

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Επιστημονικός
υπεύθυνος:

Α. Ευστρατιάδης,
ΕΔΙΠ ΕΜΠ

Σύνταξη:

Α. Ευστρατιάδης
Ι. Τσουκαλάς

**Εκσυγχρονισμός της διαχείρισης του
συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης
της Αθήνας – Αναθεώρηση**

Παραδοτέο 3

Επικαιροποίηση υδατικού ισοζυγίου Υλίκης και
Παραλίμνης και εκτίμηση του κινδύνου
υπερχείλισής τους το τρέχον υδρολογικό έτος

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

Τα στοιχεία, οι πληροφορίες και οι αναλύσεις που περιέχονται στη μελέτη αυτή, αποτελούν ερευνητικό έργο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Το ΕΜΠ κατέβαλε κάθε προσπάθεια ώστε να διασφαλίσει ότι τα στοιχεία, οι πληροφορίες και οι αναλύσεις που εμφανίζονται στη μελέτη αυτή είναι ορθά και πλήρη. Όμως, δε φέρει καμία ευθύνη για την ακρίβεια και αξιοπιστία ή τη παράλειψη πληροφοριών και στοιχείων τα οποία έλαβε από τρίτους, ούτε για τυχόν ζημιά προερχόμενη άμεσα ή έμμεσα από τη χρήση των παραπάνω πληροφοριών και στοιχείων και των αναλύσεων και αποτελεσμάτων που είναι βασισμένες στις πληροφορίες και τα στοιχεία αυτά. Το ΕΜΠ δεν είναι υπεύθυνο για την καταβολή αποζημιώσεων ή για οποιοσδήποτε άλλες αξιώσεις και απαιτήσεις ενδέχεται να προκύψουν λόγω της χρήσης των στοιχείων, πληροφοριών, αναλύσεων και αποτελεσμάτων της μελέτης αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 Αντικείμενο και διάρθρωση της έκθεσης	5
1.1 Αντικείμενο έκθεσης – ιστορικό.....	5
1.2 Διάθρωση έκθεσης.....	6
2 Ιστορικό πρόσφατης υπερχειλίσης συστήματος Υλίκης-Παραλίμνης	7
2.1 Συνοπτική περιγραφή.....	7
2.2 Χρονική εξέλιξη στάθμης Παραλίμνης.....	7
2.3 Επιπτώσεις πλημμυρικής κατάκλυσης και αντιμετώπισή τους.....	8
3 Υδατικό ισοζύγιο Υλίκης: Επικαιροποίηση και αναθεώρηση	10
3.1 Γενικά.....	10
3.2 Δεδομένα στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας.....	10
3.3 Βροχόπτωση.....	12
3.4 Απώλειες λόγω εξάτμισης.....	14
3.5 Απολήψεις για ύδρευση και άρδευση.....	15
3.6 Εισροές λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού.....	16
3.6.1 Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες.....	16
3.6.2 Κατάρτιση χρονοσειράς εισρών λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού με βάση μετρήσεις της ΕΥΔΑΠ στη Διώρυγα Καρδίτσας.....	17
3.6.3 Ανηγμένη χρονοσειρά εισρών.....	20
3.7 Εισροές λεκάνης Υλίκης.....	21
3.7.1 Προηγούμενες προσεγγίσεις.....	21
3.7.2 Εκτίμηση επιφανειακής απορροής λεκάνης Υλίκης μέσω υδρολογικού μοντέλου.....	22
3.7.3 Εκτίμηση εισρών ευρύτερου υδρογεωλογικού συστήματος.....	25
3.7.4 Τελική χρονοσειρά εισρών Υλίκης από επιφανειακά και υπόγεια νερά.....	26
3.8 Λοιπές εισροές.....	27
3.9 Υπερχειλίσεις.....	27
3.10 Υπόγειες διαφυγές.....	29
3.10.1 Ιστορικό.....	29
3.10.2 Κατάρτιση σχέσεων στάθμης-διαφυγών.....	30
3.11 Επαλήθευση μεθοδολογίας κατάρτισης υδατικού ισοζυγίου.....	32

4	Κατάρτιση υδατικού ισοζυγίου Παραλίμνης για την περίοδο Μαρτίου-Ιουλίου 2019	34
4.1	Υδροσύστημα Υλίκης-Παραλίμνης	34
4.2	Βασικά στοιχεία υδατικού ισοζυγίου Παραλίμνης	35
4.2.1	Σχέση στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος	35
4.2.2	Απώλειες λόγω υπερχειλίσης	36
4.2.3	Υπόγειες διαφυγές	37
4.3	Αναπαραγωγή υδατικού ισοζυγίου Μαρτίου-Ιουλίου 2019	38
4.3.1	Μεθοδολογία, δεδομένα και παραδοχές	38
4.3.2	Αποτελέσματα	40
4.3.3	Σύγκριση με σενάρια πρόγνωσης προηγούμενης έκθεσης	41
5	Σενάρια πρόγνωσης υδατικού ισοζυγίου Υλίκης	43
5.1	Μεθοδολογία	43
5.2	Σενάρια πρόγνωσης απορροής λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού	43
5.2.1	Δεδομένα εισόδου	43
5.2.2	Παραγωγή σεναρίων στοχαστικής πρόγνωσης	43
5.2.3	Τελικά σενάρια εισροών	45
5.3	Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου Υλίκης για την περίοδο Νοεμβρίου 2019 – Σεπτεμβρίου 2020	46
5.3.1	Μεθοδολογία και παραδοχές	46
5.3.2	Αποτελέσματα	46
6	Συμπεράσματα – προτάσεις	50
6.1	Επισκόπηση πρόσφατης υπερχειλίσης Υλίκης και Παραλίμνης	50
6.2	Αναθεώρηση διαδικασίας κατάρτισης υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης	50
6.3	Μετρητικές υποδομές	51
6.4	Αξιολόγηση πλημμυρικού κινδύνου κατά το τρέχον υδρολογικό έτος	52
	Αναφορές	53

1 Αντικείμενο και διάρθρωση της έκθεσης

1.1 Αντικείμενο έκθεσης – ιστορικό

Η παρούσα έκθεση υποβάλλεται στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «*Εκσυγχρονισμός της διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας – Αναθεώρηση*», το οποίο εκπονείται από ερευνητική ομάδα του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με Επιστημονικό υπεύθυνο τον α. Ευστρατιάδη, ΕΔΙΠ ΕΜΠ. Το αντικείμενο του έργου είναι η αναθεώρηση, αναβάθμιση και επέκταση των εργαλείων πληροφορικής που είχαν αναπτυχθεί σε παλαιότερες ερευνητικές συνεργασίες του ΕΜΠ με τη ΕΥΔΑΠ. Α.Ε., και η εν γένει υποστήριξη της Διεύθυνσης Υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ Α.Ε. σε θέματα διαχείρισης των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας και μεταφοράς νερού.

Στην παρούσα, που αποτελεί συνέχεια αντίστοιχης έκθεσης που εκπονήθηκε τον Μάρτιο του 2019, εξετάζεται η τρέχουσα κατάσταση του υδροσυστήματος των διασυνδεδεμένων λιμνών Υλίκης και Παραλίμνης, ως προς το ενδεχόμενο υπερχειλίσεώς τους και πρόκλησης ζημιών από πλημμύρα στις παρακείμενες περιοχές τη φετινή χρονιά. Λόγω των εξαιρετικά υψηλών εισροών της παρελθούσας υδρολογικής περιόδου (ιδιαίτερα του πρώτου τριμήνου του 2019), και οι δύο λίμνες υπερχειλίσαν, και μάλιστα η Παραλίμνη για πρώτη φορά έπειτα από πολλές δεκαετίες. Στην Υλίκη το φαινόμενο διήρκεσε από τον Φεβρουάριο του 2019 μέχρι τα τέλη Ιουνίου, με αποτέλεσμα τη διοχέτευση πολύ μεγάλων ποσοτήτων νερού προς την Παραλίμνη, που με τη σειρά υπερχειλίσαν από τα μέσα Απριλίου ως τα μέσα Ιουλίου. Η έντονη ανύψωση της στάθμης της Παραλίμνης προκάλεσε πολλαπλά προβλήματα, καθώς κατακλύστηκαν σημαντικές υποδομές της ΔΕΥΑ Χαλκίδας, αλλά και το τοπικό οδικό και ηλεκτρικό δίκτυο. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν χάρη στις έγκαιρες επεμβάσεις των αρμοδίων της ΔΕΥΑΧ και των τοπικών αρχών, αποφεύγοντας ακόμα πιο δυσμενείς καταστάσεις.

Επειδή, όπως ήταν αναμενόμενο, λίγο μετά την εκκίνηση του νέου υδρολογικού έτους, η στάθμη των δύο λιμνών εξακολουθεί να βρίσκεται σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα (πολύ υψηλότερα σε σχέση με την περσινή χρονιά), ελλοχεύει ο κίνδυνος επανάληψης του φαινομένου, η ένταση του οποίου ως επί το πλείστον εξαρτάται από το μέγεθος των εισροών στην Υλίκη (κυρίως από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού). Όπως και στην προηγούμενη έκθεση, η διερεύνηση που γίνεται βασίζεται σε στοχαστικές προγνώσεις των εν λόγω εισροών, και την υδραυλική λειτουργία των αντίστοιχων συστημάτων υπερχειλίσεως (διώρυγα Μουρικού και σήραγγα Ανθηδώνας, αντίστοιχα).

Στην έκθεση δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην κατάρτιση των υδατικών ισοζυγίων των δύο λιμνών, που αποτελούν τη βάση όλων των αναλύσεών μας. Στο πλαίσιο αυτό, επιχειρείται μια ενδελεχής διερεύνηση της μεθοδολογίας εκτίμησης των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, που καταλήγει στην αναθεώρηση κρίσιμων πτυχών της. Αντίστοιχα, για την Παραλίμνη αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης του ημερήσιου ισοζυγίου εισροών από την Υλίκη και εκροών λόγω διαφυγών και υπερχειλίσεων.

Η ομάδα εκπόνησης της έκθεσης είναι:

- Ανδρέας Ευστρατιάδης, ΕΔΙΠ ΕΜΠ (εκλεγμένος Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ)
- Γιάννης Τσουκαλάς, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

1.2 Διάθρωση έκθεσης

Πέραν της παρούσας εισαγωγής (**Κεφάλαιο 1**), η έκθεση περιλαμβάνει έξι ακόμη κεφάλαια.

Στο **Κεφάλαιο 2** περιγράφεται το ιστορικό της πρόσφατης υπερχειλίσης των δύο λιμνών και των επιπτώσεων που προκάλεσε.

Στο **Κεφάλαιο 3** διερευνάται η κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, καταλήγοντας στην αναθεώρηση κρίσιμων πτυχών της έως τώρα εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας.

Στο **Κεφάλαιο 4** επιχειρείται η προσεγγιστική αναπαραγωγή του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης λίγο πριν και κατά τη διάρκεια της υπερχειλίσεώς της (Μάρτιος-Ιούλιος).

Στο **Κεφάλαιο 5** εξετάζονται σενάρια στοχαστικής πρόγνωσης του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης για χρονικό ορίζοντα ενός υδρολογικού έτους, με σκοπό την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου της φετινής χρονιάς.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα συμπεράσματα των αναλύσεων και οι προτάσεις μας προς την Διεύθυνση Υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ Α.Ε. και τους λοιπούς ενδιαφερόμενους φορείς.

2 Ιστορικό πρόσφατης υπερχειλίσης συστήματος Υλίκης-Παραλίμνης

2.1 Συνοπτική περιγραφή

Το διέρρευσαν υδρολογικό έτος, και ειδικότερα το τρίμηνο Ιανουαρίου-Μαρτίου του 2019, ήταν εξαιρετικά πλούσιο σε υδροφορία, με συνέπεια την εισροή πολύ μεγάλων ποσοτήτων νερού στο διασυνδεδεμένο σύστημα Υλίκης και Παραλίμνης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την έντονη ανύψωση της στάθμης των δύο λιμνών, και την υπερχειλίση αρχικά της Υλίκης στην Παραλίμνη και ακολούθως της Παραλίμνης προς τον Ευβοϊκό Κόλπο, μέσω της σήραγγας και εν συνεχεία τάφρου Ανθηδώνας.

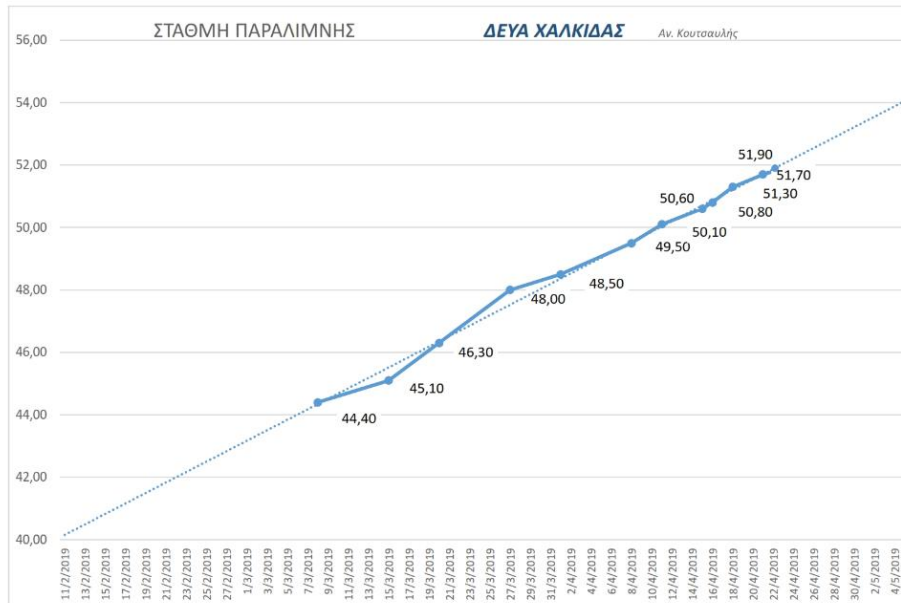
Σύμφωνα με τις αναλύσεις του υδατικού ισοζυγίου των δύο λιμνών, κατά το υδρολογικό έτος 2018-19 στην Υλίκη εισήλθαν περισσότερα από 600 hm³, μέσω του Βοιωτικού Κηφισού και της τοπικής της λεκάνης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ταχεία άνοδο της στάθμης από τα +70.0 m, στις αρχές Οκτωβρίου 2018, στα επίπεδα της υπερχειλίσης, ήτοι +78.3 m. Η υπερχειλίση της Υλίκης διήρκεσε από τις πρώτες ημέρες του Φεβρουαρίου του 2019 ως τα τέλη Ιουνίου, διοχετεύοντας προς την Παραλίμνη περί τα 240 hm³. Η ποσότητα αυτή είναι η δεύτερη υψηλότερη που έχει καταγραφεί τα τελευταία 40 έτη, με το ρεκόρ να κατέχει η περίοδος Μαρτίου-Ιουλίου 1982, κατά την οποία εκτιμάται ότι οι απώλειες νερού λόγω υπερχειλίσης ξεπέρασαν τα 340 hm³. Έκτοτε, η Υλίκη υπερχειλίσε άλλες έξι φορές, με πλέον πρόσφατη την περίοδο Μαρτίου-Μαΐου 2006.

Σε αντίθεση με την Υλίκη, το φαινόμενο της υπερχειλίσης της Παραλίμνης είναι πολύ πιο σπάνιο, ενώ και οι διακυμάνσεις της στάθμης της είναι πολύ πιο ήπιες. Ωστόσο, κατά την περσινή χρονιά, ο συνδυασμός της υψηλής υδροφορίας με τις εισροές από την Υλίκη είχαν ως συνέπεια την άνοδο της στάθμης της Παραλίμνης σε ασυνήθιστα υψηλά επίπεδα, και τελικά την υπερχειλίση της, για πρώτη φορά έπειτα από τη δεκαετία του 1960. Με βάση τις αναλύσεις μας, εκτιμάται ότι οι εκροές λόγω υπερχειλίσης υπερέβησαν τα 30 hm³, σε διάστημα περίπου ενός τριμήνου.

2.2 Χρονική εξέλιξη στάθμης Παραλίμνης

Σύμφωνα με αναφορές των αρμοδίων της ΔΕΥΑ Χαλκίδας, από τις αρχές Φεβρουαρίου, οπότε ξεκίνησε η υπερχειλίση της Υλίκης, η στάθμη της Παραλίμνης άρχισε να ανυψώνεται με ρυθμό της τάξης των 10 mm την ώρα (ήτοι 20-25 cm την ημέρα). Στις 8/3/2019, η στάθμη μετρήθηκε στα +44.40 m, ενώ ένα μήνα μετά, στις 8/4/2019, είχε ήδη φτάσει στα +49.50 m. Στις 18/4/2019, με στάθμη +51.25 m, η λίμνη ήταν στο όριο της υπερχειλίσης (είχε κατακλυσθεί η προσαγωγός διώρυγα, αλλά δεν υπήρχε ροή στη σήραγγα Ανθηδώνας), ενώ την επομένη, ήτοι στις 19/4/2019, ξεκίνησε η υπερχειλίση, που φαίνεται ότι σταμάτησε στις αρχές του δευτέρου δεκαημέρου του Ιουλίου. Η μέγιστη υψομετρική διαφορά ως προς τη στάθμη υπερχειλίσης της σήραγγας ήταν περίπου 1.60 m (άρα η λίμνη ανήλθε περίπου ως τα +53.0 m), τιμή που παρατηρήθηκε πριν τις 23/5/2019 (Α. Κουτσαυλής, προσωπική επικοινωνία, 6/11/2019). Στην **Εικόνα 2.1** δίνεται διάγραμμα μετρήσεων στάθμης από τη ΔΕΥΑΧ κατά το δίμηνο Μαρτίου-Απριλίου. Τέλος, με βάση φωτογραφία ληφθείσα στις 5/11/2019, φαίνεται ότι η στάθμη της Παραλίμνης έχει κατέλθει περίπου 0.4 m κάτω από τη γέωτρηση Γ4, που αντιστοιχεί σε υψόμετρο +48.2 m.

Σημειώνεται ότι πολλά από τα αναφερόμενα υψομετρικά μεγέθη διέπονται από ανακρίβειες, καθώς αρκετές από τις μετρήσεις έχουν γίνει με χρήση GPS.



Εικόνα 2.1: Μετρήσεις στάθμης Παραλίμνης από τη ΔΕΥΑΧ (Α. Κουτσαυλής, προσωπική επικοινωνία, 6/11/2019)..

2.3 Επιπτώσεις πλημμυρικής κατάκλυσης και αντιμετώπισή τους

Στην **Εικόνα 2.2** δίνονται χαρακτηριστικά φωτογραφικά στιγμιότυπα που ελήφθησαν στις 21/4/2019, ήτοι την τρίτη ημέρα της υπερχειλίσης της Παραλίμνης. Λόγω της ανόδου της στάθμης της λίμνης, υπήρξαν σημαντικές δυσμενείς επιπτώσεις στις υποδομές της ΔΕΥΑΧ, ήτοι η κατάκλυση τεσσάρων γεωτρήσεων (Γ3, Γ5, Γ1, Γ4) και του υπογείου του κτηρίου της. Επίσης, υπήρξαν ζημιές στο τοπικό οδικό και ηλεκτρικό δίκτυο στην περιοχή των Ούγγρων. Η ΔΕΥΑΧ, σε συνεργασία με τους λοιπούς αρμόδιους φορείς, προέβη άμεσα σε σειρά επεμβάσεων, από τις οποίες αναφέρονται ενδεικτικά (Α. Κουτσαυλής, προσωπική επικοινωνία, 31/10/2019):

- Μετατροπή των τεσσάρων γεωτρήσεων που κατακλύστηκαν σε υποβρύχιες (η μετατροπή αυτή έγινε λίγο πριν την κατάκλυση)
- Ανύψωση του κτιρίου Ενέργειας της ΔΕΥΑΧ κατά ένα όροφο, όπου μεταφέρθηκαν η Μέση και Χαμηλή Τάση των αντλιών.
- Τροποποίηση της όδευσης των αγωγών Μέσης Τάσης της ΔΕΗ γιατί κατακλύστηκαν οι κολώνες.
- Κατασκευή νέας τοπικής οδοποιίας στα Ούγγρα και μάλιστα δύο φορές, καθώς η πρώτη κατακλύστηκε από νερά.
- Τροποποίηση-ανύψωση της οδοποιίας της οδού Λουκισίων-Μουρικίου.

Όπως φαίνεται στις τελευταίες φωτογραφίες της **Εικόνας 2.2**, η υπερχειλίση της Παραλίμνης είχε ως συνέπεια και την πλημμυρική κατάκλυση ενός τμήματος της παραλίας Ανθηδώνας, χωρίς ωστόσο να αναφερθούν ζημιές. Γενικά, η έγκαιρη και συντονισμένη αντιμετώπιση των προβλημάτων βοήθησε στο να αμβλυνθούν οι συνέπειες του φαινομένου, που ενείχε τον δυνητικό κίνδυνο ακόμα και της διακοπής της υδροδότησης των περιοχών που εξυπηρετεί η ΔΕΥΑΧ.



Εικόνα 2.2: Φωτογραφίες από την υπερχείλιση της Παραλίμνης και της διοχέτευσης των πλεοναζόντων υδάτων στον κόλπο της Ανθηδώνας (αρχείο Α. Κουτσαυλή).

3 Υδατικό ισοζύγιο Υλίκης: Επικαιροποίηση και αναθεώρηση

3.1 Γενικά

Για τις ανάγκες της μελέτης επικαιροποιήθηκαν όλα τα πρωτογενή δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, μέχρι τις αρχές του τρέχοντος υδρολογικού έτους, ήτοι τον Οκτώβριο του 2019. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν παρατηρήσεις στάθμης, εισροών από τον Βοιωτικό Κηφισό, όπως μετρώνται στη Διώρυγα Καρδίτσας, βροχόπτωσης από τον μετεωρολογικό σταθμό στο Μουρίκι και απολήψεων για ύδρευση και άρδευση, σε ημερήσια κλίμακα. Ακόμη, συλλέχθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης από τον αυτόματο μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στη Θήβα, που λειτουργεί από τον Μάιο του 2006.

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης στο χρονικό διάστημα Δt γράφεται:

$$\Delta S = Q_{BK} + Q_Y + P - R_A - R_K - E - L - Y \quad (3.1)$$

όπου ΔS η μεταβολή του αποθέματος της λίμνης στο υπόψη χρονικό διάστημα, Q_{BK} οι εισροές από τη λεκάνη απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, οι οποίες εκτρέπονται στην Υλίκη μέσω της Σήραγγας Καρδίτσας, Q_Y οι εισροές από την τοπική λεκάνη της Υλίκης, P η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα, R_A οι αντλήσεις νερού για ύδρευση της Αθήνας και των άλλων μικρών καταναλωτών κατά μήκος του υδραγωγείου Υλίκης, μέσω του αντλιοστασίου Μουρικίου, R_K οι αντλήσεις νερού για άρδευση της Κωπαΐδας, E οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, L οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών, και Y οι απώλειες λόγω υπερχείλισης.

Στη σχέση (3.1) μπορούν να εκτιμηθούν, με διαφορετικά επίπεδα ακρίβειας, όλες οι μεταβλητές πλην των διαφυγών. Συνεπώς, σκοπός της κατάρτισης του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης είναι, μεταξύ άλλων, είναι η έμμεση εκτίμηση των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης, βάσει των οποίων μπορούν να καταρτιστούν εμπειρικές σχέσεις εκτίμησής τους, συναρτήσει της στάθμης της. Αντίστροφα, αν είναι διαθέσιμες προγνώσεις των υδρολογικών εισροών, της εξάτμισης και των απολήψεων για τις δύο χρήσεις νερού, μπορεί να εκτιμηθεί η εξέλιξη των αποθεμάτων και, συνακόλουθα, της στάθμης της Υλίκης, εισάγοντας τις υπόψη σχέσεις στάθμης-διαφυγών σε ένα μοντέλο προσομοίωσης.

Στη συνέχεια εξηγείται η εκτίμηση των μεταβλητών της εξίσωσης (3.1), και το αναθεωρημένο πλαίσιο κατάρτισης του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης, στη μηνιαία χρονική κλίμακα. Οι πλήρεις υπολογισμοί γίνονται για την περίοδο 1/10/1977 έως 1/10/2019, ήτοι για 42 υδρολογικά έτη.

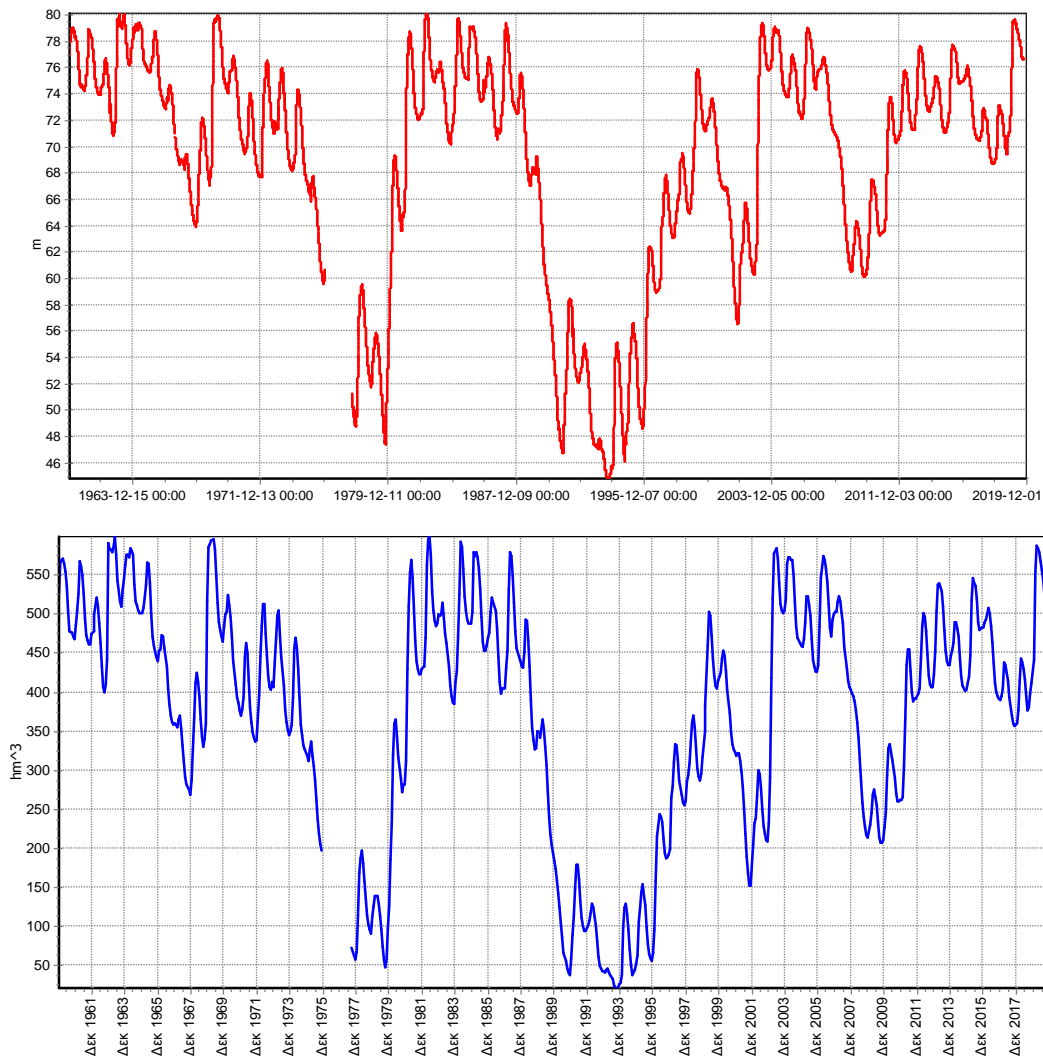
3.2 Δεδομένα στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας

Ο συμβατικός τρόπος μέτρησης της στάθμης του ταμιευτήρα Υλίκης γίνεται με την ανάγνωση σταθμημέτρου σε ημερήσια βάση, το οποίο έχει τοποθετηθεί σε τεχνητή λίμνη που έχει δημιουργηθεί κοντά στο αντλιοστάσιο Μουρικίου για να διευκολύνει την άντληση. Το σταθμήμετρο λειτουργεί όταν η στάθμη της λίμνης κυμαίνεται μεταξύ των 68 και 80 m. Οι χαμηλότερες στάθμες μετριοούνται με την τοποθέτηση σταθμημέτρων σε διάφορα σημεία της λίμνης, ανάλογα με την στάθμη της. Η ρύθμιση της κλίμακας των σταθμημέτρων αυτών γίνεται με την πραγματοποίηση χωροστάθμησης, έτσι ώστε η παρατήρηση να γίνεται σε απόλυτο υψόμετρο.

