι ελλείψεις του πρωτογενούς δείγματος (12 συνολικά κατά την περίοδο 1969-70 έως 2000-01) συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας ως σταθμό βάσης την Γραβιά, που ανήκει στην ίδια υδρολογική λεκάνη. Ελέγχθηκε ακόμη η γραμμική συσχέτιση των δεδομένων με το δείγμα βροχόπτωσης του επίσης γειτονικού βροχομετρικού σταθμού Άμφισσας, που είναι εμφανώς χειρότερη σε σχέση με την Γραβιά. Τα αποτελέσματα των επεξεργασιών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.12.

Πίνακας 2.12: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας βροχόπτωσης σταθμών Επτάλοφου, Γραβιάς και Άμφισσας.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Επτάλοφος (y), Γραβιά (x)												
<i>b</i>	1.062	0.787	0.883	1.707	1.168	0.936	0.950	1.065	1.018	0.834	1.109	1.063
<i>a</i>	14.5	43.0	47.2	-27.2	25.8	35.1	15.5	10.3	3.2	6.7	-3.8	3.0
<i>r</i> ²	0.721	0.606	0.527	0.805	0.546	0.595	0.796	0.644	0.670	0.434	0.842	0.710
Επτάλοφος (y), Άμφισσα (x)												
<i>b</i>	1.183	0.682	0.720	1.519	1.064	1.113	0.819	0.786	1.077	0.567	1.016	0.997
<i>a</i>	29.5	52.6	72.7	13.3	56.5	41.4	28.7	31.4	10.4	13.2	8.4	8.4
<i>r</i> ²	0.580	0.610	0.438	0.605	0.452	0.666	0.395	0.185	0.489	0.275	0.317	0.631

2.5 Υψομετρική αναγωγή βροχοπτώσεων

2.5.1 Μεθοδολογία

Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι επιθυμητή η μεταφορά της βροχομετρικής πληροφορίας ενός ή περισσότερων σταθμών σε διαφορετικά υψόμετρα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση ανομοιόμορφης υψομετρικής κατανομής των βροχομετρικών σταθμών μιας λεκάνης, που συνήθως καλύπτουν μόνο στα πεδινά ή ημιορεινά τμήματα αυτής. Αυτό έχει ως συνέπεια την υποεκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης, αφού, ως γνωστόν, παρατηρείται αύξηση του ύψους βροχόπτωσης με την αύξηση του υψομέτρου, με τυπικές τιμές από 0.5 ως 2.0 mm/m (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 131).

Έστω z_s το μέσο υψόμετρο της λεκάνης, το οποίο υπολογίζεται με κλασικές τοπογραφικές μεθόδους, z_σ το μέσο υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών και h_s το επιφανειακό μέσο ετήσιο ύψος βροχής, το οποίο προκύπτει με επιφανειακή ολοκλήρωση των αντίστοιχων σημειακών δειγμάτων¹ (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999, σ. 129-141). Αν ισχύει $z_s \approx z_\sigma$, η υψομετρική κατανομή των σταθμών είναι αντιπροσωπευτική της λεκάνης, και, συνακόλουθα, η βροχόπτωση που υπολογίζεται μέσω επιφανειακής ολοκλήρωσης θεωρείται αντιπροσωπευτική της επιφανειακής βροχόπτωσης της λεκάνης. Αν ωστόσο τα δύο μέσα υψόμετρα διαφέρουν σημαντικά, τότε απαιτείται διόρθωση της υπολογιζόμενης βροχόπτωσης με βάση τον λεγόμενο *συντελεστή υψομετρικής αναγωγής*:

$$\lambda = 1 + \beta \frac{z_s - z_\sigma}{h_s} \quad (2.5)$$

όπου β η *βροχομετρική βαθμίδα*, ήτοι η ανά μονάδα μέτρου μεταβολή του ύψους βροχής, η οποία ταυτίζεται με την κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ των μέσων ετήσιων τιμών των σημειακών δειγμάτων και των αντίστοιχων υψομέτρων των βροχομετρικών σταθμών.

Κανονικά, η βροχομετρική βαθμίδα β , και, κατά συνέπεια, ο συντελεστής υψομετρικής αναγωγής, λ , πρέπει να υπολογίζονται για την χρονική κλίμακα ενδιαφέροντος. Στην πράξη, είθισται ο υπολογισμός

¹ Εξαιτίας της γεωγραφικής μεταβλητότητας των κατακρημνισμάτων, ένα μεμονωμένο δείγμα βροχόπτωσης δεν μπορεί να θεωρηθεί αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής δίαιτας μιας λεκάνης, εκτός και αν η τελευταία είναι πολύ μικρή σε έκταση. Για τον λόγο αυτό, η επιφανειακή βροχόπτωση, ήτοι η ποσότητα βροχής ανηγμένη στην επιφάνεια της λεκάνης, εκτιμάται χρησιμοποιώντας τα δείγματα περισσότερων σταθμών, που ανήκουν ή γειτνιάζουν με αυτή. Η μέθοδος καλείται επιφανειακή ολοκλήρωση, και γίνεται συνήθως θεωρώντας την επιφανειακή βροχόπτωση μιας περιοχής ως σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους σημειακών δειγμάτων.

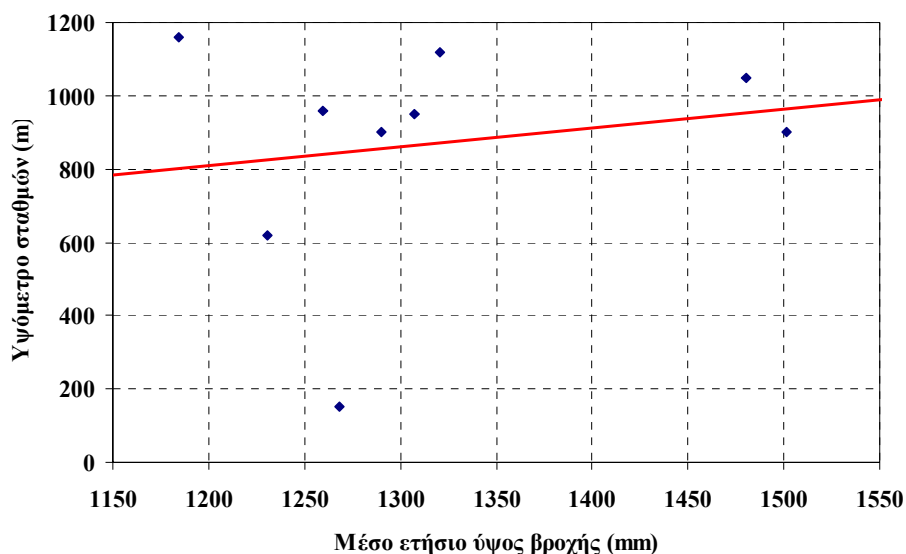
του β να γίνεται με βάση την μέση ετήσια βροχόπτωση και ο ίδιος συντελεστής λ να εφαρμόζεται για την υψομετρική αναγωγή τόσο των ετήσιων όσο και των μηνιαίων χρονοσειρών.

2.5.2 Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου λεκάνης Ευήνου

Σκοπός της σχετικής διερεύνησης είναι η εκτίμηση της τιμής της βροχομετρικής βαθμίδας στην λεκάνη απορροής του Ευήνου, που είναι αναγκαία για την αναγωγή του σημειακού δείγματος βροχόπτωσης του σταθμού Δρυμόνα στην μέση στάθμη του ταμιευτήρα (βλ. 2.6.1).

Στον Πίνακα 2.13 απεικονίζονται οι τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και τα αντίστοιχα υψόμετρα των βροχομετρικών σταθμών της λεκάνης απορροής του Ευήνου, τα οποία έχουν ληφθεί από τους *Χριστοφίδη και Μαμάση* (1995). Οι μέσες τιμές έχουν υπολογιστεί με βάση τις χρονοσειρές βροχόπτωσης έως το υδρολογικό έτος 1993-94. Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.1, όπου είναι εμφανής η τυχαιότητα μεταβολής της βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου. Πράγματι, ο συντελεστής προσδιορισμού των δύο δειγμάτων ανέρχεται σε μόλις στο 3.1%, ενώ, αν δεν ληφθούν υπόψη τα δεδομένα του σταθμού Γραμμένης Οξιάς (που ενώ βρίσκεται στο μεγαλύτερο υψόμετρο, ήτοι 1160 m, καταγράφει την μικρότερη βροχόπτωση), παρατηρείται αύξηση του r^2 στα επίπεδα του 16.6%, τιμή που εξακολουθεί να είναι πολύ χαμηλή. Η εξήγηση της κακής προσαρμογής των δεδομένων αποδίδεται σε παράγοντες όπως ο γεωγραφικός προσανατολισμός (π.χ. ύπαρξη σταθμών στην ομβροσκιά) και οι χιονοπτώσεις, που είναι πιο σημαντικοί σε σχέση με την επίδραση της ορογραφίας.

Με βάση τα στοιχεία των *Χριστοφίδη και Μαμάση* (1995), το μέσο υψόμετρο της λεκάνης Ευήνου ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Πόρου Ρηγανίου ανέρχεται στα 999.0 m, ενώ το μέσο υψόμετρο των βροχομετρικών σταθμών εκτιμάται σε 867.8 m. Η μέση ετήσια βροχόπτωση, όπως υπολογίζεται με την μέθοδο ολοκλήρωσης κατά Thiessen (*Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος*, 1999, σ. 132-133), ισούται με 1282.3 mm. Η βροχομετρική βαθμίδα, β , ήτοι η κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης του Σχήματος 2.1, είναι ίση με 0.515 mm/m. Εφαρμόζοντας την σχέση (2.5) ο συντελεστής υψομετρικής αναγωγής, λ , της λεκάνης απορροής του Ευήνου εκτιμάται σε 1.053. Βεβαίως, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής προσαρμογής του δείγματος, οι παραπάνω τιμές δεν μπορούν να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστες· είναι ωστόσο επαρκείς για τους σκοπούς της ανάλυσης.



Σχήμα 2.1: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου στην λεκάνη απορροής του Ευήνου και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης.

Πίνακας 2.13: Τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και υψομέτρου σταθμών λεκάνης Ευήνου.

Σταθμός	Μέση ετήσια βροχόπτωση (mm)	Υψόμετρο (m)
Αθανάσιος Διάκος	1480.4	1050
Ανάληψη	1230.9	620
Αράχοβα	1259.6	960
Γραμμένη Οξιά	1184.5	1160
Δρυμόνας	1290.4	900
Κρίκελλο	1320.9	1120
Πενταγιώι	1307.4	950
Πλάτανος	1501.3	900
Πόρος Ρηγανίου	1268.1	150

Σημείωση: Οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις έχουν υπολογιστεί μέχρι το υδρολογικό έτος 1993-94.

2.5.3 Διερεύνηση σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

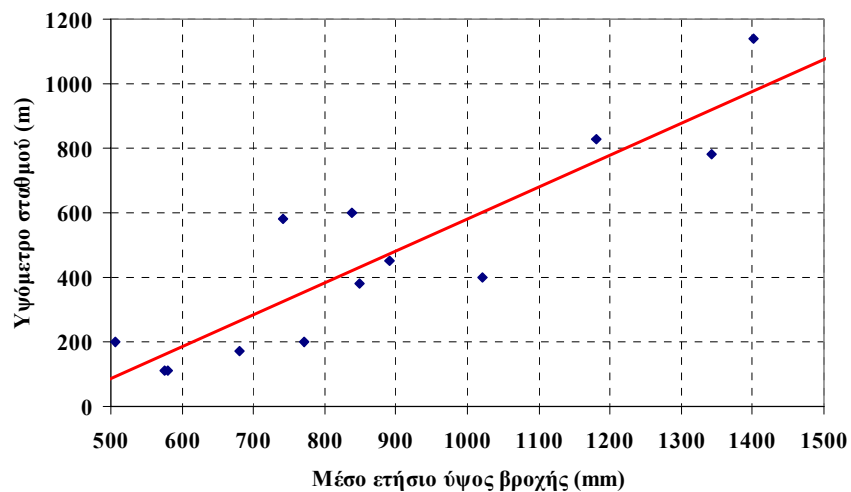
Σκοπός της σχετικής διερεύνησης είναι η εκτίμηση της τιμής της βροχομετρικής βαθμίδας και του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής, για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Για τις ανάγκες του μοντέλου προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός της σε δύο ζώνες με κοινά υδρολογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, που αντιστοιχούν στις λεγόμενες μονάδες υδρολογικής απόκρισης. Η πρώτη ζώνη περιλαμβάνει τις ορεινές περιοχές όπου κυριαρχούν τα καρστικά πετρώματα, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τις πεδινές περιοχές, στην επιφάνεια των οποίων αναπτύσσονται τεταρτογενή πετρώματα (προσχώσεις). Λεπτομέρειες δίνονται στο σχετικό τεύχος (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004).



Σχήμα 2.2: Γεωγραφική απεικόνιση βροχομετρικών σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στην λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού.

Για τη διερεύνηση της σχέσης βροχόπτωσης-υψομέτρου στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα 10 βροχομετρικών σταθμών της ευρύτερης περιοχής, τα οποία αναφέρονται στην κοινή περίοδο λειτουργίας τους, με έναρξη το υδρολογικό έτος 1966-67. Οι θέσεις των σταθμών απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2. Σε αυτούς περιλαμβάνονται και τρεις σταθμοί που βρίσκονται εκτός λεκάνης, ήτοι της Αταλάντης, της Πυράς και της Συκέας. Οι δύο τελευταίοι, οι οποίοι ανήκουν στην λεκάνη απορροής του Μόρνου, επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί ορεινοί σταθμοί, δεδομένου ότι στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού υπάρχει ανεπάρκεια μετρήσεων βροχόπτωσης σε μεγάλα υψόμετρα.

Στον Πίνακα 2.14 απεικονίζονται οι τιμές της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου των σταθμών, ενώ στο Σχήμα 2.3 απεικονίζεται το σχετικό διάγραμμα διασποράς. Είναι φανερό ότι η συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι σαφώς καλύτερη σε σχέση με την λεκάνη απορροής του Ευήνου, καθόσον ο συντελεστής προσδιορισμού ισούται με $r^2 = 0.800$. Η αντίστοιχη βροχομετρική βαθμίδα της λεκάνης ισούται με $\beta = 0.809$ mm/m. Κατά συνέπεια, στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού παρατηρείται εντονότερος ρυθμός αύξησης της βροχόπτωσης συναρτήσει του υψομέτρου σε σχέση με την λεκάνη του Ευήνου, γεγονός που εξηγείται από τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού περιλαμβάνει μεγάλες πεδινές εκτάσεις με χαμηλό υψόμετρο, στην περιφέρεια των οποίων το ανάγλυφο γίνεται απότομα πολύ τραχύ, με συνέπεια την έντονη αύξηση των κατακρημνισμάτων. Αντίθετα, η μορφολογία της λεκάνης του Ευήνου, που είναι μια τυπική ορεινή λεκάνη, είναι πιο ομοιόμορφη, με αποτέλεσμα την ομαλότερη μεταβολή των κατακρημνισμάτων συναρτήσει του υψομέτρου.



Σχήμα 2.3: Γραφική απεικόνιση σχέσης μέσης ετήσιας βροχόπτωσης-υψομέτρου στην περιοχή του Βοιωτικού Κηφισού και της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης.

Πίνακας 2.14: Τιμές μέσης ετήσιας βροχόπτωσης και υψομέτρου βροχομετρικών σταθμών ευρύτερης περιοχής Βοιωτικού Κηφισού (υδρολογικά έτη 1966-67 έως 1993-94).

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

Θεωρώντας ενιαία τιμή βροχομετρικής βαθμίδας για τις δύο ζώνες διαχωρισμού της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, υπολογίστηκαν οι συντελεστές υψομετρικής αναγωγής που χρησιμοποιήθηκαν

για την κατάρτιση των αντίστοιχων χρονοσειρών επιφανειακής βροχόπτωσης. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών υψομετρικής αναγωγής δίνονται στον Πίνακα 2.15. Η μεθοδολογία υπολογισμού των επιφανειακών βροχοπτώσεων περιγράφεται στο σχετικό με την υδρολογική ανάλυση της συγκεκριμένης λεκάνης τεύχος (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004).

Πίνακας 2.15: Στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή υψομετρικής αναγωγής στις δύο ζώνες της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

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

2.6 Εκτίμηση επιφανειακής βροχόπτωσης ταμιευτήρων

2.6.1 Ταμιευτήρας Ευήνου

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του Ευήνου προέκυψε με μεταφορά της χρονοσειράς του σταθμού Δρυμόνα, που βρίσκεται σε υψόμετρο $z_{\sigma} = 900$ m, και με αναγωγή της στην μέση στάθμη του ταμιευτήρα, $z_s = 480$ m. Η μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού, όπως εκτιμάται με βάση το πλήρες δείγμα των υδρολογικών ετών 1970-71 έως 2000-01, ισούται με $h_s = 1301.1$ mm. Εφαρμόζοντας την σχέση (2.5) ο συντελεστής υψομετρικής αναγωγής προκύπτει ίσος με $\lambda = 0.834$.

Από τον Απρίλιο του 2001 ξεκίνησε η λειτουργία του μετεωρολογικού σταθμού του φράγματος, υπό την προσωρινή εποπτεία του εργολάβου του ΥΠΕΧΩΔΕ, η οποία διακόπηκε τον Μάρτιο του 2003 λόγω βλάβης του οργάνου, η οποία δεν έχει ακόμα αποκατασταθεί. Μέχρι τώρα, η λειτουργία του εν λόγω σταθμού χαρακτηρίζεται προβληματική, καθώς καταγράφει τιμές βροχόπτωσης που φαίνονται ύποπτα χαμηλές. Για παράδειγμα, το υδρολογικό έτος 2001-02 που από τον Μάρτιο και μετά σημειώθηκαν επανειλημμένα ρεκόρ βροχόπτωσης σε όλη την ελληνική επικράτεια, ο σταθμός κατέγραψε μόλις 199.6 mm, ενώ η αντίστοιχη μέση ετήσια τιμή του ανηγμένου δείγματος του Δρυμόνα είναι υπερπενταπλάσια, καθώς φτάνει τα 1085.6 mm.

Η εκτίμηση της επιφανειακής βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα Ευήνου, ελλείπει επίκαιρων δεδομένων από τον σταθμό Δρυμόνα και έως ότου αποκατασταθεί μια αξιόπιστη λειτουργία του σταθμού του φράγματος, γίνεται επεκτείνοντας το σχετικό δείγμα μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με την χρονοσειρά απορροής ανάντη του φράγματος (βλ. 3.3). Παρατηρείται ότι η συσχέτιση των δύο δειγμάτων είναι πολύ κακή τους εαρινούς και θερινούς μήνες, κατά τους οποίους η κύρια συνιστώσα της επιφανειακής απορροής είναι η τήξη του χιονιού και όχι οι πλημμύρες. Οι παράμετροι του μοντέλου παλινδρόμησης δίνονται στον Πίνακα 2.16, ενώ τα στατιστικά χαρακτηριστικά του τελικού (ενοποιημένου) δείγματος βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα συνοψίζονται στον Πίνακα 2.17.

Πίνακας 2.16: Παράμετροι ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές συσχέτισης μεταξύ δειγμάτων μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης (y) και απορροής (x) ταμιευτήρα Ευήνου

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
b	2.785	1.261	0.915	0.849	0.851	0.829	0.839	0.603	1.129	1.655	3.738	5.163
a	36.8	89.7	42.1	24.1	31.0	1.8	17.3	24.2	4.9	0.4	-7.6	-3.2
r^2	0.448	0.572	0.840	0.579	0.543	0.608	0.275	0.169	0.162	0.056	0.198	0.329

Πίνακας 2.17: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Ευήνου για τα υδρολογικά έτη 1970-71 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	108.0	221.8	216.0	143.2	161.9	109.0	114.5	68.0	35.4	26.2	32.6	54.4	1291.0
Τυπ. απόκλ.	76.9	105.9	123.8	92.3	90.4	66.5	66.3	37.3	24.9	31.8	26.1	49.0	278.0
Μέγιστο	310.2	447.6	561.6	370.2	331.9	293.3	304.2	137.0	91.7	159.9	101.0	201.8	1696.0
Ελάχιστο	0.3	23.7	48.7	0.0	6.4	1.7	19.3	9.7	0.0	0.0	0.0	1.0	743.8

Σημείωση: Το δείγμα έχει προκύψει με μεταφορά και υψομετρική αναγωγή της χρονοσειράς βροχόπτωσης Δρυμόνα (έως τον Σεπτέμβριο του 2001) και επέκταση δείγματος μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με την χρονοσειρά απορροής ανάντη του φράγματος.

2.6.2 Ταμιευτήρας Μόρνου

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου προέκυψε με απευθείας μεταφορά της χρονοσειράς βροχόπτωσης του σταθμού Λιδορικού και χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στον ταμιευτήρα. Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1958 έως τον Ιανουάριο του 2002.

Από τον Φεβρουάριο του 2002, η βροχόπτωση στον ταμιευτήρα Μόρνου μετράται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκατέστησε η ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια του έργου (Μαμάσης, 2004). Επισημαίνεται ότι η έως τώρα λειτουργία του σταθμού δεν είναι πλήρως ικανοποιητική, και τα δεδομένα που λαμβάνονται είναι σχετικά μειωμένης αξιοπιστίας. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 2.18.

Πίνακας 2.18: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μόρνου για τα υδρολογικά έτη 1958-59 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	89.2	187.2	182.3	118.8	137.1	93.7	94.5	57.4	30.2	22.2	27.4	45.0	1085.1
Τυπ. απόκλ.	65.3	89.7	106.2	78.3	75.7	55.9	57.0	32.0	21.2	27.3	22.4	41.8	229.9
Μέγιστο	258.7	373.3	468.4	308.7	276.8	244.6	253.7	114.3	76.5	133.4	84.2	168.3	1414.5
Ελάχιστο	0.3	19.8	40.6	0.0	5.3	1.4	16.1	8.1	0.0	0.0	0.0	0.8	620.3

Σημείωση: Το δείγμα έχει προκύψει με ενοποίηση των δεδομένων του σταθμού Λιδορικού (έως τον Ιανουάριο του 2002) και του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ.

2.6.3 Λίμνη Υλίκη

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια της Υλίκης προέκυψε με μεταφορά της χρονοσειράς βροχόπτωσης του σταθμού Αλιάρτου και χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι ο σταθμός βρίσκεται πολύ κοντά στην λίμνη. Τα διαθέσιμα δεδομένα καλύπτουν μια μεγάλη χρονική περίοδο μήκους 90 ετών, από το 1907 έως το 1997. Για τρία ακόμη έτη περίπου ο σταθμός λειτούργησε πλημμελώς, και οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν μέσω γραμμικής συσχέτισης με την χρονοσειρά βροχόπτωσης του σταθμού Τανάγρας έως τον Ιούλιο του 2001 (βλ. 2.4.2).

Στο διάστημα από τον Αύγουστο του 2001 έως τον Μάιο του 2002, η βροχόπτωση στην λίμνη υπολογίζεται με απευθείας μεταφορά του δείγματος του σταθμού Μουρικού. Επισημαίνεται ωστόσο ότι, με βάση τον έλεγχο ομογένειας της ενότητας 2.3.2, τα δεδομένα του σταθμού δεν κρίνονται αξιόπιστα, καθώς το βροχόμετρο έχει τοποθετηθεί σε ακατάλληλη θέση.

Από τον Ιούνιο του 2002, η βροχόπτωση στην λίμνη μετράται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκατέστησε η ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια του έργου (Μαμάσης, 2004). Ωστόσο, και στην

περίπτωση αυτή προκύπτουν αμφιβολίες σχετικά με την αξιοπιστία των μετρήσεων. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στο διάστημα 26-30/7/2002, οπότε καταγράφηκε βροχόπτωση της τάξης των 170 mm στον γειτονικό σταθμό Μουρικού (που είναι και η υψηλότερη που έχει παρατηρηθεί ποτέ τον μήνα Ιούλιο), η αντίστοιχη τιμή του σταθμού της ΕΥΔΑΠ ήταν μόλις 33.5 mm. Η υψηλή τιμή των 170 mm, αν και στατιστικά ακραία, δεν μπορεί να αμφισβητηθεί, δεδομένου ότι επιβεβαιώνεται και από το ΙΓΜΕ (*Δάνδολος*, 2002, σ. 13).

Το τελικό δείγμα μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια της Υλίκης προκύπτει με ενοποίηση των παραπάνω τριών δειγμάτων. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 2.19.

Πίνακας 2.19: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1907-08 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	71.1	89.8	108.7	94.2	79.8	70.7	40.7	33.6	20.7	6.8	12.6	29.5	657.6
Τυπ. απόκλ.	59.8	55.0	61.1	52.9	47.1	43.6	32.9	28.9	25.5	10.3	25.6	34.8	157.3
Μέγιστο	269.9	250.5	286.7	331.8	233.4	195.6	165.6	159.1	167.8	50.5	209.4	142.4	1192.7
Ελάχιστο	0.0	2.1	7.0	5.0	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	333.6

Σημείωση: Το δείγμα έχει προκύψει με ενοποίηση των δεδομένων των σταθμών Αλιάρτου (έως τον Ιούλιο του 2001), Μουρικού (έως τον Μάιο του 2002) και του αυτόματου μετεωρολογικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ.

2.6.4 Ταμιευτήρας Μαραθώνα

Η χρονοσειρά μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του Μαραθώνα μετράται στον μετεωρολογικό σταθμό της ΕΥΔΑΠ που είναι εγκατεστημένος κοντά στο φράγμα. Από τις αρχές του 2002, η βροχόπτωση στον ταμιευτήρα μετράται από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό που εγκατέστησε η ΕΥΔΑΠ στα πλαίσια του έργου, που λειτουργεί χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα (*Μαμάσης*, 2004). Το τελικό δείγμα, όπως προέκυψε μετά την συμπλήρωση των ελλείψεων βάσει της χρονοσειράς του σταθμού Τανάγρας (βλ. 2.4.2), καλύπτει μια περίοδο 70 πλήρων υδρολογικών ετών, με έναρξη τον Φεβρουάριο του 1933. Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά του συνοψίζονται στον Πίνακα 2.20.

Πίνακας 2.20: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας βροχόπτωσης στην επιφάνεια του ταμιευτήρα Μαραθώνα για τα υδρολογικά έτη 1932-33 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	62.9	79.9	110.7	93.4	69.1	64.9	35.6	25.7	15.2	7.6	5.8	18.1	588.9
Τυπ. απόκλ.	54.2	51.1	66.2	52.5	42.7	51.6	32.9	23.8	22.0	13.0	13.8	30.5	153.1
Μέγιστο	206.9	290.0	298.5	221.0	177.8	353.0	158.5	135.2	153.3	58.0	86.2	197.1	1103.0
Ελάχιστο	0.0	0.0	18.7	5.2	6.0	1.8	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	325.3

3 Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

3.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται η μεθοδολογία και οι επεξεργασίες των υδρομετρικών δεδομένων των λεκανών Ευήνου, Μόρνου, Βοιωτικού Κηφισού, Υλίκης και Μαραθώνα, που σε συνδυασμό με την κατάρτιση των υδατικών ισοζυγίων (βλ. Κεφάλαιο 5) αποσκοπούν στην παραγωγή μηνιαίων δειγμάτων απορροής στις θέσεις των τεσσάρων ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Το μεγαλύτερο μέρος των εργασιών αφορά την εκτίμηση της απορροής της λεκάνης ανάντη του ταμιευτήρα Ευήνου, για την οποία απαιτήθηκε η συλλογή, αξιολόγηση και επεξεργασία ενός εκτενούς δείγματος πρωτογενών δεδομένων, τόσο κατά την πρώτη όσο και κατά την δεύτερη φάση του έργου. Όσον αφορά τους υπόλοιπους ταμιευτήρες, για τον Μόρνο και τον Μαραθώνα επικαιροποιήθηκαν τα δεδομένα της πρώτης φάσης του έργου, ενώ για την Υλίκη έγινε εξαιρετικά εκτεταμένη διερεύνηση, που αποτελεί αντικείμενο ξεχωριστού τεύχους (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004).