Με βάση την ημερήσια χρονοσειρά μετρήσεων στάθμης, εκτιμώνται το απόθεμα της λίμνης, καθώς και η έκταση που καταλαμβάνει. Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τις τιμές στάθμης-αποθέματος-επιφάνειας του Πίνακα 3.1, όπου για δεδομένη τιμή στάθμης εκτιμώνται οι δύο άλλες μεταβλητές

μέσω λογαριθμικής παρεμβολής μεταξύ της αμέσως μεγαλύτερης και αμέσως μικρότερης γνωστής τιμής του πίνακα. Οι υπολογισμοί αυτοματοποιούνται στο λογισμικό Υδρογνώμων.

Δεδομένου ότι διατίθενται χρονοσειρές ημερήσιας στάθμης από το 1960, οι υπολογισμοί καλύπτουν όλη την περίοδο των δεδομένων. Στην **Εικόνα 3.1** φαίνεται η εξέλιξη της στάθμης και του αντίστοιχου αποθέματος της Υλίκης από τον Ιανουάριο του 1960 έως τον Οκτώβριο του 2019. Οι διαχρονικές μεταβολές των δύο μεγεθών είναι εντυπωσιακές, καθώς συσσωρεύονται μακρές περίοδοι υψηλής και χαμηλής υδροφορίας, ενώ σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα μπορεί να υπάρξει εναλλαγή από τη μία στην άλλη κατάσταση.



Εικόνα 3.1: Χρονοσειρές στάθμης Υλίκης (πάνω) και αποθέματος (κάτω) των ετών 1960 ως 2019 (εκλείπουν οι τιμές της περιόδου 1/1/1976 έως 9/9/1977, για την οποία δεν υπάρχουν μετρήσεις).

Αν επικεντρωθούμε στην τελευταία δεκαετία, παρατηρούμε ότι μετά την τελευταία έντονη ξηρασία την περίοδο 2007-2009, υπήρξε ανάκαμψη της υδροφορίας, και μέχρι πρόσφατα η στάθμη της Υλίκης κυμαινόταν μεταξύ +69 έως +77 m, περίπου, που αντιστοιχεί σε απόθεμα μεταξύ 360 και 530 hm³. Τα υδρολογικά έτη 2016-17 και 2017-18 ήταν σχετικά μέτρια από πλευράς εισροών, με συνέπεια τον Νοέμβριο του 2017 η στάθμη της Υλίκης να βρεθεί στα χαμηλότερα επίπεδα της δεκαετίας, ήτοι στα +68.6 m. Στα τέλη του υδρολογικού έτους 2017-18, η στάθμη της λίμνης είχε βρεθεί στο χαμηλό των +69.40 m (στις 25/9/2018), για να ακολουθήσει μια περίοδος εξαιρετικά υψηλών εισροών, που οδήγησαν στην υπερχειλίση της, που εκτιμάται ότι πραγματοποιείται σε υψόμετρο +78.3 m. Στην έξαρση του φαινομένου, η στάθμη της υλίκης έφτασε έως και τα +79.61 m

(στις 18/3/2019), αυξήθηκε δηλαδή πάνω από 10 μέτρα, σε διάστημα μόλις έξι μηνών. Βεβαίως, κατά το πρόσφατο παρελθόν έχουν παρατηρηθεί ακόμα πιο εντυπωσιακές μεταβολές σε αντίστοιχα μικρά διαστήματα, π.χ. από +60.21 m στις 2/12/2002 στα +78.91 m στις 3/6/2003.

Σημειώνεται ότι υπέρβαση της στάθμης πάνω από το θεσμοθετημένο άνω όριο των +80.0 m είναι απολύτως ανεπιθύμητη, καθώς θα προκαλέσει κατάκλυση των χαμηλών περιοχών του οικισμού Μουρικίου. Στην πραγματικότητα, το όριο ασφαλείας είναι λίγο χαμηλότερα, στα +79.8 m, πάνω από το οποίο κινδυνεύουν οι εγκαταστάσεις της ΕΥΔΑΠ (αντλιοστάσια) στο Μουρίκι.

Πίνακας 3.1: Σχέση στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος 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			

3.3 Βροχόπτωση

Στην περιοχή της λίμνης Υλίκης λειτουργούν δύο συμβατικοί μετεωρολογικοί σταθμοί κοντά στο αντλιοστάσιο Μουρικίου. Ο πρώτος είναι εγκατεστημένος στη δυτική πλευρά της περιφράξης του αντλιοστασίου και περιλαμβάνει ανεμογράφο, βροχόμετρο και θερμόμετρο. Υπεύθυνος φορέας για την λειτουργία του είναι η ΕΥΔΑΠ. Ο δεύτερος σταθμός βρίσκεται σε απόσταση 60 περίπου m και αντιδιαμετρικά από τον πρώτο ως προς τη διώρυγα Μουρικίου. Ο σταθμός αυτός έχει δική του πρόχειρη περιφράξη, περιλαμβάνει βροχόμετρο, εξαμισίμετρο και θερμόμετρο, και υπεύθυνος φορέας για την λειτουργία του είναι το ΥΠΕΝ (πρώην ΥΠΕΧΩΔΕ/ΥΠΕΚΑ). Οι δύο σταθμοί είναι σε ακατάλληλη θέση από υδρολογικής πλευράς, δεδομένου ότι ο πρώτος περιβάλλεται από δένδρα και δεν έχει την απαιτούμενη απόσταση από το κτίριο του αντλιοστασίου, ενώ ο δεύτερος βρίσκεται κάτω ακριβώς από πολύ ψηλά δένδρα (Μαμάσης, 2004). Η προβληματική λειτουργία του σταθμού Μουρικίου του ΥΠΕΝ επιβεβαιώνεται και από παλαιότερες στατιστικές αναλύσεις των δεδομένων του (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004). Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης έγινε αντιπαραβολή των ημερήσιων δειγμάτων των δύο σταθμών, από την οποία προκύπτουν μικρές αλλά όχι αμελητέες

διαφορές, τόσο στις τιμές των υψών βροχής όσο και στον αριθμό των γεγονότων βροχής. Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι ο σταθμός της ΕΥΔΑΠ περιέχει περισσότερα γεγονότα βροχόπτωσης, και γενικά φαίνεται ότι πιο αξιόπιστος σε σχέση με αυτόν του ΥΠΕΝ.

Στις εγκαταστάσεις του αντλιοστασίου Μουρικίου, σε απόσταση περίπου 60 m από τον δυτικό τοίχο της Νέας Αποθήκης, υπάρχει και αυτόματος μετεωρολογικός σταθμός, που τοποθετήθηκε το 2002, στο πλαίσιο παλαιότερης ερευνητικής συνεργασίας του ΕΜΠ με την ΕΥΔΑΠ (Μαμάσης κ.ά., 2000· Μαμάσης, 2004). Η θέση του σταθμού είναι εξαιρετική από πλευράς υδρολογικής καταλληλότητας. Ωστόσο, σε σύντομο διάστημα, ο σταθμός εμφάνισε προβλήματα στη λειτουργία του, εξαιτίας της έμφραξης του μετρητικού οργάνου, οπότε τα δεδομένα του ήταν μη αξιοποιήσιμα. Από την άλλη, επισημαίνεται ότι μετά από σχετικά πρόσφατη (2016) συντήρηση του μετεωρολογικού σταθμού, η λειτουργία του είναι υποδειγματική.

Τελικά, για την εκτίμηση του ύψους βροχόπτωσης στη λίμνη Υλίκη χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δύο μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής. Συγκεκριμένα:

- Μέχρι τον Δεκέμβριο του 2000 λαμβάνονται τα μηνιαία βροχομετρικά δεδομένα του σταθμού Αλιάρτου της ΕΜΥ, που ήταν από τους πλέον αξιόπιστους της ευρύτερης περιοχής. Το πρωτογενές δείγμα του σταθμού καλύπτει μια πολύ μεγάλη χρονική περίοδο μήκους 90 ετών, από το 1907 έως το 1997. Για τρία ακόμη έτη περίπου ο σταθμός λειτούργησε πλημμελώς, και οι ελλείψεις του είχαν συμπληρωθεί μέσω γραμμικής συσχέτισης με την χρονοσειρά βροχόπτωσης του σταθμού Τανάγρας (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004).
- Από τον Ιανουάριο του 2001 λαμβάνονται τα στοιχεία του συμβατικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ.

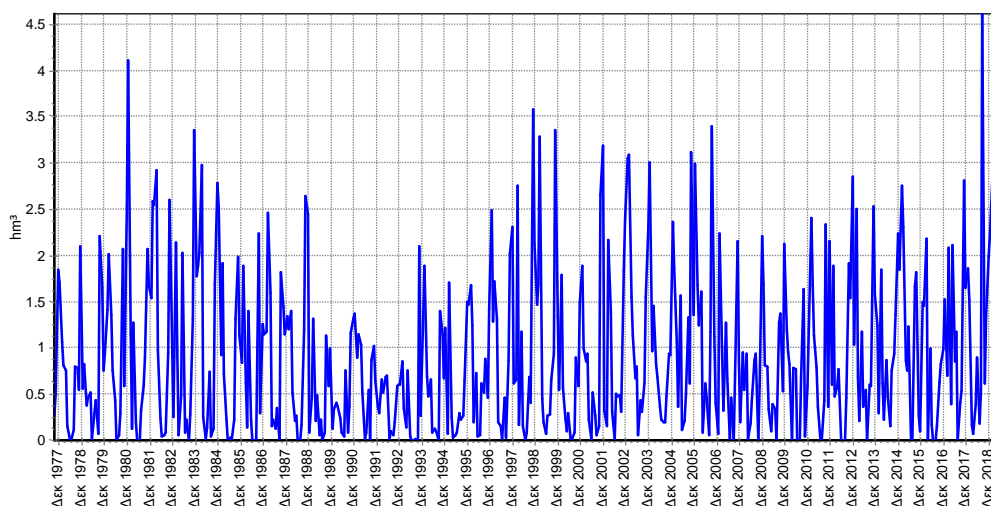
Τα βασικά στατιστικά χαρακτηριστικά των σταθμών Αλιάρτου (ΕΜΥ) και Μουρικίου (ΕΥΔΑΠ), για την αντίστοιχη περίοδο λειτουργίας του καθενός, συνοψίζονται στους **Πίνακες 3.2** και **3.3**, αντίστοιχα. Η χρονοσειρά μηνιαίας επιφανειακής βροχόπτωσης στην επιφάνεια της Υλίκης γίνεται με μεταφορά των σημειακών δειγμάτων των δύο σταθμών, χωρίς υψομετρική αναγωγή, δεδομένου ότι και οι δύο βρίσκονται πολύ κοντά στην λίμνη. Στη συνέχεια, οι εισροές λόγω βροχόπτωσης, όπως και οι απώλειες λόγω εξάτμισης, εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας τα αντίστοιχα ισοδύναμη ύψη νερού επί τη μέση επιφάνεια της λίμνης κατά το αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Στην **Εικόνα 3.2** απεικονίζεται η παραχθείσα χρονοσειρά μηνιαίων εισροών λόγω επιφανειακής βροχόπτωσης για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19.

Πίνακας 3.2: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς βροχόπτωσης σταθμού Αλιάρτου (ΕΜΥ) για την περίοδο Ιανουαρίου 1964 έως Δεκεμβρίου 2000 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	70.2	82.0	97.6	79.2	72.2	75.4	37.1	28.4	18.3	6.1	14.1	20.7	603.5
Τυπ. απόκλ.	56.5	52.4	51.1	48.0	41.9	41.2	30.5	22.5	22.9	7.8	18.0	25.1	124.7
Ελάχιστο	0.3	1.2	25.6	5.0	5.7	5.7	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	335.9
Μέγιστο	234.0	249.7	215.6	212.4	187.0	160.9	125.2	85.6	96.0	27.8	73.7	126.0	855.5

Πίνακας 3.3: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς βροχόπτωσης σταθμού Μουρικίου (ΕΥΔΑΠ) για την περίοδο Ιανουαρίου 2001 έως Απριλίου 2015 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	54.2	72.0	89.4	69.5	65.0	64.8	23.8	28.2	16.3	16.7	7.7	47.3	562.1
Τυπ. απόκλ.	41.4	57.0	63.2	48.8	42.0	43.5	18.8	28.5	16.2	30.7	14.4	61.1	149.0
Ελάχιστο	0.0	2.5	4.5	3.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	316.5
Μέγιστο	168.5	250.5	286.7	185.0	141.0	179.5	67.0	102.6	53.5	131.0	49.5	236.4	1003.2



Εικόνα 3.2: Χρονοσειρά μηνιαίων εισροών λόγω βροχόπτωσης στην επιφάνεια της Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19 (τιμές σε hm^3).

3.4 Απώλειες λόγω εξάτμισης

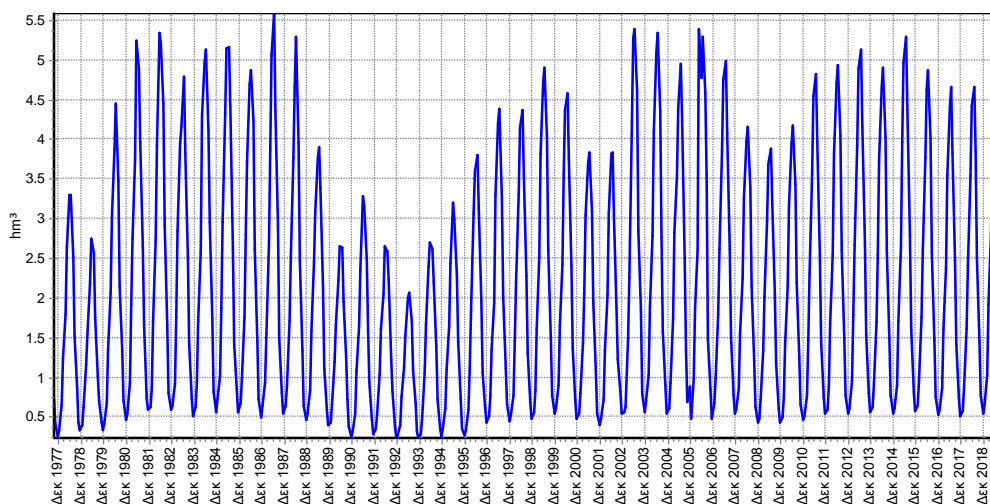
Για την εκτίμηση των μηνιαίων υψών εξάτμισης, που στη συνέχεια μετατρέπονται σε όγκους, πολλαπλασιάζοντας επί τη μέση επιφάνεια της λίμνης κάθε μήνα, εφαρμόζονται τρεις προσεγγίσεις διαφορετικής ακρίβειας:

- Τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 1978-88 η εξάτμιση εκτιμάται με την αναλυτική μέθοδο Penman, η οποία περιγράφει το πλήρες φυσικό πλαίσιο της εξάτμισης συναρτήσσει τεσσάρων μετεωρολογικών μεταβλητών, ήτοι της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, των ωρών ηλιοφάνειας και της ταχύτητας ανέμου. Η τεκμηρίωση των υπολογισμών και τα σχετικά δεδομένα αναφέρονται στην έκθεση των Ευστρατιάδη κ.ά. (2000).
- Την περίοδο μέχρι και τον Δεκέμβριο του 1998 γίνεται επέκταση του δείγματος κατά Penman μέσω μιας παραμετρικής μεθόδου, που χρησιμοποιεί ως είσοδο μόνο τη θερμοκρασία. Η μέθοδος προτάθηκε, αρχικά, από τους Κουτσογιάννη και Ξανθόπουλο (1997), για να γενικευτεί μετά με την εφαρμογή της σε πληθώρα εκτιμήσεων εξάτμισης και δυνητικής εξατμοδιαπνοής στην Ελλάδα και τον κόσμο (Tegos *et al.*, 2013, 2017).
- Από τον Ιανουάριο του 1999 και έκτοτε εφαρμόζονται οι μέσες τιμές μηνιαίων υψών εξάτμισης της περιόδου 1997-1997, που δίνονται στον **Πίνακα 3.4**, στον οποίο συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του ενοποιημένου δείγματος των ετών 1977 έως 1998.

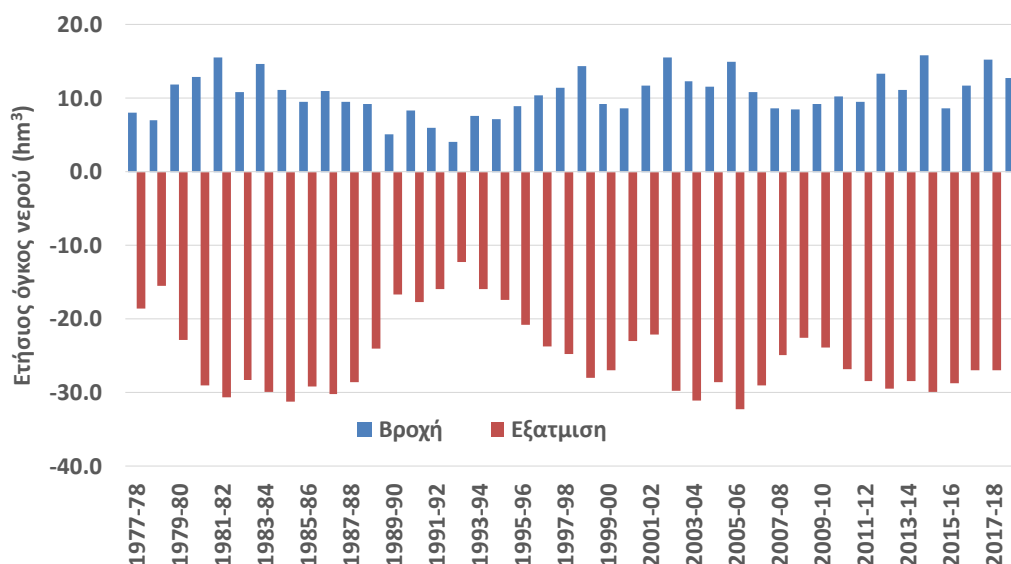
Σε όρους υψών εξάτμισης παρατηρούνται, όπως είναι αναμενόμενο, μικρές διακυμάνσεις από έτος σε έτος, καθώς η υπόψη διεργασία διέπεται από μικρή μεταβλητότητα (τυπική απόκλιση 30 mm, έναντι μέσης τιμής 1345 mm). Ωστόσο, σε όρους όγκου, επειδή το ύψος εξάτμισης ανάγεται στην επιφάνεια της λίμνης, οι υπερετήσιες διακυμάνσεις των απωλειών είναι πιο έντονες (**Εικόνα 3.3**).

Πίνακας 3.4: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς υψών εξάτμισης από τη λίμνη Υλίκη για την περίοδο 1977-1997 (mm).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιουλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	73.6	37.6	25.7	29.6	43.7	78.9	116.6	169.3	217.0	232.8	195.0	127.2	1345.0
Τυπ. απόκλ.	5.2	1.7	1.2	1.1	2.1	3.4	6.0	9.3	9.2	11.6	10.7	8.4	30.7
Ελάχιστο	64.9	34.9	22.9	27.3	40.7	70.0	106.0	155.4	194.8	219.0	165.2	102.0	1277.6
Μέγιστο	84.8	40.3	28.2	31.3	48.6	83.8	128.0	183.5	233.9	261.9	213.2	145.3	1406.5



Εικόνα 3.3: Χρονοσειρά μηνιαίων απωλειών λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια της Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19 (τιμές σε hm^3).



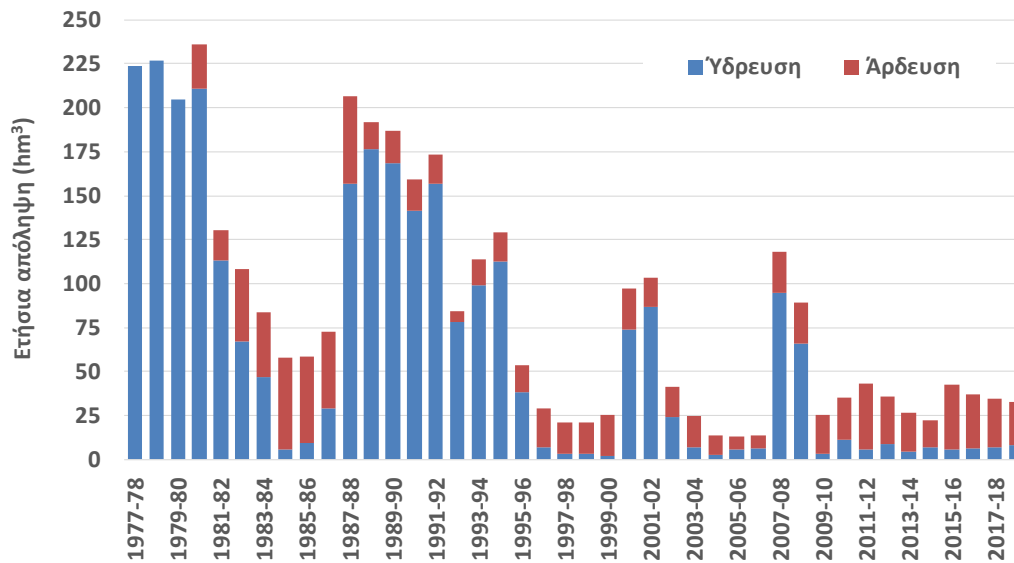
Εικόνα 3.4: Σύγκριση ετήσιων εισροών λόγω βροχόπτωσης και απωλειών λόγω εξάτμισης από την επιφάνεια της Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19 (τιμές σε hm^3).

Στην **Εικόνα 3.4** αντιπαραβάλλονται οι εισροές λόγω βροχόπτωσης με τις απώλειες λόγω εξάτμισης, στην ετήσια κλίμακα. Κατά μέσο όρο, εισέρχονται 10.6 hm^3 , ενώ χάνονται 25.3 hm^3 , που συνεπάγεται καθαρή απώλεια νερού της τάξης των 14.7 hm^3 ετησίως.

3.5 Απολήψεις για ύδρευση και άρδευση

Οι αντλήσεις νερού μέσω των αντλιοστασίων της ΕΥΔΑΠ, που διοχετεύονται στο υδραγωγείο Υλίκης, καθώς και οι αντλήσεις για άρδευση του Κωπαϊδικού πεδίου, δίνονται από την ΕΥΔΑΠ σε ημερήσια κλίμακα. Στο διάγραμμα της **Εικόνας 3.5** φαίνεται η ετήσια εξέλιξη των δύο χρήσεων νερού. Παρατηρείται ότι μετά την ένταξη των έργων του Ευήνου στο υδροδοτικό σύστημα (από το 1995 μερικώς, και από το 2001 πλήρως), οι απολήψεις για ύδρευση είναι μικρές, με εξαίρεση κάποια ιδιαίτερα ξηρά έτη. Πλέον, η ΕΥΔΑΠ γενικά αντλεί μόνο μια σταθερή παροχή συντήρησης της τάξης των 20 000 m^3 ανά ημέρα. Αντίθετα, οι αρδευτικές απολήψεις είναι σχετικά αυξημένες, και μάλιστα

το έτος 2016 ανήλθαν στα 36.4 hm³. Το διαρρέυσαν υδρολογικό έτος 2018-19, αντλήθηκαν από την Υλίκη 8.4 hm³ για ύδρευση και 24.1 hm³ για άρδευση, ήτοι σύνολο 35.5 hm³.



Εικόνα 3.5: Ετήσιες αντλήσεις για ύδρευση και άρδευση από την Υλίκη (τιμές σε hm³).

3.6 Εισροές λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

3.6.1 Υδρομετρικά δεδομένα και επεξεργασίες

Η επιφανειακή απορροή της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού, έκτασης 1930 km², διοχετεύεται στην Υλίκη μέσω της Συγκεντρωτικής Διώρυγας και, στη συνέχεια, της Σήραγγας Καρδίτσας, αποτελώντας τη σημαντικότερη συνιστώσα εισροών στη λίμνη. Η εισροή αυτή υπολογίζεται σε ημερήσια βάση, με μέτρηση της στάθμης στον υδρομετρικό σταθμό της Διώρυγας Καρδίτσας. Ο εν σταθμός ξεκίνησε να λειτουργεί από τα τέλη του 19ου αιώνα, μετά δηλαδή την ολοκλήρωση των έργων αποξήρανσης της Κωπαΐδας, και διαθέτει το μεγαλύτερο δείγμα απορροών στην Ελλάδα (από το 1907). 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 γίνονται επί της Συγκεντρωτικής Διώρυγας, περί τα 800 m ανάντη της σήραγγας, όπου η ΕΥΔΑΠ εγκατέστησε το πλέον πρόσφατο νέο σταθμήμετρο. Σημειώνεται ότι μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 υπήρχε και δεύτερο σταθμήμετρο, το οποίο λειτουργούσε υπό την εποπτεία του (τότε) ΥΠΕΧΩΔΕ. Επιπλέον, στα πλαίσια ερευνητικού έργου του ΕΜΠ, το 2002 υλοποιήθηκε ένα αυτόματο σύστημα μέτρησης της στάθμης της διώρυγας Καρδίτσας, το οποίο τοποθετήθηκε στη γέφυρα της επαρχιακής οδού που οδηγεί στο Ακραιφνίο, ανάντη των υπαρχόντων σταθμημέτρων της ΕΥΔΑΠ. Ωστόσο, η σύγκριση των μετρήσεων στάθμης των δύο σταθμών (συμβατικού και αυτόματου) δείχνει σημαντικές αποκλίσεις, ιδιαίτερα σε συγκεκριμένες περιοχές του πεδίου τιμών (Μαμάσης, 2004).

Το 1978, η ΕΥΔΑΠ πραγματοποίησε μία υδρομέτρηση στη νέα διώρυγα με στόχο τον προσδιορισμό του συντελεστή τραχύτητας της. Με τη χρήση της εξίσωσης ομοιόμορφης ροής του Manning, και γνωρίζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διώρυγας (διατομή, κλίση) ο συντελεστής αυτός προσδιορίστηκε σε 55 (στην σχέση εισάγεται ως ο λόγος $N = 1/55 = 0.018$). Εφαρμόζοντας τη σχέση του Manning για διάφορες στάθμες, καταρτίστηκε η καμπύλη στάθμης-παροχής της διώρυγας, που έκτοτε εφαρμόζεται (σε πινακοποιημένη μορφή) για την αναγωγή της στάθμης, η οποία λαμβάνεται κάθε πρωί από τον εκάστοτε παρατηρητή της ΕΥΔΑΠ, σε παροχή.

Ο οριζοντιογραφικός προσδιορισμός του σταθμημέτρου και η διατομή της διώρυγας στη θέση μέτρησης επιβεβαιώθηκαν το 1989 με στοιχειώδεις τοπογραφικές εργασίες του ΕΜΠ (Ρώτη κ.ά., 1990). Με βάση τη διατομή της διώρυγας και τον εκτιμημένο συντελεστή τραχύτητας, καταρτίστηκε από το ΕΜΠ νέα καμπύλη στάθμη-παροχής. Η καμπύλη αυτή διαφοροποιείται από της ΕΥΔΑΠ μόνο από τη στάθμη των 3.30 m και άνω (αντιστοιχεί σε παροχή 93.71 m³/s), για την οποία η διατομή γίνεται σύνθετη. Για τον υπολογισμό της παροχής εφαρμόζεται η προσέγγιση των Noutsopoulos and Xadjiranos (1983). Η καμπύλη που καταρτίστηκε από το ΕΜΠ δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα – ενδεικτικά αναφέρεται ότι στη στάθμη των 5 m η παροχή είναι μικρότερη κατά 10%.