3.2 Μεθοδολογία

3.2.1 Γενικά

Πρωτεύουσα πληροφορία της τεχνικής υδρολογίας είναι οι μετρήσεις παροχής των υδατορευμάτων, που συνιστούν την βασική πληροφορία όλων των μέτρων που σχετίζονται με την αξιοποίηση και διαχείριση των υδατικών πόρων. Κύριος στόχος της υδρομετρίας είναι η παραγωγή αδιάλειπτων χρονοσειρών παροχής, σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Για την εξυπηρέτηση αυτού του στόχου απαιτείται η εκτέλεση μετρήσεων παροχής ανά τακτά χρονικά διαστήματα, π.χ. εβδομάδας ή δεκαπενθήμερου. Ωστόσο, η χρονική πυκνότητα των υδρομετρήσεων ποτέ δεν είναι η απαιτούμενη, τόσο εξαιτίας της πολυπλοκότητας της διεργασίας όσο και του μεγάλου κόστους αυτής. Για τον λόγο αυτό, για την πύκνωση των χρονοσειρών παροχής στο επιθυμητό χρονικό βήμα (που είναι τουλάχιστον ημερήσιο) αξιοποιούνται και άλλα χαρακτηριστικά της ροής των υδατορευμάτων, με συνηθέστερη την στάθμη, της οποίας η μέτρηση είναι σαφώς απλούστερη.

Στην συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία εκτέλεσης μετρήσεων παροχής και, ακολούθως, η μεθοδολογία κατάρτισης χρονοσειρών παροχής πυκνού χρονικού βήματος από υδρομετρήσεις αραιού βήματος καθώς και χρονοσειρές στάθμης. Για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης παραπέμπεται στους *Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο* (1999, σ. 315-343)

3.2.2 Μέτρηση παροχής

Η παροχή ως υδραυλικό μέγεθος, ορίζεται από την σχέση:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (3.1)$$

όπου V ο όγκος νερού και t ο χρόνος. Στην πράξη, η τιμή της παροχής δεν μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή του παραπάνω ορισμού, καθώς είναι αδύνατη η μέτρηση του διερχόμενου όγκου σε φυσικά υδατορεύματα ή υδραγωγεία. Για τον λόγο αυτό, η παροχή εκτιμάται έμμεσα, με μέτρηση της

ταχύτητας ροής. Θεωρητικά, εφόσον είναι γνωστό το συνεχές πεδίο ταχυτήτων u σε μια διατομή A , τότε η παροχή προκύπτει άμεσα από την σχέση:

$$Q = \int_A u \, dA \quad (3.2)$$

Πρακτικά, η εκτίμηση της παροχής γίνεται με μέτρηση της ταχύτητας σε διάφορα σημεία (x_i, y_i) της διατομής, τα οποία επιλέγονται τόσο κατά την εγκάρσια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια, και την αριθμητική ολοκλήρωση του διακριτού πεδίου ταχυτήτων, u_i . Το τυπικό όργανο μέτρησης της ταχύτητας ροής είναι ο *μυλίσκος*, που αποτελείται από μια έλικα που περιστρέφεται υπό την επίδραση της ροής.

Η αξιόπιστη εκτίμηση της παροχής προϋποθέτει κατάλληλη επιλογή των σημείων μέτρησης μέσα στην διατομή, κατά την κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση. Θεωρητικοί λόγοι καταδεικνύουν ότι η πλέον αντιπροσωπευτική εκτιμήτρια της μέσης ταχύτητας σε κατακόρυφη διατομή υδατορεύματος είναι αυτή που μετράται σε απόσταση ίση με το 60% του συνολικού βάθους, d , μετρούμενου από την επιφάνεια. Αν το βάθος είναι σχετικά μικρό, τότε η διενέργεια μιας μοναδικής μέτρησης κατά την κατακόρυφη έννοια θεωρείται επαρκής. Διαφορετικά, απαιτούνται τρεις μετρήσεις, σε αποστάσεις 20%, 60% και 80% του βάθους d , οπότε η μέση ταχύτητα εκτιμάται ως (*World Meteorological Organization*, 1981, σ. 2.53):

$$\bar{u} = \frac{u_{60\%}}{2} + \frac{u_{20\%} + u_{80\%}}{4} \quad (3.3)$$

Ως προς την εγκάρσια διεύθυνση, οι αποστάσεις μέτρησης, w , πρέπει να είναι τέτοιες ώστε η παροχή που αντιπροσωπεύεται από μια κατακόρυφο, ήτοι η ποσότητα:

$$q = \bar{u} \, d \, w \quad (3.4)$$

να μην υπερβαίνει το 10% της ολικής παροχής της διατομής (*Mosley and McKerchar*, 1993, σ. 8.14). Η ολική παροχή προκύπτει από την σχέση:

$$Q = \sum_i q_i = \sum_i \bar{u}_i \, d_i \, w_i \quad (3.5)$$

3.2.3 Μέτρηση στάθμης

Η διαδικασία μέτρησης της παροχής που περιγράφηκε παραπάνω γίνεται από εξειδικευμένα συνεργεία, και σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να έχει την χρονική διακριτότητα που απαιτείται για την εξαγωγή χρονοσειρών παροχής. Για τον λόγο αυτό, οι τελευταίες προκύπτουν έμμεσα, χρησιμοποιώντας ως βάση μετρήσεις στάθμης πυκνού χρονικού βήματος. Η μέτρηση της στάθμης ενός υδατορεύματος, η οποία είναι σχετικό μέγεθος, γίνεται κατά κύριο λόγο με σταθμήμετρα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, με σταθμηγράφους, που είναι αυτόματα καταγραφικά όργανα. Γενικά, τα δεδομένα του σταθμημέτρου είναι μια χρονοσειρά ημερήσιου βήματος, η οποία προκύπτει με ανάγνωση της στάθμης μιας σταδίας από τον παρατηρητή. Από την άλλη πλευρά, τα δεδομένα του σταθμηγράφου είναι μια χρονοσειρά ωριαίου ή δίωρου βήματος, που προέρχεται από την ψηφιοποίηση των ταινιών του καταγραφικού.

Εφόσον σε έναν σταθμό συνυπάρχουν τα δύο όργανα, απαιτείται έλεγχος και επεξεργασία των στοιχείων τους, με σκοπό την κατάρτιση ενός ενοποιημένου και αξιόπιστου δείγματος τιμών στάθμης. Συχνά παρατηρείται το φαινόμενο ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων από τον σταθμηγράφο και το σταθμήμετρο που διαφέρουν μεταξύ τους. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα στοιχεία του σταθμημέτρου υπόκεινται μόνο στο σφάλμα ανάγνωσης του παρατηρητή, οι αποκλίσεις οφείλονται κατά κύριο λόγο σε σφάλματα των δεδομένων του σταθμηγράφου (λόγω βλάβης του αισθητήρα, κακής τοποθέτησης

της ταινίας, σφαλμάτων ψηφιοποίησης, κλπ.). Ακόμη, συμβαίνει να έχει γίνει σταθμημέτρηση ταυτόχρονα με την μέτρηση παροχής, και η στάθμη που έχει καταγράψει το συνεργείο υδρομέτρησης να είναι διαφορετική από αυτή που έχει καταγράψει ο παρατηρητής του σταθμημετρικού σταθμού.

Για τους παραπάνω λόγους, συνήθως θεωρείται ορθότερη η χρονοσειρά του σταθμημέτρου, ενώ η χρονοσειρά του σταθμηγράφου υπόκειται μια απλή διαδικασία αναγωγής. Συγκεκριμένα, τις χρονικές στιγμές t_i κατά τις οποίες υπάρχουν ταυτόχρονες ενδείξεις από τα δύο όργανα, υιοθετούνται οι μετρήσεις του σταθμημέτρου $h_\mu(t_i)$. Για τις ενδιάμεσες τιμές του χρόνου τ_j , όπου $t_i \leq \tau_j \leq t_{i+1}$, για τις οποίες υπάρχουν τιμές του σταθμηγράφου $h_\gamma(\tau_j)$, οι τελευταίες διορθώνονται ακολουθώντας μια γραμμική σχέση του χρόνου:

$$h_\gamma'(\tau_j) = h_\mu(\tau_j) + [h_\mu(t_i) - h_\gamma(t_i)] \frac{t_{i+1} - \tau_j}{t_{i+1} - t_i} + [h_\mu(t_{i+1}) - h_\gamma(t_{i+1})] \frac{\tau_j - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.6)$$

όπου $h_\gamma'(\tau_j)$ η διορθωμένη τιμή της στάθμης του σταθμηγράφου.

3.2.4 Σχέσεις στάθμης-παροχής

Ο μετασχηματισμός της μετρημένης στάθμης σε παροχή γίνεται είτε μέσω αναλυτικών ή στατιστικών σχέσεων. Η πρώτη προσέγγιση βασίζεται σε νόμους της υδραυλικής και προϋποθέτει την γνώση των γεωμετρικών και υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής. Συνηθέστερα, χρησιμοποιείται ο εμπειρικός τύπος του Manning:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} J^{1/2} \quad (3.7)$$

όπου A το εμβαδόν της διατομής, R η υδραυλική ακτίνα, ήτοι ο λόγος A / P , όπου P η βρεχόμενη περίμετρος, J η κλίση του υδραυλικού φορτίου και n συντελεστής τραχύτητας, που εξαρτάται από το υλικό και την παλαιότητα της διατομής, την απόθεση φερτών υλών, την φυτοκάλυψη του πυθμένα, κλπ. Τυπικές τιμές του συντελεστή n δίνονται στην βιβλιογραφία (Chow, 1959, σ. 110-113).

Η εφαρμογή της σχέσης (3.7) προϋποθέτει συνθήκες ομοιόμορφης ροής, ήτοι πρακτικά ευθύγραμμη πορεία του υδατορεύματος και περίπου σταθερή διατομή, τραχύτητα και κλίση σε μεγάλο μήκος ανάντη της θέσης ελέγχου. Στην περίπτωση αυτή, η κλίση του υδραυλικού φορτίου ταυτίζεται με την κατά μήκος κλίση του υδατορεύματος. Βεβαίως, σε φυσικά ποτάμια κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά σπάνιο, καθώς είναι πολύ δύσκολη η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας, ενώ και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής μεταβάλλονται δυναμικά, ειδικά μετά από έντονα πλημμυρικά επεισόδια. Συνεπώς, η σχέση του Manning εφαρμόζεται μόνο σε ευθύγραμμα τεχνητά κανάλια, που έχουν γνωστή γεωμετρία και υποβάλλονται σε τακτική συντήρηση.

Εναλλακτικά, ακολουθείται η στατιστική προσέγγιση, βάσει της οποίας η παροχή εκτιμάται μέσω αμφιμονοσήμαντων μαθηματικών σχέσεων $Q = f(h)$ που προκύπτουν με προσαρμογή γνωστών, από υδρομετρήσεις, τιμών παροχής, Q_i , στις αντίστοιχες τιμές στάθμης, h_i . Απαραίτητα προϋπόθεση για την εξαγωγή τέτοιων σχέσεων είναι η ύπαρξη ικανοποιητικού δείγματος μετρήσεων (Q_i, h_i), για όλες τις συνήθεις δίαυτες ροής.

Η συνάρτηση $Q = f(h)$ καλείται *καμπύλη στάθμης-παροχής* (rating curve) και συνήθως περιγράφεται από μια γενική σχέση δύναμης της μορφής:

$$Q = c (h - a)^N \quad (3.8)$$

όπου a η στάθμη στην οποία μηδενίζεται η τιμή της παροχής και c, N παράμετροι. Η παραπάνω σχέση δικαιολογείται με εφαρμογή των τύπων της υδραυλικής. Αποδεικνύεται ότι σε πρισματικές διατομές, ισχύει η σχέση (3.8) με τιμές εκθέτη N από 1.5 ως 3. Σε πιο σύνθετες διατομές, όπου η γεωμετρία της

κοίτης μεταβάλλεται με την στάθμη, η καμπύλη μπορεί να αποτελείται από m το πλήθος τμήματα, κάθε ένα από τα οποία προσεγγίζεται από μια συνάρτηση της μορφής (3.8), δηλαδή:

$$Q = \begin{cases} c_1 (h - \alpha)^{N_1} & h_0 < h \leq h_1 \\ c_2 (h - \alpha)^{N_2} & h_1 < h \leq h_2 \\ \dots & \dots \\ c_m (h - \alpha)^{N_m} & h_{m-1} < h \leq h_m \end{cases} \quad (3.9)$$

όπου $h_0 = \min (h_i)$, $h_m = \max (h_i)$ και h_k σημεία θλάσης τέτοια ώστε:

$$c_k (h_k - \alpha)^{N_k} = c_{k+1} (h_k - \alpha)^{N_{k+1}} \quad (3.10)$$

για κάθε $k = 1, \dots, m - 1$.

Υπό την προϋπόθεση ότι όλα τα ζεύγη σημείων (Q_i, h_i) περιγράφονται από μια ενιαία εξίσωση, η εκτίμηση των παραμέτρων c και N γίνεται εύκολα, μέσω γραμμικής παλινδρόμησης (βλ. 2.4.1). Πράγματι, μετά από λογαρίθμηση, η (3.8) γράφεται:

$$\log Q = \log c + N \log (h - \alpha) \quad (3.11)$$

που δείχνει ότι οι λογάριθμοι της παροχής Q και της διαφοράς στάθμης $h - \alpha$ συνδέονται με μια γραμμική σχέση. Στην περίπτωση αυτή, οι συντελεστές $\log c$ και N , δηλαδή η τομή και κλίση, αντίστοιχα, της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων, δίνονται από αναλυτικές σχέσεις.

Αν ωστόσο η διάταξη της σημειοσειράς (Q_i, h_i) απαιτεί περισσότερες από μία σχέσεις της μορφής (3.8), που σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα απεικονίζεται ως μια κατά τμήματα γραμμική καμπύλη, δεν υπάρχει αναλυτική μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων c_k, N_k . Στην περίπτωση αυτή, η εκτίμηση των παραμέτρων καθώς και ο χειρισμός των περιορισμών συνέχειας (3.10) γίνεται μέσω βελτιστοποίησης, θεωρώντας ως μεταβλητές ελέγχου τα $m - 1$ σημεία θλάσης, h_k , και τις $m + 1$ παροχές, Q_k . Ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, θεωρείται η μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ των παρατηρημένων και εκτιμημένων παροχών.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που συχνά προκύπτει κατά την κατάρτιση καμπυλών στάθμης-παροχής είναι η απουσία μετρήσεων παροχής στην περιοχή των υψηλών τιμών στάθμης, ήτοι κατά την διάρκεια πλημμυρών, ενώ αντίθετα υπάρχουν καταγραφές του σταθμημέτρου ή του σταθμηγράφου. Συνεπώς, για την εκτίμηση της παροχής σε συνθήκες πλημμυρικής διαίτας απαιτείται επέκταση της καμπύλης πέρα από την μέγιστη μετρημένη στάθμη, h_m . Σημειώνεται ότι η εφαρμογή της σχέσης (3.8) ή της (3.9) για τιμές στάθμης μεγαλύτερες της h_m δεν είναι ενδεδειγμένη. Αντίθετα, θεωρείται καταλληλότερη η εφαρμογή σχέσεων της υδραυλικής, όπως η εξίσωση του Manning που περιγράφηκε προηγουμένως.

Στα περισσότερα υδατορεύματα, η σχέση στάθμης-παροχής υπόκειται σε αλλαγές με την πάροδο του χρόνου που οφείλονται στην μεταβολή των χαρακτηριστικών της διατομής, εξαιτίας της διάβρωσης, της απόθεσης φερτών υλικών, της ανάπτυξης της χλωρίδας, κλπ. Αυτές οι αλλαγές δυσκολεύουν σημαντικά την διαδικασία κατάρτισης καμπυλών στάθμης-παροχής, αφού δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστική η ύπαρξη μίας διαχρονικής καμπύλης αλλά ένα σύνολο καμπυλών, κάθε μία από τις οποίες ισχύει για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Κατά συνέπεια, πριν την κατάρτιση των καμπυλών απαιτείται η ομαδοποίηση των υδρομετρήσεων σε υποσύνολα, με τρόπο ώστε οι μετρήσεις κάθε υποσυνόλου να περιγράφονται από την ίδια σχέση. Αυτό σημαίνει ότι στους αγνώστους του προβλήματος προστίθενται και οι περίοδοι ισχύος κάθε καμπύλης. Συχνά γίνεται η παραδοχή ότι η αλλαγή της καμπύλης γίνεται κατά την διάρκεια ισχυρών πλημμυρικών επεισοδίων, που έχουν ως αποτέλεσμα την δραστική αλλαγή των χαρακτηριστικών της διατομής εξαιτίας της έντονης διαβρωτικής ικανότητας του νερού. Εμπειρικά, η περίοδος ισχύος κάθε

καμπύλης εκτιμάται ελέγχοντας την γραμμικότητα των σημείων μέτρησης (Q_i, h_i) πάνω σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα. Η παραπάνω διαδικασία συνδυάζεται και με τον εντοπισμό τυχόν εσφαλμένων μετρήσεων, οι οποίες θεωρούνται *εξωκείμενα σημεία* (outliers) και δεν υπάγονται σε κανένα υποσύνολο, οπότε πρέπει να απομακρυνθούν από το δείγμα. Εμπειρικά, τα εξωκείμενα σημεία εντοπίζονται ελέγχοντας την απόστασή τους από την δέσμη των υπόλοιπων σημείων.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι η αντιμετώπιση του προβλήματος κατασκευής σχέσεων στάθμης-παροχής δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία, καθώς σημαντικό μέρος αυτής γίνεται με το χέρι, κάτι που προφανώς προϋποθέτει σημαντική εμπειρία από πλευράς μελετητή. Για τον λόγο αυτό, η ανάπτυξη αυτόματων μεθοδολογιών ανάλυσης υδρομετρικών δεδομένων με στόχο την κατάρτιση πολλαπλών σχέσεων στάθμης-παροχής συνιστά ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας στον χώρο της τεχνικής υδρολογίας (*Tsakalios and Koutsoyiannis, 1999*).

3.2.5 Εκτίμηση χρονοσειρών παροχής από χρονοσειρές στάθμης

Μετά την επεξεργασία των σταθμημετρικών δεδομένων και ειδικότερα την αναγωγή των μετρήσεων του σταθμηγράφου που περιγράφηκε στην ενότητα 3.2.3, και την κατάρτιση των καμπυλών στάθμης-παροχής που αναλύθηκε στην ενότητα 3.2.4, υπολογίζονται οι χρονοσειρές παροχής. Ωστόσο, αυτό δεν γίνεται με άμεση εφαρμογή της σχέσης στάθμης-παροχής, αφού κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό παροχών που διαφέρουν από τις αντίστοιχες μετρημένες κατά τις χρονικές στιγμές πραγματοποίησης των υδρομετρήσεων.

Για τον λόγο αυτό, εφαρμόζεται μια διαδικασία διόρθωσης των χρονοσειρών στάθμης, γνωστή ως *μέθοδος Stout* (*Shaw, 1994, σ. 119*). Συγκεκριμένα, για όλους τους χρόνους t_i που υπάρχουν μετρήσεις παροχής υπολογίζεται η διαφορά:

$$\Delta h(t_i) = h_{\sigma}(t_i) - h_{\pi}(t_i) \quad (3.12)$$

όπου $h_{\sigma}(t_i)$ η τιμή της στάθμης που προέρχεται από το ενοποιημένο δείγμα σταθμημέτρου και σταθμηγράφου και $h_{\pi}(t_i)$ η τιμή της στάθμης που υπολογίζεται με εφαρμογή της αντίστροφης της σχέσης στάθμης-παροχής, συναρτήσεως της μετρημένης παροχής $Q_{\mu}(t_i)$. Υποθέτοντας ότι το μέγεθος Δh μεταβάλλεται γραμμικά ανάμεσα στις χρονικές στιγμές $[t_i, t_{i+1}]$, σε κάθε χρονική στιγμή t ισχύει:

$$\Delta h(t) = \Delta h(t_i) \frac{t_{i+1} - t}{t_{i+1} - t_i} + \Delta h(t_{i+1}) \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.13)$$

οπότε η διορθωμένη τιμή της στάθμης είναι:

$$h_{\sigma}'(t) = h_{\sigma}(t) + \Delta h(t) \quad (3.14)$$

και η τιμή της παροχής προκύπτει με εφαρμογή της σχέσης στάθμης-παροχής, δηλαδή:

$$Q(t) = f(h_{\sigma}'(t)) \quad (3.15)$$

Με εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας, η εκτίμηση της παροχής $Q(t_i)$ ταυτίζεται με την αντίστοιχη μέτρηση $Q_{\mu}(t_i)$, για όλες τις χρονικές στιγμές t_i .

3.3 Απορροή λεκάνης Ευήνου

3.3.1 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Στη λεκάνη απορροής του Ευήνου, ο πλέον αξιόλογος υδρομετρικός σταθμός είναι ο σταθμός Πόρου Ρηγανίου, που βρίσκεται 35 km ανάντη των εκβολών του ποταμού και είναι σε συνεχή λειτουργία από το 1960 υπό την εποπτεία της ΔΕΗ. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει ο σταθμός Αγίου Δημητρίου (Νεοχωρίου), ο οποίος λειτούργησε από το 1970 μέχρι την έναρξη κατασκευής του φράγματος, στις

αρχές της δεκαετίας του 1990. Παρόλο που ο τελευταίος παρουσιάζει το πλεονέκτημα της άμεσης γειννιάσής του με τον ταμιευτήρα, για την αναγωγή των παροχών στη θέση του φράγματος επιλέχθηκε τελικά ως σταθμός βάσης ο σταθμός Πόρου Ρηγανίου, ο οποίος μάλιστα διαθέτει και σταθμηγράφο. Οι κυριότεροι λόγοι είναι οι εξής:

- Στον σταθμό Αγίου Δημητρίου λειτουργούσαν έξι διαφορετικά σταθμήμετρα που εναλλάσσονταν διαδοχικά στο χρόνο με ελάχιστες επικαλύψεις. Αντίθετα, στον Πόρο Ρηγανίου υπάρχουν τρία σταθμήμετρα, από τα οποία το ένα (το λεγόμενο «μέσο») λειτουργεί σε συνεχή βάση και παρουσιάζει συνέπεια με τις μετρήσεις του σταθμηγράφου.
- Επειδή στον Πόρο Ρηγανίου λειτουργεί και σταθμηγράφος, είναι δυνατή η εκτίμηση και των πλημμυρικών παροχών με βάση τις ωριαίες στάθμες.
- Η στατιστική επεξεργασία των δειγμάτων παροχών των δύο σταθμών που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια προηγούμενου έργου, κατέδειξε ότι η αξιοπιστία των μετρήσεων στον σταθμό Αγίου Δημητρίου είναι περιορισμένη (*Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1989*).
- Εξαιτίας της παύσης λειτουργίας του σταθμού Αγίου Δημητρίου, δεν υπάρχει δείγμα μετρήσεων μετά το 1990.

3.3.2 Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής στον Πόρο Ρηγανίου

Η υδρομετρική πληροφορία στη θέση Πόρος Ρηγανίου περιλαμβάνει τις ακόλουθες συνιστώσες:

- δεδομένα σταθμήμετρου σε ημερήσιο βήμα, τα οποία καταγράφονται στις 8 το πρωί από τον εκάστοτε παρατηρητή·
- δεδομένα σταθμηγράφου σε ωριαίο βήμα, τα οποία αναφέρονται σε σημαντικά πλημμυρικά επεισόδια και προέρχονται από ψηφιοποίηση της ταινίας του οργάνου·
- υδρομετρήσεις δεκαπενθήμερου, περίπου, χρονικού βήματος (με εξαίρεση του θερινού μήνες), οι οποίες, ελλείψει στοιχείων, θεωρείται ότι πραγματοποιούνται στις 10 το πρωί, λαμβάνοντας υπόψη ότι το συνεργείο ξεκινά νωρίς το πρωί από το Αγρίνιο.

Τα παραπάνω στοιχεία, τα οποία ήταν διαθέσιμα από προηγούμενα ερευνητικά έργα του ΕΜΠ μέχρι το υδρολογικό έτος 1993-94 (*Τσακαλίας και Κουτσογιάννης, 1995*), επικαιροποιήθηκαν μέχρι τον Απρίλιο του 2001, βάσει πρωτογενών δεδομένων που ελήφθησαν από την ΔΕΗ. Ειδικότερα, η κατασκευή των καμπυλών στάθμης-παροχής και ο υπολογισμός των παροχών πραγματοποιήθηκε για την περίοδο από τον Νοέμβριο του 1992 και έπειτα.

Αρχικά, ενοποιήθηκαν τα σταθμημετρικά δεδομένα που προέρχονται από τις καταγραφές του σταθμήμετρου και του σταθμηγράφου. Ως όργανο βάσης ελήφθη το σταθμήμετρο, το οποίο είναι λιγότερο ευαίσθητο σε σφάλματα, ενώ από αυτό προέρχονται οι τιμές στάθμης που αναφέρονται στα έντυπα των υδρομετρήσεων, μέσω των οποίων κατασκευάστηκαν οι καμπύλες στάθμης-παροχής.

Στην συνέχεια ελήφθη το δείγμα των υδρομετρήσεων διατεταγμένο κατά αύξουσα χρονολογική σειρά, στο οποίο έγινε ομαδοποίηση των δεδομένων και απόρριψη των εξωκείμενων σημείων. Επισημαίνεται ότι κατά την εφαρμογή της διαδικασίας δεν χρησιμοποιήθηκαν τα μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια πλημμυρικών επεισοδίων, οπότε παρουσιάζονται έντονες διακυμάνσεις της στάθμης. Ο λόγος είναι η αβεβαιότητα ως προς τον ακριβή χρόνο πραγματοποίησης των υδρομετρήσεων, που μπορεί να εισάγει σημαντικό σφάλμα κατά την διαδικασία υπολογισμού των χρονοσειρών παροχής από τις χρονοσειρές στάθμης (βλ. 3.2.5). Ακολούθως, για κάθε ομάδα δεδομένων κατασκευάστηκε η αντίστοιχη καμπύλη στάθμης-παροχής, θεωρώντας ένα μόνο σημείο θλάσης ($k = 2$), ήτοι:

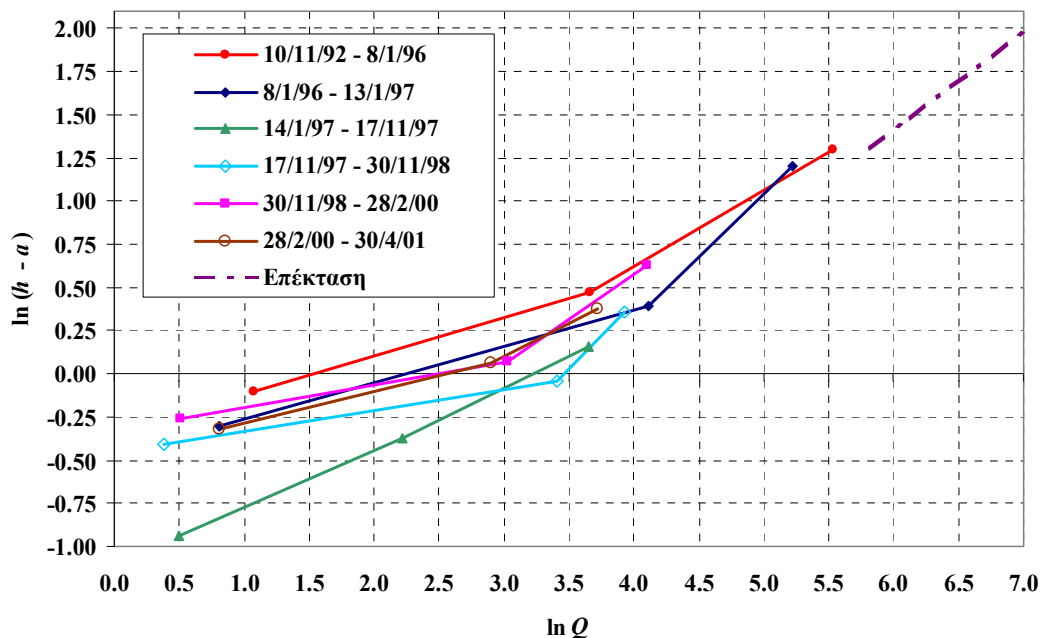
$$Q = \begin{cases} c_1 (h - a)^{N1} & h_0 < h \leq h_1 \\ c_2 (h - a)^{N2} & h_1 < h \leq h_2 \end{cases} \quad (3.16)$$

Κατά συνέπεια, κάθε καμπύλη στάθμης-παροχής ορίστηκε από τρία ζεύγη τιμών (Q_k, h_k) και την σταθερά α . Η τελευταία, η οποία θεωρήθηκε κοινή για όλες τις καμπύλες, τέθηκε ίση με -0.70 m, έτσι ώστε για όλο το εύρος τιμών του σταθμημέτρου και του σταθμηγράφου να ισχύει η αναγκαία συνθήκη $h + \alpha > 0$. Από την άλλη πλευρά, η επέκταση των καμπυλών στην περιοχή των υψηλών τιμών στάθμης, ήτοι τιμών μεγαλύτερων της μέγιστης παρατηρημένης ($h > 3$ m), έγινε με εφαρμογή αναλυτικών εξισώσεων της υδραυλικής. Συνολικά προέκυψαν έξι καμπύλες, τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οποίων δίνονται στον Πίνακα 3.1, ενώ οι γραφικές τους παραστάσεις απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1.