Η αξιολόγηση και επεξεργασία των μετρήσεων στάθμης για την εξαγωγή ενός αξιόπιστου δείγματος ημερήσιων και μηνιαίων απορροών έχει γίνει από τους Ρώτη κ.ά. (1990). Το δείγμα αυτό κάλυπτε την περίοδο από τον Ιανουάριο του 1907 έως τον Απρίλιο του 1989, με εξαίρεση τον Σεπτέμβριο του 1964 έως τον Νοέμβριο του 1967, οπότε δεν λειτούργησε η διώρυγα λόγω επισκευών, και από τον Οκτώβριο του 1976 έως τον Σεπτέμβριο του 1977, διάστημα κατά το οποίο κατασκευάστηκε η νέα διώρυγα. Για τις περιόδους αυτές δεν υπήρχαν μετρήσεις στάθμης, και συνεπώς δεν ήταν δυνατή η εκτίμηση των εισροών. Μεταγενέστερα, οι Ευστρατιάδης κ.ά. (2000, 2004) επέκτειναν το δείγμα και συμπλήρωσαν τα κενά του με την μέθοδο της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, με είσοδο της απορροή του προηγούμενου μήνα και τη βροχόπτωση στον σταθμό Αλιάρτου.

Σε δύο πιλοτικές υδρομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις 7/1/2019 και στις 29/1/2003 από το ΕΜΠ, για στάθμες 1.30 και 2.55 m, εκτιμήθηκαν παροχές 14.78 και 61.59 m³/s, αντίστοιχα, ενώ με την σχέση της ΕΥΔΑΠ οι εκτιμώμενες παροχές είναι 16.88 και 57.31 m³/s, αντίστοιχα (Μαμάσης, 2004). Ειδικότερα, στη δεύτερη υδρομέτρηση, κατά την οποία ελήφθησαν 30 μετρήσεις ταχυτήτων σε όλο το εύρος της διατομής, η εκτίμηση της παροχής έγινε με διάφορες μεθόδους ολοκλήρωσης, που έδωσαν ένα αρκετά μεγάλο εύρος εκτιμώμενων παροχών και αντίστοιχων συντελεστή Manning. Η θεωρούμενη ως πλέον αληθοφανής παροχή των 61.59 m³/s αντιστοιχεί σε $N = 1/59 = 0.017$, ήτοι πολύ κοντά στην τιμή που εκτίμησε η ΕΥΔΑΠ το 1977, ενώ άλλες τεχνικές ολοκλήρωσης έδωσαν έως και 25% μικρότερες εκτιμήσεις της μέσης ταχύτητας, που αντιστοιχούν σε $N = 1/45 = 0.022$ (Πέππα, 2008). Αλλά και η πρώτη υδρομέτρηση, που δίνει αρκετά χαμηλότερη παροχή από την εκτιμώμενη με την καμπύλη της ΕΥΔΑΠ, ήτοι 14.78 έναντι 16.88 m³/s (μείωση κατά 12%), που ενδεχομένως οφείλεται σε υποεκτίμηση την τραχύτητας (καθώς για παροχή 14.78 m³/s προκύπτει $1/N = 1/48 = 0.021$). Πάντως, θεωρούμε εύλογο να έχει αυξηθεί η τραχύτητα της διατομής με την πάροδο των ετών, που σημαίνει ότι οι εισροές που δίνονται από την ΕΥΔΑΠ ενδέχεται να είναι υπερεκτιμημένες.

Προβληματισμό δημιουργεί και η ανάλυση την Ευστρατιάδη κ.ά. (2004), όπου γίνεται σύγκριση των παροχών που εκτιμά η ΕΥΔΑΠ με σειρά υδρομετρήσεων του ΙΓΜΕ, που είχαν πραγματοποιηθεί την περίοδο 1986-1989 λίγο ανάντη του υδρομετρικού σταθμού της ΕΥΔΑΠ (Παγούνης κ.ά., 1994). Στην υπόψη διερεύνηση αναφέρεται ότι το ΙΓΜΕ εκτιμά συστηματικά μεγαλύτερες παροχές σε σχέση με την ΕΥΔΑΠ, με τη διαφορά να κυμαίνεται περί το 10%. Το γεγονός αυτό προκαλεί έκπληξη, καθώς υποδηλώνει αύξηση της τιμής του συντελεστή $1/N$, που δεν επιβεβαιώνεται ούτε από τις δύο μεταγενέστερες υδρομετρήσεις του ΕΜΠ ούτε από τη φυσική ερμηνεία του υπόψη συντελεστή, που κανονικά θα έπρεπε να μειώνεται διαχρονικά, λόγω φθορών και επικαθήσεων στη διατομή.

3.6.2 Κατάρτιση χρονοσειράς εισροών λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού με βάση μετρήσεις της ΕΥΔΑΠ στη Διώρυγα Καρδίτσας

Με την επιφύλαξη όλων όσων αναφέρονται παραπάνω, εξήχθη η χρονοσειρά μηνιαίων απορροών του Βοιωτικού Κηφισού που διοχετεύονται στην Υλίκη μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας, που καλύπτει 112 υδρολογικά έτη, ήτοι από το 1907-08 έως το 2018-19 (πρόκειται για το μεγαλύτερο δείγμα απορροών στον ελληνικό χώρο). Η χρονοσειρά παρήχθη ως εξής:

- Από τον Οκτώβριο του 1907 μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2002 εφαρμόζονται οι μηνιαίες τιμές των Ευστρατιάδη και Μαμάση (2004), με βάση επεξεργασίες των Ρώτη κ.ά. (1990), και με συμπλήρωση των (λίγων) κενών μηνών σύμφωνα με τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2000).
- Από τον Οκτώβριο του 2002 γίνεται συνάθροιση των ημερήσιων εισροών που λαμβάνονται από την ΕΥΔΑΠ, με βάση παλιά σχέση στάθμης-παροχής, ήτοι θεωρώντας $N = 1/55$ και χωρίς διόρθωση για τις στάθμες άνω των 3.30 m που η διατομή γίνεται σύνθετη (βεβαίως, οι περιπτώσεις υπέρβασης της εν λόγω στάθμης είναι σπάνιες, αφού από τον Οκτώβριο του 1994 και έκτοτε έχει παρατηρηθεί υψηλότερη ημερήσια παροχή μόλις 7 φορές).

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του συνολικού μηνιαίου δείγματος δίνονται στον **Πίνακα 3.5**.

Πίνακας 3.5: Βασικά στατιστικά μεγέθη χρονοσειράς απορροής Βοιωτικού Κηφισού που μετράται στη Διώρυγα Καρδίτσας για τα υδρολογικά έτη 1907-08 έως 2018-19 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	20.5	28.8	43.1	56.6	59.4	65.0	43.7	22.3	11.0	3.7	3.1	11.4	368.7
Τυπ. απόκλ.	10.9	17.1	30.7	31.1	32.0	29.9	26.1	15.8	11.0	6.8	4.8	8.9	160.3
Ελάχιστο	0.0	6.5	9.0	14.9	3.4	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	64.6
Μέγιστο	48.5	108.1	205.4	158.8	155.3	169.0	167.2	76.1	57.5	48.5	29.7	55.0	793.1

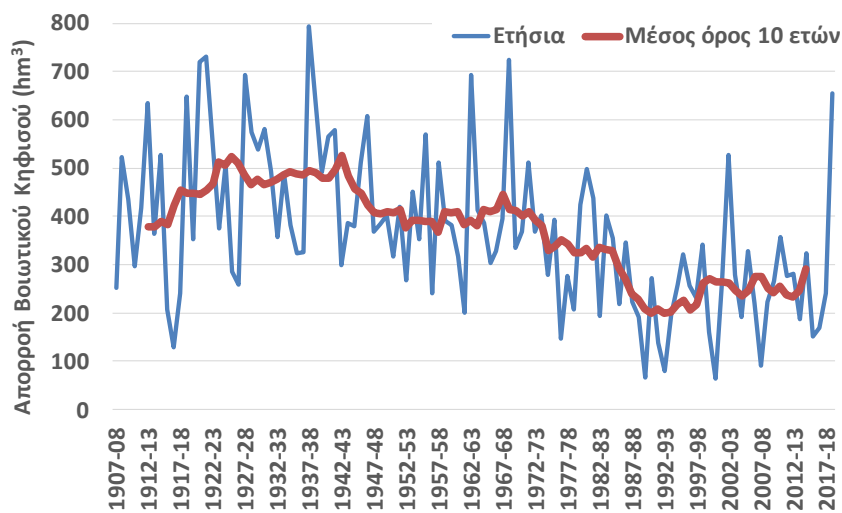
Στην **Εικόνα 3.6** απεικονίζεται η χρονοσειρά ετήσιας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού και οι κινούμενοι μέσοι όροι 10 ετών, που χαρακτηρίζονται από αξιοσημείωτη διαχρονική μεταβλητότητα. Συγκεκριμένα, μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1940, η μέση απορροή κυμαινόταν κοντά στα 500 hm^3 , στις αρχές της δεκαετίας του 1970 μειώθηκε στα 400 hm^3 , στα μέσα της δεκαετίας του 1980 κατήλθε σε μόλις 200 hm^3 , για να ανακάμψει πλέον στα επίπεδα των 300 hm^3 . Τα αίτια της επί σειρά δεκαετιών υποβάθμισης του επιφανειακού υδατικού δυναμικού της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού είναι εν μέρει φυσικά, ήτοι οφειλόμενα στις κλιματολογικές συνθήκες και ειδικότερα στη μείωση των βροχοπτώσεων (Nalbantis *et al.*, 1993), και εν μέρει ανθρωπογενή.

Πράγματι, στη λεκάνη αναπτύχθηκαν, διαχρονικά, διάφορα έργα για την αξιοποίηση των υδατικών της πόρων, κυρίως έργα υδρομάστευσης για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών, αλλά και έργα αντιπλημμυρικής προστασίας (διευθετήσεις, μικρά φράγματα), που προκάλεσαν αλλαγές στο καθεστώς της ροής. Ειδικά, οι επί δεκαετίες ολοένα αυξανόμενες αντλήσεις φαίνεται ότι οδήγησαν στη μείωση των υπόγειων αποθεμάτων της λεκάνης και, ως εκ τούτου, του υδατικού δυναμικού των μεγάλων καρστικών πηγών του μέσου και κάτω ρου (Μέλανα, Πολυγύρας, Μαυρονερίου), που είναι βασικοί τροφοδότες του Βοιωτικού Κηφισού. Η μείωση αυτή υπήρξε ιδιαίτερα έντονη τα ξηρά έτη, που γινόταν υπεράντληση των υδροφορέων. Οι αντλήσεις κορυφώθηκαν την περίοδο 1989-1994, όταν διανοίχτηκαν νέες γεωτρήσεις στον μέσο ρου του ποταμού για ενίσχυση της υδροδότησης της Αθήνας, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν υπερεντατικά, οδηγώντας ακόμα και σε στέρηση των πηγών Μαυρονερίου, των δεύτερων πιο σημαντικών της λεκάνης. Πρότερες αναλύσεις έδειξαν ότι λόγω των αντλήσεων μειώθηκαν οι εισροές στην Υλίκη, και συνεπώς το καθαρό όφελος σε υδρευτικό νερό ήταν περιορισμένο. Ομοίως, οι υδρευτικές γεωτρήσεις που διανοίχθηκαν πέριξ της Υλίκης (ΝΔ της λίμνης και στην περιοχή των Ούγγρων) στην πράξη άντλησαν νερό της ίδιας της λίμνης, καθώς ενίσχυσαν τις διαφυγές της (Ευστρατιάδης κ.ά., 2004).

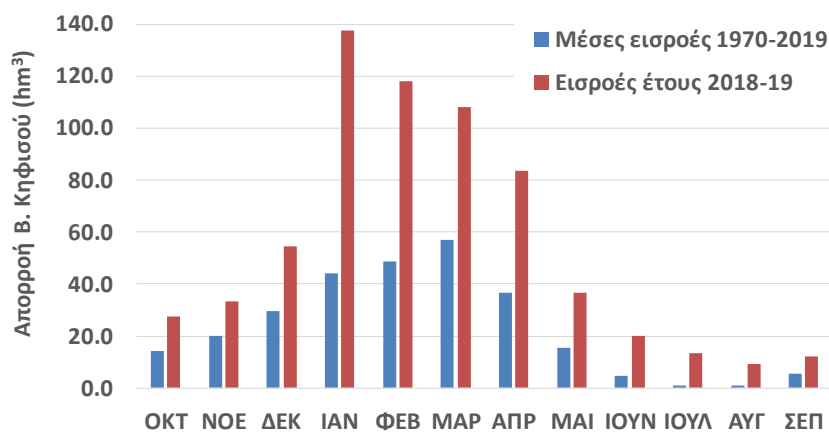
Η διαφοροποίηση της δίαιτας των απορροών είναι ιδιαίτερα εμφανής κατά τη θερινή περίοδο, που η κοίτη του Βοιωτικού Κηφισού, καθώς και ορισμένων παραποτάμων (π.χ., τάφος Μαυρονερίου) φράσσονται για την διαμόρφωση πρόχειρων αρδευτικών αναχωμάτων, με συνέπεια τη διακοπή της εισροής στην Υλίκη. Μάλιστα, σε περιόδους χαμηλής υδροφορίας, έχει παρατηρηθεί διακοπή της ροής ήδη από τον Απρίλιο ή ακόμη και τον Μάρτιο. Για τους παραπάνω λόγους, στις στατιστικές

αναλύσεις χρησιμοποιείται, γενικά, ως μέτρο σύγκρισης το δείγμα απορροών μετά το 1970, ως πιο αντιπροσωπευτικό της υδρολογικής συμπεριφοράς της λεκάνης (Κουτσογιάννης κ.ά., 2002).

Σε αντίθεση με τη γενικότερη εικόνα των τελευταίων δεκαετιών, το διαρρέυσαν υδρολογικό έτος ήταν εξαιρετικά πλούσιο σε υδροφορία, καθώς η απορροή ανήλθε σε 653.8 hm^3 , έχοντας υπερβεί πάνω από δύο φορές τον αντίστοιχο μέσο όρο της περιόδου 1970-2017, ήτοι 279.1 hm^3 . Πρόκειται για την 7η υψηλότερη τιμή στο δείγμα των 112 ετών, και η υψηλότερη μετά το έτος 1968-69. Ειδικά το τρίμηνο Ιανουαρίου-Μαρτίου καταγράφηκε η δεύτερη υψηλότερη τιμή αθροιστικής απορροής (363.5 hm^3), με το ιστορικό μέγιστο (377.1 hm^3) να έχει παρατηρηθεί το πρώτο τρίμηνο του 1928. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.7**, όλους τους μήνες του περασμένου υδρολογικού έτους οι εισροές την Υλίκη ήταν εμφανώς υψηλότερες σε σχέση με τις μέσες μηνιαίες τιμές της αντιπροσωπευτικής περιόδου από το 1970 και έπειτα. Οι αξιοσημείωτα υψηλές εισροές δικαιολογούν πλήρως τις πολύ μεγάλες υπερχειλίσεις της Υλίκης επί διάστημα πέντε μηνών, αλλά και το ασυνήθιστο φαινόμενο υπερχείλισης της Παραλίμνης, καθώς υποδηλώνουν εξαιρετικά πλούσια υδροφορία στην περιοχή.



Εικόνα 3.6: Ετήσιες εισροές στην Υλίκη από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού και κυλιόμενοι μέσοι όροι δέκα ετών (τιμές σε hm^3).



Εικόνα 3.7: Σύγκριση μηνιαίων απορροών Βοιωτικού Κηφισού τρέχοντος υδρολογικού έτους και μέσου όρου ετών 1970-2019 (τιμές σε hm^3).

3.6.3 Ανηγγεμένη χρονοσειρά εισροών

Οι εκτιμήσεις του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, με βάση τις διοχετευόμενες απορροές μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας που εκτιμώνται από την ΕΥΔΑΠ, φαίνεται ότι παρήγαγε κάποια συστηματικά σφάλματα, που αποτυπώνονταν στις τιμές των υπόγειων διαφυγών των τελευταίων, κυρίως, ετών. Αλλά και η προσεκτική ανάλυση του υδατικού ισοζυγίου σε ημερήσια κλίμακα για τα δύο τελευταία υδρολογικά έτη, έδειχνε, σε κάποιες ημέρες έντονης υδροφορίας, μικρότερες αυξήσεις στάθμης από αυτές που θα προέκυπταν αν εφαρμόζονταν οι εισροές που είχαν καταγραφεί.

Λαμβάνοντας υπόψη και τους προβληματισμούς του εδαφίου 3.7.1, επιχειρήσαμε να υπολογίσουμε εκ νέου το μηνιαίο υδατικό ισοζύγιο της περιόδου Οκτωβρίου 2017 – Σεπτεμβρίου 2019, προκειμένου να εφαρμόσουμε κατάλληλο μειωτικό συντελεστή αφενός για τις εισροές του Βοιωτικού Κηφισού και αφετέρου τις υπερχειλίσεις που εκτιμώνται από τη σχέση στάθμης-παροχής της Εταιρείας Λίμνης Κωπαΐδας (βλ. υποκεφάλαιο 3.9). Μετά από εξαντλητική διερεύνηση, προέκυψε ότι οι εκτιμώμενες εισροές είναι πράγματι υπερεκτιμημένες, και πρέπει να μειωθούν κατά περίπου 10%. Θεωρώντας ότι η διαφορά αυτή οφείλεται αποκλειστικά στην αύξηση της τραχύτητας της διατομής της Διώρυγας Καρδίτσας, στο αρχικό δείγμα μηνιαίων εισροών από τον Οκτώβριο του 1977 ($t = 0$) και έπειτα εφαρμόστηκε ένας μειωτικός συντελεστής ως γραμμική συνάρτηση του χρόνου, ήτοι:

$$k_t = \frac{(55 - 0.01t)}{55} \quad (3.2)$$

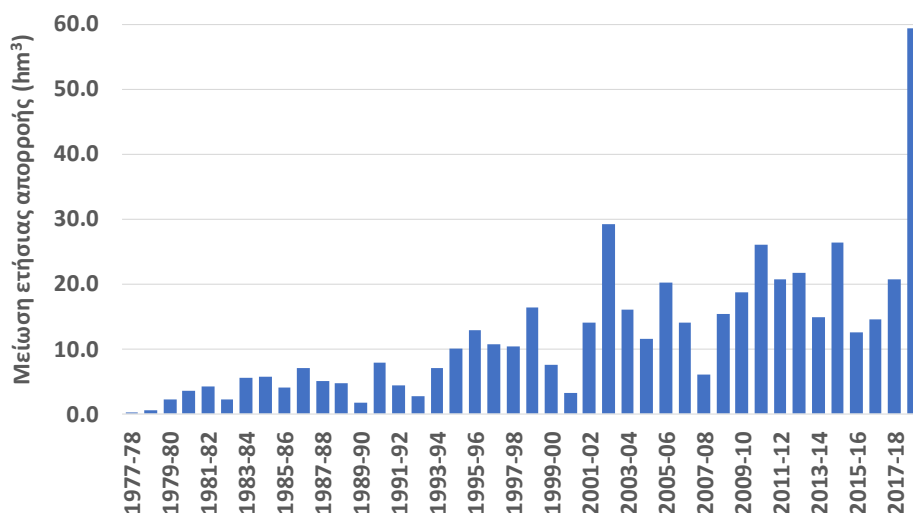
Στην παραπάνω σχέση, η οποία είναι καθαρά εμπειρική, ο αριθμητικός συντελεστής 55 αναφέρεται στην τιμή του συντελεστή $1/N$ της εξίσωσης ομοιόμορφης ροής του Manning, όπως εκτιμήθηκε στην υδρομέτρηση του 1977, με την οποία γίνονται οι υπολογισμοί της ΕΥΔΑΠ για τις εισροές μέσω της Διώρυγας Καρδίτσας. Με την παραπάνω υπόθεση, η αρχική τιμή του $1/N$ μειώνεται κατά 0.01 κάθε μήνα, ώστε πλέον να έχει κατέλθει στα επίπεδα του 50, ήτοι μειωμένος κατά 10%.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της ανηγμένης χρονοσειράς εισροών από τον Βοιωτικό Κηφισό, για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19, δίνονται στον **Πίνακα 3.6**. Η χρονοσειρά αυτή εφαρμόζεται στους επόμενους υπολογισμούς του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, ενώ στις στοχαστικές αναλύσεις του Κεφαλαίου 5 παράγονται σενάρια πρόγνωσης με βάση το αρχικό δείγμα απορροών του Βοιωτικού Κηφισού, που στη συνέχεια απομειώνονται κατά 10%. Προφανώς, λόγω της αναγωγής οι τελικές μας εκτιμήσεις για το διαρρέυσαν υδρολογικό έτος είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις αρχικές, όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Συγκεκριμένα, οι ανηγμένες ετήσιες εισροές εκτιμώνται σε 598.6 hm^3 , ενώ οι ανηγμένες εισροές του τριμήνου Ιανουαρίου-Μαρτίου εκτιμώνται σε 334.0 hm^3 .

Σημειώνεται ότι η χρήση μειωτικού συντελεστή που εκφράζεται συναρτήσει του χρόνου οδηγεί σε μεγαλύτερη απομείωση των υψηλών εισροών σε σχέση με τις χαμηλές, και των πλέον πρόσφατων εισροών σε σχέση με τις παλαιότερες. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 3.8**, η μεγαλύτερη ονομαστική μείωση αφορά στις εισροές του περασμένου υδρολογικού έτους κατά σχεδόν 60 hm^3 (ήτοι ποσοστό 10%), ενώ τα περισσότερα έτη του δείγματος οι διαφορές που προκύπτουν μεταξύ των δύο προσεγγίσεων είναι πολύ πιο μικρές, της τάξης των 10 έως 20 hm^3 ετησίως.

Πίνακας 3.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη ανηγμένης χρονοσειράς εισροών στην Υλίκη από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	12.4	17.0	27.1	40.5	44.9	52.3	34.5	14.9	5.2	1.1	1.0	3.9	254.8
Τυπ. απόκλ.	8.6	7.3	12.4	26.0	25.1	24.9	24.1	13.6	5.9	2.2	2.0	4.4	118.1
Ελάχιστο	0.7	6.2	8.5	14.5	9.0	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	61.0
Μέγιστο	41.8	45.4	57.7	127.4	118.1	104.9	87.4	54.4	22.3	12.2	8.3	17.2	598.6



Εικόνα 3.8: Διαφορά ανηγμένων ετήσιων απορροών Βοιωτικού Κηφισού σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρούμενες στη Διώρυγα Καρδίτσας (τιμές σε hm^3).

3.7 Εισροές λεκάνης Υλίκης

3.7.1 Προηγούμενες προσεγγίσεις

Το συνολικό εμβαδόν της τοπικής λεκάνης της Υλίκης είναι 424.0 km^2 , συμπεριλαμβανομένης και της κλειστής λεκάνης των Βαγίων, έκτασης 82.9 km^2 , στα νοτιοδυτικά. Όπως αναφέρεται στην έκθεση των Ευστρατιάδη κ.ά. (2004), το υψηλό τμήμα των Βαγίων, έκτασης 47.5 km^2 , προβλεπόταν να αποχετεύεται μέσω τεσσάρων τάφρων που θα διανοίγονταν στην περιφέρεια του έλους Φαγά, ώστε να τροφοδοτούν την Υλίκη, μέσω της διώρυγας τέλματος και του ρέματος Καναβάρι. Ωστόσο, την περίοδο εκπόνησης της μελέτης τα έργα δεν είχαν ακόμη κατασκευαστεί. Όσον αφορά στο χαμηλό τμήμα της λεκάνης, έκτασης 35.4 km^2 , αυτό αποστραγγίζεται βραδέως με φυσικό τρόπο, μέσω των καταβοθρών του Τενερικού πεδίου, που εικάζεται ότι τροφοδοτούν υπογείως την Υλίκη (Λαδόπουλος και Χωραφάς, 1974).

Η εκτίμηση των εισροών της τοπικής λεκάνης, επιφανειακών και υπόγειων, και η εν γένει υδραυλική της επικοινωνία με την ίδια τη λίμνη και τα γειτονικά υπόγεια συστήματα, αποτελούν μια από τις πλέον αβέβαιες πτυχές στην κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, καθώς δεν υπάρχουν καθόλου μετρητικά δεδομένα που να επιτρέπουν τεκμηριωμένες ποσοτικές εκτιμήσεις. Αρκετοί μελετητές στο παρελθόν επιχείρησαν να προσεγγίσουν το πρόβλημα με εμπειρικές μεθόδους, σύνοψη των οποίων δίνεται από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2004). Η πλέον λεπτομερής ανάλυση ήταν αυτή των Λαδόπουλου και Χωραφά (1974), όπου είχε γίνει συνδυαστική χρήση υδρομετρήσεων, υδρογεωλογικών χαρτογραφήσεων, γεωφυσικών διασκοπήσεων, παρατηρήσεων γεωτρήσεων και χημικών αναλύσεων, προκειμένου να καταρτιστούν ισοζύγια των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού, Υλίκης, Βαγίων και Παραλίμνης. Οι μελετητές είχαν καταλήξει ότι, σε ετήσια βάση, η απορροή της λεκάνης της Υλίκης ανέρχεται σε 21.8 hm^3 , ενώ άλλα 5.1 hm^3 παράγονται στην κλειστή λεκάνη των Βαγίων (μέσοι όροι περιόδου 1907-1973).

Αντίθετα, η προσέγγιση που είχε προτείνει από αρκετά παλιά το ΕΜΠ (Ρώτη κ.ά., 1990), και έκτοτε εφαρμόζεται από την ΕΥΔΑΠ, είναι πολύ απλή, και βασίζεται στη προσαύξηση των μετρούμενης εισροών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας κατά 6%, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά της λεκάνης της Υλίκης. Η διερεύνηση των Ευστρατιάδη κ.ά. (2004) είχε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η εκτίμηση της απορροής της λεκάνης της Υλίκης, με θεώρησή της ως σταθερό ποσοστό της μετρημένης απορροής στην Διώρυγα Καρδίτσας, είναι ικανοποιητική.

Εξαίρεση αποτελούν οι θερινοί μήνες, κατά τους οποίους η μετρούμενη παροχή του Βοιωτικού Κηφισού είναι μικρότερη από την πραγματική ή ακόμα και μηδενική, λόγω των ανάντη αρδευτικών απολήψεων. Σε κάθε περίπτωση, την θερινή περίοδο, κατά την οποία εντατικοποιούνται οι αρδεύσεις και φράσσεται η ροή του ποταμού, οι βροχοπτώσεις στην λεκάνη της Υλίκης είναι ελάχιστες και συνεπώς η παραγόμενη απορροή πολύ μικρή, δεδομένου ότι το έδαφος είναι πολύ ξηρό και η ζήτηση για εξατμοδιαπνοή αυξημένη.

3.7.2 Εκτίμηση επιφανειακής απορροής λεκάνης Υλίκης μέσω υδρολογικού μοντέλου

Προκαταρκτικές διερευνήσεις του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, με επίλυσή του ως προς τη συνιστώσα των υπόγειων διαφυγών, έδειξαν ότι με την απλοϊκή θεώρηση ενός ενιαίου ποσοστού της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού προκύπτουν, περιστασιακά, κάποιες ανεξήγητες αποκλίσεις από τις αναμενόμενες τιμές διαφυγών. Επιπλέον, λεπτομερής ανάλυση των εκτιμώμενων απορροών της Υλίκης έδειξε ότι, σε κάποιες περιόδους που ήταν γνωστό ότι η απορροή ήταν αυξημένη, π.χ. τους χειμερινούς μήνες του 2002, που η περιοχή επλήγη από εξαιρετικά ισχυρές χιονοπτώσεις, η εφαρμοζόμενη προσέγγιση έδινε σχετικά χαμηλές τιμές.