Πίνακας 3.1: Περίοδος ισχύος και χαρακτηριστικά σημεία καμπυλών στάθμης-παροχής στην θέση του υδρομετρικού σταθμού Πόρου Ρηγανίου. Κάθε σημείο της καμπύλης απεικονίζεται στη μορφή (h, Q), όπου h η στάθμη σε m και Q η παροχή σε m^3/s .

	Καμπύλη 1	Καμπύλη 2	Καμπύλη 3	Καμπύλη 4	Καμπύλη 5	Καμπύλη 6
Περίοδος ισχύος	1/11/92- 7/1/96	8/1/96- 13/1/97	14/1/97- 16/11/97	17/11/97- 29/11/98	30/11/98- 27/2/00	28/2/00- 30/4/01
Σημείο 1	(0.20, 2.94)	(0.04, 2.25)	(-0.31, 1.64)	(-0.04, 1.47)	(0.07, 1.67)	(0.03, 2.23)
Σημείο 2	(0.90, 38.73)	(0.78, 61.00)	(-0.01, 9.14)	(0.26, 30.36)	(0.37, 20.60)	(0.36, 18.18)
Σημείο 3	(2.97, 253.26)	(2.62, 185.12)	(0.47, 38.55)	(0.73, 51.03)	(1.18, 60.16)	(0.76, 41.02)
Σημείο 4	(3.0, 338.7)	(3.0 338.7)	(3.0, 338.7)	(3.0, 338.7)	(3.0, 338.7)	(3.0, 338.7)
Σημείο 5	(7.0, 1207.0)	(7.0, 1207.0)	(7.0, 1207.0)	(7.0, 1207.0)	(7.0, 1207.0)	(7.0, 1207.0)

Τα κοινά για όλες τις καμπύλες σημεία 4 και 5 έχουν προκύψει με εφαρμογή εξισώσεων της υδραυλικής.



Σχήμα 3.1: Γραφική παράσταση των σχέσεων στάθμης-παροχής στη θέση Πόρος Ρηγανίου. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται η επέκταση των σχέσεων για στάθμες μεγαλύτερες από 3 m, η οποία προκύπτει με εφαρμογή εξισώσεων της υδραυλικής.

Στην συνέχεια, έχοντας γνωστή την χρονοσειρά παροχών, $Q(t_i)$, όπου t_i ο χρόνος ως απόλυτο μέγεθος (σε sec), υπολογίστηκαν οι μηνιαίοι όγκοι απορροής, $V(\tau)$, όπου τ ο δείκτης του μήνα, μέσω χρονικής ολοκλήρωσης, ήτοι:

$$V(\tau) = \sum_{t_i=t_\tau}^{t_{\tau+1}} \frac{Q(t_{i-1}) + Q(t_i)}{2} (t_{i-1} - t_i) \quad (3.17)$$

όπου $t_\tau, t_{\tau+1}$ η αρχή και λήξη του μήνα τ , αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η χρονοσειρά $Q(t_i)$ είναι τυχαίου βήματος, ενώ η χρονοσειρά $V(\tau)$ είναι σταθερού (μηνιαίου) βήματος.

Το τελικό δείγμα μηνιαίας απορροής στην θέση Πόρος Ρηγανίου ξεκινά τον Μάιο του 1961, λίγο δηλαδή μετά την έναρξη λειτουργίας του υδρομετρικού σταθμού, και ολοκληρώνεται τον Απρίλιο του 2001, μέχρις ότου επικαιροποιήθηκαν τα πρωτογενή υδρομετρικά δεδομένα της ΔΕΗ. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος δίνονται στον Πίνακα 3.2. Σημειώνεται ότι κατά την περίοδο 1963-64 έως 1969-70 δεν υπάρχουν δεδομένα παροχής, καθώς δεν πραγματοποιήθηκαν υδρομετρήσεις.

Πίνακας 3.2: Βασικά στατιστικά μεγέθη μηνιαίας απορροής Ευήνου στη θέση Πόρος Ρηγανίου για τα υδρολογικά έτη 1960-61 έως 2000-01 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	16.9	70.3	136.7	99.9	114.2	103.5	77.8	45.0	19.3	11.2	7.8	7.7	718.2
Τυπ. απόκλ.	13.8	53.5	97.0	71.6	71.2	56.3	30.5	22.5	8.5	4.2	2.5	3.6	249.9
Μέγιστο	67.7	226.7	417.9	323.1	370.0	261.6	162.1	97.7	46.6	23.1	14.7	23.4	1695.9
Ελάχιστο	4.7	10.4	18.4	14.2	10.8	15.9	27.5	14.7	8.0	5.1	4.1	3.4	283.0

3.3.3 Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Ευήνου

Μέχρι την έναρξη της λειτουργίας του φράγματος Αγίου Δημητρίου στον ποταμό Ευήνο (Σεπτέμβριος 2001), η εκτίμηση της απορροής της ανάντη λεκάνης έγινε έμμεσα, με αναγωγή της μηνιαίας απορροής στην θέση Πόρος Ρηγανίου μέσω της σχέσης:

$$\frac{Q_{\text{Αγ. Δημ.}}}{Q_{\text{Πόρος}}} = \frac{F_{\text{Αγ. Δημ.}}}{F_{\text{Πόρος}}} \quad (3.18)$$

όπου Q_i η μηνιαία απορροή στη θέση i και F_i το εμβαδόν της ανάντη λεκάνης. Δεδομένου ότι το εμβαδόν της λεκάνης απορροής του Ευήνου ανάντη του φράγματος είναι 351.9 km^2 , ενώ το εμβαδόν της λεκάνης ανάντη του υδρομετρικού σταθμού Πόρου Ρηγανίου είναι 892.0 km^2 , ο λόγος των παροχών στις δύο θέσεις είναι ίσος με 40%. Η σχέση αναγωγής (3.18) βασίζεται στην ορθολογική μέθοδο, και προϋποθέτει κοινή υδρολογική διαίτα των δύο λεκανών, ήτοι ίσες επιφανειακές βροχοπτώσεις και ίσους συντελεστές απορροής. Με βάση την διερεύνηση των *Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλου* (1989) και *Κουτσογιάννη κ.ά.* (1992), οι παραπάνω απαιτήσεις ισχύουν για την συγκεκριμένη λεκάνη.

Από τον Μάιο του 1995 έως τον Οκτώβριο του 1999, στην θέση του φράγματος λειτούργησε ένα προσωρινό έργο εκτροπής (πρόφραγμα), που καταστράφηκε εξαιτίας μια εξαιρετικά έντονης πλημμύρας. Συνεπώς, κατά την περίοδο αυτή, στην σχέση (3.18) πρέπει να συνυπολογιστεί και ο όγκος εκτροπής προς τον ταμιευτήρα Μόρνου $Q_{\text{εκροής}}$, μέσω του προφράγματος. Αν Q' η απορροή της ενδιάμεσης λεκάνης, τότε ισχύει ο λόγος:

$$\frac{Q_{\text{Αγ. Δημ.}}}{Q'} = \frac{0.4}{0.6} \quad (3.19)$$

Η απορροή στη θέση Πόρος Ρηγανίου ισούται με το άθροισμα της απορροής της ενδιάμεσης λεκάνης και της λεκάνης ανάντη του φράγματος, αφαιρώντας τον όγκο εκτροπής προς Μόρνο, δηλαδή:

$$Q_{\text{Πόρος}} = Q' + (Q_{\text{Αγ. Δημ.}} - Q_{\text{εκτροπής}}) \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας την (3.19) στην (3.20) προκύπτει:

$$Q_{\text{Αγ. Δημ.}} = 0.4 (Q_{\text{Πόρος}} + Q_{\text{εκτροπής}}) \quad (3.21)$$

Η σχέση (3.21) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της απορροής στη θέση του ταμιευτήρα Ευήνου για την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1995 έως τον Οκτώβριο του 1999. Το πεντάμηνο Μαΐου-Σεπτεμβρίου 1995, οι πληροφορίες που έδωσε ο εργολάβος δεν ήταν επαρκείς και ο όγκος εκτροπής εκτιμήθηκε με βάση τις ακόλουθες υποθέσεις:

- Στην περίπτωση που το σύνολο της απορροής ανάντη του φράγματος διοχετεύτηκε προς τον ταμιευτήρα Μόρνου ($Q_{\text{Αγ. Δημ.}} = Q_{\text{εκτροπής}}$), τότε από τις (3.19) και (3.20) προκύπτει ότι το φυσικό άνω όριο για τον όγκο εκτροπής είναι:

$$Q_{\text{εκτροπής}} = 0.67 Q_{\text{Πόρος}} \quad (3.22)$$

- Ο όγκος εκτροπής δεν μπορεί να ξεπέρασε τη συνολική ποσότητα που εισέρευσε στον ταμιευτήρα Μόρνου, η οποία περιλαμβάνει και την απορροή της λεκάνης. Θεωρώντας ότι εισέρευσε από τη λεκάνη ποσότητα ίση με την ελάχιστη παρατηρηθείσα, τότε προκύπτει ένα δεύτερο άνω όριο που ισούται με:

$$Q_{\text{εκτροπής}} = \text{Αθροιστική εισροή στον Μόρνο} - \text{Ελάχιστη παρατηρηθείσα απορροή} \quad (3.23)$$

- Για το πεντάμηνο Μαΐου-Σεπτεμβρίου 1995 ο εργολάβος έδωσε συνολικό όγκο εκτροπής ίσο με 29.0 hm³, εκ των οποίων τα 16.9 hm³ εκτράπηκαν μέχρι το τέλος Ιουνίου. Οι τιμές αυτές θεωρήθηκαν αξιόπιστες και χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο των τελικών αποτελεσμάτων.

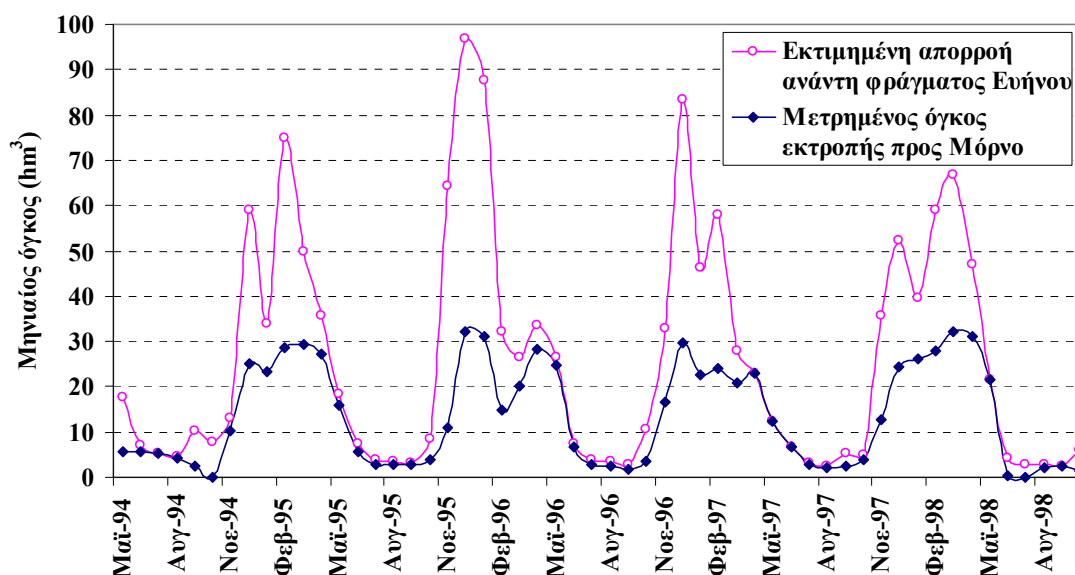
Με βάση τα παραπάνω, υπολογίστηκαν οι ποσότητες που εκτράπηκαν από το πρόφραγμα, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδος και στην εξίσωση ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μόρνου (βλ. 5.2). Οι σχετικοί υπολογισμοί παρατίθενται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3: Στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του όγκου εκτροπής από τον Ευήνο προς τον Μόρνο, για την περίοδο Μαΐου-Σεπτεμβρίου 1995 (τιμές σε hm³)

	Μάιος	Ιούνιος	Ιούλιος	Αύγουστος	Σεπτέμβριος	Σύνολο
Απορροή στον Πόρο Ρηγανίου	34.0	12.7	8.0	7.2	19.9	
Φυσικό άνω όριο όγκου εκτροπής	22.7	8.5	5.3	4.8	13.2	
Συνολική εισροή στον Μόρνο	18.6	9.5	8.8	4.3	3.0	
Ελάχιστη ιστορική τιμή απορροής	2.4	3.7	1.7	0.0	0.7	
Εκτίμηση εργολάβου		16.9	9.2	2.9	0.0	29.0
Τελική εκτίμηση	11.1	5.8	5.3	4.3	2.3	28.8

Στο Σχήμα 3.2 συγκρίνονται το μηνιαίο δείγμα απορροής στη θέση Άγιος Δημήτριος και η χρονοσειρά με τις τιμές των όγκων εκτροπής για την περίοδο λειτουργίας του προφράγματος. Παρατηρείται ότι τις περιόδους χαμηλής υδροφορίας, το σύνολο σχεδόν της εκτιμημένης απορροής εκτρέπεται προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου, ενώ κατά τις περιόδους υψηλής υδροφορίας, και λόγω ανεπαρκούς παροχετευτικότητας της σήραγγας εκτροπής, ο υπολειπόμενος όγκος προφανώς υπερχειλίζει κατάντη του προφράγματος. Η τήρηση του εν λόγω φυσικού περιορισμού αποτελεί ισχυρή ένδειξη (όχι όμως και απόδειξη) της καταλληλότητας των υποθέσεων που έγιναν σχετικά με τον τρόπο μεταφοράς των μετρημένων παροχών στην θέση Πόρος Ρηγανίου στην θέση του φράγματος. Για καλύτερη επαλήθευση της ακολουθούμενης μεθοδολογίας, προτείνεται η απόκτηση ενός εύλογου δείγματος απορροής με βάση το υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα (βλ. 5.2), και η

σύγκρισή του με αντίστοιχο δείγμα που θα προκύψει με επεξεργασία και, εν συνεχεία, αναγωγή των μετρήσεων στην θέση Πόρος Ρηγανίου.



Σχήμα 3.2: Σύγκριση μηνιαίας απορροής στη θέση του φράγματος Αγίου Δημητρίου με τις ποσότητες που εκτράπηκαν προς τον ταμιευτήρα Μόρνο (τιμές σε hm^3)

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 3.3.2, τα πρωτογενή δεδομένα του σταθμού Πόρου Ρηγανίου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της απορροής ανάντη του ταμιευτήρα Ευήνου ελήφθησαν μέχρι τον Απρίλιο του 2001. Από την έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα και έκτοτε, ήτοι από τον Σεπτέμβριο του 2001, η απορροή ανάντη του φράγματος εκτιμήθηκε με επίλυση της μηνιαίας εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου (βλ. 5.2). Στο ενδιάμεσο διάστημα μήκους τεσσάρων μηνών, η απορροή του Ευήνου συμπληρώθηκε μέσω γραμμικής παλινδρόμησης με την αντίστοιχη μηνιαία απορροή του Μόρνο, με την οποία παρουσιάζει ισχυρή συσχέτιση. Η πλήρης χρονοσειρά, όπως προκύπτει από την ενοποίηση των επιμέρους δειγμάτων, υπάρχει στη βάση δεδομένων, ενώ τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό των στατιστικών μεγεθών δεν έχουν ληφθεί τα δεδομένα των ετών 1960-61 έως 1969-70 που, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζουν πάρα πολλές ελλείψεις.

Πίνακας 3.4: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Ευήνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1970-71 έως 2002-03 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	6.9	27.1	53.7	40.2	43.5	38.1	33.3	19.3	7.7	4.6	3.3	3.4	281.1
Τυπ. απόκλ.	5.7	18.9	36.3	25.0	23.7	18.5	12.7	7.6	2.7	1.4	0.9	1.7	79.1
Μέγιστο	27.1	77.7	167.2	111.7	100.3	99.1	64.8	33.4	16.1	7.3	5.9	10.3	414.7
Ελάχιστο	1.9	4.2	7.4	5.7	4.3	6.4	11.0	5.9	3.2	2.1	1.9	1.3	113.2

3.4 Απορροή λεκάνης Μόρνο

3.4.1 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Στην λεκάνη απορροής του Μόρνο δεν λειτουργεί σήμερα κανένας υδρομετρικός σταθμός. Στο παρελθόν έχουν λειτουργήσει δύο υδρομετρικοί σταθμοί στις θέσεις Στενό και Περιβόλι, που ήταν

εγκατεστημένοι ανάντη της θέσης του φράγματος. Συγκεκριμένα, στην θέση Στενό διατίθενται ημερήσιες σταθμημετρικές παρατηρήσεις από το 1950 έως το 1974, αραιές μετρήσεις παροχής από το 1950 έως το 1956 και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Αύγουστο του 1963 έως τον Οκτώβριο του 1968. Από την άλλη πλευρά, στην θέση Περιβόλι διατίθενται ημερήσιες παρατηρήσεις στάθμης από το 1964 έως το 1974, και συστηματικές υδρομετρήσεις κατά την περίοδο από τον Οκτώβριο του 1963 έως τον Οκτώβριο του 1968. Στα πλαίσια προηγούμενου ερευνητικού έργου του ΕΜΠ έγινε αξιολόγηση και επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων, με σκοπό την εξαγωγή των ημερήσιων δειγμάτων παροχής (Κουτσογιάννης και Τζεράνης, 1988· Μαμάσης και Τζεράνης, 1989). Επιπλέον, έγινε ενοποίηση των δειγμάτων και μεταφορά της παροχομετρικής πληροφορίας στην θέση του φράγματος Μόρνου, με χρήση κατάλληλων συντελεστών αναγωγής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1989).

Στα πλαίσια του έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του ποταμού Μόρνου, που τοποθετήθηκε στην παλαιά γέφυρα του δρόμου Λευκαδιτίου-Κονιάκου και ελέγχει περίπου το 70% των απορροών της λεκάνης ανάντη του φράγματος Μόρνου (Μαμάσης, 2004). Εξαιτίας της πολύ μικρής περιόδου λειτουργίας του εν λόγω υδρομετρικού σταθμού και της διενέργειας δύο μόλις πιλοτικών υδρομετρήσεων, δεν είναι ακόμα δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων.

3.4.2 Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Μόρνου

Από την επεξεργασία των δεδομένων των υδρομετρικών σταθμών στις θέσεις Στενό και Περιβόλι προέκυψε ένα αξιόπιστο δείγμα μηνιαίας απορροής μήκους δέκα υδρολογικών ετών, που καλύπτει τις περιόδους 1951-52 έως 1955-56 και 1963-64 έως 1967-68. Πρόκειται για τις περιόδους κατά τις οποίες πραγματοποιήθηκαν υδρομετρήσεις, οπότε ήταν δυνατή η εξαγωγή σχέσεων στάθμης-παροχής. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος συνοψίζονται στον Πίνακα 3.5. Από την έναρξη της λειτουργίας του ταμιευτήρα Μόρνου και έκτοτε, ήτοι από το υδρολογικό έτος 1979-80, η απορροή της υπολεκάνης ανάντη του φράγματος, έκτασης 588.1 km², εκτιμάται με επίλυση της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου σε μηνιαία βάση (βλ. 5.2). Η πλήρης χρονοσειρά απορροής υπάρχει στη βάση δεδομένων, ενώ τα κύρια στατιστικά χαρακτηριστικά της συνοψίζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.5: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1951-52 έως 1955-56 και 1963-64 έως 1967-68 (hm³) – Η χρονοσειρά προέκυψε από επεξεργασία υδρομετρικών δεδομένων στις θέσεις Στενό και Περιβόλι.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	15.6	39.4	51.0	62.2	58.1	38.5	34.0	23.3	13.3	6.0	3.9	4.2	349.6
Τυπ. απόκλ.	19.0	30.0	27.5	42.4	33.6	16.7	12.6	12.6	7.1	4.2	1.9	2.0	89.8
Μέγιστο	2.2	4.8	6.3	22.7	20.5	10.7	16.0	9.7	4.6	1.5	1.7	0.4	200.0
Ελάχιστο	60.2	93.6	90.8	131.5	127.8	65.5	51.3	44.8	28.4	16.6	7.0	6.9	461.0

Πίνακας 3.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μόρνου στην θέση του φράγματος για τα υδρολογικά έτη 1979-80 έως 2002-03 (hm³) – Η χρονοσειρά προέκυψε από επεξεργασία των δεδομένων υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	6.7	22.2	39.2	31.1	32.2	31.7	28.7	20.2	9.8	6.4	4.5	4.5	237.4
Τυπ. απόκλ.	5.8	15.5	26.7	21.3	18.4	15.4	8.6	8.0	3.7	2.8	3.2	3.1	82.9
Μέγιστο	23.2	63.1	104.0	78.0	74.3	67.1	45.3	34.9	16.3	11.3	11.2	11.8	418.6
Ελάχιστο	0.0	5.8	5.7	2.9	3.9	5.8	11.0	3.9	3.1	2.0	0.0	0.0	86.5

3.5 Απορροή λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

3.5.1 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Η λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού καταλαμβάνει συνολική έκταση 2042.6 km². Το κύριο υδατόρευμα αυτής, μαζί με ένα πλήθος δευτερευόντων κλάδων που συγκεντρώνουν τα νερά των μεγάλων καρστικών πηγών της περιοχής, τροφοδοτούν την λίμνη Υλίκη μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας Καρδίτσας και, στη συνέχεια, της Σήραγγας Καρδίτσας.

Ο σημαντικότερος υδρομετρικός σταθμός βρίσκεται στην Διώρυγα Καρδίτσας, ήτοι την έξοδο της λεκάνης, και ελέγχει το μεγαλύτερο ποσοστό (άνω του 90%) των επιφανειακών εισροών της Υλίκης. Ο εν λόγω σταθμός, όπου γίνεται καθημερινή καταγραφή της στάθμης νερού στην διώρυγα, ξεκίνησε να λειτουργεί από τα τέλη του 19ου αιώνα, μετά δηλαδή την ολοκλήρωση των έργων αποξήρανσης της Κωπαΐδας. Γενικά, στη μακρά περίοδο λειτουργίας του σταθμού υπήρξαν πολλές μεταβολές, τόσο στη διατομή της διώρυγας όσο και στη θέση και λειτουργία των διαφόρων σταθμημέτρων που είχαν κατά καιρούς τοποθετηθεί, κυρίως από τον Οργανισμό Κωπαΐδας. Οι τελευταίες επεμβάσεις χρονολογούνται στα τέλη του 1977, οπότε κατασκευάστηκε η λεγόμενη νέα διώρυγα. Έκτοτε, οι μετρήσεις πραγματοποιούνται επί της Συγκεντρωτικής Διώρυγας, περί τα 800 m ανάντη της σήραγγας, όπου η ΕΥΔΑΠ εγκατέστησε νέο σταθμήμετρο¹. Η αναγωγή της στάθμης σε παροχή γίνεται μέσω πινακοποιημένων τιμών που βασίζονται στην εξίσωση ομοιόμορφης ροής του Manning (σχέση 3.7). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο εκτίμησης των παροχών δίνονται από τον Μαμάση (2004).

Στα πλαίσια του έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης της διώρυγας Καρδίτσας, το οποίο τοποθετήθηκε στη γέφυρα της επαρχιακής οδού που οδηγεί στο Ακράϊφνιο και βρίσκεται ανάντη των υπάρχοντων σταθμημέτρων της ΕΥΔΑΠ (Μαμάσης, 2004). Ωστόσο, η σύγκριση των μετρήσεων στάθμης των δύο σταθμών (συμβατικού και αυτόματου) δείχνει σημαντικές αποκλίσεις, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου τιμών. Συνεπώς, δεν είναι ακόμα δυνατή η αξιοποίηση των διαθέσιμων δεδομένων.

Επισημαίνεται ότι στην λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχουν λειτουργήσει κατά το παρελθόν πολλοί ακόμη υδρομετρικοί σταθμοί, κυρίως στον άνω ρου αυτής. Στις αρχές του 1980, το ΙΓΜΕ εγκατέστησε ένα εκτεταμένο δίκτυο μέτρησης της παροχής κατά μήκος του Βοιωτικού Κηφισού και των κύριων παραποτάμων του, που τροφοδοτούνται από καρστικές πηγές ιδιαίτερα αξιόλογου υδατικού δυναμικού (Σχήμα 3.3). Εκτεταμένη ανάλυση των παραπάνω δεδομένων γίνεται στο σχετικό με την υδρολογική διερεύνηση της λεκάνης τεύχος (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004).

¹ Σημειώνεται ότι μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 υπήρχε και δεύτερο σταθμήμετρο, το οποίο λειτουργούσε υπό την εποπτεία του ΥΠΕΧΩΔΕ.



Σχήμα 3.3: Θέσεις υδρομετρικών σταθμών του ΙΓΜΕ σε πηγές (κύκλοι) και υδατορεύματα (τρίγωνα) της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού.

3.5.2 Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης

Το δείγμα μηνιαίας απορροής στην έξοδο της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού για το σύνολο των υδρολογικών ετών από το 1907-08 έως το 1989-90 προέρχεται από συστηματική διερεύνηση και επεξεργασία των ημερήσιων δεδομένων στάθμης (*Ρώτη κ.ά., 1990· Ρώτη και Ανυφαντή, 1992*). Τα στοιχεία των τελευταίων ετών λαμβάνονται απευθείας από την ΕΥΔΑΠ, υπό μορφή χρονοσειράς ημερήσιων όγκων απορροής, και μετατρέπονται άμεσα σε μηνιαίους όγκους, που είναι και το χρονικό βήμα ενδιαφέροντος για τα μαθηματικά μοντέλα του ερευνητικού έργου. Στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου, ενημερώθηκαν οι χρονοσειρές έως το υδρολογικό έτος 1999-00 (*Ευστρατιάδης κ.ά., 2000*), ενώ κατά την δεύτερη φάση έγινε νέα επικαιροποίηση για τρία ακόμη έτη, και το σύνολο των δεδομένων απορροής, σε ημερήσια και μηνιαία κλίμακα, καταχωρήθηκαν στην βάση δεδομένων.

Από τον Σεπτέμβριο του 1964 έως τον Νοέμβριο του 1967, οπότε δεν λειτούργησε η διώρυγα λόγω επισκευών, καθώς και από τον Οκτώβριο του 1976 έως τον Σεπτέμβριο του 1977, διάστημα κατά το οποίο κατασκευάστηκε η νέα διώρυγα, δεν υπάρχουν μετρήσεις στάθμης και, συνεπώς, δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της παροχής. Τα κενά της χρονοσειράς μηνιαίας απορροής συμπληρώθηκαν με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, θεωρώντας ότι η απορροή $Q(t)$ κατά τον μήνα t είναι μια συνάρτηση της μορφής:

$$Q(t) = a Q(t - 1) + b R(t) + c \quad (3.24)$$

όπου $Q(t - 1)$ η απορροή του προηγούμενου μήνα, $R(t)$ η τιμή της σημειακής βροχόπτωσης στην Αλίαρτο¹ κατά τον μήνα t , και a, b, c παράμετροι που εκτιμώνται με τυπικές στατιστικές μεθόδους (*Κουτσογιάννης, 1997, σ. 207-209*). Οι τιμές των παραμέτρων και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού, που πάντως δεν είναι ιδιαίτερα υψηλοί, δίνονται στον Πίνακα 3.7.