Στις παρούσες αναλύσεις επιχειρήθηκε μια συνθετική προσέγγιση, για την εκτίμηση των εισροών στην Υλίκη από επιφανειακά νερά, τα οποία προέρχονται από την ίδια τη λεκάνη της, και υπόγεια νερά, που προέρχονται τόσο από το ευρύτερο υδρογεωλογικό σύστημα.

Η εκτίμηση της επιφανειακής απορροής της λεκάνης της Υλίκης βασίζεται στη φυσική περιγραφή των διεργασιών μετασχηματισμού της βροχόπτωσης σε απορροή, με χρήση εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου, ημερήσιας χρονικής διακριτότητας. Η κλίμακα αυτή επιτρέπει την καλύτερη περιγραφή των πλημμυρικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μεγάλα επεισόδια βροχής. Είσοδοι του μοντέλου είναι η ημερήσια βροχόπτωση και η δυνητική εξατμοδιαπνοή, οι οποίες αναφέρονται στην επιφάνεια της λεκάνης. Για την περίοδο 1977-2000, η επιφανειακή βροχόπτωση εκτιμάται ως ο μέσος όρος των ημερήσιων δειγμάτων του σταθμών Αλιάρτου (ΕΜΥ) και Μουρικού (ΕΥΔΑΠ), ενώ μετά τη διακοπή λειτουργία τους πρώτου εφαρμόζεται απευθείας η χρονοσειρά του Μουρικού. Από τον Μάιο του 2016 λαμβάνεται ο μέσος όρος τιμών βροχόπτωσης από τον Μουρίκι και τον τηλεμετρικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στη Θήβα, η χρονοσειρά του οποίου ανακτώνται από την ιστοσελίδα: <http://meteosearch.meteo.gr/data/thiva/>. Τέλος, η δυνητική εξατμοδιαπνοή, η οποία αναφέρεται στις θεωρητική ζήτηση για παραγωγή εξάτμισης από το έδαφος και διαπνοής από τη βλάστηση, εκτιμάται με απομείωση των μέσων μηνιαίων υψών εξάτμισης της Υλίκης κατά 20%.

Το μοντέλο εκτιμά τη μετατροπή της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή (που επιμερίζεται σε επίγεια και υποδερμική ροή), απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής από την επιφάνεια του εδάφους (άμεση εξατμοδιαπνοή) και την ακόρεστη ζώνη (εδαφική εξατμοδιαπνοή), καθώς και σε κατεισδύσεις προς βαθύτερα στρώματα και διαφυγές εκτός λεκάνης.

Η ακόρεστη ζώνη του εδάφους αναπαρίσταται ως μία εννοιολογική δεξαμενή χωρητικότητας K , που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου. Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος είναι γνωστή η αποθήκευση νερού στη δεξαμενή, W , η βροχόπτωση, P , και δυνητική εξατμοδιαπνοή, PET (όλες οι μεταβλητές δίνονται σε ισοδύναμα ύψη νερού, ήτοι σε mm). Αρχικά, εκτιμάται η επίγεια απορροή με χρήση της εμπειρικής σχέσης της Soil Conservation Service (SCS, πλέον καλείται Natural Resources Conservation Service, NRCS), η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλο φάσμα υδρολογικών εφαρμογών, μεταξύ άλλων στα πλέον διαδεδομένα μοντέλα πλημμυρών (Efstratiadis *et al.*, 2014). Στο σχήμα προσομοιώσεις που αναπτύχθηκε, η σχέση διατυπώνεται ως εξής:

$$Q_s = \frac{P - a S}{[P + (1 - a) S]^2} \quad (3.3)$$

όπου $S = K - W$ είναι η μέγιστη δυνητική κατακράτηση, ήτοι ο διαθέσιμος χώρος αποθήκευσης στη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, και a αδιάστατη παράμετρος, με την οποία εκτιμάται η ελάχιστη ποσότητα βροχής που πρέπει να προσπέσει στη λεκάνη ώστε να παραχθεί απορροή (η παραγωγή απορροής γίνεται για $P > a S$). Σύμφωνα με την κλασική υπόθεση της NRCS, η ποσότητα αυτή, που αναφέρεται ως αρχικές απώλειες, εκφράζεται ως ποσοστό της κατακράτησης, S , ενώ η τυπική τιμή της είναι 20% (NRCS, 2004). Σημειώνεται ότι η ποσότητα S , άρα και οι αρχικές απώλειες, δεν είναι σταθερή, αλλά ακολουθεί τη μεταβολή της εδαφικής υγρασίας, W . Συνεπώς, όσο πιο κοντά είναι το έδαφος στον κορεσμό, τόσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγή επίγειας απορροής, και αντίστροφα.

Η παραπάνω ποσότητα παράγεται, ως κατανεμημένη απορροή, στην επιφάνεια της λεκάνης, ωστόσο φτάνει στην έξοδο της εξομαλυμένη, λόγω της διόδευσής της στο υδρογραφικό δίκτυο. Η πολύπλοκη διεργασία της διόδευσης περιγράφεται μέσω ενός απλού φίλτρου, τύπου γραμμικού ταμιευτήρα, με εισροή την απορροή Q_s και εκροή την ποσότητα:

$$Q_0 = \theta X \quad (3.4)$$

όπου X η αποθήκευση στον ταμιευτήρα, η οποία επανυπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα, και θ συντελεστής στείρευσης, που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου.

Η άμεση εξατμοδιαπνοή, που παράγεται στην επιφάνεια του εδάφους από νερό που κατακρατείται από τη βλάστηση και σε κοιλότητες του αναγλύφου, εκτιμάται από τη σχέση:

$$ET_D = \min(PET, P - Q_s) \quad (3.5)$$

Η υπολειπόμενη βροχόπτωση διηθείται στην ακόρεστη ζώνη, εμπλουτίζοντας τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, ήτοι:

$$I = P - Q_s - ET_D \quad (3.6)$$

Εφόσον δεν έχει καλυφθεί η δυνητική εξατμοδιαπνοή μέσω της βροχόπτωσης, παράγεται επιπλέον εξατμοδιαπνοή από το έδαφος, μέσω της εμπειρικής σχέσης:

$$ET_S = (PET - ET_D) \tanh\left(\frac{W}{K}\right) \quad (3.7)$$

Η παραπάνω σχέση εισάγει μια μη γραμμικότητα στον ρυθμό παραγωγής εξάτμισης, επιτρέποντας την ικανοποίηση έως και 76% της ζήτησης όταν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο.

Στη συνέχεια εκτιμώνται οι απώλειες λόγω κατείδυσης σε χαμηλότερα στρώματα, που τελικά διαφεύγουν διαμέσου του καρστικού υποβάθρου εκτός λεκάνης, μέσω της σχέσης:

$$L = \mu W \quad (3.8)$$

όπου μ συντελεστής στείρευσης, που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου.

Τέλος, παράγεται η υπόγεια (υποδερμική) απορροή, ως οριζόντια εκροή από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας, μέσω της σχέσης:

$$Q_G = \lambda W \quad (3.9)$$

όπου λ συντελεστής στείρευσης, που αποτελεί παράμετρο του μοντέλου.

Τέλος, η υποδερμική απορροή προστίθεται στη διοδευμένη επίγεια απορροή, ώστε να προκύψει η συνολική παραγωγή επιφανειακής απορροής της λεκάνης της Υλίκης, ήτοι:

$$Q_Y = Q_0 + Q_G \quad (3.10)$$

Η συνολική απορροή μετατρέπεται σε εισροή στην Υλίκη, πολλαπλασιάζοντας επί την αντίστοιχη ενεργό επιφάνεια της λεκάνης. Η τελευταία ισούται με τη συνολική έκταση των 424.0 km², από την οποία αφαιρούνται το χαμηλό τμήμα τη ενδορροϊκής λεκάνης των Βαγίων, έκτασης 35.4 km², και η επιφάνεια που καταλαμβάνει η Υλίκη, η οποία εκτιμάται συναρτήσει της στάθμης της.

Μετά από πληθώρα δοκιμών, καταλήξαμε σε αντιπροσωπευτικές τιμές παραμέτρων του μοντέλου, που κρίνεται ότι δίνουν ευλογοφανή αποτελέσματα. Συγκεκριμένα:

- Χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας $K = 400 \text{ mm}$
- Ποσοστό αρχικών απωλειών $\alpha = 0.20$
- Συντελεστής στείρευσης γραμμικού ταμιευτήρα $\theta = 0.20$
- Συντελεστής στείρευσης για παραγωγή υπόγειων διαφυγών $\mu = 0.0015$
- Συντελεστής στείρευσης για παραγωγή υποδερμικής ροής $\lambda = 0.0005$

Για τις παραπάνω τιμές παραμέτρων παρήχθη η χρονοσειρά των ημερήσιων εισροών στην Υλίκη από επιφανειακά νερά της ίδιας της λεκάνης, που ακολούθως συναθροίστηκε στη μηνιαία κλίμακα. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μηνιαίας χρονοσειράς δίνονται στον **Πίνακα 3.7**. Σε μέση ετήσια βάση, η επιφανειακή αυτή συνιστώσα εκτιμάται σε 13.6 hm³.

Με βάση το προσομοιωμένο δείγμα απορροών, καταρτίστηκε το μέσο ετήσιο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης της Υλίκης για την περίοδο 1977-78 έως 2018-19. Από τις αναλύσεις μας προκύπτει ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση της υπόψη περιόδου ανέρχεται σε 577.7 mm, από τα οποία:

- 462.4 mm μετατρέπονται σε απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής (ποσοστό 80.0%)
- 78.8 mm μετατρέπονται σε απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών (ποσοστό 13.6%)
- 36.8 mm μετατρέπονται σε επιφανειακή απορροή (ποσοστό 6.4%)

Τα παραπάνω ποσοστά είναι εύλογα, λαμβάνοντας υπόψη το υδροκλιματικό καθεστώς της λεκάνης αλλά και τα γεωλογικά της χαρακτηριστικά, ήτοι την κυριαρχία ασβεστολιθικών σχηματισμών υψηλής και πολύ υψηλής διαπερατότητας. Ο ιδιαίτερα χαμηλός συντελεστής επιφανειακής απορροής είναι αναμενόμενος για την ευρύτερη περιοχή, και συνεπής με αντίστοιχες εκτιμήσεις υδατικού ισοζυγίου της ευρύτερης περιοχής (λεκάνες Βοιωτικού Κηφισού, Μαραθώνα, Ασωπού και Σαρανταπόταμου), ενώ το υψηλό ποσοστό των απωλειών λόγω εξατμοδιαπνοής αιτιολογείται από την κυριαρχία γεωργικών χρήσεων στην λεκάνη. Βεβαίως, στην πραγματικότητα οι ανάγκες των καλλιεργειών καλύπτονται κυρίως μέσω άρδευσης, που σημαίνει ότι μέρος των φερόμενων ως απωλειών εξατμοδιαπνοής είναι στην πραγματικότητα νερά που αντλούνται από υπόγεια υδροφόρα στρώματα για να καλύψουν τις ανάγκες τους σε αρδευτικό νερό. Σε κάθε περίπτωση, η ακριβής κατάρτιση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, που θα απαιτούσε πιο πολύπλοκη παραμετροποίηση και περισσότερα δεδομένα εισόδου (π.χ. αρδευτικές ανάγκες και σχετικά τεχνικά έργα) δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσης, η οποία εστιάζει αποκλειστικά στην εκτίμηση της επιφανειακής απορροής που τελικά τροφοδοτεί την Υλίκη.

Πίνακας 3.7: Βασικά στατιστικά μεγέθη προσομοιωμένης χρονοσειράς επιφανειακών εισροών στην Υλίκη από την τοπική λεκάνη της για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.4	0.7	1.7	1.8	2.5	2.3	1.6	1.0	0.6	0.4	0.2	0.3	13.6
Τυπ. απόκλ.	0.4	0.9	4.6	1.8	4.1	3.0	1.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.8	10.7
Ελάχιστο	0.1	0.2	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	5.2
Μέγιστο	2.1	4.9	30.7	10.3	25.1	19.6	5.6	1.9	1.0	0.9	0.9	5.0	60.0

3.7.3 Εκτίμηση εισροών ευρύτερου υδρογεωλογικού συστήματος

Είναι γνωστό ότι το υδρογεωλογικό σύστημα της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού εκτείνεται πολύ πέραν των ορίων της επιφανειακής λεκάνης, καθώς μέσω του καρστ επικοινωνεί υδραυλικά αφενός με την Υλίκη και με τις λεκάνες Θηβών-Βαγίων, καθώς και με πηγές που εκφορτίζονται στη θάλασσα ήτοι στον Βόρειο Ευβοϊκό και τον Βόρειο Κορινθιακό Κόλπο. Πληθώρα μελετητών έχει ασχοληθεί με την ποσοτικοποίηση των διαφυγών του Βοιωτικού Κηφισού, που βεβαίως διέπονται από εξαιρετικά μεγάλη πολυπλοκότητα και αβεβαιότητα. Σχετικά πρόσφατη διερεύνηση των Efstratiadis *et al.* (2008), με χρήση ενός συνδυαστικού μοντέλου υδρολογικής-υδρογεωλογικής προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών της λεκάνης και των ανθρωπογενών επεμβάσεων σε αυτή (απολήψεις από επιφανειακά νερά, αντλήσεις υπόγειων νερών), κατέληξε ότι οι διαφυγές από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού για την περίοδο 1994-1994 εκτιμώνται 167 hm³, ποσότητα που συμφωνεί και με άλλες εκτιμήσεις του ΕΜΠ (ΥΠΑΝ κ.α., 2003). Με βάση τη σχηματοποίηση που υλοποιήθηκε, περίπου το 5 ως 10% της ποσότητας αυτής φαίνεται να καταλήγει στην Υλίκη.

Επειδή η αναλυτική μοντελοποίηση των υπόγειων εισροών στην Υλίκη είναι ιδιαίτερα κοπιαστική, και απαιτεί όχι μόνο τη χρήση ενός πολύπλοκου μοντέλου αλλά και τη συλλογή πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων, τα οποία πρέπει να επικαιροποιούνται συνεχώς, θεωρήσαμε σκόπιμο να εφαρμόσουμε μια πολύ απλή προσέγγιση για την εκτίμηση της υπόγεια τροφοδοσία της. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αναρρύθμιση που προσφέρει ο υδροφορέας, στην προτεινόμενη μεθοδολογία παράγεται, αρχικά, η χρονοσειρά των κινούμενων μέσω όρων έξι μηνών της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (μετά την αναγωγή του εδαφίου 3.6.3), και στη συνέχεια το 4% αυτής θεωρείται ως υπόγεια εισροή στη λίμνη, είτε απευθείας από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είτε από την τοπική λεκάνη. Η σχέση υπολογισμού είναι:

$$G_t = 0.04 \times \left(\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 Q_{t-i} \right) \quad (3.11)$$

όπου Q_t η απορροή του Βοιωτικού Κηφισού τον μήνα t .

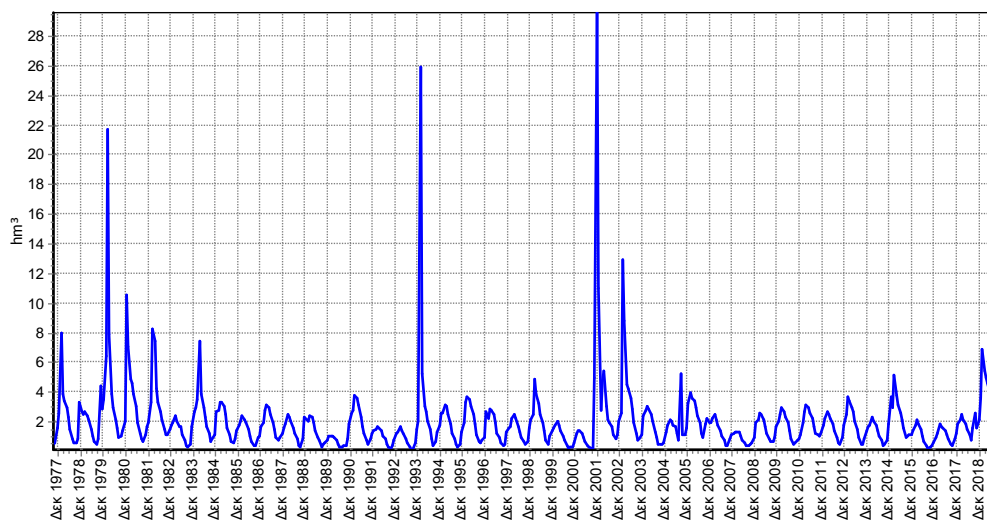
Στον **Πίνακα 3.8** συνοψίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της μηνιαίας χρονοσειράς υπόγεια τροφοδοσίας της Υλίκης για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19. Η μέση ετήσια τιμή ανέρχεται σε 10.2 hm³, είναι δηλαδή συνεπής με τις προαναφερθείσες εκτιμήσεις της χωρικής κατανομής των υπόγειων διαφυγών της λεκάνης του Βοιωτικού Κηφισού. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι χάρη στην υπόγεια αυτή συνιστώσα, υπάρχει συνεχής τροφοδοσία της Υλίκης ακόμα και τη θερινή περίοδο. Αυτό δεν μπορούσε να επιτευχθεί με την έως τώρα εφαρμοζόμενη προσέγγιση, ήτοι με θεώρηση του 6% της μετρούμενης απορροής στη Διώρυγα Καρδίτσας, με αποτέλεσμα κατά τους ξηρούς μήνες να παράγονται συστηματικά ελλείμματα στο ισοζύγιο, καθώς η μετρούμενη πτώση στάθμης της Υλίκης ήταν μικρότερη από την υπολογιζόμενη με βάση τις απώλειες λόγω εξάτμισης και διαφυγών και τις αντλήσεις. Αυτό υποδήλωνε την ανάγκη εισαγωγής μιας συνιστώσας εισροών, που προφανώς δεν θα μπορούσε να προέρχεται από επιφανειακά νερά, δεδομένου μάλιστα ότι την αρδευτική περίοδο συνήθως δεν υπάρχει ροή στη Διώρυγα Καρδίτσας.

Πίνακας 3.8: Βασικά στατιστικά μεγέθη προσομοιωμένης χρονοσειράς υπόγειων εισροών στην Υλίκη για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19 (hm³).

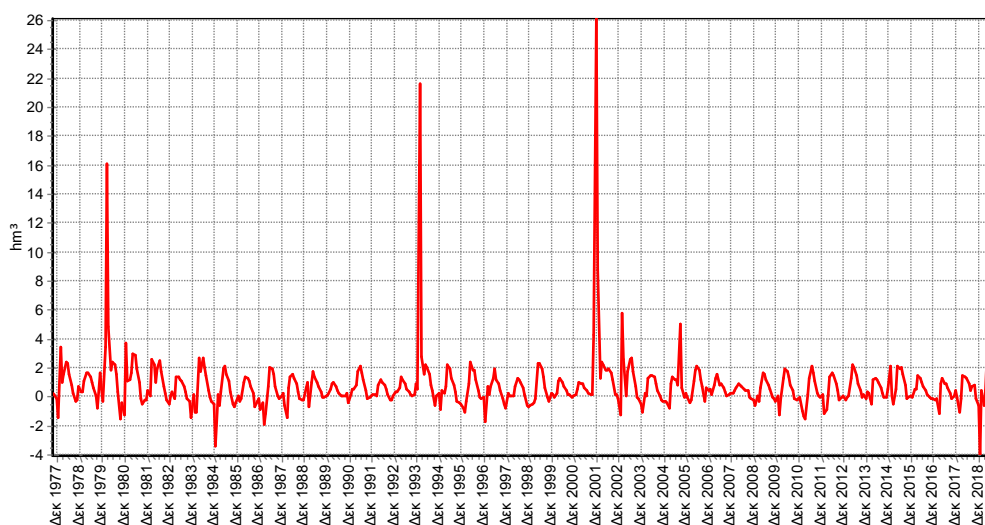
	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.2	0.3	0.4	0.7	1.0	1.3	1.4	1.4	1.3	1.0	0.7	0.4	10.2
Τυπ. απόκλ.	0.2	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3	4.6
Ελάχιστο	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	2.4
Μέγιστο	0.8	0.6	0.9	1.7	2.4	2.9	3.2	3.3	3.1	2.4	1.8	1.3	23.5

3.7.4 Τελική χρονοσειρά εισροών Υλίκης από επιφανειακά και υπόγεια νερά

Προσθέτοντας τις δύο συνιστώσες, ήτοι επιφανειακή και υπόγεια, παράγεται η μηνιαία χρονοσειρά εισροών στην Υλίκη, που μάλιστα αναφέρεται στη φυσική τροφοδοσία της λίμνης, δεδομένου ότι η βασική της τροφοδοσία προέρχεται από την εκτροπή της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Στον **Πίνακα 3.8** δίνονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χρονοσειράς, η μηνιαία εξέλιξη της οποίας απεικονίζεται στην **Εικόνα 3.9**. Ακόμη, στην **Εικόνα 3.10** απεικονίζεται η διαφορά της με τις τιμές των εισροών που εκτιμώνται ως ποσοστό 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Οι αποκλίσεις των δύο προσεγγίσεων είναι της τάξης των 2.0 hm^3 , παρατηρούνται ωστόσο και ορισμένες μεγάλες διαφορές, που οφείλονται σε τοπικά πλημμυρικά γεγονότα στη λεκάνη τη Υλίκης, με τα οποία παρήχθη ιδιαίτερα υψηλή επίγεια ροή. Σε μέση ετήσια βάση, με την αναθεωρημένη προσέγγιση οι εισροές εκτιμώνται σε 23.8 hm^3 , ήτοι 9.3% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού για την αντίστοιχη περίοδο (254.8 hm^3). Η τιμή αυτή, ως συνολική συνεισφορά στην Υλίκη, είναι συνεπής με τις προαναφερθείσες εκτιμήσεις των Λαδόπουλου και Χωραφά (1974)



Εικόνα 3.9: Χρονοσειρά προσομοιωμένων μηνιαίων εισροών στην Υλίκη από επιφανειακά και υπόγεια νερά της τοπικής της λεκάνης και του ευρύτερου υδρογεωλογικού συστήματος, για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19 (τιμές σε hm^3).



Εικόνα 3.10: Αποκλίσεις μηνιαίων εισροών Υλίκης που εκτιμώνται από την παρούσα προσέγγιση και ως ποσοστό 6% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (τιμές σε hm^3).

Πίνακας 3.9: Βασικά στατιστικά μεγέθη προσομοιωμένης χρονοσειράς φυσικών εισροών στην Υλίκη από επιφανειακά και υπόγεια νερά για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 2018-19 (hm³).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Μέση τιμή	0.6	1.0	2.1	2.4	3.5	3.6	3.1	2.4	1.9	1.4	1.0	0.7	23.8
Τυπ. απόκλ.	0.4	0.9	4.4	2.0	4.2	3.3	1.6	1.0	0.8	0.6	0.5	0.8	13.1
Ελάχιστο	0.1	0.3	0.5	0.9	1.0	1.0	0.9	0.7	0.4	0.2	0.2	0.1	7.6
Μέγιστο	2.5	5.0	29.6	11.0	25.9	21.7	7.8	4.6	3.9	2.8	2.1	5.2	68.3

3.8 Λοιπές εισροές

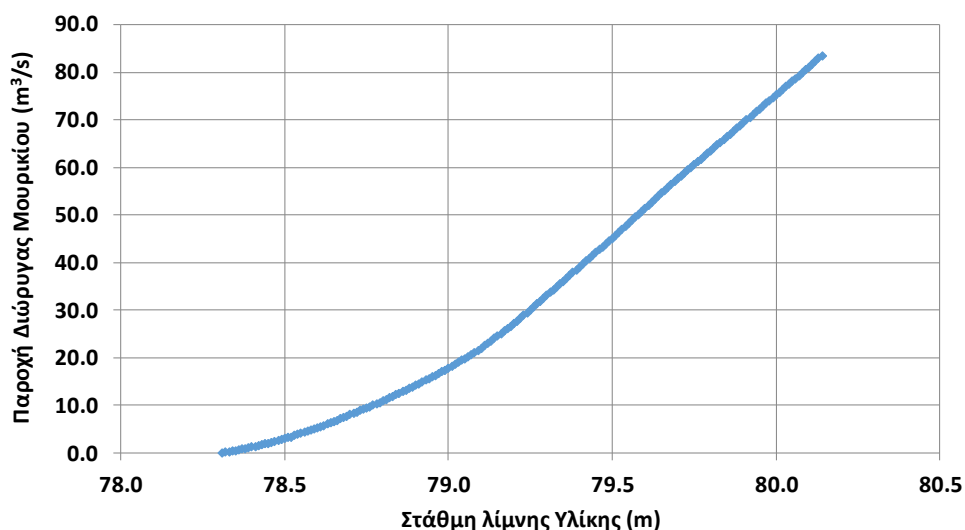
Στο υδατικό ισοζύγιο της Υλίκης λαμβάνονται, περιστασιακά, υπόψη και άλλες εισροές, ήτοι από την Παραλίμνη, από γεωτρήσεις και από άντληση νερών από την πεδιάδα των Θηβών. Συγκεκριμένα:

- Οι εισροές από Παραλίμνη αφορούν σε αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν από το 1977 ως το 1979, ήτοι λίγο πριν ολοκληρωθούν τα έργα του Μόρνου, με σκοπό την ενίσχυση του υδατικού δυναμικού της Υλίκης. Οι αντίστοιχες ετήσιες τιμές είναι 26.1, 11.5 και 1.5 hm³.
- Οι εισροές από γεωτρήσεις αφορούν στην άντληση υπόγειου νερού πέριξ της Υλίκης για ενίσχυση του δυναμικού της 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).
- Αντλήσεις από την πεδιάδα των Θηβών πραγματοποιήθηκαν στις αρχές του 2002, όταν η περιοχή είχε κατακλυστεί από πολύ μεγάλες ποσότητες νερού, εξαιτίας και των έντονων χιονοπτώσεων της εποχής εκείνης.