¹ Στην Αλίαρτο λειτούργησε μέχρι πρόσφατα (τέλη 2000), και υπό την εποπτεία της ΕΜΥ, ο παλαιότερος βροχομετρικός σταθμός της λεκάνης, για τον οποίο διατίθενται αξιόπιστα δεδομένα μηνιαίας βροχόπτωσης από το 1907. Παρόλο που το κριτήριο επιλογής του εν λόγω σταθμού είναι η παλαιότητά του, ώστε να υπάρχουν ταυτόχρονες μετρήσεις βροχόπτωσης και απορροής, μπορεί να θεωρηθεί αρκετά αντιπροσωπευτικός της διαίτας των κατακρημνισμάτων της λεκάνης.

Το τελικό δείγμα απορροής του Βοιωτικού Κηφισού καλύπτει μια περίοδο 96 πλήρων υδρολογικών ετών, από τον 1907-08 έως το 2002-03. Σημειώνεται ότι για λόγους που οφείλονται τόσο σε μια φαινόμενη τάση μείωσης των κατακρημισμάτων της λεκάνης όσο και στην κατασκευή σημαντικών υδροληπτικών έργων ανάντη, η απορροή του Βοιωτικού Κηφισού παρουσιάζει εμφανή πτωτική τάση, που θεωρείται στατιστικά σημαντική (*Nalbantis et al.*, 1993). Για τον λόγο αυτό, μόνο η τελευταία τριακονταετία θεωρείται αντιπροσωπευτική της δίαιτας των απορροών, όσον αφορά την λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη διαχείριση των υδατικών πόρων της λεκάνης καθώς και την εκτίμηση των επιφανειακών εισροών της Υλίκης (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004). Στον Πίνακα 3.8 δίνονται τα βασικά στατιστικά μεγέθη του πλήρους δείγματος απορροής, ενώ στον Πίνακα 3.9 δίνονται τα ίδια μεγέθη για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03.

Επισημαίνεται ότι κατά τους θερινούς μήνες, και σε ορισμένες περιπτώσεις από την αρχή της αρδευτικής περιόδου, η κοίτη του Βοιωτικού Κηφισού και των λοιπών υδατορευμάτων που συμβάλλουν στην Διώρυγα Καρδίτσας (με κυριότερο τον Μέλανα) φράσσονται μέσω πρόχειρων κατασκευών, και τα νερά τους διοχετεύονται στο αποστραγγιστικό δίκτυο της Κωπαΐδας ώστε να χρησιμοποιηθούν για αρδευτικούς σκοπούς. Επιπλέον, οι απολήψεις από τις γεωτρήσεις που αναπτύσσονται σε όλη την έκταση της λεκάνης, και οι οποίες οδηγούν ακόμη και σε υπερεκμετάλλευση του υπόγειου δυναμικού αυτής, αλλοιώνουν την φυσική δίαιτα των υδατικών πόρων της περιοχής, μειώνοντας την απόδοση των πηγών που, σε μέση ετήσια βάση, συνεισφέρουν πάνω από το 50% της απορροής. Κατά συνέπεια, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος, η παροχή που καταλήγει στην Υλίκη μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας δεν είναι φυσική.

Πίνακας 3.7: Παράμετροι πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και συντελεστές προσδιορισμού για την συμπλήρωση των κενών της μηνιαίας χρονοσειράς απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας.

Μήνας	Παράμετρος <i>a</i>	Παράμετρος <i>b</i>	Παράμετρος <i>c</i>	Συντελεστής προσδιορισμού
Οκτώβριος	0.588	0.092	7.895	0.492
Νοέμβριος	0.935	0.158	-3.290	0.582
Δεκέμβριος	0.983	0.312	-17.792	0.585
Ιανουάριος	0.632	0.308	0.899	0.712
Φεβρουάριος	0.677	0.432	-13.326	0.690
Μάρτιος	0.561	0.359	6.534	0.592
Απρίλιος	0.586	0.361	-8.090	0.742
Μάιος	0.446	0.164	-1.827	0.586
Ιούνιος	0.456	0.109	-1.268	0.513
Ιούλιος	0.374	0.059	-0.840	0.348
Αύγουστος	0.319	0.030	1.819	0.224
Σεπτέμβριος	0.817	0.075	7.843	0.428

Πίνακας 3.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας για την περίοδο 1907-08 έως 2002-03 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	21.4	30.7	46.1	59.5	62.4	66.8	46.5	24.2	11.9	4.1	3.5	12.8	386.5
Τυπ. απόκλ.	10.9	17.7	31.9	30.8	34.2	31.1	27.1	16.3	11.6	7.3	5.2	8.7	159.7
Μέγιστο	48.4	108.1	205.4	158.9	160.9	168.9	167.1	76.2	57.6	48.5	29.6	54.9	793.1
Ελάχιστο	0.0	6.5	9.0	14.9	3.5	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.5

Πίνακας 3.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού στην Διώρυγα Καρδίτσας για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 (hm³).

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

3.6 Απορροή λεκάνης Υλίκης

Εκτός από τον Βοιωτικό Κηφισό, μικρό μέρος της επιφανειακής τροφοδοσίας της Υλίκης προέρχεται και από επιφανειακούς υδατικούς πόρους της τοπικής της λεκάνης, έκτασης 424.0 km². Στην λεκάνη της Υλίκης δεν υπάρχουν καθόλου μετρήσεις παροχής στα υδατορεύματα που τροφοδοτούν την λίμνη, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των απευθείας εισροών λόγω επιφανειακής απορροής. Ως εκ τούτου, η εκτίμηση των εν λόγω εισροών είναι αναγκαστικά χονδροειδής, καθώς βασίζεται αποκλειστικά σε παραδοχές και καθόλου σε μετρήσεις.

Με βάση ένα σύνολο εύλογων παραδοχών, η συνεισφορά της λεκάνης της Υλίκης εκτιμάται ως το 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, σε μέση ετήσια χρονική κλίμακα. Χονδροειδώς, μπορεί να θεωρηθεί ότι ακόμη και σε κλίμακα μήνα, η συνολική απορροή της Υλίκης προκύπτει με προσαύξηση κατά 6% την μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας. Η εν λόγω μεθοδολογία προτάθηκε από τους *Κουτσογιάννη και Ναλμπάντη* (1989) και ακολουθήθηκε έκτοτε σε όλες τις μελέτες που απαιτούν την κατάρτιση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της λίμνης (βλ. 5.3.3). Εκτενής διερεύνηση που έγινε στα πλαίσια του έργου επαληθεύει την παραπάνω άποψη (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004).

3.7 Απορροή λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας

3.7.1 Υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα

Ο χειμάρρος Χάραδρος καθώς και το μικρό ρέμα της Σταμάτας αποτελούν τους επιφανειακούς τροφοδότες του ταμιευτήρα Μαραθώνα. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής τους ανάντη του φράγματος ανέρχεται σε 118.0 km².

Στην λεκάνη δεν λειτούργησαν κατά το παρελθόν υδρομετρικοί σταθμοί. Στα πλαίσια του έργου, υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης του Χάραδρου, που τοποθετήθηκε σε απόσταση 500 μέτρων από το διυλιστήριο Κιούρκων (*Μαμάσης*, 2004). Έως τώρα, δεν έχουν πραγματοποιηθεί υδρομετρήσεις, ώστε να είναι δυνατή η κατάρτιση σχέσεων στάθμης-παροχής.

3.7.2 Κατάρτιση δείγματος μηνιαίας απορροής ανάντη φράγματος Μαραθώνα

Όπως εξηγείται στην ενότητα 5.3.4, η μηνιαία απορροή του Μαραθώνα εκτιμάται μέσω επίλυσης της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα, από την έναρξη λειτουργίας του τον Φεβρουάριο του 1933. Ωστόσο, για ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, και συγκεκριμένα μετά την ένταξη των έργων της Υλίκης στο σύστημα υδροδότησης της Αθήνας στα μέσα της δεκαετίας του 1950, η κατάρτιση του εν λόγω ισοζυγίου δεν ήταν δυνατή, καθώς δεν υπήρχε αντικειμενικός τρόπος εκτίμησης των ποσοτήτων νερού που προέρχονται από την Υλίκη. Η αδυναμία αυτή αποκαταστάθηκε μόλις τα τελευταία δύο έτη, οπότε τοποθετήθηκαν νέα παροχόμετρα τόσο κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης όσο και στο υδραγωγείο Μπογιατίου. Ωστόσο, οι μετρήσεις ακόμη δεν θεωρούνται αξιόπιστες (*Νασίκας*, 2003, προσωπική επικοινωνία).

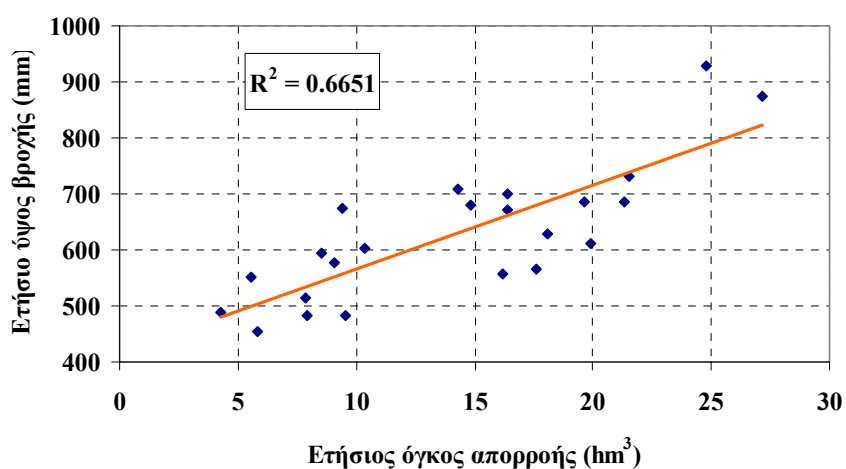
Τα βασικά στατιστικά μεγέθη της μηνιαίας απορροής του Μαραθώνα, όπως αυτή προκύπτει από το μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα των υδρολογικών ετών 1932-33 έως 1957-58 συνοψίζονται στον Πίνακα 3.10. Έκτοτε, η εκτίμηση της απορροής γίνεται μέσω γραμμικής συσχέτισης με την μηνιαία βροχόπτωση του σταθμού του φράγματος. Οι παράμετροι των μηνιαίων μοντέλων παλινδρόμησης δίνονται στον Πίνακα 3.11. Γενικά, η προσαρμογή του μοντέλου θεωρείται από κακή (π.χ. τον μήνα Μάιο) έως σχετικά ικανοποιητική. Σε ετήσια βάση, ο συντελεστής προσδιορισμού ανέρχεται στο 66.5% (Σχήμα 3.4).

Πίνακας 3.10: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Μαραθώνα για την περίοδο 1932-33 έως 1957-58 (hm^3) – Επεξεργασία δεδομένων υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.5	0.7	1.5	2.9	3.1	2.5	1.2	0.6	0.4	0.2	0.2	0.2	14.2
Τυπ. απόκλ.	0.6	1.0	1.3	2.4	2.4	2.0	0.9	0.3	0.4	0.1	0.2	0.2	6.5
Μέγιστο	2.3	4.5	4.2	9.2	10.6	9.7	5.0	1.3	2.3	0.4	1.1	0.8	27.1
Ελάχιστο	0.0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	4.3

Πίνακας 3.11: Παράμετροι γραμμικής συσχέτισης για την εκτίμηση της μηνιαίας απορροής του Μαραθώνα συναρτήσει της μετρημένης βροχόπτωσης στον σταθμό του φράγματος.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Κλίση	0.009	0.016	0.015	0.044	0.041	0.041	0.020	0.001	0.012	0.005	0.011	0.006
Τομή	-0.1	-0.5	-0.2	-1.7	-0.0	0.1	0.6	0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
Συντ. προσδ.	0.694	0.408	0.473	0.723	0.632	0.548	0.466	0.004	0.794	0.325	0.792	0.508



Σχήμα 3.4: Διάγραμμα διασποράς ετήσιας απορροής ταμιευτήρα Μαραθώνα συναρτήσει της ετήσιας βροχόπτωσης στον σταθμό του φράγματος (υδρολογικά έτη 1932-33 έως 1957-58).

3.8 Εκτίμηση επιφανειακού υδατικού δυναμικού υδροσυστήματος

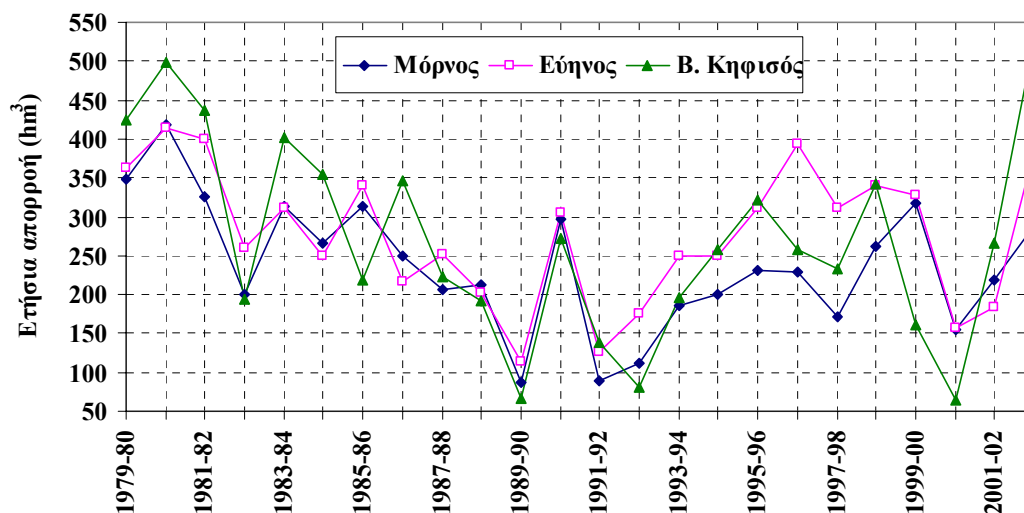
Στον Πίνακα 3.12 συνοψίζονται οι μέσες ετήσιες εισροές λόγω απορροής των τεσσάρων ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, όπως προκύπτουν βάσει της ανάλυσης του παρόντος κεφαλαίου. Ειδικότερα, η απορροή της Υλίκης εκτιμάται με προσάυξη κατά 6% της μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας. Σημειώνεται ότι το σχετικό δείγμα, βάσει του οποίου προκύπτει η μέση ετήσια τιμή, αναφέρεται στην περίοδο από το 1970-71 και έπειτα, ώστε να είναι αντιπροσωπευτικό της υφιστάμενης διαίτας της λεκάνης. Με την παραδοχή αυτή, το μέσο ετήσιο επιφανειακό υδατικό δυναμικό του συστήματος ανέρχεται σε 820 hm^3 .

Οι τελικές χρονοσειρές απορροής των τεσσάρων ταμιευτήρων υπάρχουν στη βάση δεδομένων. Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται οι απορροές των λεκανών Μόρνου, Ευήνου και Βοιωτικού Κηφισού για τα υδρολογικά έτη 1979-80 έως 2002-03, για τα οποία υπάρχει κοινό ιστορικό δείγμα. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι το δυναμικό των λεκανών αλλά και η διαίτα των απορροών είναι, σε γενικές γραμμές, παρόμοια. Μετά από μια σταθερά πτωτική τάση των απορροών κατά την δεκαετία του 1980, η οποία είχε ως αποκορύφωμα την έμμονη ξηρασία της περιόδου 1988-1994 που οδήγησε το σύστημα στα όρια της ασφαλούς λειτουργίας του, παρατηρήθηκε σταθερή ανάκαμψη έως τα τέλη μέσα της δεκαετίας του 1990. Ακολούθως προέκυψε μια νέα περίοδος εξαιρετικά χαμηλής υδροφορίας, που παρά και την ένταξη των έργων του Ευήνου στο σύστημα δημιούργησε την ανάγκη λήψης έκτακτων μέτρων, με ενεργοποίηση των εφεδρικών υδατικών πόρων (Υλίκη και γεωτρήσεις). Ωστόσο, τα τελευταία δύο υδρολογικά έτη παρατηρείται μια θεαματική ανάκαμψη, ιδιαίτερα στο ανατολικό σύστημα Υλίκης-Μαραθώνα, που κατά το τρέχον υδρολογικό έτος οδήγησε πολύ γρήγορα το σύστημα των ταμιευτήρων σε ιστορικό ρεκόρ αποθεμάτων.

Πίνακας 3.12: Χαρακτηριστικά μεγέθη λεκανών απορροής υδροσυστήματος.

Λεκάνη απορροής	Έκταση (km ²)	Μέση ετήσια απορροή (hm ³)
Μόρνου (ανάτη φράγματος)	588.1	237.4
Ευήνου (ανάτη φράγματος)	351.9	281.1
Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης ⁽¹⁾	2466.6	285.9
Χάραδρου (ανάτη φράγματος)	118.0	14.4

(1) Η λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού έχει έκταση 2042.6 km², ενώ η λεκάνη της Υλίκης 424 km².



Σχήμα 3.5: Διακύμανση ετήσιας απορροής λεκανών Μόρνου, Ευήνου και Βοιωτικού Κηφισού.

4 Εκτίμηση απωλειών ταμιευτήρων λόγω εξάτμισης

4.1 Σκοπός

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται η μεθοδολογία και οι επεξεργασίες των μετεωρολογικών δεδομένων της περιοχής μελέτης, με στόχο την παραγωγή μηνιαίων χρονοσειρών εξάτμισης των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, που είναι απαραίτητες για την κατάρτιση των υδατικών τους ισοζυγίων (βλ. Κεφάλαιο 5)

4.2 Μεθοδολογία υπολογισμού εξάτμισης

4.2.1 Γενικά

Σε αντίθεση με τη βροχόπτωση, η φυσική εξάτμιση είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί με αξιόπιστο τρόπο. Το σύνηθες όργανο μέτρησης είναι το εξατμισόμετρο, το οποίο υπολογίζει την απώλεια νερού από μια μικρή λεκάνη. Η διαφορά κλίμακας ως προς την έκταση και τον όγκο νερού της λεκάνης του εξατμισίμετρου σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη ενός ταμιευτήρα έχουν ως αποτέλεσμα την υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής της εξάτμισης. Επιπλέον συχνά παρατηρούνται προβλήματα που σχετίζονται με την τοποθέτηση, συντήρηση και ασφάλεια του οργάνου, τα οποία το καθιστούν εντελώς αναξιόπιστο. Κατά συνέπεια, είναι προτιμότερος ο έμμεσος τρόπος εκτίμησης της εξάτμισης, με βάση μετρήσεις άλλων μετεωρολογικών μεταβλητών που την επηρεάζουν. Από τις ποικίλες μεθοδολογίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία, η μέθοδος του Penman θεωρείται παγκοσμίως ως η πλέον τεκμηριωμένη και είναι αυτή η οποία εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των εξατμίσεων από τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Η μέθοδος, η οποία βασίζεται στην φυσική ερμηνεία του φαινομένου, περιγράφεται συνοπτικά στις ενότητες 4.2.2 και 4.2.3, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπουμε στους *Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο* (1999, σ. 165-232).

Η ανάγκη ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου που απαιτεί η μέθοδος Penman, περιορίζει το εύρος εφαρμογής της. Συχνά, παρατηρείται έλλειψη δεδομένων, με εξαίρεση της θερμοκρασία που είναι η ευκολότερα μετρούμενη μετεωρολογική μεταβλητή. Για τον λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί τρόποι εκτίμησης της εξάτμισης συναρτήσει μόνο της θερμοκρασίας, που χρησιμοποιήθηκαν για την επέκταση των δειγμάτων και την συμπλήρωση των ελλείψεων. Οι σχετικές μεθοδολογίες περιγράφονται στην ενότητα 4.2.4.

4.2.2 Φυσικό πλαίσιο

Η εξάτμιση, ήτοι η μετατροπή του νερού από την υγρή σε αέρια φάση, εξαρτάται από τρεις θεμελιώδεις παράγοντες:

- τη φυσική διαθεσιμότητα του νερού σε υγρή φάση·
- τη διαθεσιμότητα ενέργειας στην επιφάνεια του νερού για την πραγματοποίηση της εξάτμισης·
- την ευκολία με την οποία διαχέονται οι υδρατμοί στην ατμόσφαιρα.

Η φυσική διεργασία της εξάτμισης τροφοδοτείται ενεργειακά από την ηλιακή ακτινοβολία. Η ενεργή διαφορά της ηλιακής ακτινοβολίας (μικρού μήκους κύματος) και την γήινης υπέρυθρης (μεγάλου μήκους κύματος) ακτινοβολίας παρέχει την *λανθάνουσα θερμότητα* που χρειάζεται για την εξάτμιση

του νερού, ενώ ένα άλλο μέρος αυτής της διαφοράς αποδίδεται ως *αισθητή θερμότητα*, μέσω των μηχανισμών αγωγής και κατακόρυφης μεταφοράς. Στους υπολογισμούς της εξάτμισης ενδιαφέρει άμεσα η λανθάνουσα θερμότητα και έμμεσα η ενέργεια που προσλαμβάνεται από τον ήλιο, καθώς και η καθαρή ενέργεια που εγκαταλείπει την γη.

Η καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας, R_n (σε $\text{kJ/m}^2/\text{ημέρα}$), είναι η διαφορά της προσπίπτουσας από την ανακλώμενη ακτινοβολία, δηλαδή:

$$R_n = S_n - L_n \quad (4.1)$$

Η ενέργεια που προσλαμβάνεται από τον ήλιο, S_n , εξαρτάται από την *ροή ηλιακής ενέργειας* στο όριο της ατμόσφαιρας σε παράλληλο με την επιφάνεια της γης επίπεδο. Σε ημερήσια βάση, η τελευταία είναι αστρονομικό μέγεθος που εξαρτάται από την ημέρα του έτους, J , και το γεωγραφικό πλάτος, φ , του σημείου αναφοράς. Ειδικότερα, η ημέρα του έτους είναι αδιάστατος δείκτης που κυμαίνεται μεταξύ 1 και 365, ξεκινώντας από την 1η Ιανουαρίου. Σε μηνιαία βάση, χρησιμοποιείται εναλλακτικά η αντιπροσωπευτική μέρα, που είναι προφανώς η μεσαία κάθε μήνα (Πίνακα 4.1).

Πίνακας 4.1: Αντιπροσωπευτικές ημέρες κάθε μήνα για τον υπολογισμό της μέσης διάρκειας ημέρας και της μέσης μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας.

Μήνας	Ημέρα	Αριθμός ημέρας (J)	Μήνας	Ημέρα	Αριθμός ημέρας (J)
Ιανουάριος	17	17	Ιούλιος	17	198
Φεβρουάριος	15	46	Αύγουστος	16	228
Μάρτιος	16	75	Σεπτέμβριος	15	258
Απρίλιος	15	105	Οκτώβριος	16	289
Μάιος	15	135	Νοέμβριος	15	319
Ιούνιος	11	162	Δεκέμβριος	11	345

Η ροή ηλιακής ενέργειας, γνωστή και ως *εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία*, συμβολίζεται με S_0 (σε $\text{kJ/m}^2/\text{ημέρα}$) και δίνεται από την σχέση:

$$S_0 = \frac{24 I_s d_r}{\pi} (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_s \cos \varphi \cos \delta) \quad (4.2)$$

Τα αστρονομικά μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της S_0 είναι:

- η *ηλιακή σταθερά*, με τιμή $I_s = 4921 \text{ KJ/m}^2/\text{h}$.
- η *εκκεντρότητα*, d_r (αδιάστατη), που είναι συνάρτηση της ημέρας J και δίνεται από την προσεγγιστική εξίσωση:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (4.3)$$

- η *ηλιακή απόκλιση*, δ (σε rad), που είναι συνάρτηση της ημέρας J και του γεωγραφικού πλάτους, φ , και δίνεται από την προσεγγιστική εξίσωση:

$$\delta = 0.4093 \left(\cos \frac{2\pi}{365} J - 2.98 \right) \quad (4.4)$$

- η *γωνία ώρας δύσης του ηλίου*, ω_s (σε rad), που είναι συνάρτηση του γεωγραφικού πλάτους, φ , και της ηλιακής απόκλισης, δ , και δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_s = \arccos (-\tan \varphi \tan \delta) \quad (4.5)$$

- η *αστρονομική διάρκεια της ημέρας*, N (σε ώρες) που δίνεται από τη σχέση:

$$N = (24 / \pi) \omega_s \quad (4.6)$$

Η καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων, S_n , η οποία φτάνει στο έδαφος αφού διασχίσει την ατμόσφαιρα, είναι προφανώς ποσοστό της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας, S_0 , και εξαρτάται από τον βαθμό ηλιοφάνειας και τον βαθμό ανακλαστικότητας του εδάφους. Ο βαθμός ηλιοφάνειας ποσοτικά αποδίδεται από την *σχετική ηλιοφάνεια*, n / N , όπου n ο πραγματικός αριθμός των ωρών ηλιοφάνειας κατά την περίοδο που εξετάζεται (ημέρα, μήνας) και N ο θεωρητικός αριθμός, ήτοι η αστρονομική διάρκεια της ημέρας. Η μεταβλητή n είναι μια τυπική μετεωρολογική παράμετρος, που εξαρτάται από την παρουσία ή όχι νεφών, ενώ η μεταβλητή N είναι αστρονομικό μέγεθος, που δίνεται από την (4.6). Τέλος, ο βαθμός ανακλαστικότητας του εδάφους αποδίδεται ποσοτικά από την *λευκαύγεια*, α , που είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών. Για την περίπτωση εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια, η τυπική τιμή της λευκαύγειας του νερού είναι $\alpha = 0.08$.

Η καθαρή ακτινοβολία βραχέων κυμάτων εκτιμάται από την σχέση (σε $\text{kJ/m}^2/\text{ημέρα}$):

$$S_n = (1 - \alpha) f_s S_0 \quad (4.7)$$

όπου f_s αδιάστατος συντελεστής απορρόφησης της ακτινοβολίας βραχέων κυμάτων από την ατμόσφαιρα, που εκτιμάται από την ακόλουθη σχέση του Prescott:

$$f_s = 0.25 + 0.50 n / N \quad (4.8)$$

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα, ήτοι η ακτινοβολία μακρών κυμάτων, διέπεται από τον νόμο θερμικής ακτινοβολίας των Stefan-Boltzman, ήτοι:

$$L_0 = \varepsilon \sigma (T + 273)^4 \quad (4.9)$$

όπου L_0 ο ρυθμός εκπομπής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας, T η θερμοκρασία της επιφάνειας του σώματος που εκπέμπει (εκφρασμένη εδώ σε $^{\circ}\text{C}$), σ παγκόσμια σταθερά, γνωστή ως *σταθερά Stefan-Boltzman*, και ε αδιάστατο μέγεθος που εξαρτάται από το υλικό του σώματος (για ιδεατό μελανό σώμα $\varepsilon = 1$).

Στην περίπτωση της γης, μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης γυρίζει πίσω, μετά από απορρόφησης του από τα αέρια θερμοκηπίου και τα σύννεφα και στη συνέχεια επανεκπομπή του από την ατμόσφαιρα προς την επιφάνεια της γης. Κατά συνέπεια, η *καθαρή γήινη ακτινοβολία*, L_n , ήτοι η καθαρή ακτινοβολία που διαφεύγει από το έδαφος, εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, και συγκεκριμένα την σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας και την σχετική ηλιοφάνεια. Ο υπολογισμός της σε $\text{kJ/m}^2/\text{ημέρα}$, που είναι προφανώς πιο πολύπλοκος σε σχέση με τον ιδεατό νόμο των Stefan-Boltzman, γίνεται μέσω της σχέσης:

$$L_n = \varepsilon_n f_L \sigma (T + 273)^4 \quad (4.10)$$

όπου ε_n αδιάστατο μέγεθος που εκφράζει την καθαρή ικανότητα θερμικής εκπομπής, f_L ο συντελεστής νέφωσης (αδιάστατος), σ η σταθερά Stefan-Boltzman που ισούται με $4.9 \times 10^{-6} \text{ KJ/m}^2 \text{ K}^4$ ημέρα, και T η θερμοκρασία του αέρα (σε $^{\circ}\text{C}$).

Η *καθαρή ικανότητα θερμικής εκπομπής* υπολογίζεται συναρτήσει της τάσης των υδρατμών, e (σε hPa), με βάση την ακόλουθη εμπειρική σχέση του Brunt:

$$\varepsilon_n = 0.56 - 0.08 \sqrt{e} \quad (4.11)$$

Ο *συντελεστής νέφωσης* εκτιμάται από την σχέση:

$$f_L = 0.1 + 0.9 n / N \quad (4.12)$$

Η *τάση των υδρατμών*, e , συναρτήσει της οποίας εκτιμάται η καθαρή ικανότητα θερμικής εκπομπής, είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας του αέρα, T (σε $^{\circ}\text{C}$), και της σχετικής υγρασίας, U , και δίνεται από τη σχέση:

$$e = e^* U \quad (4.13)$$

όπου e^* η τάση κορεσμού των υδρατμών (σε hPa), που εξαρτάται από την θερμοκρασία του αέρα, T , και υπολογίζεται ως:

$$e^* = 6.11 \exp\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3}\right) \quad (4.14)$$

Με συνδυασμό των παραπάνω, είναι δυνατός ο σχετικά ακριβής προσδιορισμός της ολικής καθαρής ενέργειας ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας είναι η λεγόμενη διαθέσιμη ενέργεια, A , ήτοι η ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε αισθητή, H , και λανθάνουσα, λ , θερμότητα, δηλαδή:

$$R_n \approx A = H + \lambda \quad (4.15)$$

Η λανθάνουσα ενέργεια, λ , καταναλώνεται για την πραγματοποίηση της φυσικής διεργασίας της εξάτμισης. Η τελευταία, εκφρασμένη σε όρους ισοδύναμου ύψους νερού ανά μονάδα χρόνου, δίνεται από την σχέση:

$$E = \frac{\lambda}{\rho \lambda} \quad (4.16)$$

όπου λ η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης (σε kJ/kg), που εξαρτάται από την θερμοκρασία στην επιφάνεια του νερού, T_s (σε °C), και δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = 2501 - 2.361 T_s \quad (4.17)$$

και ρ η πυκνότητα του νερού, που είναι ίση με 1000 g/m³.

Ο προσδιορισμός των μεταβλητών H και λ , ήτοι ο επιμερισμός της διαθέσιμης ενέργειας σε αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα συνιστά το πιο δύσκολο τμήμα της μαθηματικής περιγραφής του φαινομένου της εξάτμισης. Η προσέγγιση που ακολουθείται συνίσταται στην θεώρηση της διαδικασίας μεταφοράς των υδρατμών μέσω του ανέμου καθώς και της θερμότητας ως διεργασιών διάχυσης, που διέπονται από νόμους μηχανικής των ρευστών. Η αναλυτική περιγραφή των σχετικών εξισώσεων δίνεται από τους Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο (1999, σ. 181-187).

4.2.3 Εκτίμηση εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια με την μέθοδο Penman

Η φερόνυμη μέθοδος ανήκει στην κατηγορία των λεγόμενων αναλυτικών τεχνικών που περιγράφουν τον πλήρη μηχανισμό του φαινομένου της εξάτμισης, θεωρείται δε επιστημονικά ως η πλέον αξιόπιστη. Ο Penman (1948), συνδυάζοντας την εξίσωση ενεργειακού ισοζυγίου στην επιφάνεια της γης (4.15) με τις εξισώσεις διάχυσης των υδρατμών και αισθητής θερμότητας, καταλήγει στην ακόλουθη σχέση υπολογισμού του ύψους εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια, εκφρασμένου σε mm/ημέρα:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} F(u) D \quad (4.18)$$

όπου Δ η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού, γ ο ψυχομετρικός συντελεστής, R_n η καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας, $F(u)$ η συνάρτηση ανέμου και D το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών. Συγκεκριμένα:

Η κλίση της καμπύλης πίεσης κορεσμού των υδρατμών, Δ (σε hPa/°C), είναι συνάρτηση της πίεσης κορεσμού, e^* , και δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta = \frac{4098 e^*}{(T + 237.3)^2} \quad (4.19)$$

Ο ψυχομετρικός συντελεστής, γ (σε hPa/°C), εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση, p (σε hPa), και την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης, λ , και δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = 1.63 p / \lambda \quad (4.20)$$

Η ατμοσφαιρική πίεση, p (σε hPa), είναι συνάρτηση του υψομέτρου, z (σε m), και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$p = 1013 (1 - 2.218 \times 10^{-5} z)^{5.256} \quad (4.21)$$

Η καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας, R_n , υπολογίζεται συναρτήσει των αστρονομικών μεγεθών, με βάση της διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 4.2.2.

Η συνάρτηση ανέμου, $F(u)$, η οποία ισχύει για οποιαδήποτε πυκνότητα αέρα και πίεση, δίνεται από την εξίσωση:

$$F(u) = \frac{43.6}{T + 275} u \quad (4.22)$$

όπου u η ταχύτητα ανέμου στα 2 m (σε m/s).

Τέλος, το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών, D (σε hPa), υπολογίζεται ως η διαφορά:

$$D = e^* - e \quad (4.23)$$

Κατά συνέπεια, για την εφαρμογή της μεθόδου Penman σε ημερήσια βάση απαιτούνται τα ακόλουθα δεδομένα:

- το γεωγραφικό πλάτος αναφοράς, φ (σε rad).
- ο δείκτης της ημέρας του έτους, J .
- το υψόμετρο z (σε m).
- η μέση θερμοκρασία του αέρα, T (σε °C).
- η μέση σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, U (%).
- οι ώρες ηλιοφάνειας, n .
- η μέση ταχύτητα του ανέμου, u (σε m/s), μετρημένη σε ύψος 2 m από το έδαφος.

Σημειώνεται ότι αν η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται σε τυχαίο ύψος z_1 , τότε η αναγωγή της τελευταίας στο ύψος αναφοράς $z_2 = 2$ m γίνεται με την παραδοχή λογαριθμικής κατανομής του πεδίου ταχυτήτων, βάσει της σχέσης:

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right)} \quad (4.24)$$

όπου z_0 παράμετρος τραχύτητας, με τυπικές τιμές για υδάτινη επιφάνεια μεταξύ 0.01 και 0.06 cm.

Εφόσον οι υπολογισμοί γίνονται σε μηνιαία βάση, τότε χρησιμοποιείται η αντιπροσωπευτική ημέρα του μήνα (Πίνακας 4.1) και οι μετεωρολογικές μεταβλητές εισάγονται ως μέσες μηνιαίες τιμές. Το αποτέλεσμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με το πλήθος των ημερών του αντίστοιχου μήνα.

4.2.4 Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων εξάτμισης

Ένα συχνό πρόβλημα που προκύπτει κατά την εφαρμογή της μεθόδου Penman είναι η ύπαρξη όλων των μετεωρολογικών δεδομένων πλην της θερμοκρασίας μόνο για μικρά χρονικά διαστήματα. Συνεπώς, το δείγμα εξάτμισης που προκύπτει έχει μικρό μήκος, ίσο με το ελάχιστο κοινό μήκος των δειγμάτων των τεσσάρων μετεωρολογικών μεταβλητών. Είναι ωστόσο δυνατό, χρησιμοποιώντας το

κατά κανόνα πολύ μεγαλύτερο δείγμα της θερμοκρασίας, να γίνει συμπλήρωση ή επέκταση του αντίστοιχου δείγματος εξάτμισης, βάσει δύο εμπειρικών μεθόδων.

Η πρώτη μέθοδος συνίσταται στην κατασκευή του λεγόμενου *βρόχου εξάτμισης*, ήτοι του διαγράμματος εξάτμισης-θερμοκρασίας σε μέση μηνιαία κλίμακα, για την περίοδο όπου υπάρχουν πλήρεις χρονοσειρές όλων των μετεωρολογικών μεταβλητών. Η εκτίμηση της εξάτμισης γίνεται συναρτήσει μόνο της θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τον άνω κλάδο του βρόχου για τους εαρινούς και τον κάτω για τους φθινοπωρινούς μήνες. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα μόνο εφόσον η θερμοκρασία βρίσκεται εκτός των ορίων του βρόχου, είναι δηλαδή υψηλότερη από την ελάχιστη μέση μηνιαία ή χαμηλότερη από την μέγιστη μέση μηνιαία. Διαφορετικά, γίνεται επέκταση του βρόχου από τα δύο άκρα του με τη μέθοδο της διχοτόμου.

Μια ακριβέστερη μέθοδος βασίζεται στην εφαρμογή μια παραμετρικής σχέσης της μορφής:

$$E = \frac{aS_0 - b}{1 - cT} \quad (4.25)$$

όπου S_0 η εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία, που είναι αστρονομικό μέγεθος και υπολογίζεται με βάση την διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 4.2.2, και a , b και c παράμετροι. Στην περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμο δείγμα εξάτμισης κατά Penman, οι τελευταίες εκτιμώνται μέσω βελτιστοποίησης, ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ των τιμών εξάτμισης που υπολογίζονται αναλυτικά και αυτών που προκύπτουν με εφαρμογή της (4.25).

4.3 Χρονοσειρές εξάτμισης ταμιευτήρων

4.3.1 Γενικό πλαίσιο εργασιών

Η ανάγκη ύπαρξης ταυτόχρονων μετρήσεων θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας ανέμου, καθιστούσε μέχρι πρόσφατα προβληματική την εφαρμογή της μεθόδου Penman για την εκτίμηση της επιφανειακής εξάτμισης των ταμιευτήρων του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Κατά την πρώτη φάση του έργου, αναζητήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμούς που βρίσκονταν έστω και σε μεγάλη απόσταση από τους ταμιευτήρες, με αποτέλεσμα την κατάρτιση δειγμάτων εξάτμισης κατά Penman, μειωμένης σχετικά αξιοπιστίας (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Τα δείγματα αυτά συμπληρώθηκαν και επεκτάθηκαν, όσο ήταν δυνατό, με εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων που περιγράφονται στην ενότητα 4.2.4.

Μετά την εγκατάσταση των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή όλων των ταμιευτήρων πλην του Ευήνου (*Μαμάσης*, 2004), είναι πλέον δυνατή η εκτίμηση της εξάτμισης με μεγάλη ακρίβεια, και μάλιστα όχι μόνο σε μηνιαία αλλά και σε ημερήσια βάση. Οι υπολογισμοί γίνονται αυτόματα, μέσω του προγράμματος *Υδρογνώμων*. Αν και οι νέες χρονοσειρές θεωρούνται πολύ πιο αξιόπιστες, τα παλιά δείγματα χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των μηνιαίων υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων, ενώ όπου υπάρχουν ελλείψεις χρησιμοποιούνται οι μέσες μηνιαίες τιμές. Στην συνέχεια περιγράφονται οι διαδικασίες υπολογισμού των χρονοσειρών εξάτμισης.

4.3.2 Μετεωρολογικοί σταθμοί και δεδομένα

Για την εφαρμογή της μεθόδου Penman πριν την έναρξη λειτουργίας των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών των ταμιευτήρων, αναζητήθηκαν μηνιαία δεδομένα μέσης θερμοκρασίας αέρα, μέσης σχετικής υγρασίας, ηλιοφάνειας και μέσης ταχύτητας ανέμου από μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης, τα χαρακτηριστικά των οποίων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Μετεωρολογικοί σταθμοί.

Όνομασία σταθμού	Λεκάνη απορροής	Μεταβλητές	Περίοδος μετρήσεων
Αγρίνιο	Αχελώου	Θερμοκρασία	10/1961 – 12/1990
		Σχετική υγρασία	10/1961 – 12/1990
		Ηλιοφάνεια	8/1979 – 6/1988
		Ταχύτητα ανέμου	1/1956 – 12/1990
Αλιάρτος	Βοιωτικού Κηφισού	Θερμοκρασία	1/1977 – 6/1997
		Σχετική υγρασία	1/1977 – 6/1992
		Ηλιοφάνεια	1/1977 – 6/1993
		Ταχύτητα ανέμου	1/1970 – 12/1987
Αεροδρόμιο Τατοίου	Αττικού Κηφισού	Θερμοκρασία	2/1951 – 12/1997
		Σχετική υγρασία	1/1956 – 12/1997
		Ταχύτητα ανέμου	1/1956 – 12/1997
Αράχοβα	Ευήνου	Θερμοκρασία	10/1977 – 4/1986
Γραμμένη Οξιά	Ευήνου	Θερμοκρασία	6/1971 – 9/1987
Δρυμόνας	Ευήνου	Θερμοκρασία	1/1974 – 9/1994
Λαμία	Σπερχειού	Θερμοκρασία	10/1962 – 12/1990
		Σχετική υγρασία	10/1962 – 12/1990
		Ηλιοφάνεια	1/1977 – 6/1993
		Ταχύτητα ανέμου	1/1977 – 6/1993
Λιδορίκι	Μόρνου	Θερμοκρασία	10/1970 – 6/1995
		Σχετική υγρασία	1/1977 – 6/1992
Νέα Φιλαδέλφεια	Αττικού Κηφισού	Ηλιοφάνεια	1/1977 – 12/1998
Πόρος Ρηγανίου	Ευήνου	Θερμοκρασία	11/1977 – 8/1982

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της μηνιαίας εξάτμισης κάθε ταμιευτήρα είναι:

Ταμιευτήρας Ευήνου

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Δρυμόνα (1974-94).
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1977-92).
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Λαμίας (1977-93).
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87).

Ταμιευτήρας Μόρνου

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1970-95).
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Λιδορικού (1977-92).
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Λαμίας (1977-93).
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87).

Λίμνη Υλίκη

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Αλιάρτου (1977-97).
- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Αλιάρτου (1977-92).
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Αλιάρτου (1977-93).
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Αλιάρτου (1977-87).

Ταμιευτήρας Μαραθώνα

- Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες στον σταθμό Τατοίου (1951-97).

- Μέσες μηνιαίες σχετικές υγρασίες στον σταθμό Τατοΐου (1956-97).
- Μηνιαίες ώρες ηλιοφάνειας στον σταθμό Νέας Φιλαδέλφειας (1977-98).
- Μέσες μηνιαίες ταχύτητες ανέμου στον σταθμό Τατοΐου (1956-97).

Εντός παρενθέσεως αναγράφεται η περίοδος παρατηρήσεων κάθε χρονοσειράς.

4.3.3 Επεξεργασία πρωτογενών μετεωρολογικών δεδομένων

Οι χρονοσειρές μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας διορθώθηκαν ώστε να αντιστοιχούν στην μέση στάθμη του αντίστοιχου ταμιευτήρα. Η αναγωγή έγινε με εφαρμογή της σχέσης:

$$T_r = T_s - c \frac{z_r - z_s}{100} \quad (4.26)$$

όπου T_r η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα στη μέση στάθμη του ταμιευτήρα, T_s η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα του σταθμού αναφοράς, z_r , z_s τα αντίστοιχα υψόμετρα και c η μέση μηνιαία θερμοβαθμίδα, ήτοι ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας συναρτήσει του υψομέτρου. Τυπικές τιμές της θερμοβαθμίδας για μεσογειακές λεκάνες κάτω του 45ου παραλλήλου, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του Giandotti, δίνονται στον Πίνακα 4.3. Η μέση στάθμη κάθε ταμιευτήρα και το απόλυτο υψόμετρο του αντίστοιχου σταθμού αναφοράς, όπου γίνεται η μέτρηση της θερμοκρασίας, δίνονται στον Πίνακα 4.4.

Στα πρωτογενή δείγματα μέσης μηνιαίας σχετικής υγρασίας και ωρών ηλιοφάνειας κάθε μήνα δεν απαιτήθηκε καμία προσαρμογή.

Τέλος, στα πρωτογενή δείγματα μέσης μηνιαίας ταχύτητας ανέμου απαιτήθηκε αναγωγή μόνο για τον έναν από τους δύο σταθμούς, και συγκεκριμένα το Τατόι. Αυτό έγινε επειδή το ανεμόμετρο του σταθμού είναι τοποθετημένο στα 11.2 m, αρκετά ψηλότερα δηλαδή από το υψόμετρο αναφοράς των 2 m. Η αναγωγή των μετρήσεων ταχύτητας ανέμου έγινε με εφαρμογή της λογαριθμικής σχέσης (4.24). Αντίθετα, δεν απαιτήθηκε ανάλογη προσαρμογή του δείγματος του σταθμού Αλιάρτου.

Οι μηνιαίες χρονοσειρές των πρωτογενών και επεξεργασμένων μετεωρολογικών δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της εξάτμισης των ταμιευτήρων έχουν καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων.

Πίνακας 4.3: Μέση μείωση της θερμοκρασίας ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου κατά Giandotti.

Μήνας	Θερμοβαθμίδα	Μήνας	Θερμοβαθμίδα
Ιανουάριος	0.31	Ιούλιος	0.61
Φεβρουάριος	0.38	Αύγουστος	0.59
Μάρτιος	0.56	Σεπτέμβριος	0.59
Απρίλιος	0.63	Οκτώβριος	0.53
Μάιος	0.63	Νοέμβριος	0.43
Ιούνιος	0.63	Δεκέμβριος	0.34

Πίνακας 4.4: Δεδομένα που απαιτούνται για την υψομετρική αναγωγή των θερμοκρασιών στην μέση στάθμη των ταμιευτήρων.

	Εύηνος	Μαραθώνας	Μόρνος	Υλίκη
Γεωγραφικό πλάτος, φ	38° 40'	38° 06'	38° 32'	38° 26'
Μέση στάθμη ταμιευτήρα, z_r (m)	480	200	377	70
Σταθμός μέτρησης της θερμοκρασίας	Δρυμόνας	Τατόι	Λιδορίκι	Αλιάρτος
Υψόμετρο σταθμού z_s (m)	900	237	537	110

4.3.4 Εφαρμογή μεθόδου Penman

Η μέθοδος Penman εφαρμόστηκε μόνο για τις περιόδους ταυτόχρονης διαθεσιμότητας των απαιτούμενων μετεωρολογικών μεταβλητών. Δεδομένου ότι τα πρωτογενή δεδομένα ελήφθησαν από σταθμούς που απέχουν σημαντικά από τους ταμιευτήρες (σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα χρησιμοποιήθηκαν κοινά πρωτογενή δείγματα), οι χρονοσειρές που προέκυψαν θεωρούνται σχετικά μειωμένης αξιοπιστίας.

Στον Πίνακα 4.5 δίνονται, για τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, οι μέσες τιμές των χρονοσειρών εξάτμισης, σε μηνιαία και ετήσια κλίμακα. Όπως είναι αναμενόμενο, οι απώλειες λόγω εξάτμισης αυξάνονται μεταβαίνοντας προς χαμηλότερα υψόμετρα, ήτοι από τον Εύηνο προς την Υλίκη, δεδομένου ότι αυξάνει η μέση θερμοκρασία.

Πίνακας 4.5: Μέσες τιμές ύψους εξάτμισης ταμιευτήρων (mm) – Εκτίμηση κατά Penman.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Εύηνος	66.2	31.7	22.6	26.7	38.0	70.1	107.3	145.7	190.6	212.3	174.7	123.2	1184.5
Μόρνος	67.3	32.9	23.5	27.1	39.6	71.2	110.7	154.9	195.6	215.5	185.7	126.7	1232.1
Υλίκη	70.2	35.7	27.2	31.2	42.2	73.6	118.1	168.0	214.0	227.5	196.2	132.6	1326.0
Μαραθώνας	72.1	35.7	25.9	31.2	43.8	80.5	119.1	176.7	203.7	221.4	191.7	131.2	1340.3

4.3.5 Συμπλήρωση και επέκταση δειγμάτων

Για την συμπλήρωση και επέκταση των χρονοσειρών εξάτμισης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Penman με βάση τα δείγματα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, εφαρμόστηκαν και συγκρίθηκαν οι εμπειρικές μεθοδολογίες που περιγράφονται στην ενότητα 4.2.4, ήτοι η μέθοδος του βρόχου εξάτμισης και η παραμετρική σχέση (4.25).

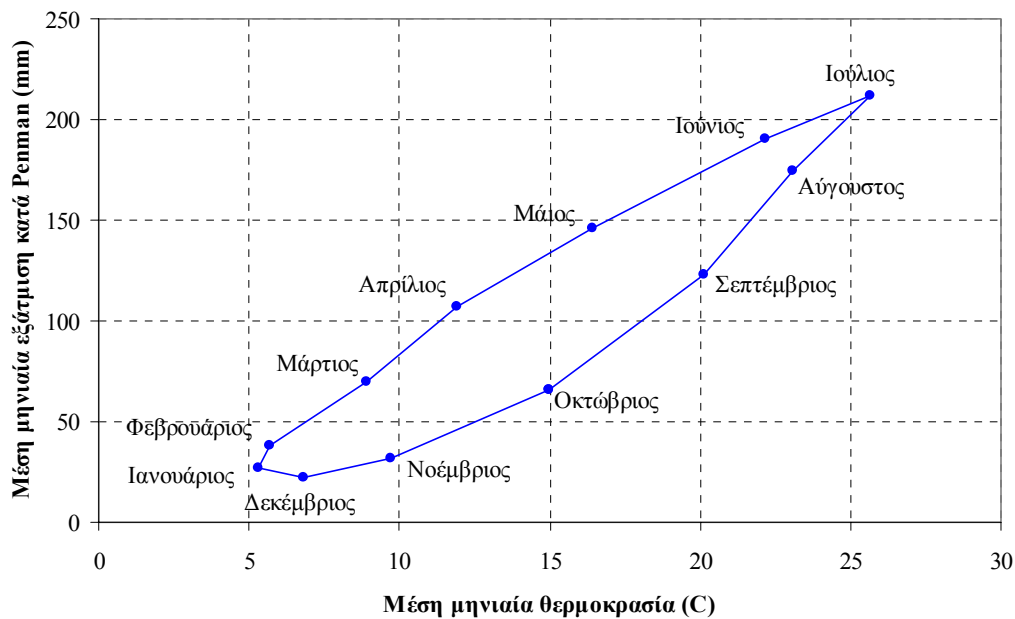
Οι βρόχοι εξάτμισης για τους τέσσερις ταμιευτήρες απεικονίζονται στα Σχήματα 4.1 έως 4.4. Τα εν λόγω διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν για την εμπειρική εκτίμηση της εξάτμισης, συναρτήσει της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας, χρησιμοποιώντας τον κάτω κλάδο τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες και τον πάνω κλάδο τους εαρινούς και θερινούς μήνες, και επεκτείνοντας κατά μήκος της διχοτόμου, στην περίπτωση θερμοκρασιών εκτός των ακραίων μέσων μηνιαίων τιμών. Επιπλέον, υπολογίστηκε το αντίστοιχο τυπικό σφάλμα, ήτοι η τετραγωνική ρίζα της μέσης τετραγωνικής απόκλισης των εξατμίσεων που υπολογίζονται με την παραπάνω μέθοδο σε σχέση με αυτές που εκτιμώνται με την αναλυτική μέθοδο Penman (βλ. Πίνακα 4.6). Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για όλους τους ταμιευτήρες πλην του Μαραθώνα, για τον οποίο η απεικόνιση της σχέσης εξάτμισης-θερμοκρασίας παρουσιάζει ακανόνιστη μορφή (βλ. Σχήμα 4.4). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την υψηλή μέση ετήσια τιμή (υψηλότερη της Υλίκης, που βρίσκεται σε χαμηλότερο υψόμετρο), εγείρονται αμφιβολίες σχετικά με την αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της εξάτμισης του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

Στον Πίνακα 4.6 δίνονται ακόμη οι βελτιστοποιημένες παράμετροι της εμπειρικής σχέσης (4.25) για κάθε ταμιευτήρα. Η βελτιστοποίηση έγινε μέσω του ενσωματωμένου επιλυτή (solver) του υπολογιστικού πακέτου Excel. Ως κριτήριο βελτιστοποίησης θεωρήθηκε το τυπικό σφάλμα, που σε όλες τις περιπτώσεις είναι σημαντικά μικρότερο (περίπου το μισό) σε σχέση με το αντίστοιχο σφάλμα της μεθόδου του βρόχου εξάτμισης. Χαρακτηριστικό είναι ότι το ελαχιστοποιημένο σφάλμα όλων των ταμιευτήρων πλην του Μαραθώνα κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Κατά συνέπεια, η παραμετρική μέθοδος θεωρήθηκε ότι δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, και υιοθετήθηκε για την συμπλήρωση και επέκταση των δειγμάτων εξάτμισης που υπολογίστηκαν κατά Penman. Με τον τρόπο αυτό προέκυψαν χρονοσειρές εξάτμισης σημαντικά μεγαλύτερου μήκους, και συγκεκριμένα:

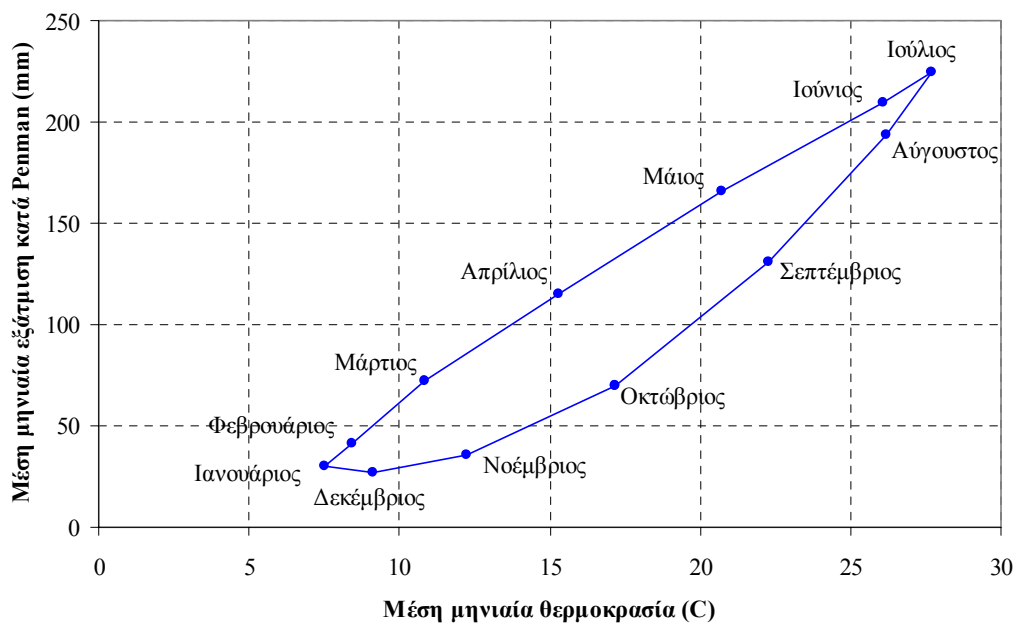
- για τον ταμιευτήρα Ευήνου από τον Ιανουάριο του 1974 έως τον Σεπτέμβριο του 1994.
- για τον ταμιευτήρα Μόρνου από τον Οκτώβριο του 1970 έως τον Ιούνιο του 1995.
- για την λίμνη Υλίκη από τον Ιανουάριο του 1977 έως τον Δεκέμβριο του 1997.
- για τον ταμιευτήρα Μαραθώνα από τον Φεβρουάριο του 1951 έως τον Δεκέμβριο του 1997.

Πίνακας 4.6: Παράμετροι εμπειρικής παραμετρικής σχέσης υπολογισμού εκτίμησης της εξάτμισης.