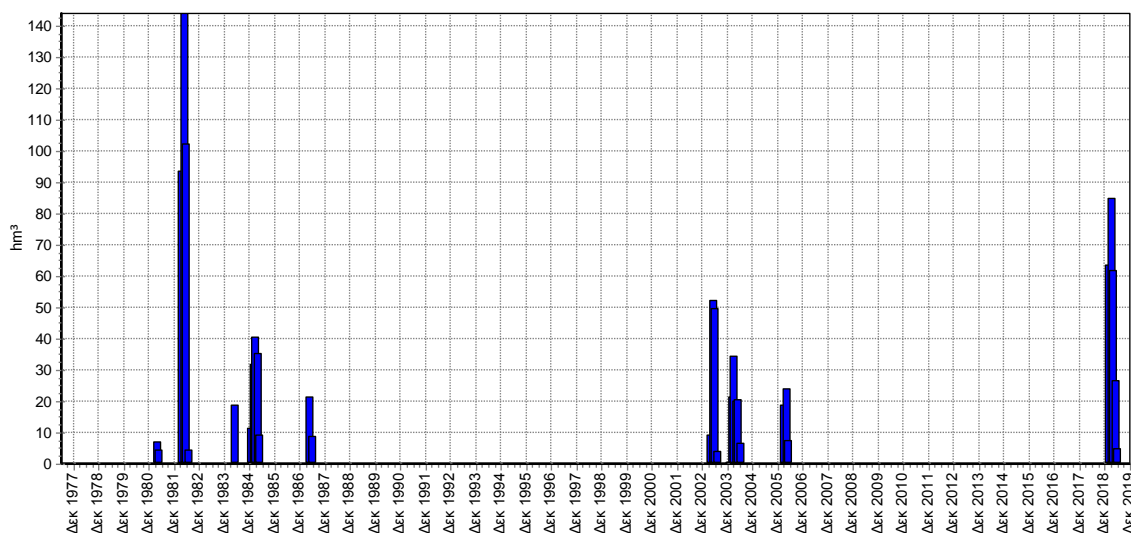
3.9 Υπερχείλισεις

Η διοχέτευση των υπερχειλίσεων της Υλίκης γίνεται μέσω διώρυγας, μήκους περίπου 1 km και πλάτους 24 m, η οποία διανοίχθηκε κατά μήκος του αυχένα Μουρικίου, ενώ στη συνέχεια τα νερά οδηγούνται στην Παραλίμνη μέσω τάφρου. Υπάρχει ασάφεια ως το ακριβές υψόμετρο έναρξης της υπερχείλισης, δεδομένου μάλιστα ότι η αναφερόμενη ως μέτρηση στάθμης της Υλίκης δεν γίνεται στην λίμνη αλλά στη Διώρυγα Μουρικίου (βλ. 3.2). Σε παλαιότερες εκθέσεις του ΕΜΠ (π.χ., Τζεράνης και Τσολακίδη, 1990· Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995· Κουτσογιάννης κ.ά., 2002) αναφέρεται ως στάθμη υπερχείλισης άλλοτε τα +77.7 m και άλλες φορές τα +77.8 m, με δυνατότητα ανύψωσης έως τα +79.8 m ή τα +80.0 m, φράσσοντας τη διώρυγα με πασσαλοσανίδες. Το υψόμετρο των +77.8 m συμφωνεί με την σχέση που κατάρτισε η Continental Drilling το 1967, με βάση στοιχεία της ΕΛΚ για την περίοδο 1907-1956 και διορθώσεις του μελετητή Θ. Ραυτόπουλου, όπως εξηγείται σε έκθεση των Τζεράνη και Τσολακίδη (1990). Ωστόσο, σε σχετικό διάγραμμα της Εταιρείας Λίμνης Κωπαΐδας (ΕΛΚ), η ροή στη Διώρυγα Μουρικίου ξεκινά για στάθμη Υλίκης ίση με +78.31 m, ενώ όταν η στάθμη της λίμνης φτάσει στα +78.50 m, στο διάγραμμα αναγράφεται στάθμη στη διώρυγα ίση με +78.10 m και παροχή 3.0 m³/s. Κατά την ΕΥΔΑΠ, η στάθμη υπερχείλισης είναι στα +78.10 m, μετρούμενη στη Διώρυγα Μουρικίου (Μ. Κούτρα, προσωπική επικοινωνία, 24/10/2019).

Οι Τζεράνης και Τσολακίδη (1990) αναφέρουν ότι για την εκτίμηση των υπερχειλίσεων της Υλίκης έχουν καταρτιστεί διάφορες εκδοχές της σχέσης στάθμης-παροχής της Διώρυγας Μουρικίου, που παρουσιάζουν μικρές σχετικά αποκλίσεις, καμία ωστόσο δεν θεωρείται επαρκώς αξιόπιστη, λόγω της παρεμβολής τεχνικών έργων κατά μήκος της διώρυγας. Η σχέση που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, και η οποία εφαρμόστηκε και στην προηγούμενη έκθεση, έχει καταρτιστεί από την ΕΛΚ τη δεκαετία του 1930, σε πινακοποιημένη μορφή, και δίνεται στην **Εικόνα 3.11**.



Εικόνα 3.11: Σχέση στάθμης Γλίκης - παροχής Διώρυγας Μουρικού (αναπαραγωγή από πινακοποιημένα στοιχεία της Εταιρείας Λίμνης Κωπαΐδας).



Εικόνα 3.12: Εκτιμώμενες μηνιαίες υπερχειλίσεις Γλίκης (μετά από απομείωση) για τα υδρολογικά έτη 1976-77 έως 2018-19 (τιμές σε hm³).

Από το υδρολογικό έτος 1977-78 και μετά, η Γλίκη υπερχείλισε αρκετές φορές τη δεκαετία του 1980, καθώς και τα έτη 2003, 2004 και 2006. Σε παλαιότερες αναλύσεις του υδατικού ισοζυγίου της Γλίκης έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές των μηνιαίων υπερχειλίσεων που δόθηκαν από την ΕΥΔΑΠ, αλλά θεωρούνται μειωμένης αξιοπιστίας εξαιτίας του αμφίβολου τρόπου μέτρησης. Μάλιστα, για επτά μήνες των ετών 1981 και 1982, τους οποίους ήταν γνωστό ότι υπερχείλισε η Γλίκη, δεν δίνονται συγκεκριμένες τιμές, παρά μόνο επισημαίνεται η ύπαρξή τους. Στην παρούσα μελέτη, οι υπερχειλίσεις της Γλίκης υπολογίστηκαν εκ νέου, με βάση τη χρονοσειρά ημερήσιας στάθμης από την 1/10/1977 έως τη 1/10/2019, εφαρμόζοντας τις τιμές στάθμης-παροχής της ΕΛΚ, μετά από απομείωση. Η υπόθεση αυτή αιτιολογείται από το μεγάλο διάστημα που έχει μεσολαβήσει από την κατάρτιση της σχέσης στάθμης-παροχής της Διώρυγα Μουρικού, με συνέπεια την αύξηση των υδραυλικών απωλειών της.

Μετά από εκτενή διερεύνηση, στην υπολογιζόμενη χρονοσειρά εφαρμόστηκε μειωτικός συντελεστής 0.77, ενώ ως στάθμη έναρξης της υπερχειλίσης ελήφθησαν τα +78.31 m, που εξάλλου συμφωνεί με το διάγραμμα της **Εικόνας 3.11**.

Βεβαίως, η εφαρμογή της σχέσης στάθμης-παροχής της ΕΛΚ προϋποθέτει ότι δεν γίνεται χρήση των πασσαλοσανίδων στο Μουρίκι, το οποίο ενδεχομένως να μην αληθεύει για κάποια από τα γεγονότα υπερχειλίσης των αρχών της δεκαετίας του '80. Μετά από συνδυαστική ανάλυση και των απωλειών λόγω διαφυγών, αποφασίστηκε η κατά περίπτωση διατήρηση των τιμών που είχαν δοθεί από την ΕΥΔΑΠ, οι οποίες δημοσιεύονται σε πρότερες εκθέσεις του ΕΜΠ (Μαμάσης και Ναλμπάντης, 1995-Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004).

Το τελικό δείγμα μηνιαίων υπερχειλίσεων της περιόδου 1977-78 έως 2018-19 απεικονίζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 3.12**. Το περασμένο υδρολογικό έτος, οι εκτιμώμενες απώλειες εκτιμήθηκαν σε 240.8 hm³, ήτοι 63.4 hm³ τον Φεβρουάριο, 84.8 hm³ τον Μάρτιο, 61.7 hm³ τον Απρίλιο, 26.3 hm³ τον Μάιο, και 4.6 hm³ τον Ιούνιο. Με βάση τη στάθμη αναφοράς των +78.31 m, η υπερχειλίση της Υλίκης ξεκίνησε στις 4 Φεβρουαρίου και σταμάτησε στις 25 Ιουνίου.

Σημειώνεται ότι αν υποθεθεί στάθμη υπερχειλίσης τα +78.10 m, ενώ η διάρκεια του φαινομένου αυξάνει πολύ λίγο, διαρκώντας πλέον από τις 2 Φεβρουαρίου ως τις 4 Ιουλίου, η ποσότητα των απωλειών που εκτιμώνται από τη σχέση της ΕΛΚ αυξάνει σημαντικά, από τα 240.8 hm³ στα 334.0 hm³ (εφαρμόζεται πάντοτε ο μειωτικός συντελεστής 0.77). Η τιμή αυτή δεν μπορεί να αιτιολογηθεί από τα υπόλοιπα δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου, και μάλιστα συνεπάγεται αρνητικές διαφυγές κατά την περίοδο υπερχειλίσης.

3.10 Υπόγειες διαφυγές

3.10.1 Ιστορικό

Η εκτίμηση των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης και του υδρογεωλογικού ισοζυγίου της ευρύτερης περιοχής, καθώς και ο πιθανός περιορισμός των απωλειών μέσω τεχνικών επεμβάσεων, αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας από πολύ παλιά. Συνήθης στόχος των ερευνών ήταν η ανάπτυξη αναλυτικών σχέσεων ή νομογραφημάτων για την εκτίμησή τους συναρτήσει της στάθμης της λίμνης. Ορισμένοι μελετητές είχαν επίσης επιχειρήσει να συσχετίσουν τη στάθμη της Υλίκης με τις παροχές μεγάλων πηγών της περιοχής που τροφοδοτούνται από τις διαφυγές της λίμνης, όπως οι πηγές Ούγγρων. Εκτενής επισκόπηση σχετικών μελετών γίνεται από τους Ρώτη κ.ά. (1990), Τζεράνη και Τσολακίδη (1990), και αργότερα από τους Ευστρατιάδη κ.ά. (2004).

Από τα τέλη της δεκαετίας του 1980, στο πλαίσιο ερευνητικών έργων του ΕΜΠ καταρτίστηκαν, με χρήση τεχνικών παλινδρόμησης, στατιστικές σχέσεις μεταξύ της μέσης μηνιαίας στάθμης της Υλίκης και των υπόγειων διαφυγών της, οι οποίες είχαν εκτιμηθεί από την επίλυση του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης. Αρχικά είχαν αναπτυχθεί πολυωνυμικές σχέσεις, ενώ στα διαχειριστικά σχέδια που εκπονήθηκαν κατά τη δεκαετία του 2000 (Κουτσογιάννης κ.ά., 2002· Ευστρατιάδης κ.ά., 2009) έγινε εφαρμογή μιας γραμμικής εξίσωσης τους υγρούς μήνες, ενώ για τους ξηρούς μήνες εφαρμόστηκε η ίδια σχέση, μετατοπισμένη προς τα πάνω. Ως εύλογο αίτιο για τη διαφοροποίηση των δύο περιόδων αναφέρεται η αύξηση των υπόγειων διαφυγών της Υλίκης λόγω της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα κατά τους ξηρούς μήνες, με αποτέλεσμα για ίδια στάθμη να αναπτύσσεται υψηλότερο υδραυλικό φορτίο σε σχέση με την υγρή περίοδο. Μάλιστα, για χαμηλές στάθμες της Υλίκης είχαν προκύψει αρνητικές διαφυγές, που αποδίδονται σε τροφοδοσία της λίμνης από υπόγεια νερά όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πιο ψηλά από τη λίμνη.

Γενικά, είχαν αγνοηθεί από το δείγμα οι περίοδοι με υπερχειλίσεις, καθώς από την επίλυση του ισοζυγίου προέκυπταν μη ρεαλιστικές τιμές διαφυγών. Σε κάθε περίπτωση, είχε παρατηρηθεί ότι η

χειμερινή περίοδος, και γενικότερα οι υψηλές στάθμες, διέπεται από μεγαλύτερη διασπορά τιμών, που αποδίδεται σε σφάλματα που εισέρχονται στην εξίσωση υδατικού ισοζυγίου από μεταβλητές όπως οι απορροές της λεκάνης της Υλίκης που, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είχαν εκτιμηθεί ως σταθερό ποσοστό 6% των μετρούμενων εισροών στη Διώρυγα Καρδίτσας.

3.10.2 Κατάρτιση σχέσεων στάθμης-διαφυγών

Στο πλαίσιο της παρούσας διερεύνησης, όπως και σε πρόσφατες σχετικές αναλύσεις (Μακρόπουλος κ.ά., 2018), εφαρμόστηκαν σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης που διαφοροποιούνται ανά μήνα. Η επιλογή αυτή κατέστη εφικτή επειδή το διαθέσιμο δείγμα είναι αρκετά μεγάλο (πάνω από 40 έτη), επιτρέποντας ασφαλείς στατιστικές εκτιμήσεις. Επιπλέον, εξασφαλίζεται καλύτερη ακρίβεια καθώς, όπως θα φανεί στη συνέχεια, για τους περισσότερους μήνες οι επιμέρους υψηλότεροι συντελεστές συσχέτισης είναι γενικά υψηλότεροι σε σχέση με τη χρήση δύο μόνο εποχιακών σχέσεων, στις οποίες γίνεται διάκριση υγρών και ξηρών μηνών.

Στην παρούσα μελέτη, αρχικά παρήχθη το δείγμα μηνιαίων απωλειών λόγω διαφυγών, L_t , με επίλυση της εξίσωσης υδατικού ισοζυγίου (3.1), για την οποία όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές είναι γνωστές. Ακόμη, παρήχθη το δείγμα μέσης μηνιαίας στάθμης της Υλίκης, \bar{Z}_t , θεωρώντας το ημιάθροισμα της στάθμης της πρώτης ημέρας του τρέχοντος και του επόμενου μήνα. Τα δύο δείγματα διαχωρίστηκαν ανά μήνα, και για επιμέρους σύνολο τιμών καταρτίστηκε το διάγραμμα διασποράς μεταξύ των δύο μεταβλητών και υπολογίστηκε η αντίστοιχη εξίσωση γραμμικής παλινδρόμησης, ήτοι:

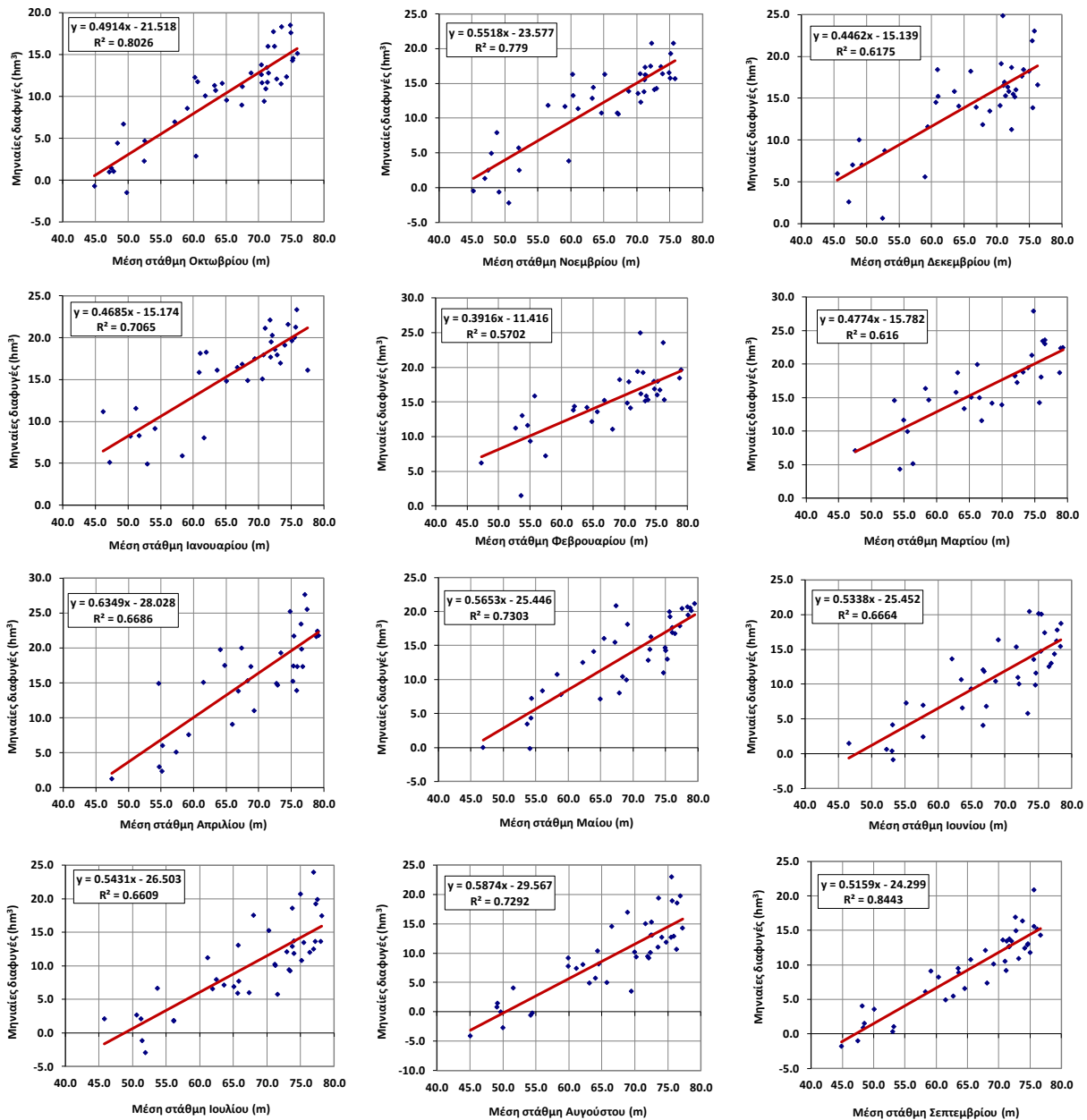
$$L_t = \alpha + \beta \bar{Z}_t \quad (3.12)$$

όπου α και β συντελεστές, διαφορετικοί ανά μήνα, που εκτιμώνται αναλυτικά. Μετά από λεπτομερή διερεύνηση, έγινε χειροκίνητη αφαίρεση των εξωκείμενων τιμών που θεωρήθηκαν ύποπτες, και επιχειρήθηκε η ερμηνεία τους. Στις πιο πολλές περιπτώσεις, οι τιμές αυτές αναφέρονταν είτε σε περιόδους υπερχειλίσσεων είτε σε μήνες με πολύ ψηλές εισροές, και περιόδους με εισροές που είχαν εμφανώς υποεκτιμηθεί, όπως μήνες με αξιοσημείωτα μεγάλη χιονόπτωση. Τα τελικά διαγράμματα διασποράς για κάθε μήνα απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.13**, ενώ στον **Πίνακα 3.10** συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σχέσεων στάθμης-διαφυγών, ήτοι:

- Το μήκος του τελικού δείγματος κάθε μήνα, μετά την αφαίρεση των εξωκείμενων τιμών.
- Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης.
- Η κλίση και τομή της σχέσης παλινδρόμησης κάθε μήνα.
- Η τυπική απόκλιση του σφάλματος, που εκτιμάται ως η διαφορά των δειγματικών τιμών από τις θεωρητικές, που εκτιμώνται μέσω της εξίσωσης γραμμικής παλινδρόμησης (εξ ορισμού, η μέση τιμή του σφάλματος είναι μηδενική).

Πίνακας 3.10: Χαρακτηριστικά μεγέθη μηνιαίων σχέσεων μέσης στάθμης – υπόγειων διαφυγών που εκτιμήθηκαν μέσω γραμμικής παλινδρόμησης.

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.
Πλήθος τιμών	42	42	38	35	35	32	35	37	38	40	41	40
Συντ. συσχέτισης	0.896	0.883	0.786	0.841	0.755	0.785	0.823	0.855	0.824	0.813	0.854	0.919
Κλίση	0.491	0.552	0.446	0.469	0.392	0.477	0.639	0.565	0.541	0.543	0.587	0.516
Τομή (hm ³)	-21.5	-23.6	-15.1	-15.2	-11.4	-15.8	-28.3	-25.4	-25.9	-26.5	-29.6	-24.3
Τυπ. αποκ. (hm ³)	2.4	2.8	3.3	2.8	3.0	3.3	3.9	3.1	3.4	3.6	3.4	2.1



Εικόνα 3.13: Τελικά διαγράμματα διασποράς μέσης στάθμης Υλίκης – διαφυγών κάθε μήνα και τελικές εξισώσεις γραμμικής παλινδρόμησης, μετά από αφαίρεση των εξωκείμενων τιμών.

Είναι αξιοσημείωτο ότι ενώ το πλήρες δείγμα περιέχει $42 \times 12 = 504$ τιμές (από το υδρολογικό έτος 1977-78 έως το 2018-19), προκειμένου να εξασφαλιστεί καλή προσαρμογή των σχέσεων γραμμικής παλινδρόμησης, χρειάστηκε να αφαιρεθούν 49 εξωκείμενα σημεία, κυρίως κατά την υγρή περίοδο. Ο μήνας με το ρεκόρ εξωκείμενων τιμών ήταν ο Μάρτιος, στον οποίο διατηρήθηκαν μόνο 32 από τις 42 τιμές, αντίθετα από τον Ιούνιο έως τον Σεπτέμβριο αφαιρέθηκαν μόλις 5 τιμές, ενώ τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο διατηρήθηκαν όλες οι τιμές. Σε κάθε περίπτωση, με την παραπάνω επεξεργασία επιτεύχθηκαν υψηλοί έως πολύ υψηλοί συντελεστές συσχέτισης, καθώς η διασπορά των σφαλμάτων είναι μικρότερη από οποιαδήποτε προηγούμενη προσέγγιση.

Όσον αφορά στα εξωκείμενα σημεία, το γεγονός ότι συσσωρεύονται την υγρή περίοδο, κατά την οποία η εν γένει διασπορά των σημείων είναι μεγαλύτερη από τους ξηρούς, θεωρούμε ότι οφείλεται στις αβεβαιότητες των εκτιμώμενων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου, και ιδιαίτερα των εισροών από τις λεκάνες του Βοιωτικού Κηφισού και Υλίκης, και λιγότερα στην πολυπλοκότητα

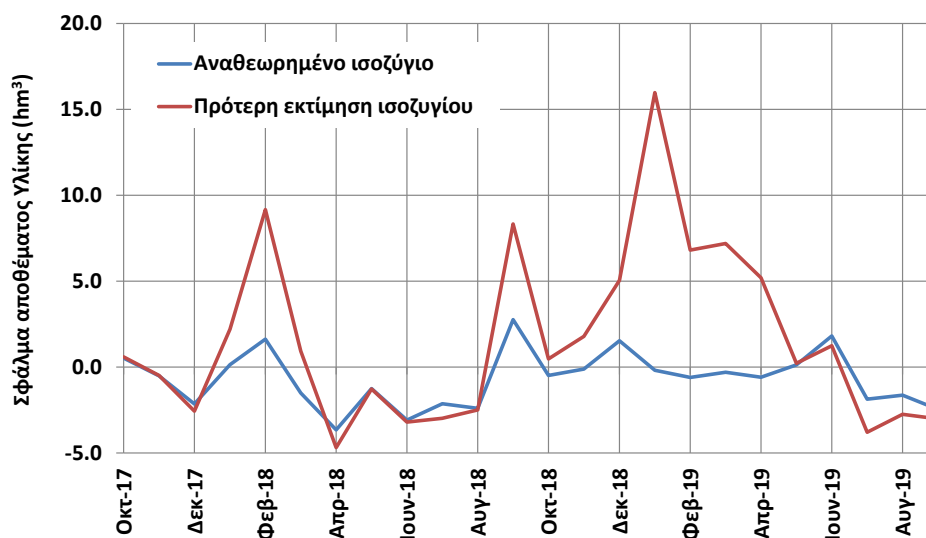
του ίδιου του φαινομένου. Επίσης, με λίγες εξαιρέσεις, κατά τις περιόδους των υπερχειλίσεων παράγονται σφάλματα που κάποιες φορές είναι και εντελώς παράλογα, π.χ. προκύπτουν αρνητικές διαφυγές σε πολύ υψηλές στάθμες.

3.11 Επαλήθευση μεθοδολογίας κατάρτισης υδατικού ισοζυγίου

Η αναθεωρημένη μεθοδολογία κατάρτισης του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης περιλαμβάνει τις ακόλουθες αλλαγές στις εκτιμήσεις των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου:

- Χρονική απομείωση της εκτιμώμενης, από την ΕΥΔΑΠ, απορροής του Βοιωτικού Κηφισού στη Διώρυγα Καρδίτσας, που μεσοσταθμικά, ήτοι από το 1977 έως τώρα, φτάνει το 10%, ώστε να ληφθεί υπόψη η γήρανση της διατομής, και συνεπώς αύξηση της τραχύτητάς της.
- Εκτίμηση των φυσικών εισροών της Υλίκης ως άθροισμα δύο συνιστωσών, ήτοι της επιφανειακής απορροής της ίδιας λεκάνης της Υλίκης, που εκτιμάται μέσω εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου ημερήσια χρονικής κλίμακας, και της υπόγειας τροφοδοσίας της λίμνης από το ευρύτερο υδρογεωλογικό σύστημα των λεκανών Βοιωτικού Κηφισού-Υλίκης, που εκτιμάται ως το 4% του κυλιόμενου μέσου όρου της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού των προηγούμενων έξι μηνών.
- Εκτίμηση των απωλειών λόγω υπερχειλίσεων με τη σχέση της ΕΛΚ, με στάθμη αναφοράς τα +78.31 m, και εφαρμογή μειωτικού συντελεστή 0.77, που επίσης ερμηνεύεται φυσικά από την αύξηση της τραχύτητας της Διώρυγας Μουρικού.
- Κατάρτιση σχέσεων γραμμικής παλινδρόμησης, σε μηνιαία κλίμακα, για την εκτίμηση των υπόγειων διαφυγών συναρτήσει της μέσης στάθμης κάθε μήνα, μετά από αφαίρεση των εξωκείμενων τιμών του δείγματος της περιόδου 1977-2019, οι οποίες εντοπίστηκαν μετά από εξονυχιστική διερεύνηση.

Για την αξιολόγηση της εν λόγω προσέγγισης, εφαρμόστηκε η μηνιαία εξίσωση υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης για τα δύο τελευταία υδρολογικά έτη (Οκτώβριος 2017 έως Σεπτέμβριος 2019), θέτοντας για κάθε μήνα την μετρημένη τιμή στάθμης και υπολογίζοντας το απόθεμα στο τέλος του μήνα με εκτίμηση των εισροών και εκροών όπως περιγράφηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, για κάθε μήνα υπολογίστηκε η απόκλιση του εκτιμώμενου αποθέματος από το πραγματικό, ενώ η διαδικασία επαναλήφθηκε με εφαρμογή της μέχρι πρότινος εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας.



Εικόνα 3.14: Σύγκριση αποκλίσεων τιμών αποθέματος στο τέλος κάθε μήνα που εκτιμώνται με την παλιά και την αναθεωρημένη μεθοδολογία κατάρτισης του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης.

Οι αποκλίσεις των δύο προσεγγίσεων απεικονίζονται στην **Εικόνα 3.14**, από την οποία προκύπτει ότι η αναθεωρημένη μεθοδολογία παράγει πολύ μικρότερα σφάλματα σε σχέση με την παλιά. Ειδικότερα, η παλιά προσέγγιση καταλήγει σε συστηματικά μεγαλύτερα αποθέματα κατά την υγρή περίοδο, που ως επί το πλείστον οφείλεται στην υπερεκτίμηση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού. Μια σημαντική παρατήρηση αφορά στους ξηρούς μήνες, που φαίνεται να υπάρχει υποεκτίμηση των αποθεμάτων και από τις δύο μεθόδους. Αυτό οφείλεται είτε σε υπερεκτίμηση των απωλειών λόγω εξάτμισης, οι οποίες, λόγω έλλειψης μετεωρολογικών δεδομένων, εκτιμώνται προσεγγιστικά, με βάση τις μέσες τιμές υψών εξάτμισης της περιόδου 1977-1997, ή/και σε στραγγίσεις από τοπικές αρδεύσεις, που τελικά εισρέουν στην Υλίκη.