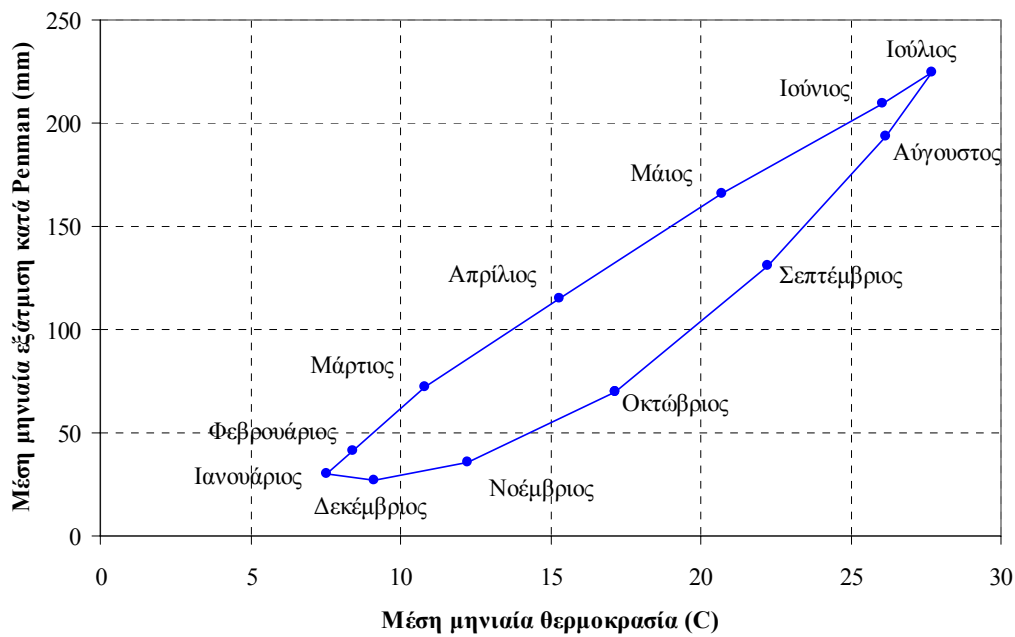
	Εύηνος	Μόρνος	Υλίκη	Μαραθώνας
Παράμετρος a ($\times 10^{-5}$)	10.176	9.713	9.728	10.160
Παράμετρος b	0.86367	0.78422	0.75322	0.75551
Παράμετρος c	0.02061	0.02110	0.02070	0.01994
Τυπικό σφάλμα παραμετρικής μεθόδου (mm)	0.763	0.717	0.728	1.040
Τυπικό σφάλμα βρόχου εξάτμισης (mm)	1.537	1.237	1.149	



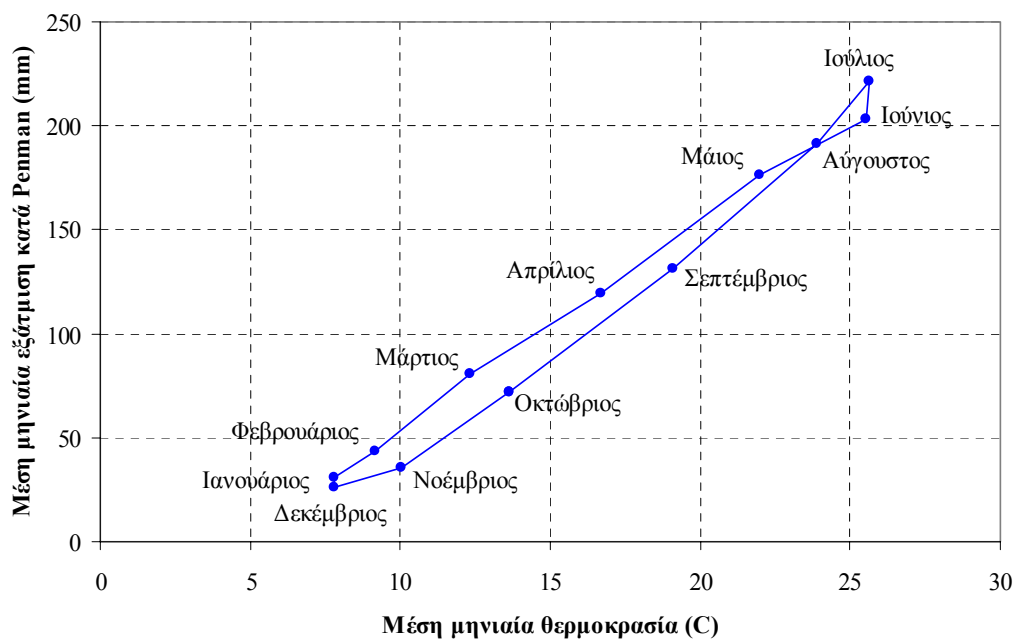
Σχήμα 4.1: Βρόχος εξάτμισης ταμιευτήρα Ευήνου.



Σχήμα 4.2: Βρόχος εξάτμισης ταμιευτήρα Μόρνου.



Σχήμα 4.3: Βρόχος εξάτμισης λίμνης Υλίκης.



Σχήμα 4.4: Βρόχος εξάτμισης ταμιευτήρα Μαραθώνα.

4.3.6 Εκτιμήσεις με βάση τα στοιχεία των αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών

Από τα μέσα του 2002, έχουν τεθεί σε λειτουργία τρεις αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί, στην γειτονιά των ταμιευτήρων Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα (Μαμάσης, 2004). Οι εν λόγω σταθμοί καταγράφουν μια πληθώρα μετεωρολογικών παραμέτρων, και οι μετρήσεις τους καταχωρούνται στην κεντρική βάση δεδομένων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του έργου. Τα εν λόγω δεδομένα, μετά από στοιχειώδη επεξεργασία (συνάθροιση) μετατρέπονται στην χρονική κλίμακα που ενδιαφέρει, και που στην προκειμένη περίπτωση, είναι η μηνιαία.

Η μηνιαία μετεωρολογική πληροφορία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εξάτμισης, με εφαρμογή της μεθόδου Penman. Σε αντίθεση με την έως τώρα προσέγγιση, ο υπολογισμός γίνεται με μεγάλη ακρίβεια, αφού όλες οι μεταβλητές (θερμοκρασία αέρα, σχετική υγρασία, ώρες ηλιοφάνειας, ταχύτητα ανέμου) μετρώνται στην θέση ενδιαφέροντος, και δεν προκύπτουν με μεταφορά δειγμάτων από σχετικά κοντινές έως και πολύ απομακρυσμένες θέσεις. Επισημαίνεται ότι για τους ταμιευτήρες Μόρνου και Υλίκης, οι τιμές που υπολογίστηκαν κατά το υδρολογικό έτος 2002-03 βρίσκονται κοντά στις αντίστοιχες μέσες μηνιαίες του Πίνακα 4.5. Το γεγονός αυτό συνιστά ένδειξη της αξιοπιστίας της έως τώρα προσέγγισης. Από την άλλη πλευρά, οι αντίστοιχες εκτιμήσεις για τον ταμιευτήρα Μαραθώνα βρίσκονται στο κάτω όριο των τιμών του δείγματος, κάτι που επιβεβαιώνει την υπογία υπερεκτίμησης της εξάτμισης (βλ. 4.3.5). Γενικά, θα ήταν σκόπιμη η αξιολόγηση των δύο προσεγγίσεων, με σύγκριση των τιμών εξάτμισης που υπολογίζονται με την παλιά και τη νέα μέθοδο. Αυτό βεβαίως θα μπορεί να γίνει μετά από εύλογο χρονικό διάστημα λειτουργίας του μετρητικού δικτύου (π.χ. σε ορίζοντα πέντε ετών), ώστε να υπάρχει ένα δείγμα ικανοποιητικού μεγέθους.

Οι χρονοσειρές εξάτμισης που τελικά χρησιμοποιούνται για την κατάρτιση των μηνιαίων υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων προκύπτουν με ενοποίηση δύο δειγμάτων, ήτοι:

- του «παλαιού» δείγματος εξάτμισης που υπολογίζεται με την μέθοδο Penman και με βάση στοιχεία που προέρχονται από τους σταθμούς που αναφέρονται στην ενότητα 4.3.2, και έχει συμπληρωθεί και επεκταθεί με εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης (4.25), και
- του «νέου» δείγματος εξάτμισης που επίσης υπολογίζεται με την μέθοδο Penman, αλλά με βάση τα στοιχεία των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών των ταμιευτήρων (ισχύει μόνο για τους ταμιευτήρες Μόρνου, Υλίκης και Μαραθώνα).

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος για κάθε έναν από τους τέσσερις ταμιευτήρες δίνονται στους Πίνακες 4.7 έως 4.10. Τονίζεται ότι οι τελικές χρονοσειρές δεν είναι πλήρεις, και ειδικά από τα μέσα ή τα τέλη της δεκαετίας του 1990 μέχρι πρόσφατα, είναι τελείως κενές. Για τους σκοπούς της ανάλυσης, ήτοι την κατάρτιση των υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων στα οποία η συνιστώσα της εξάτμισης δεν θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη, οι ελλείψεις συμπληρώθηκαν θέτοντας τις αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές.

Πίνακας 4.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Ευήνου για την περίοδο 1973-74 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	66.6	33.0	22.3	26.6	39.4	72.4	109.7	151.3	179.2	209.3	179.8	116.6	1213.0
Τυπ. απόκλ.	3.4	1.6	1.5	3.2	3.7	10.0	13.3	13.1	14.4	18.8	15.9	11.3	37.7
Μέγιστο	72.2	35.8	25.1	33.0	46.4	91.3	134.2	173.6	205.2	235.8	208.1	138.7	1260.0
Ελάχιστο	60.3	30.7	19.8	21.0	32.6	56.9	85.4	132.0	156.5	182.5	161.1	103.2	1146.9

Πίνακας 4.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Μόρνου για την περίοδο 1970-71 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	68.7	34.0	23.7	27.8	40.4	74.2	109.8	156.4	196.2	217.3	186.9	123.2	1259.6
Τυπ. απόκλ.	4.5	2.6	2.0	3.1	3.0	7.5	10.9	11.7	10.9	16.4	14.0	9.9	51.7
Μέγιστο	76.5	40.6	29.6	35.2	47.7	86.6	134.2	176.3	211.3	267.9	213.3	140.0	1392.3
Ελάχιστο	60.3	27.2	19.8	21.0	32.6	56.9	85.4	131.2	172.4	192.4	161.5	95.2	1162.5

Πίνακας 4.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Υλίκης για την περίοδο 1976-77 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	73.7	37.6	25.7	29.7	43.2	78.4	115.6	169.6	217.1	232.3	194.8	126.6	1343.2
Τυπ. απόκλ.	5.1	1.7	1.2	1.3	3.1	4.0	7.3	9.2	9.0	11.2	10.9	8.5	30.5
Μέγιστο	84.8	40.3	28.2	32.2	48.6	83.8	128.0	183.5	233.9	261.9	213.2	145.3	1406.5
Ελάχιστο	64.9	34.9	22.9	27.3	32.5	68.8	96.1	155.4	194.8	219.0	165.2	102.0	1277.6

Πίνακας 4.10: Βασικά στατιστικά μεγέθη ενοποιημένου δείγματος εξάτμισης Μαραθώνα για την περίοδο 1950-51 έως 2002-03 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	70.4	37.3	27.2	32.5	46.5	85.3	126.4	182.1	209.2	217.8	176.9	116.1	1328.4
Τυπ. απόκλ.	5.6	3.8	2.4	3.3	4.8	8.4	13.4	13.6	12.8	15.2	18.2	14.9	58.4
Μέγιστο	89.5	49.0	33.3	41.1	52.1	96.0	147.4	200.9	229.0	252.7	227.5	163.3	1432.8
Ελάχιστο	61.1	27.6	20.1	21.8	26.9	58.5	81.0	140.0	159.9	185.1	152.6	96.6	1152.6

4.3.7 Δεδομένα εξατμισίμετρου μετεωρολογικού σταθμού Μαραθώνα

Στο έντυπο της ΕΥΔΑΠ με κωδικό Ε15 και τίτλο "Παρατηρήσεις εξατμίσεως εις λίμνην Μαραθώνος", αναγράφονται οι μηνιαίες τιμές των υψών εξάτμισης τριών εξατμισίμετρων, τα οποία αναφέρονται ως "πλωτόν εξατμισίμετρον", "εξατμισίμετρον ξηράς παρά γραφείου" και "εξατμισίμετρον ξηράς εις όχθην λίμνης" τα οποία λειτούργησαν κατά την περίοδο 1931-38, ενώ έκτοτε μόνο το "εξατμισίμετρον ξηράς παρά γραφείου" συνέχισε να λειτουργεί. Βάσει των στοιχείων του εντύπου, η πραγματική εξάτμιση της λίμνης υπολογιζόταν με αναγωγή των μετρήσεων του εξατμισίμετρου ξηράς. Οι συντελεστές αναγωγής, οι οποίοι παρατίθενται στον Πίνακα 4.11, προήλθαν από γραμμική συσχέτιση της εξάτμισης του πλωτού εξατμισίμετρου, το οποίο καταργήθηκε το 1938, με την εξάτμιση του εξατμισίμετρου ξηράς για την περίοδο 1931-38.

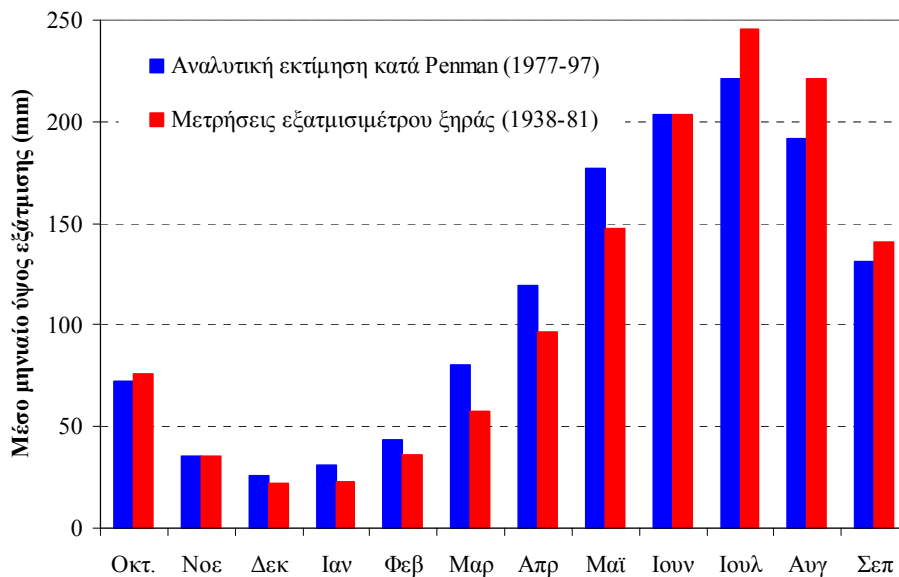
Πίνακας 4.11: Συντελεστές αναγωγής των μετρήσεων εξατμισίμετρου για τον υπολογισμό της πραγματικής εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

Μήνας	Συντελεστής αναγωγής	Μήνας	Συντελεστής αναγωγής
Ιανουάριος	1.067	Ιούλιος	0.626
Φεβρουάριος	0.662	Αύγουστος	0.708
Μάρτιος	0.629	Σεπτέμβριος	0.85
Απρίλιος	0.487	Οκτώβριος	0.855
Μάιος	0.468	Νοέμβριος	1.335
Ιούνιος	0.566	Δεκέμβριος	1.481

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις προηγούμενης μελέτης (Ρώτη κ.ά., 1990), κατά την οποία πραγματοποιήθηκαν και επί τόπου επισκέψεις στον σταθμό, και με βάση επιπλέον αναλύσεις, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Όπως προέκυψε από τις επί τόπου επισκέψεις, τις ημέρες που έβρεχε διαπιστώθηκε είτε ότι υπήρχε ασυμβατότητα των δεδομένων του βροχόμετρου και του εξατμισίμετρου είτε ότι δεν γινόταν σωστή αφαίρεση της βροχής από την εξάτμιση, αφού η εξάτμιση λαμβανόταν είτε ίση με μηδέν είτε ίση με την ένδειξη του οργάνου.

- Κατά το μεγαλύτερο διάστημα λειτουργίας του, ο σταθμός ήταν απροστάτευτος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται το δοχείο του εξατμισίμετρου ως πηγή πόσιμου νερού για σκυλιά, πουλιά και άλλα ζώα.
- Οι εξατμίσεις του εξατμισίμετρου ξηράς μετατρέπονταν σε πραγματικές βάσει των συντελεστών αναγωγής της λίμνης Μαραθώνα της περιόδου 1931-38, κατά την οποία λειτούργησε το πλωτό εξατμισίμετρο στη λίμνη. Αν και είναι αδύνατη η εκτίμηση της αξιοπιστίας του συγκεκριμένου οργάνου, έχει αποδειχθεί ότι γενικά τα πλωτά εξατμισίμετρα παρουσιάζουν προβλήματα αξιοπιστίας, κυρίως λόγω της εναλλαγής του νερού τους με αυτό της λίμνης, υπό μορφή σταγονιδίων. Κατά συνέπεια είναι αμφισβητήσιμη η αξιοπιστία των συντελεστών εξατμισίμετρου, κάτι που ενισχύεται από το γεγονός ότι το εξατμισίμετρο ξηράς έχει αλλάξει θέση αρκετές φορές από το 1938.
- Παρόλα αυτά, συγκρίνοντας τις μέσες μηνιαίες των πρωτογενών τιμών του εξατμισίμετρου με τις τιμές που προέκυψαν με την αναλυτική μέθοδο Penman, και που θεωρούνται ακριβείς, προκύπτει ότι οι μετρήσεις του εξατμισίμετρου προσεγγίζουν αρκετά ικανοποιητικά την πραγματικότητα (βλ. Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5: Σύγκριση μέσων μηνιαίων υψών εξάτμισης στον ταμιευτήρα Μαραθώνα με βάση τον αναλυτικό υπολογισμό κατά Penman και το δείγμα του εξατμισίμετρου

5 Υδατικά ισοζύγια ταμιευτήρων

5.1 Σκοπός

Ο κύριος σκοπός της κατάρτισης υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων είναι η παρακολούθηση της πορείας των αποθεμάτων και των λοιπών συνιστωσών του, όπως των φυσικών εισροών, που απαιτούνται για την επιχειρησιακή διαχείριση του συστήματος και την λήψη αποφάσεων. Η κατάρτιση των ισοζυγίων εξυπηρετεί και πρακτικούς λόγους. Εφόσον διατίθενται μετρήσεις ή εκτιμήσεις ως προς όλους πλην ενός όρους, είναι δυνατή η εκτίμησή του με επίλυση της εξίσωσης ισοζυγίου ως προς την άγνωστη συνιστώσα του. Συγκεκριμένα, για τους ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, η άγνωστη συνιστώσα ισοζυγίου αναφέρεται στην απορροή της ανάντη λεκάνης (ταμιευτήρες Ευήνου, Μόρνου και Μαραθώνα), και ειδικά όσον αφορά την Υλίκη στις απώλειές της λόγω υπόγειων διαφυγών, που είναι εξαιρετικά σημαντικές λόγω του διαπερατού υποβάθρου του πυθμένα και των τοιχωμάτων της λίμνης.

Η γενική εξίσωση υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα γράφεται:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t) \quad (5.1)$$

όπου $S(t)$ το απόθεμα του ταμιευτήρα, $I(t)$ το σύνολο των πάσης φύσεως εισροών λόγω απορροής, επιφανειακής βροχόπτωσης και τροφοδοσίας από ανάντη υδραγωγεία, $O(t)$ το σύνολο των πάσης φύσεως εκροών, απολήψεων και υδρολογικών απωλειών (λόγω εξάτμισης, υπερχειλίσης και υπόγειων διαφυγών) και t ο χρόνος. Για πρακτικούς λόγους, η εξίσωση ισοζυγίου διατυπώνεται σε διακριτή μορφή, ήτοι:

$$\Delta S_t = I_t - O_t \quad (5.2)$$

όπου ΔS_t η μεταβολή του αποθέματος του ταμιευτήρα κατά το χρονικό διάστημα (μήνα) t . Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμιευτήρα και η μηνιαία μεταβολή του, δηλαδή:

$$\Delta S_t = f_1(Z_{t+1}) - f_1(Z_t) \quad (5.3)$$

όπου Z_t η στάθμη του ταμιευτήρα την πρώτη ημέρα του μήνα t και Z_{t+1} η στάθμη την πρώτη ημέρα του επόμενου μήνα, και $S = f_1(Z)$ η σχέση στάθμης-αποθέματος του ταμιευτήρα, που προκύπτει με βάση την μεθοδολογία της ενότητας 5.2.2.

Οι τυπικές συνιστώσες ισοζυγίου ενός φυσικού ή τεχνητού ταμιευτήρα είναι η απορροή της ανάντη λεκάνης, η βροχόπτωση και οι απώλειες λόγω εξάτμισης, υπόγειων διαφυγών και υπερχειλίσης. Κατά κανόνα, η απορροή είναι η άγνωστη συνιστώσα του ισοζυγίου, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση (5.2). Η βροχόπτωση και η εξάτμιση υπολογίζονται με βάση το αντίστοιχο ισοδύναμο ύψος νερού, το οποίο είτε μετράται απευθείας (ύψος βροχόπτωσης) είτε εκτιμάται συναρτήσει άλλων στοιχείων (ύψος εξάτμισης), πολλαπλασιασμένο επί την μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα κατά το χρονικό βήμα αναφοράς. Για μηνιαία χρονικά βήματα, η τελευταία εκτιμάται ως το ημιάθροισμα:

$$\bar{A}_t = \frac{f_2(Z_t) + f_2(Z_{t+1})}{2} \quad (5.4)$$

όπου $A = f_2(Z)$ η σχέση στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα, που προκύπτει με βάση την μεθοδολογία της ενότητας 5.2.2.

Ως υπόγειες διαφυγές νοούνται οι πάσης φύσεως απώλειες νερού μέσω του πυθμένα, των τοιχωμάτων του ταμιευτήρα και του φράγματος. Η απευθείας μέτρηση των απωλειών είναι, προφανώς, αδύνατη. Για τον λόγο αυτό, οι διαφυγές εκτιμώνται μέσω εμπειρικών σχέσεων, συναρτήσεων της μέσης στάθμης του ταμιευτήρα. Τέλος, η υπερχειλίση αναφέρεται σε μη ελεγχόμενες εκροές νερού, που λαμβάνουν χώρα κατά την διάρκεια εξαιρετικών πλημμυρικών επεισοδίων. Εφόσον πρόκειται για τεχνητό ταμιευτήρα, η υπερχειλίση διοχετεύεται μέσω του υπερχειλιστή του φράγματος, και μπορεί να εκτιμηθεί εφόσον είναι γνωστή η σχέση στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία κατάρτισης των χρονοσειρών υδατικού ισοζυγίου των ταμιευτήρων της Αθήνας, ο τρόπος επικαιροποίησης αυτών κατά την επιχειρησιακή πλέον φάση λειτουργίας των σχετικών συνιστωσών του συστήματος υποστήριξης αποφάσεων που υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου (μετρητικό δίκτυο, βάση δεδομένων, λογισμικό *Υδρογνώμων*).

5.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων

5.2.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Από τους τέσσερις ταμιευτήρες του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας, μόνον αυτός της Υλίκης είναι φυσική λίμνη και χρησιμοποιείται σήμερα ως βοηθητικός υδατικός πόρος. Ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα χρησιμοποιείται κυρίως για την αποθήκευση νερού για λόγους ασφαλείας, λόγω της εγγύτητας του στην Αθήνα. Τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων και των φραγμάτων τους συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά ταμιευτήρων υδροδοτικού συστήματος Αθήνας.

	Εύηνος	Μόρνος	Υλίκη	Μαραθώνας
Έτος έναρξης πλήρους λειτουργίας	2001	1981	1957	1931
Έκταση λεκάνης απορροής (km ²) ⁽¹⁾	351.9	588.1	2466.6	118.0
Κατώτατη στάθμη υδροληψίας (m)	458.3	384.0	43.5	204.4
Στάθμη υπερχειλίσης (m)	505.0	435.0	79.8 ⁽²⁾	224.0 ⁽³⁾
Ολική χωρητικότητα (hm ³)	137.63	763.71	594.75	42.85
Ωφέλιμη χωρητικότητα (hm ³)	112.05	630.23	584.75	33.20
Νεκρός όγκος (hm ³)	25.58	133.48	10.00	9.65
Μέγιστη επιφάνεια (km ²) ⁽⁴⁾	3.60	19.93	27.74	2.57
Ύψος φράγματος από την θεμελίωση (m)	104	139		47
Υψόμετρο στέψης (m)	516.0	446.5		227.0
Μήκος στέψης (m)	600	815		285

(1) Η έκταση της λεκάνης απορροής αναφέρεται πάντοτε ανάντη του φράγματος, ενώ στην περίπτωση της Υλίκης περιλαμβάνει την τοπική λεκάνη τροφοδοσίας της λίμνης, έκτασης 424 km², καθώς και την λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2042.6 km².

(2) Κανονικά, η στάθμη υπερχειλίσης της Υλίκης βρίσκεται στα +77.7 m, υπάρχει ωστόσο περιθώριο αύξησης της αποθηκευτικής ικανότητας της λίμνης με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

(3) Κανονικά, η στάθμη υπερχειλίσης του Μαραθώνα βρίσκεται στα +223.0 m, υπάρχει ωστόσο περιθώριο αύξησης της αποθηκευτικής ικανότητας του ταμιευτήρα με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

(4) Η μέγιστη επιφάνεια αναφέρεται στην στάθμη υπερχειλίσης.

5.2.2 Μεθοδολογία κατασκευής καμπυλών ταμιευτήρων

Ως καμπύλες ταμιευτήρων νοούνται οι σχέσεις στάθμης-αποθέματος, $S = f_1(Z)$, και στάθμης-επιφάνειας, $A = f_2(Z)$. Οι συναρτήσεις f_1 και f_2 κατασκευάζονται με παρεμβολή μεταξύ ζευγών τιμών (Z_i, S_i) και (Z_i, A_i) , με τον ακόλουθο τρόπο.

Η σημειοσειρά στάθμης-επιφάνειας, ήτοι τα ζεύγη τιμών (Z_i, A_i) , προκύπτει με εμβαδομέτρηση των επιφανειών πάνω σε τοπογραφικό χάρτη (κοινό ή ψηφιακό). Συχνά, θεωρείται γραμμική μεταβολή της επιφάνειας συναρτήσει της στάθμης και εφαρμόζοντας απλές σχέσεις χωρικής ολοκλήρωσης υπολογίζεται ο αντίστοιχος όγκος ταμιευτήρα. Μια εναλλακτική, ακριβέστερη προσέγγιση είναι η υπόθεση σχέσης δύναμης μεταξύ επιφάνειας και στάθμης, ήτοι

$$A(Z) = A_1 \left(\frac{Z - Z_0}{Z_1 - Z_0} \right)^\lambda \quad (5.5)$$

όπου A_1 η επιφάνεια του ταμιευτήρα σε μια δεδομένη στάθμη Z_1 και Z_0 η κατώτερη στάθμη του ταμιευτήρα, στην οποία μηδενίζεται η επιφάνεια. Η παράμετρος λ της σχέσης (5.5) δεν θεωρείται ότι είναι αναγκαστικά σταθερή για όλες τις στάθμες, αλλά μπορεί να παίρνει διαφορετικές τιμές ανά ζώνες. Στη ζώνη μεταξύ των τιμών Z_1 και Z_2 , για τις οποίες η επιφάνεια του ταμιευτήρα έχει αντίστοιχα τις τιμές A_1 και A_2 , η τιμή του εκθέτη λ προσδιορίζεται εύκολα από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)}{\ln \left(\frac{Z_2 - Z_0}{Z_1 - Z_0} \right)} \quad (5.6)$$

που είναι συνέπεια της (5.5). Ο όγκος ΔS που περικλείεται ανάμεσα στις στάθμες Z_1 και Z_2 είναι:

$$\Delta S = \int_{Z_1}^{Z_2} A(Z) dZ \quad (5.7)$$

Μετά από πράξεις προκύπτει:

$$\Delta S = \frac{(Z_2 - Z_0) A_2 - (Z_1 - Z_0) A_1}{\lambda + 1} \quad (5.8)$$

Για την τυχούσα στάθμη Z στη ζώνη ανάμεσα στις στάθμες Z_1 και Z_2 , ο συνολικός όγκος είναι

$$S(Z) = S_1 - \frac{(Z_1 - Z_0) A_1}{\lambda + 1} + \frac{A_1}{(Z_1 - Z_0)^\lambda (\lambda + 1)} (Z - Z_0)^{\lambda + 1} \quad (5.9)$$

Θεωρώντας ότι η ισχύς της (5.9) επεκτείνεται προς τα κάτω μέχρι τη στάθμη Z_0 , προκύπτει ότι οι δύο πρώτοι όροι του δεύτερου μέλους της (5.9) ταυτίζονται με το $S(Z_0)$, το οποίο προφανώς έχει μηδενική τιμή, οπότε η (5.9) απλοποιείται στην ακόλουθη μορφή

$$S = a (Z - Z_0)^b \quad (5.10)$$

όπου $b = \lambda + 1$ και $a = A_1 / [(Z_1 - Z_0)^\lambda (\lambda + 1)]$. Εναλλακτικά, τα a και b μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τα γνωστά σημεία (Z_1, S_1) και (Z_2, S_2) , οπότε μετά από στοιχειώδεις υπολογισμούς προκύπτει:

$$b = \frac{\ln \left(\frac{S_2}{S_1} \right)}{\ln \left(\frac{Z_2 - Z_0}{Z_1 - Z_0} \right)}, \quad a = S_1 / (Z_1 - Z_0)^b \quad (5.11)$$

Η καμπύλη στάθμης-αποθέματος κατασκευάζεται ενώνοντας διαδοχικές συναρτήσεις της μορφής (5.10).