4 Κατάρτιση υδατικού ισοζυγίου Παραλίμνης για την περίοδο Μαρτίου-Ιουλίου 2019

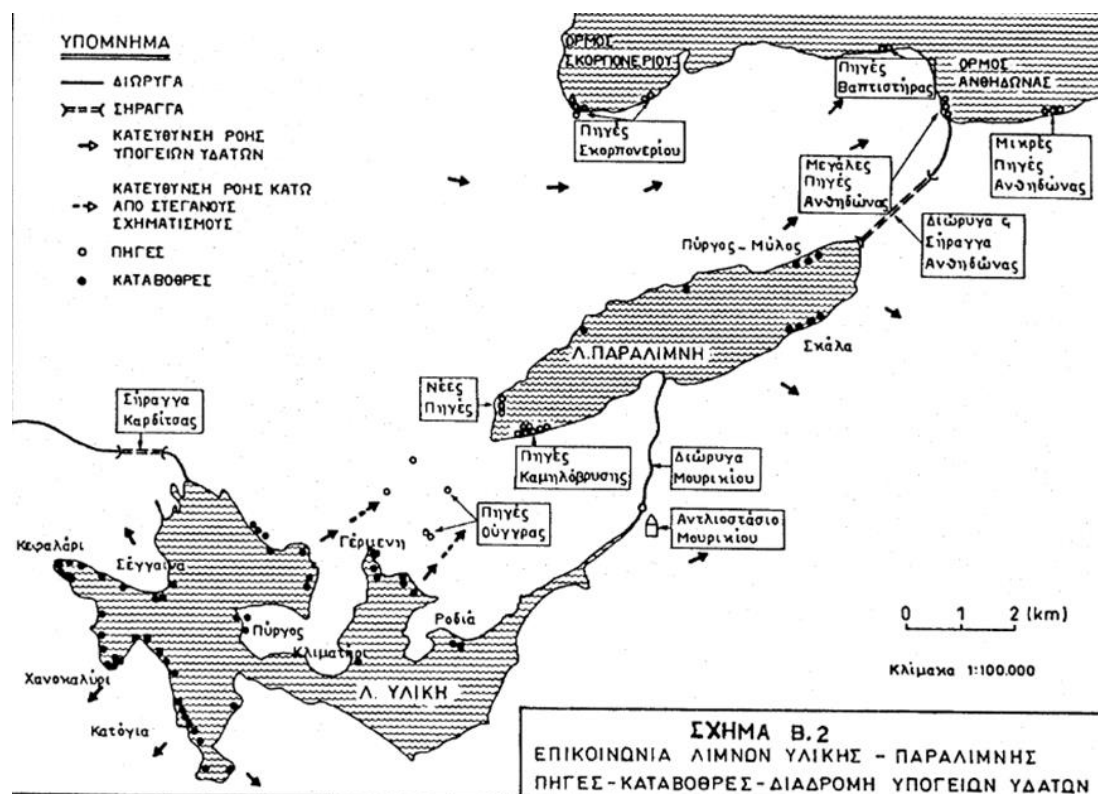
4.1 Υδροσύστημα Υλίκης-Παραλίμνης

Η Παραλίμνη, μαζί με την γειτονική της λίμνη Υλίκη, τις τοπικές τους λεκάνες αλλά και τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, εντάσσονται σε ένα σύνθετο και ιδιαίτερα εκτεταμένο σύστημα, με πολλαπλές διασυνδέσεις, τόσο επιφανειακές (εκτροπή Βοιωτικού Κηφισού στην Υλίκη, εκτροπή υπερχειλίσεων Υλίκης στην Παραλίμνη, μέσω της Διώρυγας Μουρικίου, εκτροπή υπερχειλίσεων Παραλίμνης στον όρμο της Ανθηδώνας, μέσω της ομώνυμης σήραγγας και στη συνέχεια τάφρου), όσο και υπόγειες.

Όπως η Υλίκη, έτσι και η Παραλίμνη είναι μη στεγανή, καθώς αναπτύσσεται σε καρστικοποιημένο υπόβαθρο, με αποτέλεσμα οι υπόγειες ροές να διαδραματίζουν ουσιώδη ρόλο στο υδατικό της ισοζύγιο. Στον χάρτη της **Εικόνας 4.1**, που αναπαρήχθη από τη μελέτη των Τζεράνη και Τσολακίδη (1990), απεικονίζονται οι πιθανές διαδρομές των υπόγειων υδάτων μεταξύ Υλίκης και Παραλίμνης. Γενικά, οι μελετητές συμφωνούν ότι οι εισροές της Παραλίμνης προέρχονται, ως επί το πλείστον, από υπόγειες διαφυγές της Υλίκης. Η απευθείας υπόγεια επικοινωνία της Υλίκης με την Παραλίμνη είναι μάλλον περιορισμένη, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των διαφυγών της Υλίκης από το Β και ΒΑ τμήμα της αναβλύζει επιφανειακά, στις καρστικές πηγές Ούγγρας και Καμηλόβρυσης. Οι τελευταίες εμφανίζονται σε δύο συστήματα, μικρό και μεγάλο, σε υψόμετρο +42 m, κοντά στο Δ και ΒΔ άκρο της Παραλίμνης, και φαίνεται ότι αποτελούν βασικό τροφοδότη της. Οι υπόλοιπες διαφυγές της Υλίκης, από το ΝΔ και ΝΑ της τμήμα, εικάζεται ότι εκφορτίζονται στις πηγές Κοκκώση, δυτικά των μικρών πηγών του όρμου της Ανθηδώνας.

Οι υπόλοιπες εισροές της Παραλίμνης προέρχονται από τη βροχόπτωση στην επιφάνεια της λίμνης, την επιφανειακή και υπόγεια απορροή της τοπικής της λεκάνης, έκτασης 74.5 km², καθώς και από περιστασιακές υπερχειλίσεις της Υλίκης. Οι κύριες εκροές της είναι οι απώλειες λόγω εξάτμισης και, οι υπόγειες διαφυγές, που εικάζεται ότι καταλήγουν σε παραθαλάσσιες πηγές (βλ. 4.2.3). Οι υπερχειλίσεις της λίμνης είναι σπάνιες, με τη φετινή χρονιά να αποτελεί ορόσημο, δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε υπερχειλίση μετά από πολλές δεκαετίες. Τέλος, αν και δεν πραγματοποιούνται απευθείας απολήψεις από τη λίμνη, αντλούνται ωστόσο νερά από παρακείμενες γεωτρήσεις, που είναι βέβαιο ότι επηρεάζουν το υδατικό ισοζύγιο της λίμνης. Τα αντλιοστάσια της ΔΕΥΑ Χαλκίδας, τα οποία βρίσκονται εντός τη λεκάνης κατάκλυσης της Παραλίμνης, ξεκίνησαν τη λειτουργία τους το 1985, αντλώντας σε μηνιαία βάση περίπου 500 000 m³.

Σε αντίθεση με την Υλίκη, για τις περισσότερες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της οποίας υπάρχουν συστηματικά δεδομένα μετρήσεων, και μάλιστα σε ημερήσια κλίμακα, για την Παραλίμνη δεν διατίθενται παρά ελάχιστα στοιχεία μετρήσεων. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι κύριες ροές της διακινούνται υπόγεια, άρα είναι πρακτικά αδύνατο να ποσοτικοποιηθούν. Από την άλλη πλευρά, η βασική τροφοδοσία της Υλίκης είναι μέσω εκτροπής της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, η οποία συγκεντρώνεται και μετράται στη Διώρυγα Καρδίτσας, που σε συνδυασμό με τα άλλα μετρήσιμα στοιχεία, αλλά και κάποιες παραδοχές, επιτρέπει μια σχετικά αξιόπιστη κατάρτιση υδατικού της ισοζυγίου σε μηνιαία βάση.



Εικόνα 4.1: Επιφανειακές και υπόγειες διαδρομές υδροσυστήματος Υλικής-Παραλίμνης (αναπαραγωγή από Τζεράνη και Τσολακίδη, 1990, σελ. 36).

4.2 Βασικά στοιχεία υδατικού ισοζυγίου Παραλίμνης

4.2.1 Σχέση στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος

Στη μελέτη των Ραυτόπουλου και Σίνου (1951) δίνονται τιμές επιφάνειας και όγκου για διάφορες τιμές στάθμης της Παραλίμνης, που απεικονίζονται και σε μορφή διαγράμματος. Στο πλαίσιο των αναλύσεών μας, εκτιμήσαμε εκ νέου τα αποθέματα, με λογαριθμική παρεμβολή μεταξύ των γνωστών τιμών στάθμης και επιφάνειας (Ευστρατιάδης και Μαμάσης, 2004). Τα τελικά μεγέθη, με βάση τις δύο προσεγγίσεις, δίνονται στον Πίνακα 4.1. Οι αποκλίσεις στις τιμές των όγκων είναι μικρές, με τη μεθοδολογία μας να δίνει κατά 4 ως 5 hm³ υψηλότερες τιμές αποθέματος για το εύρος τιμών στάθμης που κυμαίνεται η λίμνη κατά την πρόσφατη περίοδο.

Για την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου της λίμνης και την εκτίμηση των υπερχειλίσεων μέσω αριθμητικού σχήματος διάδευσης (βλ. 4.3), ήταν αναγκαία η χρήση αναλυτικών σχέσεων στάθμης-όγκου (και αντίστροφα) και στάθμης-επιφάνειας. Προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής ακρίβεια στις εκτιμήσεις, οι σχέσεις αυτές καταρτίστηκαν μέσω τεχνικών παλινδρόμησης, με βάση τμήμα του δείγματος του Πίνακα 4.1, γύρω από τα όρια των 40 έως 60 m, ήτοι εντός της διακύμανσης της στάθμης την περίοδο προσομοίωσης. Η προκύπτουσα αναλυτική σχέση στάθμης-όγκου γράφεται:

$$S = 8.582 (Z - 30)^{1.139} \quad (4.1)$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση στάθμης-επιφάνειας είναι:

$$A = 0.269Z + 1.526 \quad (4.2)$$

Τέλος, η εξίσωση όγκου-στάθμης είναι:

$$Z = 30 + 0.152 S^{0.877} \quad (4.3)$$

Πίνακας 4.1: Σχέση στάθμης-επιφάνειας-αποθέματος Παραλίμνης.

Στάθμη (m)	Επιφάνεια (km ²)	Απόθεμα μελέτης Σίνου και Ραυτόπουλου (hm ³)	Απόθεμα εκτιμώμενο στην παρούσα μελέτη (hm ³)
29.5	0.06	0.0	0.0
30.0	5.01	1.3	1.9
35.0	10.43	39.9	43.9
40.0	12.29	96.7	101.1
45.0	13.71	161.7	166.3
50.0	15.04	233.6	238.2
55.0	16.30	312.0	316.7
60.0	17.74	397.1	401.8
65.0	19.36	489.9	494.6
70.0	21.08	591.0	595.8
75.0	22.81	700.0	705.5
80.0	24.38	818.0	823.5

4.2.2 Απώλειες λόγω υπερχειλίσης

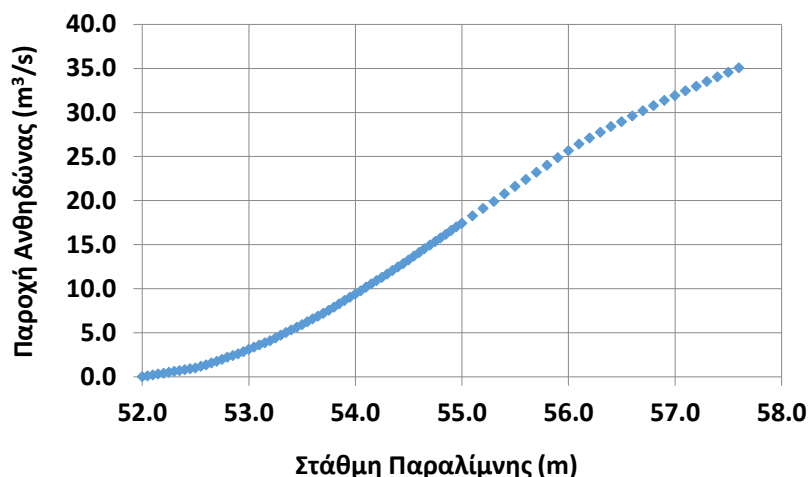
Η υπερχειλίση της Παραλίμνης γίνεται μέσω της σήραγγας Ανθηδώνας, που είναι πεταλοειδούς διατομής, μήκους 800 m, με μέγιστο άνοιγμα περί τα 3.5 m και μέγιστο ύψος περί τα 4.0 m. Η είσοδος της σήραγγας βρίσκεται στην ανατολική πλευρά της λίμνης, όπου τα νερά οδηγούνται μέσω τάφρου. Οι εκροές της σήραγγας διοχετεύονται σε τάφρο, μήκους περί το 1 km, που εκβάλλει στον όρμο της Ανθηδώνας.

Για την εκτίμηση των υπερχειλίσεων της Παραλίμνης χρησιμοποιείται η πινακοποιημένη σχέση που έχει καταρτιστεί από την Εταιρεία Λίμνης Κωπαΐδας (ΕΛΚ), ενώ παρεμφερείς εκτιμήσεις δίνονται σε μελέτη της Continental Drilling, που εκπονήθηκε το 1967 (Τζεράνης και Τσολακίδης, 1990). Η σχέση της ΕΛΚ απεικονίζεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 4.2**, η δε μορφή της είναι τυπική για τέτοιο έργο, καθώς περιλαμβάνει ένα τμήμα που λειτουργεί με ελεύθερη επιφάνεια (όταν η ανάντη στάθμη ανέρχεται κοντά στο ύψος της οροφής) και ένα τμήμα που λειτουργεί υπό πίεση. Σύμφωνα με τις ως άνω μελέτες, ο πυθμένας της σήραγγας, και συνεπώς το όριο της υπερχειλίσης, είναι στα +52.0 m, ωστόσο κατά τη ΔΕΥΑ Χαλκίδας το υψόμετρο που οριακά δεν πραγματοποιείται υπερχειλίση είναι τα +51.25 m. Για στάθμη υπερχειλίσης +52.0 m, και με βάση την σχέση (4.1), ο όγκος νερού στην Παραλίμνη εκτιμάται σε 290 hm³, ενώ για στάθμη +51.25 m η αντίστοιχη αποθήκευση εκτιμάται σε 279 hm³.

Για τις ανάγκες του μοντέλου προσομοίωσης, καταρτίστηκε, όπως προηγουμένως, μια αναλυτική σχέση στάθμης-εκροών διαμέσου της σήραγγας Ανθηδώνας, που δίνεται από τη σχέση:

$$L = 0.143h^2 + 0.124h \quad (4.4)$$

όπου οι εκροές λόγω υπερχειλίσης σε ημερήσια κλίμακα (σε hm³), και h το υδραυλικό φορτίο, ήτοι η διαφορά της στάθμης της λίμνης από τη στάθμη έναρξης της υπερχειλίσης, η οποία θεωρήθηκε στα +51.25 m. Η παραπάνω σχέση καταρτίστηκε προσαρμόζοντας την ως άνω πολυωνυμική σχέση για υδραυλικό φορτίο έως και 2.0 m, ώστε να είναι αντιπροσωπευτική για το εύρος διακύμανσης της στάθμης της Παραλίμνης την περσινή χρονιά. Υπενθυμίζεται ότι, με βάση μαρτυρίες της ΔΕΥΑΧ, η μέγιστη υψομετρική διαφορά της στάθμης της Παραλίμνης από τον πυθμένα της σήραγγας Ανθηδώνας, και συνεπώς το μέγιστο υδραυλικό φορτίο, έφτασε έως τα 1.60 m, στις 21/5/2019.



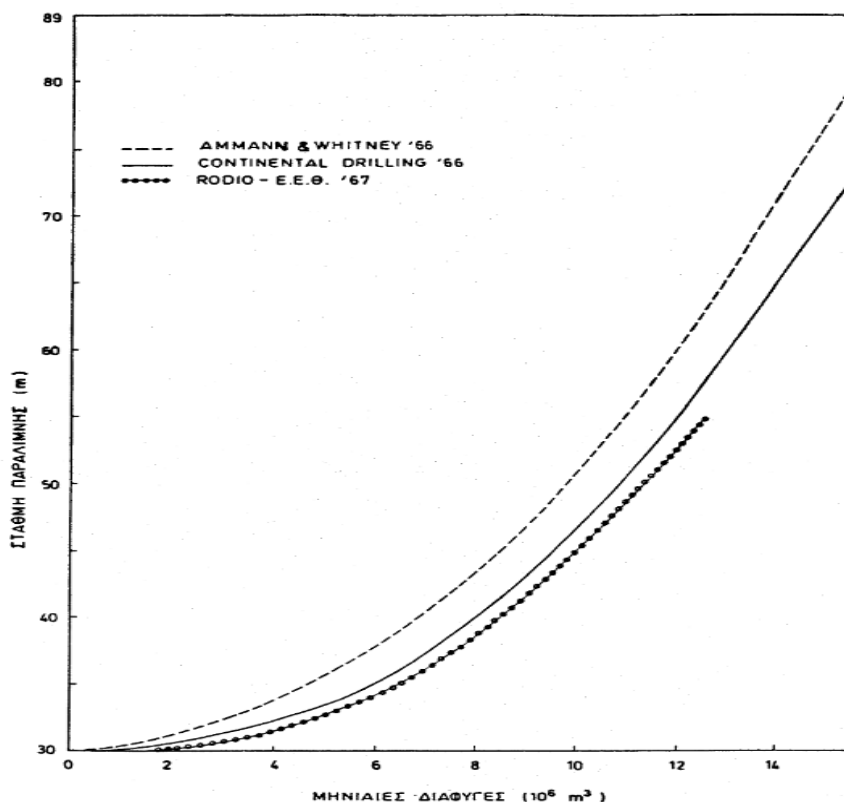
Εικόνα 4.2: Σχέση στάθμης Παραλίμνης και παροχής Σήραγγας Ανθηδώνας (αναπαραγωγή από πινακοποιημένες τιμές της ΕΛΚ).

4.2.3 Υπόγειες διαφυγές

Το πρόβλημα εκτίμησης των διαφυγών της Παραλίμνης έχει απασχολήσει αρκετούς μελετητές κατά το παρελθόν, αν και όχι στην ίδια έκταση με την περίπτωση της Υλίκης. Στην επισκόπηση των Τζεράνη και Τσολακίδη (1990) παρουσιάζονται απόπειρες ποσοτικοποίησης των διαφυγών της Παραλίμνης από τρεις μελέτες που εκπονήθηκαν, σχεδόν ταυτόχρονα, στα τέλη της δεκαετίας του 1960 (Amman and Whitney, 1966· Continental Drilling, 1967· Rodio & ΕΕΘ, 1967). Συγκεκριμένα, για στάθμη Παραλίμνης +38 m, οι Amman and Whitney (1966) εκτιμούν ετήσιες απώλειες της τάξης των 72 hm³. Η προσέγγιση της Continental Drilling (1967) για στάθμες από +35 έως +38 m, με βάση δειγματοληπτικές μετρήσεις, είναι παρεμφερής, ήτοι 75 hm³, ωστόσο από το ισοζύγιο της λίμνης οι μελετητές καταλήγουν σε πολύ μεγαλύτερες εκτιμήσεις διαφυγών, ήτοι 138 hm³.

Οι παραπάνω μελέτες ανέπτυξαν και αναλυτικές σχέσεις των διαφυγών της Παραλίμνης συναρτήσει της στάθμης, που δίνονται στην έκθεση των Τζεράνη και Τσολακίδη (1990) σε γραφική μορφή (**Εικόνα 4.3**). Σημειώνεται ότι η καμπύλη των Rodio & ΕΕΘ (1967) παρήχθη μετατοπίζοντας αυτή των Amman and Whitney, ώστε να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των πηγών Καμηλόβρυσης. Για τον λόγο αυτό, η καμπύλη αυτή δίνει τις πιο υψηλές τιμές διαφυγών. Από την αντιπαραβολή των τριών γραφημάτων προκύπτει ότι για στάθμη της λίμνης κοντά στην υπερχειλίση, οι μηνιαίες διαφυγές της κυμαίνονται από 10 έως 12 hm³. Πάντως, όλοι οι μελετητές συμφωνούν πως υπάρχει πολύ μεγάλη αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις, καθώς από τις αναλύσεις των δεδομένων ισοζυγίου που είχαν επιχειρηθεί, υπήρχε μεγάλη διασπορά των εκτιμώμενων απωλειών λόγω διαφυγών, ακόμα και για σταθερή στάθμη.

Ολοκληρώνοντας, σχετικά με τις υπόγειες ροές της Παραλίμνης, οι Τζεράνης και Τσολακίδη (1990) παραθέτουν ακόμη τα βασικά συμπεράσματα σχετικής εισήγησης του Α. Ξανθάκη, τέως Διευθυντή Υδροληψίας της ΕΥΔΑΠ. Στην εισήγηση επισημαίνεται ότι κατά την περίοδο της μεγάλης ξηρασίας στα τέλη της δεκαετίας του 1980, η Παραλίμνη δεν είχε αδειάσει, παρά τις ιδιαίτερα χαμηλές εισροές αλλά και την εντατική άντληση που γινόταν από την Υλίκη, το οποίο αποδίδεται στην ύπαρξη σημαντικών υπόγειων εισροών στη λίμνη. Από ανάλυση των διαθέσιμων μετρήσεων στάθμης στις δύο λίμνες, εκτιμάται ότι όταν η στάθμη της Υλίκης βρίσκεται στα επίπεδα των +70 m και άνω, η Παραλίμνη τείνει να ισορροπήσει στα επίπεδα των +36 m, ενώ όταν η Υλίκη βρίσκεται χαμηλότερα από τα +65 m, η Παραλίμνη ισορροπεί περί τα +32.5 m. Κατά τον Ξανθάκη, αυτό υποδηλώνει ότι για στάθμες άνω των +36 m οι διαφυγές της Παραλίμνης υπερκαλύπτουν τις εισροές, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για χαμηλότερες στάθμες.



Εικόνα 4.3: Σχέση στάθμης Παραλίμνης και μηνιαίων διαφυγών, με βάση τρεις διαφορετικές μελέτες (αναπαραγωγή από Τζεράνη και Τσολακίδη, 1990, σελ. 35).

4.3 Αναπαραγωγή υδατικού ισοζυγίου Μαρτίου-Ιουλίου 2019

4.3.1 Μεθοδολογία, δεδομένα και παραδοχές

Βασική συνιστώσα των αναλύσεων της παρούσας ήταν η αναπαραγωγή του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης κατά την περίοδο της υπερχειρίσής της. Η ανάλυση έγινε σε ημερήσια κλίμακα, για το διάστημα 1/3/2019, ήτοι πριν την έναρξη της υπερχειρίσης της Παραλίμνης, αλλά στην έξαρση της υπερχειρίσης της Υλίκης, οπότε ξεκίνησε η συστηματική παρακολούθηση του φαινομένου από τη ΔΕΥΑΧ, έως τις 31/7/2019, που η υπερχειρίση και των δύο λιμνών είχε ολοκληρωθεί. Ο στόχος της διερεύνησης αυτής ήταν διττός, αφενός να εκτιμηθεί η ποσότητα νερού που υπερχείλισε από την Παραλίμνη και αφετέρου να αξιολογηθεί η μεθοδολογία εκτίμησης των υπερχειρίσεων της Υλίκης, και ειδικότερα η επιλογή της στάθμης αναφοράς των +78.31 m και η εφαρμογή του μειωτικού συντελεστή 0.77 στη σχέση στάθμης-παροχής της Διώρυγας Μουρικίου (βλ. 3.9).

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης στο χρονικό διάστημα Δt μεταξύ δύο διαδοχικών ημερών γράφεται:

$$\Delta S = I_{\gamma} + Q_{\Pi} + P - E - L - Y \quad (4.5)$$

όπου ΔS η μεταβολή του αποθέματος της λίμνης στο υπόψη χρονικό διάστημα, I_{γ} οι εισροές από την υπερχειρίση της Υλίκης, Q_{Π} οι εισροές από την τοπική λεκάνη της Παραλίμνης, P η βροχόπτωση στην επιφάνεια της λίμνης, E οι απώλειες νερού λόγω εξάτμισης, L οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών, και Y οι απώλειες λόγω υπερχειρίσης.

Οι συνιστώσες της παραπάνω σχέσης εκτιμώνται ως εξής:

- Το απόθεμα της Παραλίμνης στην αρχή κάθε ημέρας, και η αντίστοιχη ημερήσια μεταβολή του, εκτιμάται συναρτήσει της στάθμης, μέσω της σχέσης (4.3).

- Οι εισροές από την υπερχειλίση της Υλίκης εκτιμώνται με βάση τα δεδομένα και παραδοχές του υποκεφαλαίου 3.9.
- Η απορροή από την λεκάνη της Παραλίμνης εκτιμάται με αναγωγή των τιμών επιφανειακής απορροής της λεκάνης της Υλίκης στην καθαρή έκταση της λεκάνης της Παραλίμνης, ήτοι τη διαφορά της συνολικής έκτασης από την αντίστοιχη μέση ημερήσια επιφάνεια της λίμνης, η οποία εκτιμάται συναρτήσει της στάθμης, μέσω της σχέσης (4.2).
- Η εισροή λόγω βροχόπτωσης εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας τα ημερήσια ύψη βροχής του τηλεμετρικού σταθμού του ΕΑΑ στη Θήβα επί την μέση ημερήσια επιφάνεια της λίμνης.
- Οι απώλειες λόγω εξάτμισης εκτιμώνται πολλαπλασιάζοντας τα μέσα ύψη εξάτμισης της Υλίκης (σταθερές τιμές ανά μήνα) επί την μέση ημερήσια επιφάνεια της Παραλίμνης.
- Οι υπόγειες διαφυγές της Παραλίμνης εκτιμώνται βάσει μιας γραμμικής σχέσης στάθμης-διαφυγών (σε $\text{hm}^3/\text{ημέρα}$), ήτοι:

$$L = \alpha + \beta Z \quad (4.6)$$

- Οι απώλειες λόγω υπερχειλίσης εκτιμώνται μέσω της σχέσης (4.4), που έχει προσαρμοστεί στην καμπύλη της ΕΛΚ, θεωρώντας μηδενικό υδραυλικό φορτίο στα +51.25 m (βλ. 4.2.2).

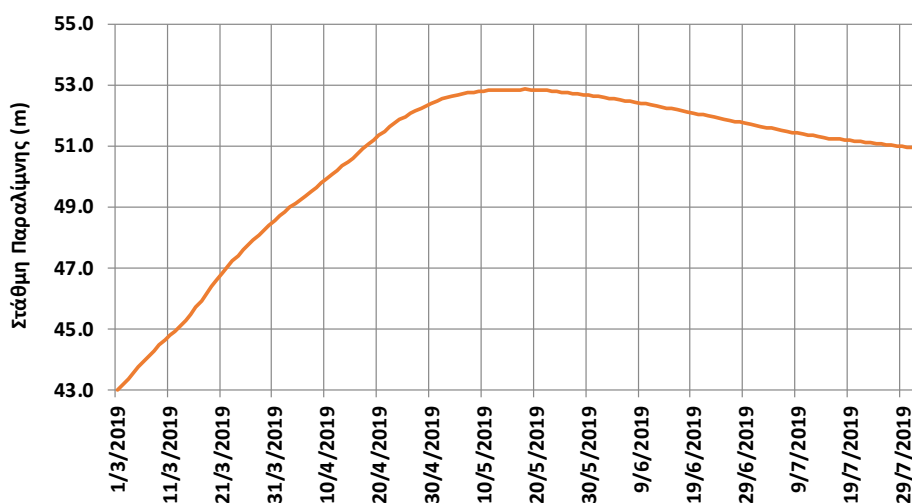
Παρατηρείται ότι, με εξαίρεση τις γνωστές εισροές από την Υλίκη, όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης είναι συναρτήσεις της στάθμης στην αρχή του χρονικού βήματος (στη γενική περίπτωση μη γραμμικές), με αποτέλεσμα να προκύπτει μια πεπλεγμένη σχέση που δεν μπορεί να λυθεί αναλυτικά. Η σχέση αυτή είναι αναδρομική, καθώς για να υπολογιστεί η στάθμη σε ένα δεδομένο χρονικό βήμα, θα πρέπει να έχουν υπολογιστεί προηγουμένως οι στάθμες όλων των προηγούμενων βημάτων, ξεκινώντας από μια γνωστή αρχική τιμή. Με τον τρόπο αυτό, σε κάθε βήμα, η στάθμη που προσδιορίζεται αποτελεί στοιχείο εισόδου για το επόμενο, το οποίο προϋποθέτει τη σειριακή χρήση μη γραμμικών επιλυτών. Εναλλακτικά, μπορεί να εφαρμοστεί ένα ρητό αριθμητικό σχήμα, που στη γενική περίπτωση διατυπώνεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με μεταβλητές ελέγχου όλες τις άγνωστες στάθμες ταυτόχρονα, και στόχο την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων του υδατικού ισοζυγίου. Ως στοιχική συνάρτηση, τίθεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ του αριστερού και δεξιού όρου της εξίσωσης, ήτοι της μεταβολής του αποθέματος, ΔS , και της διαφοράς εισροών και εκροών (Ευστρατιάδης και Παπανικολάου, 2018).

Στην προκειμένη περίπτωση, το πρόβλημα είναι πιο σύνθετο, καθώς εκτός από τις στάθμες είναι άγνωστες και οι τιμές των δύο παραμέτρων της σχέσης στάθμης-διαφυγών. Επιπρόσθετα, εκτός από το σφάλμα των εξισώσεων υδατικού ισοζυγίου, που προφανώς πρέπει να γίνει ελάχιστο (στην ιδανική περίπτωση μηδενικό), η αναπαραγωγή του υδατικού ισοζυγίου πρέπει να επαληθεύει τις ποσοτικές και ποιοτικές παρατηρήσεις της ΔΕΥΑΧ, που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2. Για τον λόγο αυτό, στη διατύπωση της στοιχικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης εισήχθησαν, ως πρόσθετος στόχος, η ελαχιστοποίηση της απόκλισης των εκτιμώμενων τιμών στάθμης από τις μετρημένες, που δίνονται στο διάγραμμα της **Εικόνας 2.1**, και ως περιορισμοί η μέγιστη στάθμη κατά τη διάρκεια της υπερχειλίσης να μην υπερβεί τα +52.85 m (δηλαδή 1.60 m πάνω από το όριο έναρξης της υπερχειλίσης, σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της ΔΕΥΑΧ) και να έχει ολοκληρωθεί το φαινόμενο έως τις 15/7/2019.

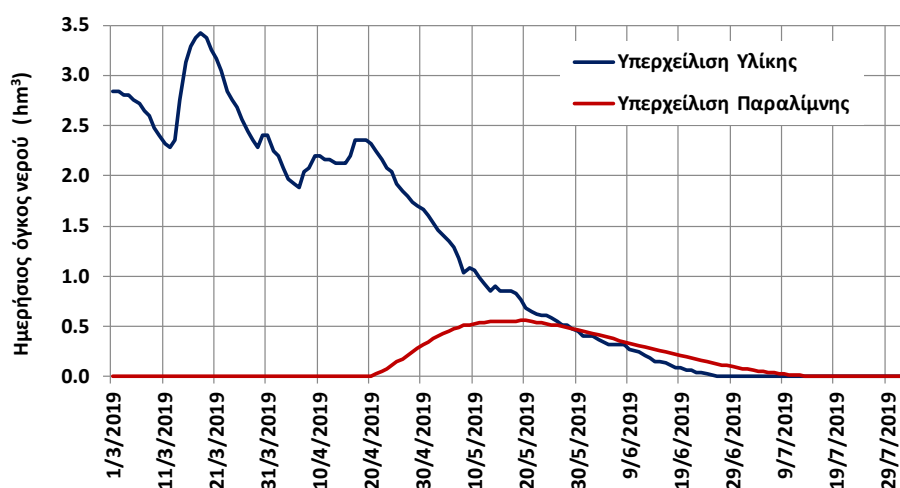
Το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου ήταν 155, ήτοι 153 άγνωστες στάθμες στο χρονικό διάστημα προσομοίωσης και οι δύο παράμετροι της σχέσης (4.6). Μετά από δοκιμές, ως στάθμη έναρξης στις 1/3/2019 θεωρήθηκαν τα +43.0 m.

4.3.2 Αποτελέσματα

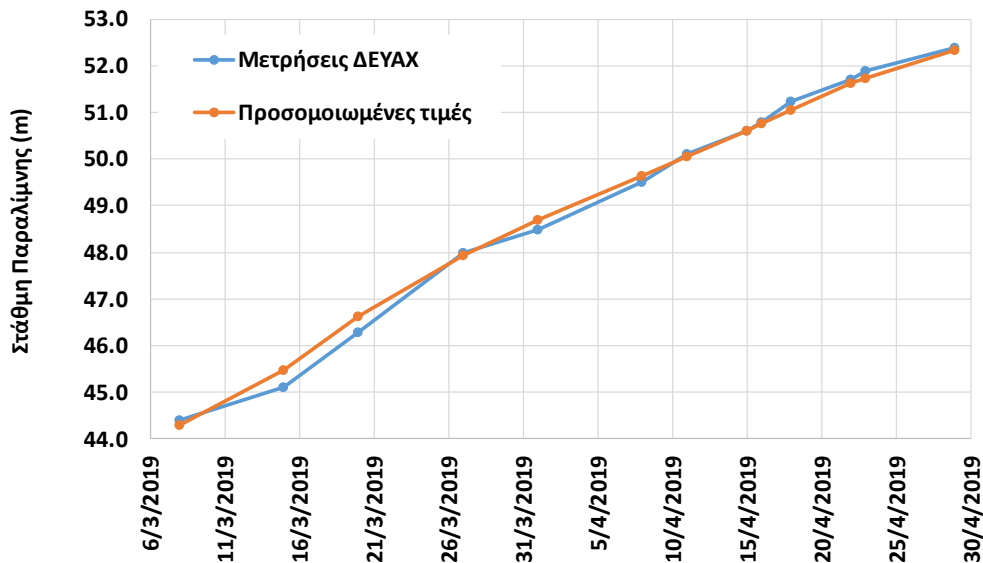
Στην **Εικόνα 4.4** δίνεται η χρονική εξέλιξη της προσομοιωμένης ημερήσιας στάθμης της Παραλίμνης κατά το χρονικό διάστημα από 1/3/2019 έως 31/7/2019, ενώ στην **Εικόνα 4.5** απεικονίζονται οι ημερήσιες χρονοσειρές υπερχειλίσας από την Υλίκη και την Παραλίμνη, με την πρώτη να αποτελεί εισροή στην λίμνη, ενώ τη δεύτερη εκροή. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης προκύπτει ότι στο χρονικό διάστημα των πέντε μηνών, από τις υπερχειλίσες της Υλίκης εισήλθαν στην Παραλίμνη 180.2 hm^3 , ενώ εξήλθαν 25.5 hm^3 από την υπερχειλίση της Παραλίμνης, η οποία διήρκησε από τις 20/4/2019 έως τις 14/7/2019. Από την αντιπαραβολή των προσομοιωμένων τιμών στάθμης με τις μετρήσεις της ΔΕΥΑΧ το δίμηνο Μαρτίου-Απριλίου (**Εικόνα 4.6**) προκύπτει πολύ καλή συμφωνία, τεκμηριώνοντας την ορθότητα της προσέγγισής μας, και ειδικότερα των παραδοχών που αφορούν στις εκτιμώμενες εισροές από την Υλίκη. Μάλιστα, από την προσομοίωση επιβεβαιώνονται δύο μείζονες παρατηρήσεις της ΔΕΥΑΧ, ότι η στάθμη της Παραλίμνης έφτασε έως και 1.60 m πάνω από την υπερχειλίση (στις 18 και 19/5/2019), και ότι το φαινόμενο σταμάτησε στις αρχές του δευτέρου δεκαημέρου του Ιουλίου (βλ. 2.2).



Εικόνα 4.4: Προσομοιωμένη στάθμη Παραλίμνης από 1/3/2019 έως 31/7/2019.



Εικόνα 4.5: Χρονοσειρές ημερήσιας υπερχειλίσας από την Υλίκη και την Παραλίμνη, στο διάστημα από 1/3/2019 έως 31/7/2019.



Εικόνα 4.6: Σύγκριση προσομοιωμένης στάθμης Παραλίμνης με μετρήσεις της ΔΕΥΑΧ το χρονικό διάστημα από 6/3/2019 έως 28/4/2019.

Από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης εκτιμήθηκαν και οι δύο παράμετροι της σχέσης σταθμής διαφυγών, η τελική μορφή της οποίας είναι:

$$L = -0.200 + 0.0041 Z \quad (4.7)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, και μέσω του μοντέλου προσομοίωσης, οι συνολικές απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών στο πεντάμηνο Μαρτίου-Ιουλίου 2019 εκτιμήθηκαν σε 28.5 hm^3 , ήτοι περίπου 5.7 hm^3 ανά μήνα. Τονίζεται ότι η υπόψη συνιστώσα εκφράζει, στην πραγματικότητα, τη διαφορά μεταξύ των υπόγειων διαφυγών και των αντίστοιχων υπόγειων εισροών, και όχι τις διαφυγές καθαυτές. Αν συγκριθεί με τις εκτιμήσεις των παλιών μελετητών, που δίνονται στην **Εικόνα 4.3**, προφανώς και προκύπτουν αποκλίσεις, που προφανώς οφείλονται στην άμεση και έμμεση (μέσω των πηγών Καμηλόβρυσης) τροφοδοσία της Παραλίμνης από τις διαφυγές της Υλίκης. Δεδομένου ότι κατά την περίοδο προσομοίωσης οι διαφυγές της Υλίκης ήταν ιδιαίτερα υψηλές (αφού η Υλίκη ήταν στην υπερχειλίση), είναι αναμενόμενο να υπήρχαν αυξημένες εισροές στην Παραλίμνη, μέσω των πολύπλοκων υπόγειων διαδρομών του ενιαίου υδρογεωλογικού συστήματος. Βεβαίως, είναι εξαιρετικά δύσκολο, αν όχι πρακτικά αδύνατο, να διαχωριστεί η υπόγεια ροή που εκτιμάται μέσω της (4.7) σε εισροές και εκροές.

4.3.3 Σύγκριση με σενάρια πρόγνωσης προηγούμενης έκθεσης

Στην πρότερη έκθεση των Ευστρατιάδη κ.ά. (2019), παρήχθησαν σενάρια πρόγνωσης της στάθμης και των υπερχειλίσεων της Παραλίμνης, για την περίοδο 21/3/2019 έως 30/6/2019. Στα σενάρια αυτά είχε θεωρηθεί μία μόνο συνιστώσα εισροής, ήτοι η υπερχειλίση της Υλίκης, και καμία εκροή, ενώ είχε τεθεί ως στάθμη υπερχειλίσης τα $+52.0 \text{ m}$, με βάση την σχέση στάθμης-παροχής της ΕΛΚ, στην οποία εφαρμόστηκε μειωτικός συντελεστής κατά 20% ώστε να ληφθούν υπόψη αβεβαιότητες σχετικά με την υδραυλική λειτουργία της σήραγγας Ανθηδώνας (π.χ., αυξημένη τραχύτητα λόγω επικαθήσεων φερτών). Με τη θεώρηση αρκετά χαμηλότερου υψομέτρου αναφοράς, ήτοι $+51.25 \text{ m}$, εισάγεται προφανώς συστηματικό σφάλμα στη σύγκριση των μεγεθών της πρόγνωσης με την πραγματική εξέλιξη των αντίστοιχων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης (στάθμη, υπερχειλίσεις), που και αυτές, βεβαίως, βασίζονται σε εκτιμήσεις μέσω προσομοίωσης και όχι σε μετρήσεις.

Πίνακας 4.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μέσου σεναρίου πρόγνωσης της έκθεσης των Ευστρατιάδη κ.ά. (2019) με τα προσομοιωμένα μεγέθη της παρούσας, για την περίοδο 21/3/2019 έως 30/6/2019.

	Μέσο σενάριο πρόγνωσης	Τιμές από προσομοίωση
Συνολική εισροή από Υλίκη (hm ³)	119.4	123.8
Τελική στάθμη στις 30/6/2019 (m)	53.13	51.71
Μέγιστη στάθμη (m)	53.63	52.85
Συνολική υπερχειλίση (hm ³)	19.4	25.0

Δεδομένου ότι, ως προς το ισοζύγιο της Υλίκης, το μέσο σενάριο πρόγνωσης αποδείχθηκε το πλέον κοντινό στις παρατηρημένες τιμές, στον **Πίνακα 4.2** παραθέτουμε τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με την αντίστοιχα μεγέθη της πρόγνωσης. Θεωρούμε ότι οι αποκλίσεις που προκύπτουν κυρίως οφείλονται στο υπερεκτιμημένο υψόμετρο έναρξης της υπερχειλίσης αλλά και την εφαρμογή μειωτικού συντελεστή στη σχέση στάθμης-παροχής, με συνέπεια την υπερεκτίμηση της στάθμης και την αντίστοιχη υποεκτίμηση των όγκων υπερχειλίσης.

Από την άλλη πλευρά, η εκτιμώμενη εισροή από την υπερχειλίση της Υλίκης, για το μέσο σενάριο πρόγνωσης, σχεδόν ταυτίζεται με την πραγματική, επιβεβαιώνοντας ότι το φαινόμενο εξελίχθηκε σύμφωνα με τις μέσες εκτιμήσεις μας.

Σε κάθε περίπτωση, επιβεβαιώθηκε η πρόβλεψή μας ότι δεν υπήρχε παρά μόνο στατιστικά ακραίο ενδεχόμενο να ανέλθει η στάθμη της λίμνης στα επίπεδα των +56.5 m, θέτοντας σε κίνδυνο τις βασικές Η/Μ υποδομές της ΔΕΥΑΧ.

5 Σενάρια πρόγνωσης υδατικού ισοζυγίου Υλίκης

5.1 Μεθοδολογία

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο πλημμυρικός κίνδυνος από την δυνητική υπερχειλίση της Υλίκης και κατά το τρέχον υδρολογικό έτος, εξετάστηκαν πέντε σενάρια πρόγνωσης του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της, με έναρξη την 1/11/2019 και λήξη στο πέρας του υδρολογικού έτους. Όπως εξηγείται στη συνέχεια, τα σενάρια διαμορφώθηκαν με βάση αντίστοιχα σενάρια μηνιαίων εισροών από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, τρία από τα οποία παρήχθησαν με χρήση εξειδικευμένου σχήματος στοχαστικής πρόγνωσης, ενώ για τα άλλα δύο ορίστηκαν θέτοντας τις μέσες μηνιαίες και διάμεσες τιμές της ιστορικής χρονοσειράς εισροών.

Ακολούθως, καταρτίστηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, με δεδομένα εισόδου τα προαναφερθέντα σενάρια εισροών, και προσεγγιστικές τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου (εισροή από λεκάνη Υλίκης, βροχόπτωση, εξάτμιση, εκροές για ύδρευση και άρδευση). Θεωρήθηκε η στάθμη την 1/11/2019, ήτοι +76.10 m, και για κάθε μήνα εκτιμήθηκαν οι απώλειες λόγω διαφυγών και, κατά περίπτωση, υπερχειλίσης, που είναι και οι δύο συναρτήσεις της (άγνωστης) στάθμης στο τέλος του μήνα (καθώς στις αντίστοιχες εξισώσεις εισάγεται, ως ανεξάρτητη μεταβλητή, η μέση μηνιαία στάθμη). Συνεπώς, το πρόβλημα έγκειται στην εκτίμηση της στάθμης στο πέρας κάθε μήνα, που εισάγεται ως γνωστή τιμή τον επόμενο.

Από την παραπάνω υπολογιστική διαδικασία προέκυψαν πέντε σενάρια πρόγνωσης δύο βασικών μεγεθών ενδιαφέροντος, ήτοι της στάθμης της Υλίκης και των απωλειών λόγω υπερχειλίσης, με βάση τα οποία δίνεται μια αρχική εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου για το τρέχον έτος.

5.2 Σενάρια πρόγνωσης απορροής λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού

5.2.1 Δεδομένα εισόδου

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι μηνιαίες χρονοσειρές πρόγνωσης των εισροών στην Υλίκη από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, με χρονικό ορίζοντα τον Σεπτέμβριο του 2020, παρήχθησαν με δύο τρόπους, ήτοι μέσω στοχαστικού μοντέλου (από τα αποτελέσματα του οποίου επιλέχθηκαν τρία χαρακτηριστικά σενάρια) και με εφαρμογή τυπικών στατιστικών εκτιμητριών (δύο σενάρια).

Και στις δύο προσεγγίσεις, χρησιμοποιήθηκε ως βάση η χρονοσειρά μηνιαίων εισροών από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού, μήκους 112 ετών (1907-08 έως 2018-19), η κατάρτιση της οποίας περιγράφεται στο εδάφιο 3.6.2. Προκειμένου να μην υπάρχουν τεχνητές αλλοιώσεις στα στατιστικά χαρακτηριστικά του δείγματος, δεν έγινε αναγωγή των εκτιμώμενων παροχών της ΕΥΔΑΠ. Όπως εξηγείται στο εδάφιο 3.6.3, ενδέχεται (χωρίς ωστόσο να είναι βέβαιο) ότι απαιτείται μεσοσταθμική μείωση των δειγματικών τιμών κατά 10%, από το 1977 έως σήμερα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η πιθανολογούμενη αύξηση της τραχύτητας της διατομής της Διώρυγας Καρδίτσας. Συνεπώς, όλες οι επόμενες στατιστικές και στοχαστικές αναλύσεις βασίζονται στο αρχικό, ενδεχομένως ελαφρά υπερεκτιμημένο, δείγμα τιμών, το οποίο είναι προς την πλευρά της ασφαλείας.

5.2.2 Παραγωγή σεναρίων στοχαστικής πρόγνωσης

Η στοχαστική προσέγγιση, που είναι και η πλέον δόκιμη, καθώς έχει ως υπόβαθρο τη θεωρία πιθανοτήτων, βασίστηκε σε πρωτότυπο σχήμα πιθανοτικής δεσμευμένης πρόγνωσης (probabilistic

conditional forecasting), που υλοποιήθηκε σε δύο στάδια. Αρχικά, παρήχθησαν 1000 συνθετικές τιμές πρόγνωσης της απορροής του υδρολογικού έτους 2019-20, στατιστικά δεσμευμένες στο παρατηρημένο δείγμα των 112 ετήσιων τιμών. Η διαδικασία γέννησης έγινε με το στοχαστικό σχήμα Symmetric Moving Average To Anything (SMARTA) των Tsoukalas *et al.* (2018b), που συνδυάζει το μοντέλο συμμετρικών κινούμενων μέσων όρων (Symmetric Moving Average, SMA), που ανέπτυξε ο Koutsoyiannis (2000), με τεχνικές μετασχηματισμού κατανομών, που βασίζονται στη θεωρία των copulas και του μοντέλου από κοινού κατανομής Nataf (Tsoukalas, 2018· Tsoukalas *et al.*, 2018a, b).

Στο μοντέλο SMA, το οποίο είχε υλοποιηθεί και στο λογισμικό Κασταλία (Efstratiadis *et al.*, 2014), η γεννήτρια συνάρτηση της στοχαστικής διεργασίας διατυπώνεται ως σταθμισμένο άθροισμα ενός πολύ μεγάλου (θεωρητικά άπειρου) πλήθους τυχαίων όρων, οι συντελεστές του οποίου είναι συνάρτηση των αυτοσυνδιασπορών της ανέλιξης. Οι τελευταίες προκύπτουν αναλυτικά, μέσω μιας γενικευμένης συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς που είτε ορίζεται θεωρητικά ή προσαρμόζεται στο αυτοσυσχετόγραμμα του ιστορικού δείγματος, εξασφαλίζοντας την αναπαραγωγή μακροχρόνιων στατιστικών εξαρτήσεων όχι μόνο στην ετήσια αλλά και σε πολλαπλές συναθροισμένες κλίμακες. Πρακτικά, αυτές οι εξαρτήσεις είναι η στατιστική απεικόνιση της συσσώρευσης υγρών και ξηρών περιόδων και των εγγενών μακροχρόνιων υδροκλιματικών μεταβολών, που στη γενική περίπτωση αναφέρονται με τον όρο δυναμική Hurst-Kolmogorov (Koutsoyiannis, 2011). Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.6**, η απορροή του Βοιωτικού Κηφισού χαρακτηρίζεται από ισχυρή μακροχρόνια εμμονή, που ποσοτικοποιείται μέσω της παραμέτρου σχήματος της συνάρτησης αυτοσυνδιασποράς. Η επιλογή της εν λόγω παραμέτρου αποτελεί ουσιώδη παραδοχή του μοντέλου, και στην προκειμένη περίπτωση έγινε ημιεμπειρικά, λαμβάνοντας υπόψη το ιστορικό δείγμα αλλά και την εν γένει δίαιτα των υδροκλιματικών διεργασιών στην περιοχή μελέτης (Efstratiadis *et al.*, 2014).

Η αρχική υλοποίηση του σχήματος γέννησης SMA εξασφάλιζε αφενός την αναπαραγωγή ενός πολύ μεγάλου φάσματος δομών αυτοσυσχέτισης και αφετέρου την αναπαραγωγή των δειγματικών στατιστικών χαρακτηριστικών της μεταβλητής (μέση τιμή, διασπορά, συντελεστής ασυμμετρίας), γεννώντας τυχαίες μεταβλητές (λευκό θόρυβο) από κατανομή γάμα. Οι Tsoukalas *et al.* (2018b) εισήγαγαν στο υπόψη σχήμα μια βελτιωμένη και γενική υπολογιστική διαδικασία, που επιτρέπει τη ρητή περιγραφή της διεργασίας που προσομοιώνεται μέσω της αναπαραγωγής οποιουδήποτε μοντέλου κατανομής, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί πρότυπα εξάρτησης που δεν μπορούν να απεικονιστούν πλήρως μέσω των τυπικών γραμμικών στοχαστικών σχημάτων (Tsoukalas *et al.*, 2018c). Ακρογωνιαίος λίθος της εν λόγω προσέγγισης είναι το μοντέλο από κοινού κατανομής Nataf, που σχετίζεται με τη γκαουσιανή copula (Tsoukalas, 2018· Tsoukalas *et al.*, 2018a).

Τελικά, μέσω του μοντέλου SMARTA παρήχθησαν 1000 ετήσιες τιμές της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού του υδρολογικού έτους 2019-20, από τις οποίες επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές τιμές, ήτοι 107.3, 276.1 και 530.1 hm³, που αντιστοιχούν σε εμπειρικές πιθανότητες υπέρβασης 95, 50 και 5%. Στη συνέχεια, για κάθε μία από τις παραπάνω τιμές, παρήχθησαν 1000 συνθετικές χρονοσειρές μηνιαίων τιμών που αθροίζουν στην ίδια ετήσια τιμή, συνδυάζοντας τη μεθοδολογία πιθανοτικής δεσμευμένης πρόγνωσης διεργασιών (probabilistic conditional forecasting) του Tsoukalas (2018) και της τεχνικής επιμερισμού (disaggregation) των Tsoukalas *et al.* (2019), η οποία είναι κατάλληλη για διεργασίες (στάσιμες ή κύκλοστάσιμες) με οποιαδήποτε περιθώρια κατανομή. Η τελευταία αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του σχήματος των Koutsoyiannis and Manetas (1996) και Koutsoyiannis (2000), που είχε επίσης υλοποιηθεί στο λογισμικό Κασταλία. Για την κατάρτιση των τελικών σεναρίων, για κάθε μήνα ελήφθη, ως πλέον αντιπροσωπευτική, η μέση τιμή του δείγματος των 1000 ισοπίθανων τιμών πρόγνωσης. Τα τρία σεναρία που προέκυψαν δίνονται στον **Πίνακα 5.1**.

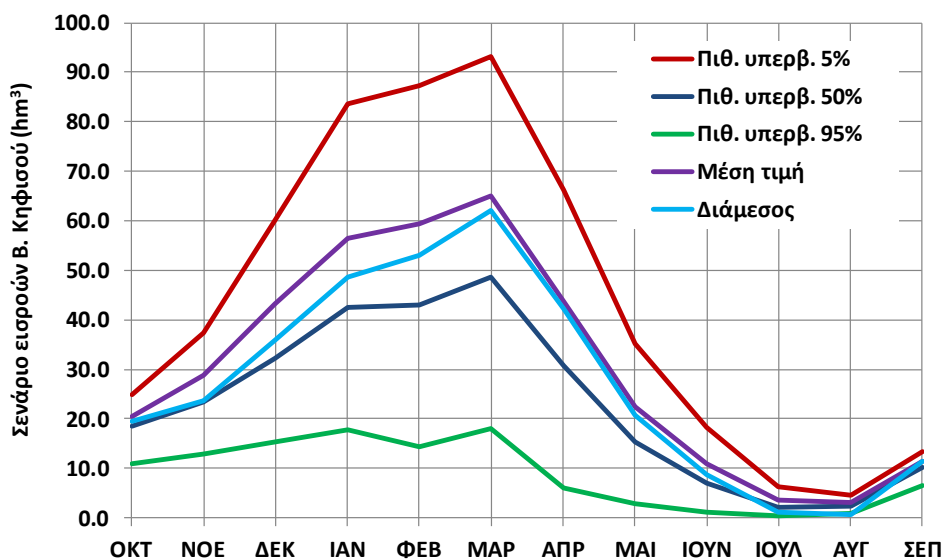
5.2.3 Τελικά σενάρια εισροών

Εκτός από τα προαναφερθέντα σενάρια στοχαστικής πρόγνωσης, εφαρμόστηκαν, για λόγους σύγκρισης, δύο ακόμη σενάρια υποθετικών εισροών, θεωρώντας δύο χαρακτηριστικές τιμές, ήτοι τη μέση τιμή κάθε μήνα και τη διάμεσο, δηλαδή τη μεσαία τιμή του ταξινομημένου δείγματος. Όσο περισσότερο η κατανομή του αντίστοιχου μήνα αποκλίνει από την κανονική, τόσο οι δύο αυτές τιμές απομακρύνονται. Όπως φαίνεται στον **Πίνακα 5.1**, η διάμεσος είναι συστηματικά μικρότερη από τη μέση τιμή, καθώς η μηνιαία απορροή χαρακτηρίζεται από αρνητική ασυμμετρία. Ορισμένους μήνες, οι αποκλίσεις είναι πολύ μικρές, άρα η κατανομή τείνει στην κανονική, ενώ κατά την υγρή περίοδο Νοεμβρίου-Φεβρουαρίου παρατηρούνται μη αμελητέες αποκλίσεις, καθώς οι αντίστοιχες διεργασίες ακολουθούν ασύμμετρη κατανομή.

Πίνακας 5.1: Σενάρια πρόγνωσης της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού για το υδρολογικό έτος 2019-20 (hm^3).

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάι.	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπ.	Έτος
Πιθ. υπ. 5%	24.8	37.3	60.2	83.6	87.2	93.1	66.2	35.1	18.3	6.3	4.6	13.4	530.1
Πιθ. υπ. 50%	18.5	23.4	32.1	42.6	43.0	48.6	30.9	15.4	6.9	2.2	2.3	10.1	276.1
Πιθ. υπ. 95%	10.9	13.0	15.2	17.7	14.3	18.0	6.1	2.9	1.2	0.4	0.8	6.6	107.3
Μέση τιμή	20.5	28.9	43.1	56.5	59.4	65.0	43.7	22.3	11.0	3.7	3.1	11.4	368.8
Διάμεσος	19.4	23.6	35.8	48.5	53.0	62.2	42.4	20.7	8.6	1.1	0.7	11.5	327.5

Τα πέντε τελικά σενάρια απορροής, που βεβαίως παρουσιάζουν πολύ μεγάλη διασπορά, δίνονται και σε μορφή διαγράμματος, στην **Εικόνα 5.1**. Είναι αξιοσημείωτο ότι το μέσο σενάριο πρόγνωσης είναι ελαφρά χαμηλότερο από το ιστορικό διάμεσο, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι, αν και το διαρρεύσαν υδρολογικό έτος ήταν εξαιρετικά υγρό, τα δύο προηγηθέντα ήταν σχετικά φτωχά σε υδροφορία. Επειδή η στατιστική εξάρτηση της απορροής δεν περιορίζεται στην ετήσια κλίμακα, αλλά επεκτείνεται και σε πολύ μεγαλύτερες, με βάση τη μέση στοχαστική πρόγνωση δεν αναμένεται να επαναληφθεί η τόσο υψηλή υδροφορία της περσινής χρονιάς. Βεβαίως αυτό αφορά στη μέση εκτίμηση, καθώς υπάρχει και μια μικρή, έστω, πιθανότητα παραγωγής πολύ μεγάλων εισροών (δυσμενές σενάριο 5%), που με την έως τώρα (τέλη Νοεμβρίου 2019) εξέλιξη των εισροών στην γλίσκη δεν φαίνεται να επιβεβαιώνεται.