5.3 Συνιστώσες υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρων

5.3.1 Ταμιευτήρας Ευήνου

Τα έργα του Ευήνου, που περιλαμβάνουν το φράγμα και την σήραγγα εκτροπής προς τον ταμιευτήρα Μόρνου, τέθηκαν σε πλήρη λειτουργία τον Σεπτέμβριο του 2001. Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +458.3 m, η στάθμη υπερχειλίσσης στα +505.0 m, ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής του ανέρχεται σε 351.9 km².

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Ευήνου ελήφθησαν από τον κατασκευαστή του φράγματος (*Καραβοκύρης, 2000, προσωπική επικοινωνία*), ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.2. Οι τελικές εκτιμήσεις δίνονται στον Πίνακα 5.2. Βάσει των στοιχείων του πίνακα, και μέσω λογαριθμικής παρεμβολής, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (137.6 hm³), ο νεκρός όγκος (25.6 hm³) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (112.0 hm³).

Η απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας μεταφέρονται μέσω της σήραγγας Ευήνου-Μόρνου, μήκους 29.4 km. Η σήραγγα λειτουργεί υπό πίεση και έχει μεταβλητή παροχетеυτικότητα, εξαρτώμενη από την στάθμη του ταμιευτήρα Ευήνου (μέγιστη 27.0 m³/s). Η σήραγγα εκβάλλει στον ταμιευτήρα του Μόρνου, 10 m πάνω από την στάθμη υπερχειλίσσης του φράγματος (+445 m).

Πίνακας 5.2: Δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Ευήνου.

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)
410.0	0.000	0.00
420.0	0.060	0.27
425.0	0.100	0.66
430.0	0.370	1.73
440.0	0.690	6.97
450.0	1.048	15.62
460.0	1.410	27.89
470.0	1.820	44.01
480.0	2.301	64.59
490.0	2.784	89.99
500.0	3.300	120.39
505.0	3.600	137.63
510.0	3.900	156.38
520.0	4.477	198.24

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Ευήνου είναι:

Μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, η οποία κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.2, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμιευτήρα και η μηνιαία μεταβολή του.

Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η τελευταία υπολογίζεται μέσω της καμπύλη στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα, που

κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.2. Το ύψος βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα μετράται στον σταθμό του φράγματος που, ωστόσο, δεν είναι αξιόπιστος και, επιπλέον, έχει τεθεί εκτός λειτουργίας από τον Μάρτιο του 2003. Για τον λόγο αυτό, το ύψος βροχής μπορεί να εκτιμηθεί είτε με μεταφορά και αναγωγή του δείγματος του βροχομετρικού σταθμού Δρυμόνα, είτε μέσω γραμμικής συσχέτισης με άλλους σταθμούς.

Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Το ύψος εξάτμισης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την αναλυτική μέθοδο Penman ή την απλούστερη παραμετρική μέθοδο, εφόσον διατίθενται τα απαιτούμενα μετεωρολογικά δεδομένα από τον σταθμό του φράγματος ή όσο το δυνατόν κοντινότερους μετεωρολογικούς σταθμούς (βλ. 4.3). Διαφορετικά, χρησιμοποιούνται οι τυπικές μέσες μηνιαίες τιμές του Πίνακα 4.7.

Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω υπερχείλισης υπολογίζονται αθροίζοντας τα ημερήσια στοιχεία που προκύπτουν με βάση τις ημερήσιες τιμές της στάθμης υπερχείλισης και την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχείλιστή.

Εκτροπή προς Μόρνο: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που διοχετεύονται μέσω της σήραγγας εκτροπής προς τον ταμιευτήρα του Μόρνου προκύπτουν αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες που δίνονται από την ΕΥΔΑΠ.

Εκροές κατάντη του φράγματος: Για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων στα οικοσυστήματα και στο δέλτα του ποταμού από τη μείωση της ροής λόγω της λειτουργίας του ταμιευτήρα Ευήνου, προβλέπεται η διατήρηση μόνιμης παραμένουσας ροής κατάντη του φράγματος ίσης με $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, όση δηλαδή η μέση θερινή μηνιαία παροχή στη θέση αυτή. Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που διοχετεύονται κατάντη του φράγματος, για λόγους περιβαλλοντικής διαχείρισης, προκύπτουν αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες.

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Ευήνου επιλύεται ως προς την άγνωστη συνιστώσα του, που είναι η μηνιαία απορροή. Η τελευταία μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος διαιρώντας με την καθαρή έκταση της ανάντη λεκάνης, ήτοι την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος (351.9 km^2) μείον τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα για τον μήνα αναφοράς.

5.3.2 Ταμιευτήρας Μόρνου

Το φράγμα του Μόρνου κατασκευάστηκε μεταξύ των ετών 1972-1979, ενώ ο ταμιευτήρας τέθηκε για πρώτη φορά σε λειτουργία για την ύδρευση της Αθήνας το 1981. Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα $+384.0 \text{ m}$, η στάθμη υπερχείλισης στα $+435.0 \text{ m}$, ενώ η έκταση της λεκάνης απορροής του ανάντη του φράγματος ανέρχεται σε 588.1 km^2 .

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μόρνου ελήφθησαν από την ΕΥΔΑΠ, ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.2. Οι τελικές εκτιμήσεις δίνονται στον Πίνακα 5.3. Βάσει των στοιχείων του πίνακα, και μέσω λογαριθμικής παρεμβολής, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (763.7 hm^3), ο νεκρός όγκος (133.5 hm^3) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (630.2 hm^3). Σημειώνεται ότι, ακόμη και αν τα αποθέματα κατέλθουν κάτω από την στάθμη υδροληψίας, υπάρχει, θεωρητικά, η δυνατότητα χρήσης πλωτών αντλιοστασίων, μέσω των οποίων εξασφαλίζονται περί τα 100 hm^3 επιπλέον νερού. Η δυνατότητα αυτή δεν έχει ποτέ δοκιμαστεί στην πράξη, και δεν θεωρείται σκόπιμο να λαμβάνεται υπόψη στις εκτιμήσεις του επιφανειακού υδατικού δυναμικού του συστήματος.

Οι απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας διοχετεύονται στο υδραγωγείο του Μόρνου, μήκους 188 km . Το υδραγωγείο, παροχετευτικότητας $18.0 \text{ m}^3/\text{s}$ στο ανάντη του μεριστή τμήμα του και $15.5 \text{ m}^3/\text{s}$ στο κατάντη, μεταφέρει νερό με βαρύτητα από τον ταμιευτήρα Μόρνου στις μονάδες επεξεργασίας

Μάνδρας και Μενιδίου, ενώ συνδέεται με το υδραγωγείο Υλίκης στην θέση Δαφνούλα, μέσω του ενωτικού υδραγωγείου Μαραθώνα.

Πίνακας 5.3: Δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μόρνου.

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)
320.0	0.000	0.00
330.0	0.130	0.41
340.0	0.580	3.67
350.0	1.530	13.78
360.0	2.360	33.13
370.0	3.740	63.36
380.0	5.750	110.40
390.0	7.630	177.10
400.0	9.760	263.85
410.0	12.190	373.39
420.0	14.660	507.47
430.0	17.890	669.94
440.0	22.180	869.84

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο του ταμιευτήρα Μόρνου, το οποίο έχει καταρτιστεί από τον Νοέμβριο του 1979 και έκτοτε, είναι:

Μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, η οποία κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.3, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμιευτήρα και η μηνιαία μεταβολή του. Επισημαίνεται ότι πλήρεις (χωρίς κενά) χρονοσειρές ημερήσιας στάθμης διατίθενται από την 1/1/1985. Για τα προηγούμενα έτη, και συγκεκριμένα από την 1/2/1979 υπάρχουν δεδομένα στάθμης με ελλείψεις. Στην περίπτωση που οι τιμές στάθμης αναφέρονται σε ημερομηνία κοντινή στην πρώτη του μήνα, αυτές χρησιμοποιούνται ως έχουν για την εκτίμηση του αντίστοιχου αποθέματος. Διαφορετικά, ως τιμές αποθέματος λαμβάνονται αυτές που είχαν δοθεί από την ΕΥΔΑΠ, στα πλαίσια προηγούμενων ερευνητικών έργων (*Κουτσογιάννης και Τζεράνης, 1988· Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995*).

Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η τελευταία υπολογίζεται μέσω της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα, που κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.3. Το ύψος βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα μετράται στον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος, που βρίσκεται σε λειτουργία από τον Φεβρουάριο του 2002. Για την συμπλήρωση των έως τότε δεδομένων, χρησιμοποιείται το δείγμα βροχόπτωσης του σταθμού Λιδορικού (βλ. 2.6.2).

Εισροές από τον Εύηνο: Πρόκειται για τις ποσότητες που διοχετεύονται από τον Εύηνο, μέσω της σήραγγας εκτροπής (βλ. 5.3.1).

Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Από τον Αύγουστο του 2003, το ύψος εξάτμισης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την αναλυτική μέθοδο Penman, και με βάση τα αναγκαία μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται από τον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος. Για την επέκταση της χρονοσειράς

εξάτμισης προς τα πίσω, χρησιμοποιείται το λεγόμενο παλαιό δείγμα, που υπολογίζεται με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα άλλων σταθμών (βλ. 4.3). Στην περίπτωση που υπάρχουν κενά, χρησιμοποιούνται οι τυπικές μέσες μηνιαίες τιμές του Πίνακα 4.8.

Απώλειες στη σήραγγα Γκιώνας: Η συνιστώσα αυτή εισάγεται επειδή η μέτρηση των απολήψεων γίνεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας. Μέχρι τον Δεκέμβριο 1983, οι εν λόγω απώλειες ήταν σημαντικές και ανέρχονταν σε $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Στις αρχές του 1984 έγιναν επεμβάσεις στεγανοποίησης στη σήραγγα, με αποτέλεσμα τον δραστικό περιορισμό (πρακτικά μηδενισμό) των απωλειών.

Απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών από τον ταμιευτήρα: Οι απώλειες λόγω διαφυγών διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει τις διηθήσεις που συγκεντρώνονται στις δύο από τις τρεις σήραγγες αποστράγγισης της στοάς του Πύρνου, όπου υπάρχουν κατάλληλες διατάξεις για την μέτρησή τους (υπερχειλιστές λεπτής στέψης). Με επεξεργασία των εν λόγω μετρήσεων, έχουν προταθεί εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού των απωλειών συναρτήσει της στάθμης του ταμιευτήρα (Τζεράνης, 1989). Στην δεύτερη κατηγορία απωλειών εντάσσονται: (α) οι διαφυγές από το φράγμα και την θεμελίωσή του, (β) οι διαφυγές από την κουρτίνα τσιμεντενέσεων του Πύρνου, (γ) οι άμεσες διαφυγές από την περιοχή του Πύρνου που δεν διέρχονται μέσω της στοάς και των σήραγγων, και (δ) τυχόν άλλες διαφυγές από διάφορα σημεία της λεκάνης κατάκλυσης. Βάσει ορισμένων παραδοχών, οι συνολικές διαφυγές σε μηνιαία βάση προκύπτουν με διπλασιασμό των υπολογισμένων απωλειών του Πύρνου, και εκτιμώνται από την σχέση:

$$L_t = 0.012 (\bar{Z}_t - 390) + 0.07 \quad (5.12)$$

όπου L_t οι απώλειες (σε $\text{hm}^3/\text{μήνα}$) και \bar{Z}_t η μέση στάθμη του ταμιευτήρα (σε m) κατά τον μήνα t .

Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω υπερχείλισης υπολογίζονται αθροίζοντας τα ημερήσια στοιχεία που προκύπτουν με βάση τις ημερήσιες τιμές της στάθμης υπερχείλισης και την καμπύλη στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή.

Εκροές από τη σήραγγα Γκιώνας: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που προορίζονται για ύδρευση της Αθήνας υπολογίζονται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές, οι οποίες προκύπτουν βάσει μετρήσεων στον υπερχειλιστή παχείας στέψης που βρίσκεται στην έξοδο της σήραγγας Γκιώνας.

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μόρνου επιλύεται ως προς την άγνωστη συνιστώσα του, που είναι η μηνιαία απορροή. Η τελευταία μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος διαιρώντας με την καθαρή έκταση της ανάντη λεκάνης, ήτοι την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος (588.1 km^2) μείον τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα για τον μήνα αναφοράς.

5.3.3 Λίμνη Υλίκη

Η λίμνη Υλίκη αποτέλεσε την κύρια πηγή τροφοδοσίας της Αθήνας από το 1957, μόλις ολοκληρώθηκε η κατασκευή του υδραγωγείου Υλίκης, μέχρι το 1981, οπότε και εντάχθηκαν στο σύστημα τα έργα του Μόρνου. Η Υλίκη έχει λεκάνη απορροής 424.0 km^2 , ενώ σε αυτή διοχετεύονται, μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, και τα επιφανειακά νερά της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 2042.6 km^2 , που αποτελούν και τον βασικό τροφοδότη της λίμνης.

Ο πυθμένας της Υλίκης βρίσκεται στα $+40.0 \text{ m}$, ενώ η κατώτατη στάθμη πραγματοποίησης απολήψεων έχει καθοριστεί στα $+43.5 \text{ m}$, ώστε να αφήνεται ένα ελάχιστο ελεύθερο απόθεμα της τάξης των 10 hm^3 . Όταν η στάθμη της Υλίκης υπερβαίνει τα $+77.7 \text{ m}$, το πλεονάζοντα νερά οδηγούνται στην γειτονική λίμνη Παραλίμνη, μέσω της διώρυγας Μουρικήου. Ωστόσο, με την τοποθέτηση πρόχειρων πασσαλοσανίδων, η στάθμη υπερχείλισης ανέρχεται πλέον στα $+79.8 \text{ m}$.

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας της λίμνης Υλίκης ελήφθησαν από της ΕΥΔΑΠ, ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.2. Οι τελικές εκτιμήσεις δίνονται στον Πίνακα 5.4,

βάσει των οποίων, και μέσω λογαριθμικής παρεμβολής, εκτιμάται η συνολική χωρητικότητα της λίμνης, που φτάνει τα 594.8 hm³, ενώ η ωφέλιμη χωρητικότητά της ανέρχεται σε 584.8 hm³.

Οι απολήψεις για ύδρευση της Αθήνας πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων της ΕΥΔΑΠ στο Μουρίκι, ενώ για στάθμες μικρότερες των +71.0 m χρησιμοποιούνται και τα πλωτά αντλιοστάσια. Επιπλέον, κατά την αρδευτική περίοδο, πραγματοποιούνται απολήψεις για άρδευση, μέσω του αντλιοστασίου Κωπαΐδας. Οι υδρευτικές απολήψεις από την Υλίκη μεταφέρονται μέσω του ομώνυμου υδραγωγείου προς στον ταμιευτήρα Μαραθώνα και τα διωλιστήρια των Κιούρκων. Η μεταφορά του νερού γίνεται μέσω ενός αρκετά πολύπλοκου δικτύου ανοιχτών και κλειστών αγωγών και ωστικών αντλιοστασίων.

Πίνακας 5.4: Δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας της λίμνης Υλίκης.

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)	Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)
40.0	0.0	0.0	61.0	16.2	219.9
41.0	1.0	0.4	62.0	16.6	236.3
42.0	3.6	2.5	63.0	16.9	253.0
43.0	5.8	7.2	64.0	17.3	270.1
44.0	7.4	13.8	65.0	17.7	287.6
45.0	8.3	21.7	66.0	18.0	305.5
46.0	8.8	30.2	67.0	18.4	323.7
47.0	9.3	39.3	68.0	18.8	342.3
48.0	9.7	48.8	69.0	19.2	361.3
49.0	10.2	58.7	70.0	19.6	380.7
50.0	10.7	69.2	71.0	20.0	400.5
51.0	11.3	80.2	72.0	20.4	420.7
52.0	11.9	91.8	73.0	20.8	441.3
53.0	12.5	104.0	74.0	21.2	462.3
54.0	13.1	116.8	75.0	21.7	483.7
55.0	13.6	130.2	76.0	22.5	505.8
56.0	14.1	144.0	77.0	22.8	528.5
57.0	14.5	158.3	78.0	23.3	551.5
58.0	15.0	173.1	79.0	24.1	575.2
59.0	15.4	188.3	80.0	24.9	599.7
60.0	15.8	203.9			

Χαρακτηριστικό της Υλίκης είναι οι πολύ σημαντικές απώλειες νερού λόγω διαφυγών, οι οποίες μπορεί να ανέλθουν και στο 50% των εισροών σε υψηλές στάθμες, και οφείλονται στον διαπερατό χαρακτήρα του υποβάθρου της λίμνης. Πράγματι, λόγω της έντονης καρστικοποίησης, οι γεωλογικοί σχηματισμοί των τοιχωμάτων της Υλίκης, όπως και της γειτονικής της Παραλίμνης, δεν είναι στεγανοί, με αποτέλεσμα την διαφυγή σημαντικών ποσοτήτων νερού (μόνο ο πυθμένας της λίμνης έχει αργιλικές προσχώσεις). Σύμφωνα με τους Παγούνη κ.ά. (1986), οι κυριότερες θέσεις των υπόγειων διαφυγών εντοπίζονται στην βορειοανατολική και νοτιοδυτική όχθη της λίμνης. Οι κατευθύνσεις της υπόγειας ροής είναι προς βορειοανατολικά, με αποδέκτες τις πηγές Ούγγρας και Καμηλόβρυσης και, στην συνέχεια, την Παραλίμνη, και προς νοτιοδυτικά έως νοτιοανατολικά, με αποδέκτες, όπως εικάζεται, τις πηγές Κοκκόση, δυτικά των μικρών πηγών του όρμου της Ανθηδόνας.

Ο ποσοτικός προσδιορισμός των υπόγειων απωλειών της Υλίκης, που είναι η άγνωστη συνιστώσα του υδατικού της ισοζυγίου, έχει απασχολήσει όλους τους μελετητές του υδατικού της δυναμικού. Οι κύρια δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν πολλά σημεία διαφυγής (καταβόθρες) που είναι διασκορπισμένα στον πυθμένα και τα τοιχώματα της λίμνης. Στα πλαίσια του έργου, επιχειρήθηκε εκτεταμένη διερεύνηση, όπου έγινε αποδελτίωση παλαιότερων μελετών και ανάλυση των διαθέσιμων ιστορικών δεδομένων. Οι εργασίες περιγράφονται στο σχετικό τεύχος (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004).

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο της λίμνης Υλίκης, το οποίο έχει καταρτιστεί από τον Οκτώβριο του 1977 και έκτοτε, είναι:

Μεταβολή αποθέματος λίμνης: Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, η οποία κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.4, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμειυτήρα και η μηνιαία μεταβολή του.

Απορροή λεκάνης Υλίκης: Βάσει ορισμένων παραδοχών, η συνεισφορά της τοπικής λεκάνης τροφοδοσίας της Υλίκης εκτιμάται ως το 6% της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, μετρούμενης στην Διώρυγα Καρδίτσας (βλ. 3.6).

Βροχόπτωση στην λίμνη: Οι μηνιαίες εισροές λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια της λίμνης. Η τελευταία υπολογίζεται μέσω της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας, που κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.4. Το ύψος βροχόπτωσης μετράται στον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό Μουρικίου, που βρίσκεται σε λειτουργία από τον Ιούλιο του 2002. Για την συμπλήρωση των έως τότε δεδομένων, χρησιμοποιείται το δείγμα βροχόπτωσης του σταθμού Αλιάρτου (βλ. 2.6.3).

Εισροές από Σήραγγα Καρδίτσας: Πρόκειται για το σύνολο των επιφανειακών νερών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, τα οποία διοχετεύονται στην Υλίκη μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας και, στη συνέχεια, της Σήραγγας Καρδίτσας. Η απορροή της λεκάνης υπολογίζεται σε ημερήσια βάση, με μέτρηση της στάθμης στον υδρομετρικό σταθμό που βρίσκεται λίγο ανάντη της σήραγγας και αναγωγή της σε ημερήσιους όγκους, μέσω αναλυτικών σχέσεων στάθμης-παροχής (βλ. 3.5). Η ημερήσια χρονοσειρά μετατρέπεται σε μηνιαία μέσω συνάθροισης.

Εισροές από Παραλίμνη: Πρόκειται για αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 1977-80, με σκοπό την ενίσχυση του υδατικού δυναμικού της λίμνης.

Εισροές από γεωτρήσεις: Πέριξ της Υλίκης έχουν διανοιχθεί γεωτρήσεις, τα νερά των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για ενίσχυση του δυναμικού της λίμνης κατά τα έτη 1993 και 1994. Έχει ωστόσο παρατηρηθεί ότι οι αντλήσεις νερού από τις εν λόγω γεωτρήσεις αυξάνουν τις υπόγειες διαφυγές της λίμνης, οπότε, στην ουσία, ανακυκλώνεται μέρος της ίδιας ποσότητας νερού. Για τον λόγο αυτό, η επίδρασή τους στο υδατικό ισοζύγιο είναι ασαφής (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2004).

Απώλειες λόγω εξάτμισης από την λίμνη: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμειυτήρα. Από τον Αύγουστο του 2003, το ύψος εξάτμισης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την αναλυτική μέθοδο Penman, και με βάση τα αναγκαία μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται από τον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος. Για την επέκταση της χρονοσειράς εξάτμισης προς τα πίσω, χρησιμοποιείται το λεγόμενο παλαιό δείγμα, που υπολογίζεται με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα άλλων σταθμών (βλ. 4.3). Στην περίπτωση που υπάρχουν κενά, χρησιμοποιούνται οι τυπικές μέσες μηνιαίες τιμές του Πίνακα 4.9.

Απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας: Οι απολήψεις για ύδρευση πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων στο Μουρίκι και των πλωτών αντλιοστασίων, και εκτιμώνται σε ημερήσια βάση από την ΕΥΔΑΠ. Ο υπολογισμός των απολήψεων γίνεται με δύο τρόπους: (α) έμμεσα, με βάση τις ώρες λειτουργίας των αντλιοστασίων, και (β) άμεσα, με μέτρηση της παροχής στην θέση Βίλιζα, από την οποία αφαιρούνται οι τοπικού χαρακτήρα απολήψεις και οι διαρροές κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης, που εκτιμώνται σε ποσοστό 3%. Οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν

σημαντικές αποκλίσεις, της τάξης του 20%. Η μέχρι σήμερα κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου γίνεται με βάση τις απολήψεις που εκτιμώνται με την πρώτη μέθοδο.

Απολήψεις για άρδευση της Κωπαΐδας: Οι απολήψεις αυτές λαμβάνουν χώρα κατά την αρδευτική περίοδο, συνήθως από τα μέσα Ιουνίου έως τα μέσα Αυγούστου, και πραγματοποιούνται μέσω των αντλιοστασίων του Οργανισμού Κωπαΐδας.

Υπερχείλισεις προς Παραλίμνη: Η υπερχείλιση της Υλίκης προς την Παραλίμνη πραγματοποιείται μέσω της διώρυγας Μουρικού. Κανονικά η στάθμη υπερχείλισης είναι στα +77.7 m, όμως συνήθως η διώρυγα φράσσεται με πασσαλοσανίδες, και έτσι η στάθμη μπορεί να ανέρχεται έως τα +79.8 m. Τα στοιχεία των υπερχείλισεων προέρχονται από την ΕΥΔΑΠ και θεωρούνται μειωμένης αξιοπιστίας εξαιτίας του αμφίβολου τρόπου μέτρησης. Σημειώνεται ότι για ορισμένους μήνες κατά τους οποίους είναι γνωστό ότι υπερχείλισε η Υλίκη, δεν έχουν καταγραφεί οι τιμές.

Υπόγειες διαφυγές: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα της λίμνης, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για τις καθαρές διαφυγές, ήτοι τις υπόγειες εκροές μείον την υπόγεια τροφοδοσία, μέρος της οποίας ενδεχομένως προέρχεται από υπόγειες μεταγίσεις της γειτονικής λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Το γεγονός αυτό ερμηνεύει την εμφάνιση αρνητικών τιμών σε πολύ χαμηλές στάθμες, στις οποίες η τροφοδοσία της λίμνης υπερτερεί έναντι των διαφυγών.

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Υλίκης επιλύεται ως προς την άγνωστη συνιστώσα της, που είναι οι μηνιαίες υπόγειες διαφυγές. Με στατιστική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων διαφυγών, καταρτίστηκαν αναλυτικές σχέσεις εκτίμησής τους, που διαφοροποιούνται ανάλογα με την εποχή του έτους και είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας στάθμης της λίμνης. Οι εν λόγω σχέσεις είναι:

$$L_t = \begin{cases} 0.545 \bar{Z}_t - 26.6 & \text{για την περίοδο Μαΐου-Νοεμβρίου} \\ 0.545 \bar{Z}_t - 21.8 & \text{για την περίοδο Δεκεμβρίου-Απριλίου} \end{cases} \quad (5.13)$$

με τυπικό σφάλμα 3.6 hm³/μήνα (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004).

5.3.4 Ταμιευτήρας Μαραθώνα

Τα έργα του Μαραθώνα, που περιλαμβάνουν το φράγμα στον ποταμό Χάραδρο, το υδραγωγείο Μαραθώνα, την σήραγγα Μπογιατίου και τα διυλιστήρια Γαλατσίου, ολοκληρώθηκαν το 1931. Μέχρι το 1957, οπότε ολοκληρώθηκαν τα έργα της Υλίκης, ο ταμιευτήρας Μαραθώνα αποτέλεσε την κύρια πηγή υδροδότησης της Αθήνας. Ήδη όμως από τα τέλη της δεκαετίας του 1940, το δυναμικό του ταμιευτήρα άρχισε να ενισχύεται μέσω συμπληρωματικών έργων ύδρευσης από το ρέμα Κακοσάλεσι, τις πηγές Σουλίου και το μικρό φράγμα στον Άγιο Θωμά. Σήμερα, ο ταμιευτήρας Μαραθώνα λειτουργεί κυρίως ως έργο αναρρύθμισης και ως απόθεμα ασφαλείας.

Η έκταση της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος, συμπεριλαμβανομένης και της λεκάνης του μικρού ρέματος Σταμάτας που εκτρέπεται στον Χάραδρο, ανέρχεται στα 118.0 km². Η κατώτατη στάθμη υδροληψίας του ταμιευτήρα βρίσκεται στα +204.4 m και η στάθμη υπερχείλισης στα +223.0 m. Η τελευταία έχει αυξηθεί κατά ένα ακόμη μέτρο, με την τοποθέτηση πασσαλοσανίδων.

Τα πρωτογενή στοιχεία για την κατασκευή της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μαραθώνα εκτιμήθηκαν από τους παλαιούς τοπογραφικούς χάρτες που δόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ (οι χάρτες ανήκαν στην εταιρεία ULEN και έχουν κατασκευαστεί πριν την κατάκλυση του ταμιευτήρα), ενώ τα αντίστοιχα αποθέματα εκτιμήθηκαν με εφαρμογή της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην ενότητα 5.2.2. Οι τελικές εκτιμήσεις δίνονται στον Πίνακα 5.5, βάσει των οποίων υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη αποθέματος, ήτοι η συνολική χωρητικότητα (42.9 hm³), ο νεκρός όγκος (9.7 hm³) και η ωφέλιμη χωρητικότητα, ως διαφορά των δύο προηγούμενων μεγεθών (33.2 hm³).

Πίνακας 5.5: Δεδομένα για την κατασκευή των καμπυλών στάθμης-αποθέματος και στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)	Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα (hm ³)
186.0	0.00	0	210.0	1.34	16.2
195.0	0.51	2.7	211.0	1.41	17.6
196.0	0.55	3.2	212.0	1.48	19.0
197.0	0.60	3.8	213.0	1.55	20.5
198.0	0.65	4.5	214.0	1.63	22.1
199.0	0.70	5.1	215.0	1.70	23.8
200.0	0.75	5.9	216.0	1.79	25.5
201.0	0.80	6.6	217.0	1.88	27.4
202.0	0.85	7.5	218.0	1.97	29.3
203.0	0.90	8.3	219.0	2.07	31.3
204.0	0.96	9.3	220.0	2.16	33.4
205.0	1.03	10.3	221.0	2.26	35.6
206.0	1.09	11.3	222.0	2.35	37.9
207.0	1.15	12.4	223.0	2.45	40.3
208.0	1.22	13.6	224.0	2.57	42.8
209.0	1.30	14.9			

Η ΕΥΔΑΠ έχει καταγράψει σε ειδικά έντυπα τα μηνιαία δεδομένα ισοζυγίου του ταμιευτήρα για τις περιόδους 1931-56 και 1970-89, τα οποία συλλέχθηκαν και αρχειοθετήθηκαν στα πλαίσια της πρώτης φάσης του έργου (*Ευστρατιάδης κ.ά.*, 2000). Σημειώνεται ότι δεν κατέστη δυνατός ο εντοπισμός των στοιχείων της περιόδου 1957-69. Τα στοιχεία αναγράφονται στο έντυπο με κωδικό E7 και με τίτλο "Πίναξ εξατμίσεως, απορροής και παροχής ύδατος λίμνης Μαραθώνος". Με βάση τις επεξεργασίες των δεδομένων ισοζυγίου που συλλέχθηκαν, μόνο τα στοιχεία της περιόδου 1931-56 θεωρούνται αξιοποιήσιμα. Από το έτος 1957, οπότε εντάχθηκαν τα έργα Υλίκης στο σύστημα υδατικών πόρων της Αθήνας, είναι αδύνατη η κατάρτιση ενός αξιόπιστου υδατικού ισοζυγίου του Μαραθώνα, αφού υπάρχει έντονη αβεβαιότητα ως προς την εκτίμηση των αδιύλιστων ποσοτήτων νερού που διοχετεύονται στην λίμνη μέσω του διυλιστηρίου Κιούρκων.

Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στο μηνιαίο ισοζύγιο του Μαραθώνα για την περίοδο 1931-32 έως 1956-57, όπως καταγράφονται στο έντυπο E7, είναι:

Απόθεμα ταμιευτήρα: Στο έντυπο E7 αναγράφονται οι τιμές της στάθμης και του αντίστοιχου αποθέματος, οι οποίες αναφέρονται στην τελευταία ημέρα του αντίστοιχου μήνα. Για έλεγχο, επαναλήφθηκαν οι υπολογισμοί, με βάση την αναγραφόμενη τιμή στάθμης και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος (Πίνακας 5.5). Οι αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν θεωρούνται επουσιώδεις.

Εισροές νερού από τις πηγές Σουλίου: Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στο έντυπο E7 ως "Υδωρ Σουλίου διοχετευόμενον εις την λίμνην" και αναγράφεται από τον Δεκέμβριο του 1946, οπότε τέθηκε σε λειτουργία το σύστημα τροφοδοσίας του ταμιευτήρα Μαραθώνα από τις υφάλμυρες πηγές Σουλίου, που βρίσκονται σε απόσταση 12 km από το φράγμα.

Εισροές νερού από το υδραγωγείο Παρνασσού: Το σύστημα τροφοδοσίας από το υδραγωγείο Παρνασσού τέθηκε σε λειτουργία τον Σεπτέμβριο του 1950, με σκοπό την περαιτέρω αύξηση των απολήψιμων υδατικών πόρων για την ύδρευση της Αθήνας.

Απώλειες λόγω εξάτμισης: Τα ύψη εξάτμισης από την επιφάνεια του ταμιευτήρα εκτιμώνται με αναγωγή των παρατηρήσεων εξατμισίμετρου, όπως επεξηγείται στο υποκεφάλαιο. Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται δεν θεωρείται αξιόπιστη και, κατά συνέπεια, οι εκτιμήσεις των απωλειών λόγω

εξάτμισης στον ταμιευτήρα Μαραθώνα είναι προσεγγιστικές, χωρίς ωστόσο να επηρεάζουν σημαντικά την ακρίβεια του ισοζυγίου. Οι απώλειες υπολογίζονται πολλαπλασιάζοντας την τιμή του ύψους εξάτμισης με την επιφάνεια της λίμνης στο τέλος κάθε μήνα, η οποία είναι συνάρτηση της στάθμης του ταμιευτήρα. Όπως και με την περίπτωση του αποθέματος, οι υπολογισμοί των επιφανειών επαναλήφθηκαν για λόγους ελέγχου, με χρήση της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα (Πίνακας 5.5).

Απολήψεις για την ύδρευση της Αθήνας: Το μέγεθος αυτό αναφέρεται στο έντυπο E7 ως "Ποσότης ύδατος διοχετευθείσα εις το υδραγωγείον". Οι ποσότητες αυτές είναι υψηλότερες από τις διοχετευόμενες στο δίκτυο διανομής (βλ. έντυπο E13, "Πίναξ ολικής καταναλώσεως"), αφού περιλαμβάνουν και τις απώλειες στις εγκαταστάσεις των διυλιστηρίων.

Υπερχειλίσεις και λοιπές απώλειες: Οι λοιπές απώλειες επεξηγούνται κατά περίπτωση στον έντυπο E7 και πρόκειται για μικρές ποσότητες, της τάξης των χιλιάδων ή δεκάδων χιλιάδων κυβικών μέτρων. Οι κυριότερες αιτίες απωλειών που αναφέρονται στο έντυπο είναι λόγω διοχέτευσης νερού για τον καθαρισμό του Αδριάνειου υδραγωγείου ή της σήραγγας Μπογιατίου και λόγω υπερχειλίσης της υπολεκάνης Σταμάτας.

Φυσική τροφοδοσία ταμιευτήρα: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα, που περιλαμβάνει την απορροή των λεκανών Χάραδρου και Σταμάτας, καθώς και την επιφανειακή βροχόπτωση. Η φυσική τροφοδοσία του Μαραθώνα αντιστοιχεί στη στήλη με την ονομασία "Ολική εισροή εις λίμνην" (περίοδος 1933-46) ή "Απορροή λεκανοπεδίων Μαραθώνος και Σταμάτας" (περίοδος 1947-56). Για έλεγχο, επαναλήφθηκαν οι υπολογισμοί των εισροών, με εφαρμογή της εξίσωσης ισοζυγίου. Με βάση την ανάλυση που έγινε, προκύπτει ότι από την περίοδο 1947 και έπειτα παρουσιάζονται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των υπολογισμένων και των καταγεγραμμένων εισροών. Σε όλες πλην μίας των περιπτώσεων, οι υπολογισμένες εισροές είναι μεγαλύτερες από τις καταγεγραμμένες, αλλά οι διαφορές τους είναι σχετικά σημαντικές μόνο κατά την ξηρή περίοδο του έτους. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στην ύπαρξη και άλλων πηγών τροφοδοσίας, πιθανότατα των έργων ύδρευσης από τον Ασωπό μέσω του υδραγωγείου Κακοσάλεσι και του φράγματος Αγίου Θωμά, που τέθηκαν σε λειτουργία μετά το 1945 και δεν αναφέρονται στο έντυπο E7. Ο υπολογισμός της καθαρής εισροής στον ταμιευτήρα έγινε αφαιρώντας από την συνολική εισροή τη βροχόπτωση. Τα ύψη βροχής ελήφθησαν από το έντυπο E15 με τίτλο "Παρατηρήσεις εξεπίσωσεως εις λίμνην Μαραθώνος", όπου αναγράφονται οι μετρήσεις του παρακείμενου στο φράγμα μετεωρολογικού σταθμού για την περίοδο 1933-98.

Από το 2001, μετά την εγκατάσταση παροχομέτρων στα διυλιστήρια των Κιούρκων, την σήραγγα Μπογιατίου και κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης, είναι δυνατή πλέον η μέτρηση, ή έστω εκτίμηση, όλων των μεγεθών εισροών και εκροών του ταμιευτήρα Μαραθώνα, εκτός βεβαίως των φυσικών εισροών λόγω απορροής. Συνεπώς, υιοθετώντας παρόμοια μεθοδολογία με τους υπόλοιπους τρεις ταμιευτήρες, η κατάρτιση του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα περιλαμβάνει τις εξής συνιστώσες:

Μεταβολή αποθέματος ταμιευτήρα: Με γνωστή την στάθμη την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και την καμπύλη στάθμης-αποθέματος, η οποία κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.5, υπολογίζεται το αντίστοιχο απόθεμα του ταμιευτήρα και η μηνιαία μεταβολή του.

Απορροή ανάντη λεκάνης: Πρόκειται για την άγνωστη συνιστώσα του ταμιευτήρα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του.

Βροχόπτωση στον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες εισροές λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος βροχής επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Η τελευταία υπολογίζεται μέσω της καμπύλης στάθμης-επιφάνειας του ταμιευτήρα, που κατασκευάζεται βάσει των στοιχείων του Πίνακα 5.5. Το ύψος βροχόπτωσης στον ταμιευτήρα μετράται στον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος.

Εισροές από τα διυλιστήρια Κιούρκων: Πρόκειται για ακάθαρτο νερό που διοχετεύεται μέσω των διυλιστηρίων Κιούρκων απευθείας στον ταμιευτήρα Μαραθώνα, προτού υποστεί επεξεργασία. Σημειώνεται ότι στα διυλιστήρια καταλήγουν οι απολήψεις από την Υλίκη και τις γεωτρήσεις των περιοχών Υλίκης και ΒΑ Πάρνηθας, καθώς και μέρος των απολήψεων από το σύστημα Ευήνου-Μόρνου.

Απώλειες λόγω εξάτμισης από τον ταμιευτήρα: Οι μηνιαίες απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας το αντίστοιχο ύψος εξάτμισης επί την μέση μηνιαία επιφάνεια του ταμιευτήρα. Το ύψος εξάτμισης υπολογίζεται εφαρμόζοντας την αναλυτική μέθοδο Penman, και με βάση τα αναγκαία μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται από τον αυτόματο τηλεμετρικό σταθμό του φράγματος. Στην περίπτωση που υπάρχουν κενά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τυπικές μέσες μηνιαίες τιμές του Πίνακα 4.10, που πάντως δεν θεωρούνται ιδιαίτερα αξιόπιστες.

Υπερχείλιση ταμιευτήρα: Κατά το παρελθόν, έχουν καταγραφεί υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα Μαραθώνα. Σήμερα, δεδομένου ότι ο ταμιευτήρας έχει μόνο ρυθμιστικό χαρακτήρα, δεν αφήνεται να υπερχειλίσει, καθώς ενδέχεται να σημειωθούν μεγάλες καταστροφές κατάντη του φράγματος, όπου έχουν κατασκευαστεί αυθαίρετα κτίσματα. Για τον λόγο αυτό μάλιστα, έχουν υιοθετηθεί από την ΕΥΔΑΠ ανώτατα όρια διακύμανσης της στάθμης, που είναι σχετικά χαμηλά κατά την χειμερινή περίοδο, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης ικανών πλημμυρικών όγκων.

Εκροές από τη σήραγγα Μπογιατίου: Οι μηνιαίες ποσότητες νερού που προορίζονται για ύδρευση της Αθήνας υπολογίζονται αθροίζοντας τις αντίστοιχες ημερήσιες τιμές.

Η εξίσωση υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μαραθώνα επιλύεται ως προς την άγνωστη συνιστώσα του, που είναι η μηνιαία απορροή. Η τελευταία μετατρέπεται σε ισοδύναμο ύψος διαιρώντας με την καθαρή έκταση της ανάντη λεκάνης, ήτοι την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος (118.0 km^2) μείον τη μέση επιφάνεια του ταμιευτήρα για τον μήνα αναφοράς.

5.4 Πλαίσιο επικαιροποίησης υδατικών ισοζυγίων ταμιευτήρων

Στην παρούσα ενότητα περιγράφεται η διαδικασία επικαιροποίησης των υδατικών ισοζυγίων των ταμιευτήρων, με χρήση του λογισμικού *Υδρογνώμων* (Χριστοφίδης και Κοζάνης, 2004). Για κάθε έναν από τους τέσσερις ταμιευτήρες του συστήματος έχει καταρτιστεί ένας πίνακας, στο οποίον παρατίθενται όλες οι χρονοσειρές που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με τις συνιστώσες του ισοζυγίου. Δίπλα από κάθε χρονοσειρά δίνεται, σε παρένθεση, ο κωδικός της στην βάση δεδομένων. Εφόσον η χρονοσειρά έχει προκύψει μέσω κάποιας επεξεργασίας (συνάθροιση, μετατροπή σε άλλες μονάδες, κλπ.), δίπλα από τον κωδικό υπάρχει ένα βέλος που παραπέμπει στους κωδικούς των χρονοσειρών βάσει των οποίων προκύπτει η εν λόγω χρονοσειρά. Ο κάθε πίνακας είναι χωρισμένος σε τέσσερα τμήματα που περιλαμβάνουν τα γενικά δεδομένα, τα δεδομένα που σχετίζονται με τις παρεμβολές, τις χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται στο ισοζύγιο του ταμιευτήρα και, τέλος, τις χρονοσειρές που αναφέρονται στην εκάστοτε άγνωστη συνιστώσα, ως προς την οποία επιλύεται η εξίσωση ισοζυγίου. Συγκεκριμένα:

- Στα γενικά δεδομένα περιλαμβάνονται οι χρονοσειρές (κατά κανόνα ημερήσιου βήματος), με συνάθροιση των οποίων προκύπτουν οι μηνιαίες τιμές που τελικά υπεισέρχονται στο ισοζύγιο.
- Στα δεδομένα παρεμβολών (interpolations) περιλαμβάνονται όλα τα δεδομένα που υπεισέρχονται στην αντίστοιχη φόρμα του λογισμικού *Υδρογνώμων*. Στην φόρμα καλείται η ημερήσια χρονοσειρά στάθμης του ταμιευτήρα, βάσει της οποίας υπολογίζονται συνιστώσες όπως η μέση μηνιαία επιφάνεια, το απόθεμα την πρώτη κάθε μήνα και οι μηνιαίες υπόγειες διαφυγές.
- Στα δεδομένα ισοζυγίου περιλαμβάνονται οι τελικές χρονοσειρές που υπεισέρχονται στην αντίστοιχη φόρμα του λογισμικού *Υδρογνώμων*. Μέσω της φόρμας γίνεται ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα και καθορίζεται η χρονοσειρά στην οποία αποθηκεύονται τα

αποτελέσματα. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η δυνατότητα συμμετοχής στον υπολογισμό μιας μεταβλητής περισσοτέρων της μίας χρονοσειρές. Οι εν λόγω χρονοσειρές τοποθετούνται στη σειρά. Για κάθε μήνα, εφόσον το πρόγραμμα δεν βρει τιμή στην πρώτη χρονοσειρά, ανατρέχει στη δεύτερη, αλλιώς στην τρίτη κοκ. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην περίπτωση που υπάρχουν δεδομένα από διαφορετικές πηγές που αφορούν στην ίδια μεταβλητή. Στα ισοζύγια των ταμιευτήρων της ΕΥΔΑΠ υπάρχουν πολλά τέτοια παραδείγματα, όπως παλιά ιστορικά δείγματα που υπήρχαν σε μηνιαία χρονική κλίμακα, αλλά από κάποιο χρονικό σημείο και μετά καταγράφονται σε ημερήσια βάση. Ακόμη, για αρκετές μετεωρολογικές μεταβλητές, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας σταθμοί εφόσον υπάρχει έλλειψη δεδομένων.

- Στο τέλος κάθε πίνακα παρουσιάζονται οι χρονοσειρές που προέρχονται από τον υπολογισμό των ισοζυγίων και αναφέρονται είτε στις μηνιαίες εισροές στον ταμιευτήρα λόγω απορροής (Εύηνος, Μόρνος, Μαραθώνας) ή στις μηνιαίες υπόγειες διαφυγές (Υλίκη).

Πίνακας 5.6: Χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Ευήνου.

Μεταβλητή	Μονάδες	Κωδικοί χρονοσειρών
ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ		
Εκτροπή προς Μόρνο	1000 m ³	2283
Περιβαλλοντική εκροή κατάντη του φράγματος	1000 m ³	2281
Ημερήσια υπερχειλίση		
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ INTERPOLATION		
Ημερήσια στάθμη (συμβατική)	m	2209
Μηνιαία στάθμη	m	2211
Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος		11, 12, 4573
Ημερήσια επιφάνεια	km ²	2779 ← 2209 + K12
Ημερήσιος όγκος	hm ³	2781 ← 2209 + K12
ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ		
Εκτροπή προς Μόρνο	hm ³	2601 ← 2283
Περιβαλλοντική εκροή κατάντη του φράγματος	hm ³	2285 ← 2281
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα	mm	
Υπερχειλίσεις	hm ³	
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα	mm	
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος	hm ³	2785 ← 2781
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας	km ²	2783 ← 2779
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
Απορροή υπολεκάνης	hm ³	
Ισοδύναμο ύψος απορροής	mm	

Πίνακας 5.7: Χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μόρνου.

Μεταβλητή	Μονάδες	Κωδικοί χρονοσειρών
ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ		
Ημερήσια εκροή από σήραγγα Γκιώνας	1000 m ³	2161
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ INTERPOLATION		
Ημερήσια στάθμη (συμβατική)	m	275
Ημερήσια στάθμη (τηλεμετρική)	m	3373
Μηνιαία στάθμη	m	2075 ← 275
Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος		7, 14, 2041
Καμπύλη στάθμης – υπογείων διαφυγών		5881
Ημερήσια επιφάνεια	km ²	2067 ← 275 + K1
Ημερήσιος όγκος	hm ³	2069 ← 275 + K14
Μηνιαίες υπόγειες διαφυγές	hm ³	31 ← 2075 + K5881
ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ		
Εισροή από Εύηνο (1)	hm ³	35
Εισροή από Εύηνο (2)	hm ³	2601 ← 2283
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (1)	mm	416
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (2)	mm	357 ← 356
Εκροές από τη σήραγγα Γκιώνας (1)	hm ³	29
Εκροές από τη σήραγγα Γκιώνας (2)	hm ³	2603 ← 2161
Απώλειες στη σήραγγα Γκιώνας	hm ³	30
Απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών (1)	hm ³	31 ← 2075 + K5881
Απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών (2)	hm ³	2921
Υπερχειλίσειες	hm ³	32
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (1)	mm	72
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (2)	mm	2065 ← 2015, 2049, 2055, 2061
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος (1)	hm ³	27 ← 2069
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας (1)	km ²	28 ← 2067
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος (2)	hm ³	2881
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας (2)	km ²	2883
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
Απορροή υπολεκάνης	hm ³	576
Ισοδύναμο ύψος απορροής	mm	596

Πίνακας 5.8: Χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της λίμνης Υλίκης.

Μεταβλητή	Μονάδες	Κωδικοί χρονοσειρών
ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ		
Ημερήσια απώληση για ύδρευση της Αθήνας	1000 m ³	2561
Ημερήσια απώληση για άρδευση Κωπαΐδας	1000 m ³	2563
Ημερήσια παροχή Βοιωτικού Κηφισού	1000 m ³	2565
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ INTERPOLATION		
Ημερήσια στάθμη (συμβατική)	m	278
Ημερήσια στάθμη (τηλεμετρική)	m	3389
Μηνιαία στάθμη	m	2207 ← 278
Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος		6, 15, 4601
Ημερήσια επιφάνεια	km ²	2683 ← 278 + K15
Ημερήσιος όγκος	hm ³	2685 ← 278 + K15
ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ		
Απορροή Βοιωτικού Κηφισού (1)	hm ³	2721
Απορροή Βοιωτικού Κηφισού (2)	hm ³	2071 ← 2565
Απορροή υπολεκάνης Υλίκης	hm ³	50
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (1)	mm	378
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (2)	mm	342 ← 341
Απόληψη για ύδρευση της Αθήνας (1)	hm ³	53
Απόληψη για ύδρευση της Αθήνας (2)	hm ³	2687 ← 2561
Απόληψη για άρδευση Κωπαΐδας (1)	hm ³	52
Απόληψη για άρδευση Κωπαΐδας (2)	hm ³	2689 ← 2563
Εισροές από Παραλίμνη	hm ³	51
Υπερχειλίσσεις προς Παραλίμνη	hm ³	54
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (1)	mm	76
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (2)	mm	2097 ← 2003, 2079, 2085, 2093
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος	hm ³	47 ← 2685
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας	km ²	46 ← 2683
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
Υπόγειες διαφυγές λίμνης	hm ³	55

Πίνακας 5.9: Χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα Μαραθώνα.

Μεταβλητή	Μονάδες	Κωδικοί χρονοσειρών
ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ		
Εκροή από τη σήραγγα Μπογιατίου	1000 m ³	2201
ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ INTERPOLATION		
Ημερήσια στάθμη (συμβατική)	m	277
Ημερήσια στάθμη (τηλεμετρική)	m	3399
Μηνιαία στάθμη (από έντυπα)	m	2761
Μηνιαία στάθμη (συμβατική)		2205 ← 277
Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας – αποθέματος		5, 13, 4603
Ημερήσια επιφάνεια	km ²	2763 ← 277 + K13
Ημερήσιος όγκος	hm ³	2765 ← 277 + K13
ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΦΟΡΜΑΣ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ		
Εκροή από τη σήραγγα Μπογιατίου	hm ³	2203
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (1) (από έντυπα)	mm	2771
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (2) (συμβατικό)	mm	2037 ← 2105
Ύψος βροχής στον ταμιευτήρα (3)	mm	354 ← 353
Εισροές από τα διυλιστήρια Κιούρκων	hm ³	
Υπερχειλίσεις	hm ³	
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (1)	mm	218
Ύψος εξάτμισης στον ταμιευτήρα (2)	mm	2117 ← 2029, 2101, 2107, 2113
Μηνιαία χρονοσειρά αποθέματος	hm ³	2769 ← 2765
Μηνιαία χρονοσειρά επιφάνειας	km ²	2767 ← 2763
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ		
Απορροή υπολεκάνης	hm ³	3001
Ισοδύναμο ύψος απορροής	mm	

Αναφορές

- Αλεξοπούλου, Κ., Π. Αναστασοπούλου, Δ. Μπόκου, Ν. Σταυρίδης, και Ν. Μαμάσης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Α, Τεύχος 2, Βροχομετρικοί και υδρομετρικοί σταθμοί και δεδομένα, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1992.
- Δάνδολος, Η., Υδρογεωλογική έκθεση 3^{ου} τριμήνου 2002, *Υδρογεωλογική μελέτη παρακολούθησης των υδατικών πόρων σε περιοχές των γεωτρήσεων υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ Α.Ε.*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Υδρογεωλογίας, Αθήνα, Οκτώβριος 2002.
- 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, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 8, 129 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης και Ν. Μαμάσης, Υδρολογική διερεύνηση, Προσάρτημα, *Προμελέτη ενίσχυσης του υδατικού δυναμικού του ταμιευτήρα Μόρνου από τη λεκάνη του ποταμού Ευήνου*, Εισαγωγικό μέρος, Μελετητής: ΟΤΜΕ, Υδροηλεκτρική, ΥΔΡΟΤΕΚ, Κωνσταντινίδης, Καραβοκύρης, Γκόφας, ΥΠΕΧΩΔΕ, Αθήνα, 1991.
- Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Ναλμπάντης, και Ν. Μαμάσης, Υδρολογική διερεύνηση - Έκθεση, *Προμελέτη ενίσχυσης του υδατικού δυναμικού του ταμιευτήρα Μόρνου από τη λεκάνη του ποταμού Ευήνου*, Εισαγωγικό μέρος, Εργοδότης: Διεύθυνση Έργων Ύδρευσης και Αποχέτευσης - Γενική Γραμματεία Δημοσίων Έργων - Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημόσιων Έργων, ΟΤΜΕ, Υδροηλεκτρική, ΥΔΡΟΤΕΚ, Δ. Κωνσταντινίδης, Γ. Καραβοκύρης, Θ. Γκόφας και Συνεργάτες, 192 σελίδες, Αθήνα, 1991.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, Τελική έκθεση πρώτης φάσης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, Τεύχος 7, 114 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 1989.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ι. Ναλμπάντης, Εκτίμηση δυνατοτήτων του σημερινού υδροδοτικού συστήματος Μόρνου-Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 8, 87 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 1989.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Ι. Τζεράνης, 2η αναγνωριστική έκθεση: Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο λεκάνης Μόρνου, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, 32 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 1988.

- Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Ναλμπάντης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Β, Τεύχος 20, Μελέτη υδρολογικών ισοζυγίων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1995.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Τζεράνης, *Μετρήσεις παροχής & καμπύλες στάθμης-παροχής λεκανών Μόρνου & Ευήνου, Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 1*, Τεύχος Δ, 113 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1988.
- Μαμάσης, Ν., *Μετρητικό σύστημα, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 16, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Παγούνης, Μ., Α. Γκατζογιάννης, και Θ. Γκέρτσος, *Μελέτη σύνταξης υδατικού ισοζυγίου Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1986.
- Παπακόστας, Ν., *Σχεδιασμός και υλοποίηση κεντρικής βάσης δεδομένων, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 19, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Ρώτη, Σ., και Χ. Ανυφαντή, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Α, Τεύχος 10, Ισοζύγια ταμιευτήρων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1992.
- Ρώτη, Σ., Ν. Μαμάσης, και Κ. Τσολακίδης, *Διερεύνηση προσφερόμενων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 11, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων λεκάνης Υλίκης, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1990.
- Τζεράνης, Ι., και Κ. Τσολακίδης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 9, Επισκόπηση υδρολογικών μελετών της ευρύτερης περιοχής Υλίκης, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1989.
- Τζεράνης, Ι., *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών*, Τεύχος 3, Επισκόπηση δεδομένων διαφυγών και ισοζυγίου ταμιευτήρα Μόρνου, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1989.
- Τσακαλίας, Γ., και Δ. Κουτσογιάννης, *Καμπύλες στάθμης-παροχής και εξαγωγή παροχών, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας - Φάση 2*, Τεύχος 19, 125 σελίδες, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1995.
- Χριστοφίδης, Α., και Ν. Μαμάσης, *Εκτίμηση και διαχείριση των υδατικών πόρων της Στερεάς Ελλάδας*, Φάση Β, Τεύχος 18, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων, ΕΜΠ, ΤΥΠΥΘΕ, Αθήνα, 1995.
- Χριστοφίδης, Α., και Σ. Κοζάνης, *Υδρογνώμονας (έκδοση 1.0) - Λογισμικό διαχείρισης δεδομένων, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 22, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2004.
- Chow, V. T., *Open Channel Hydraulics*, McGraw Hill, Kogakusha, 1959.

- Mosley, M. P., and A. I. McKerchar, Streamflow, Ch. 8, *Handbook of Hydrology*, edited by D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, 1993.
- Nalbantis, I., N. Mamassis, et D. Koutsoyiannis, Le phénomène récent de sécheresse persistante et l'alimentation en eau de la cité d' Athènes, *Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 6eme Colloque International de Climatologie*, édité par P. Maheras, Thessaloniki, Septembre 1993, 6, 123-132, Association Internationale de Climatologie, Aix-en-Provence Cedex, France, 1993.
- Penman, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Royal Society of London Proceedings, Series A*, 193, 120-145, 1948.
- Shaw, E. M., *Hydrology in Practice*, 3rd edition, Chapman & Hall, London, 1994.
- Tsakalias, G., and D. Koutsoyiannis, A comprehensive system for the exploration and analysis of hydrological data, *Water Resources Management*, 13, 269-302, 1999.
- World Meteorological Organization (WMO), *Guide to Hydrological Practices*, Vol. 1, Data Acquisition and Processing, Publication 168, Fourth Edition, World Meteorological Organization, Geneva, 1981.