Εικόνα 5.1: Σενάρια πρόγνωσης της μηνιαίας απορροής του Βοιωτικού Κηφισού.

5.3 Προσομοίωση υδατικού ισοζυγίου Υλίκης για την περίοδο Νοεμβρίου 2019 – Σεπτεμβρίου 2020

5.3.1 Μεθοδολογία και παραδοχές

Η μεθοδολογία κατάρτισης του μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης σε χρονικό ορίζοντα ενός υδρολογικού έτους (ήτοι μέχρι τον Σεπτέμβριο 2020) είναι παρεμφερής με αυτή που εφαρμόστηκε στο υποκεφάλαιο 3.11, με τη διαφορά ότι τα μεγέθη εισροών και εκροών δεν είναι πραγματικά αλλά υποθετικά. Συγκεκριμένα:

- Οι εισροές από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού εισήχθησαν με τη μορφή πέντε σεναρίων πρόγνωσης, τα οποία παρήχθησαν όπως εξηγήθηκε παραπάνω.
- Η υπόγειες εισροές στην Υλίκη από την τοπική της λεκάνη και το ευρύτερο υδρογεωλογικό σύστημα εκτιμήθηκε ως το 4% του κινούμενου μέσου όρου της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, που υπολογίστηκε με βάση το πρόσφατο δείγμα εισροών και τα προαναφερθέντα σενάρια πρόγνωσης.
- Η επιφανειακή απορροή της ίδιας λεκάνης της Υλίκης εκτιμήθηκε, προσεγγιστικά, ως το 5% της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, άρα εισήχθη και αυτή με τη μορφή σεναρίων.
- Για τις εισροές λόγω βροχόπτωσης, τις απώλειες λόγω εξάτμισης, και τις απολήψεις για ύδρευση και άρδευση, δεν παρήχθησαν επιμέρους σενάρια, καθώς τέθηκαν οι τιμές του υδρολογικού έτους 2018-19.

Η προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου έγινε για 11 χρονικά βήματα, από τον Νοέμβριο του 2019 έως τον Σεπτέμβριο του 2020. Σε όλα τα σενάρια τέθηκε ως αρχική συνθήκη η παρατηρημένη τιμή αποθέματος της 1/11/2019, ήτοι 510.5 hm^3 , που αντιστοιχεί σε στάθμη $+76.10 \text{ m}$. Με γνωστή την στάθμη στην έναρξη της προσομοίωσης, για κάθε μήνα εκτιμήθηκε η στάθμη στο πέρας του και οι δύο μεταβλητές που εξαρτώνται από αυτή, ήτοι οι απώλειες λόγω διαφυγών και, κατά περίπτωση (για στάθμες μεγαλύτερες από $+78.3 \text{ m}$), υπερχειλίσης. Τόσο οι διαφυγές όσο και οι υπερχειλίσεις εκτιμήθηκαν με αναφορά στη μέση στάθμη κάθε μήνα (ημιάθροισμα αρχικής και τελικής στάθμης).

5.3.2 Αποτελέσματα

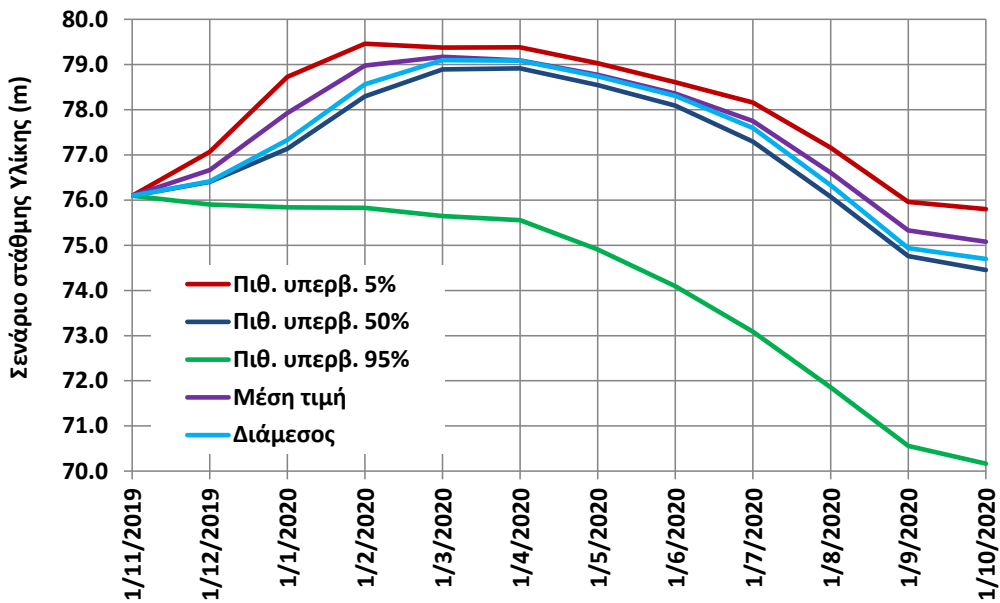
Στον **Πίνακα 5.2** δίνονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης για τα πέντε σενάρια εισροών, κατά την περίοδο Νοεμβρίου 2019 – Σεπτεμβρίου 2020. Ακόμη, στις **Εικόνες 5.2** και **5.3** δίνονται, σε μορφή διαγράμματος, η πρόγνωση της στάθμης την πρώτη ημέρα κάθε μήνα και των υπερχειλίσεων της Υλίκης, αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι:

- Με εξαίρεση το ευνοϊκό σενάριο εισροών, πιθανότητας υπέρβασης 95%, με βάση όλα τα υπόλοιπα σενάρια η Υλίκη διαφαίνεται ότι θα υπερχειλίσει, και το φαινόμενο θα διαρκέσει περίπου ένα εξάμηνο, ήτοι από τα τέλη του τρέχοντος έτους ή τις αρχές του επόμενου ως τις αρχές του καλοκαιριού.
- Στο δυσμενές σενάριο εισροών, με πιθανότητα υπέρβασης 5%, η υπερχειλίση ξεκινά ήδη από τον Δεκέμβριο και ολοκληρώνεται τον Ιούλιο, με τη συνολική ποσότητα εκροών να φτάνει στα επίπεδα των 300 hm^3 , υπερβαίνει δηλαδή την τιμή του διαρρεύσαντος έτους, ήτοι 240 hm^3 . Αντίθετα, στα άλλα τρία σενάρια οι εκτιμώμενοι όγκοι υπερχειλίσης είναι πολύ μικρότεροι, ήτοι 147 hm^3 (μέσες δειγματικές εισροές), 113 hm^3 (διάμεσες δειγματικές εισροές) και 64 hm^3 (σενάριο πιθανότητας υπέρβασης 50%).
- Στην αναμενόμενη έξαρση του φαινομένου, ήτοι την περίοδο Φεβρουαρίου-Μαρτίου, τιμή στάθμης της Υλίκης δεν θα υπερβεί τα $+79.5 \text{ m}$, ακόμα και με το δυσμενές σενάριο εισροών.

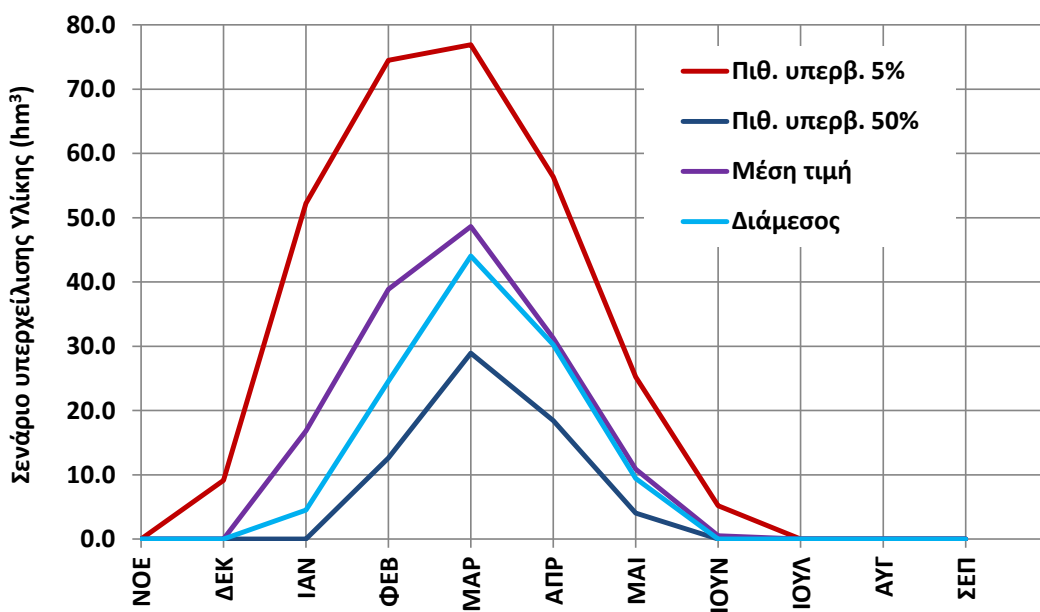
Πίνακας 5.2: Σενάρια προσομοίωσης υδατικού ισοζυγίου Υλικής για διάφορα σενάρια εισροών, για την περίοδο Νοεμβρίου 2019 – Σεπτεμβρίου 2020.

	Πιθανότητα υπέρβασης 5%	Πιθανότητα υπέρβασης 50%	Πιθανότητα υπέρβασης 95%	Μέσες εισορές	Διάμεσες εισορές
Νοέμβριος 2019					
Εισροές	40.5	25.7	14.7	31.5	26.0
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Διαφυγές	18.7	18.5	18.4	18.6	18.5
Απόθεμα 1/12/2019	531.7	517.1	506.2	522.8	517.3
Στάθμη 1/12/2019	77.07	76.40	75.90	76.66	76.41
Δεκέμβριος 2019					
Εισροές	65.7	35.9	17.9	47.6	39.8
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	9.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Διαφυγές	19.6	19.1	18.7	19.3	19.2
Απόθεμα 1/1/2020	568.0	533.2	504.8	550.4	537.4
Στάθμη 1/1/2020	78.73	77.14	75.84	77.92	77.33
Ιανουάριος 2020					
Εισροές	90.8	47.2	20.7	62.1	53.5
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	52.3	0.0	0.0	16.8	4.5
Διαφυγές	21.9	21.2	20.4	21.6	21.3
Απόθεμα 1/2/2020	584.1	558.6	504.6	573.5	564.4
Στάθμη 1/2/2020	79.46	78.30	75.83	78.98	78.56
Φεβρουάριος 2020					
Εισροές	92.9	45.6	14.9	63.2	56.3
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	74.5	12.6	0.0	38.8	24.6
Διαφυγές	19.7	19.4	18.2	19.6	19.5
Απόθεμα 1/3/2020	582.2	571.6	500.6	577.7	576.1
Στάθμη 1/3/2020	79.38	78.89	75.65	79.17	79.10
Μάρτιος 2020					
Εισροές	99.8	51.9	18.9	69.5	66.4
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	76.9	28.9	0.0	48.6	44.0
Διαφυγές	22.1	21.9	20.3	22.0	22.0
Απόθεμα 1/4/2020	582.4	572.1	498.6	576.0	575.9
Στάθμη 1/4/2020	79.38	78.91	75.56	79.09	79.09
Απρίλιος 2020					
Εισροές	71.6	33.0	6.1	47.0	45.4
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	56.3	18.5	0.0	31.2	30.2
Διαφυγές	22.3	22.0	19.8	22.2	22.2
Απόθεμα 1/5/2020	574.6	564.0	484.4	569.0	568.3
Στάθμη 1/5/2020	79.03	78.54	74.91	78.77	78.74

Μάιος 2020					
Εισροές	35.7	13.6	-0.4	21.4	19.5
Απολήψεις	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Υπερχειλίσσεις	25.2	4.1	0.0	10.9	9.4
Διαφυγές	19.1	18.8	16.7	19.0	18.9
Απόθεμα 1/6/2020	565.4	554.1	466.7	559.9	558.7
Στάθμη 1/6/2020	78.61	78.09	74.10	78.36	78.30
Ιούνιος 2020					
Εισροές	16.7	3.5	-3.3	8.3	5.6
Απολήψεις	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8
Υπερχειλίσσεις	5.2	0.0	0.0	0.5	0.0
Διαφυγές	16.5	16.1	13.9	16.3	16.3
Απόθεμα 1/7/2020	555.6	536.7	444.7	546.6	543.3
Στάθμη 1/7/2020	78.16	77.30	73.09	77.75	77.60
Ιούλιος 2020					
Εισροές	3.7	-1.7	-4.3	0.2	-2.6
Απολήψεις	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9
Υπερχειλίσσεις	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Διαφυγές	15.7	15.1	12.9	15.4	15.3
Απόθεμα 1/8/2020	533.7	509.9	417.6	521.6	515.5
Στάθμη 1/8/2020	77.16	76.07	71.86	76.60	76.33
Αύγουστος 2020					
Εισροές	1.8	-1.3	-3.4	-0.2	-2.9
Απολήψεις	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7
Υπερχειλίσσεις	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Διαφυγές	15.4	14.7	12.3	15.1	14.9
Απόθεμα 1/9/2020	507.4	481.2	389.2	493.6	485.0
Στάθμη 1/9/2020	75.96	74.76	70.56	75.33	74.94
Σεπτέμβριος 2020					
Εισροές	12.5	8.6	4.5	10.1	10.2
Απολήψεις	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Υπερχειλίσσεις	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Διαφυγές	14.8	14.2	12.0	14.5	14.3
Απόθεμα 1/10/2020	504.0	474.5	380.7	488.1	479.8
Στάθμη 1/10/2020	75.80	74.45	70.17	75.08	74.70



Εικόνα 5.2: Σενάρια πρόγνωσης της στάθμης της Υλίκης με βάση τα αντίστοιχα σενάρια πρόγνωσης των εισροών.



Εικόνα 5.3: Σενάρια πρόγνωσης των υπερχειλίσεων της Υλίκης με βάση τα αντίστοιχα σενάρια πρόγνωσης των εισροών.

6 Συμπεράσματα – προτάσεις

6.1 Επισκόπηση πρόσφατης υπερχειλίσης Υλίκης και Παραλίμνης

Το υδρολογικό έτος 2018-19 ήταν εξαιρετικά πλούσιο σε υδροφορία. Η εκτιμώμενη από την ΕΥΔΑΠ εισροή από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού ανήλθε σε 653.8 hm³, και ήταν η υψηλότερη των τελευταίων 50 ετών. Μάλιστα, το τρίμηνο Ιανουαρίου-Μαρτίου καταγράφηκε η δεύτερη υψηλότερη αθροιστική τιμή μετά το 1928. Βεβαίως, με βάση τις αναλύσεις μας θεωρούμε ότι η πραγματική εισροή ήταν περίπου 10% μικρότερη, της τάξης των 600 hm³, που εξακολουθεί προφανώς να είναι μια εξαιρετικά υψηλή τιμή.

Συνέπεια των πολύ μεγάλων εισροών ήταν η έντονη ανύψωση της στάθμης της Υλίκης, έως και 10 m από τις αρχές του υδρολογικού έτους μέχρι τα μέσα Μαρτίου, με αποτέλεσμα την υπερχειλίση της. Εκτιμούμε ότι στο διάστημα από τις αρχές Φεβρουαρίου μέχρι τα τέλη Ιουνίου υπερχείλισαν περίπου 240 hm³, τα οποία διοχετεύτηκαν στην Παραλίμνη.

Η Παραλίμνη, δεχόμενη αυτές τις πολύ μεγάλες ποσότητες νερού, και τροφοδοτούμενη επιπλέον από τοπικά επιφανειακά νερά αλλά και υπόγειες ροές, πιθανότατα προερχόμενες από τις διαφυγές της Υλίκης, παρουσίασε μια ακόμα πιο εντυπωσιακή αύξηση των αποθεμάτων της, οδηγούμενη και αυτή σε υπερχειλίση έπειτα από πολλές δεκαετίες. Με βάση μετρήσεις και ποιοτικές παρατηρήσεις της ΔΕΥΑ Χαλκίδας, αναπτύξαμε μοντέλο προσομοίωσης για την προσεγγιστική αναπαράσταση του υδατικού ισοζυγίου της Παραλίμνης, με το οποίο εκτιμήθηκε ότι υπερχείλισαν από την Παραλίμνη περίπου 25 hm³, με το φαινόμενο να διαρκεί από τα μέσα Απριλίου έως τις αρχές Ιουλίου. Εκτιμάται ότι η στάθμη της λίμνης έφτασε στα +52.85 m, περίπου 1.60 πάνω από το όριο υπερχειλίσης, ήτοι τον πυθμένα της σήραγγας Ανθηδώνας.

Η απροσδόκητη, τόσο σε μέγεθος όσο και σε ταχύτητα, άνοδος της στάθμης της Παραλίμνης είχε πολλαπλές δυσμενείς συνέπειες, καθώς κατακλύστηκαν τέσσερις χαμηλές γεωτρήσεις της ΔΕΥΑΧ και προκλήθηκαν ζημιές στο οδικό και ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής των Ούγγρων. Είναι θετικό ότι παρά την ταχύτατη εξέλιξη των γεγονότων, η ΔΕΥΑΧ και ο αρμόδιος κρατικός μηχανισμός έδρασαν έγκαιρα, λαμβάνοντας κατάλληλα μέτρα για τον μετριασμό των επιπτώσεων. Ιδιαίτερα ενθαρρυντικό είναι το γεγονός ότι το σύστημα υπερχειλίσης της Παραλίμνης, ήτοι η σήραγγα και εν συνεχεία τάφρος της Ανθηδώνας, λειτούργησε απρόσκοπτα, χάρη και στις άμεσες επεμβάσεις των αρμοδίων (επιθεώρηση σήραγγας, καθαρισμός κοίτης, κτλ.).

6.2 Αναθεώρηση διαδικασίας κατάρτισης υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης

Με αφορμή την ανάγκη επαναξιολόγησης του πλημμυρικού κινδύνου σε περίπτωση υπερχειλίσης της Υλίκης κατά το τρέχον υδρολογικό έτος, επιχειρήθηκε μια λεπτομερής επισκόπηση της διαδικασίας κατάρτισης του υδατικού της ισοζυγίου και των σχετικών δεδομένων εισόδου, καταλήγοντας στη αναθεώρηση κρίσιμων πτυχών των ως τώρα εφαρμοζόμενων προσεγγίσεων.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην εκτίμηση των εισροών στη λίμνη, που προέρχονται από την εκτροπή της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού, αλλά και επιφανειακά και υπόγεια νερά που εισέρχονται στην Υλίκη από την τοπική της λεκάνη και το ευρύτερο υδρογεωλογικό σύστημα. Οι αναλύσεις μας κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η εκτιμώμενη, με βάση την εδώ και πάνω από 40 έτη εφαρμοζόμενη σχέση στάθμης-παροχής, απορροή του Βοιωτικού Κηφισού είναι μάλλον υπερεκτιμημένη, καθώς είναι πολύ πιθανό να έχει αυξηθεί η τραχύτητα της διατομής στη θέση μέτρησης επί της Διώρυγας

Καρδίτσας. Οι διερευνήσεις μας έδειξαν ότι από το 1977, οπότε πραγματοποιήθηκε η μοναδική υδρομέτρηση στη διώρυγα, έως σήμερα, οι αντίστοιχες εκτιμήσεις της παροχής πρέπει να μειωθούν διαχρονικά έως και 10%, ακολουθώντας τη γήρανση της διατομής.

Όσον αφορά στις φυσικές εισροές στη λίμνη (η εισροή από τη λεκάνη του Βοιωτικού Κηφισού είναι τεχνητή, καθώς πραγματοποιείται μέσω έργου εκτροπής), αναπτύξαμε μια εμπειρική διαδικασία που χρησιμοποιεί ένα ημερήσιο υδρολογικό μοντέλο, για την εκτίμηση της επιφανειακής ροής, και ένα στοιχειώδες σχήμα κινούμενου μέσου όρου για την εκτίμηση των υπόγειων εισροών. Πάντως, η μεταβλητή αυτή διέπεται από πολύ μεγάλη αβεβαιότητα, καθώς δεν υπάρχει τρόπος ελέγχου της μέσω μετρήσεων.

Σημαντική αβεβαιότητα υπήρχε στην διαδικασία υπολογισμού των απωλειών λόγω υπερχειλίσης, καθώς η απευθείας εφαρμογή της σχέσης της ΕΛΚ, με υψόμετρο αναφοράς τα +78.1 m, κατέληγε σε υπερβολικά υψηλές τιμές, που δεν ήταν συνεπείς με τα υπόλοιπα δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου του περασμένου έτους. Μετά από δοκιμές, καταλήξαμε στην επιλογή υψηλότερης στάθμης έναρξης της υπερχειλίσης, ήτοι +78.3 m, και τη χρήση μειωτικού πολλαπλασιαστή 0.77 επί των παροχών που προβλέπει η σχέση της ΕΛΚ.

Με τις παραπάνω παραδοχές, καταρτίστηκαν δείγματα μηνιαίων απωλειών λόγω των διαφυγών της Υλίκης, με βάση τα οποία καταρτίστηκαν σχέσεις γραμμικής παλινδρόμησης συναρτήσεως της μέσης στάθμης του μήνα. Οι σχέσεις αυτές προέκυψαν μετά από χειροκίνητη αφαίρεση περίπου του 10% των τιμών του συνολικού δείγματος που απέκλιναν ουσιωδώς από τις υπόλοιπες, είτε λόγω της εγγενούς αβεβαιότητας της υπόψη διεργασίας (που ούτε γραμμική είναι, ούτε εξαρτώμενη μόνο από τη στάθμη της Υλίκης) αλλά και σε σφάλματα μετρήσεων. Τα σφάλματα αυτά οδηγούσαν σε εμφανώς μη ρεαλιστικές τιμές υπόγειων διαφυγών, δημιουργώντας περαιτέρω προβληματισμό σχετικά με την αξιοπιστία των δεδομένων τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα.

6.3 Μετρητικές υποδομές

Οι αναλύσεις μας κατέδειξαν ότι είναι αναγκαία η βελτίωση όλου του μετρητικού συστήματος της Υλίκης, καθώς υπάρχουν ανακρίβειες και αβεβαιότητες σε όλες τις μετρούμενες μεταβλητές, που επηρεάζουν την αξιοπιστία των δεδομένων του υδατικού της ισοζυγίου και την εν γένει διαδικασία λήψης αποφάσεων, ειδικά σε κρίσιμες περιπτώσεις όπως η τρέχουσα συγκυρία.

Ειδικότερα, είναι σημαντικό η μέτρηση της στάθμης να γίνεται εντός της λίμνης, και όχι στη Διώρυγα Μουρικίου, καθώς όταν το νερό εισέρχεται στη διώρυγα πραγματοποιείται ανάσχεση, και η πραγματική στάθμη της Υλίκης είναι εξ ορισμού ψηλότερα από την μετρούμενη. Οι ανακρίβειες αυτές επηρεάζουν και τις εκτιμώμενες ποσότητες υπερχειλίσης, καθώς είναι ασαφής ο ορισμός του υδραυλικού φορτίου της σχέσης στάθμης – παροχής υπερχειλίσης μέσω της Διώρυγας Μουρικίου. Γενικότερα, θα πρέπει να επαναξιολογηθεί η υπόψη σχέση, η οποία προέρχεται από πολύ παλιές εκτιμήσεις της ΕΛΚ, ενδεχομένως με πραγματοποίηση υδρομετρήσεων στη διώρυγα (εφόσον, όπως διαφαίνεται, πραγματοποιηθεί υπερχειλίση της Υλίκης και κατά τη φετινή χρονιά).

Ιδιαίτερα κρίσιμο είναι το ζήτημα της παρακολούθησης των εισροών του Βοιωτικού Κηφισού, που είναι η πιο σημαντική συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης. Υπενθυμίζεται ότι ο υπολογισμός τους γίνεται με βάση παρατηρήσεις στάθμης σε ημερήσια κλίμακα, και με τη χρήση μιας σχέσης στάθμης-παροχής που έχει βαθμονομηθεί με μία μόνο υδρομέτρηση, το 1977. Κατ' ελάχιστο, είναι αναγκαίο να γίνουν νέες υδρομετρήσεις, για διάφορες στάθμες, ώστε να καταρτιστεί μια πιο ακριβής σχέση στάθμης-παροχής της διατομής, και σε δεύτερο χρόνο να διερευνηθεί η επαναλειτουργία του αυτόματου σταθμηγράφου στη Γέφυρα Ακραιφνίου, που είχε εγκαταστήσει η ΕΥΔΑΠ σε συνεργασία με το ΕΜΠ πριν από 15 έτη.

Ομοίως, πρέπει να αξιοποιηθούν, μετά από έλεγχο, τα δεδομένα του τηλεμετρικού μετεωρολογικού σταθμού στο Μουρίκι, που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση των βροχοπτώσεων στη λίμνη αλλά και την τοπική της λεκάνη, καθώς και των απωλειών λόγω εξάτμισης.

6.4 Αξιολόγηση πλημμυρικού κινδύνου κατά το τρέχον υδρολογικό έτος

Με βάση τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 5, θεωρούμε μάλλον βέβαιη την υπερχειλίση της Υλίκης, σε χρονικό ορίζοντα το πολύ δύο μηνών. Προφανώς, στην παρούσα φάση είναι αδύνατη η ασφαλής πρόβλεψη των όγκων υπερχειλίσης, και γενικότερη των μεγεθών του υδατικού ισοζυγίου της Υλίκης, καθώς μόλις έχει ξεκινήσει η περίοδος των έντονων βροχοπτώσεων. Καταρχήν, οι προβλέψεις των ενδιάμεσων σεναρίων, που καταρτίστηκαν με βάση την πρόγνωση της απορροής του Βοιωτικού Κηφισού (μέσες ιστορικές τιμές, διάμεσες τιμές, στοχαστικό σενάριο πιθανότητας υπέρβασης 50%) είναι καθυστερημένες, καθώς οι εκτιμώμενες υπερχειλίσεις προκύπτουν σαφώς μικρότερες σε σχέση με τη περσινή χρονιά. Από την άλλη πλευρά, το δυσμενές στοχαστικό σενάριο δίνει μια μικρή αλλά μη αμελητέα πιθανότητα της τάξης του 5% να υπάρξουν μεγαλύτερες υπερχειλίσεις, και μάλιστα να συνεχιστούν έως τον Ιούλιο. Πάντως, ακόμα και στο δυσμενές σενάριο δεν διαφαίνεται ανύψωση της στάθμης πάνω από τα +79.5 m, συνεπώς θεωρούμε εξαιρετικά μικρό τον κίνδυνο να υπερβληθεί το όριο ασφαλείας των +79.8 m, θέτοντας σε κίνδυνο τις εγκαταστάσεις της ΕΥΔΑΠ στο Μουρίκι (αλλά και τον ίδιο τον οικισμό).

Η εικόνα από την εξέλιξη των εισροών τους δύο πρώτους μήνες του υδρολογικού έτους είναι σχετικά αισιόδοξη, καθώς προς το παρόν φαίνεται δύσκολο να επαληθευτεί το δυσμενές σενάριο εισροών. Ο Οκτώβριος ήταν αρκετά ξηρός, ενώ κατά το Νοέμβριο μόνο τις τελευταίες μέρες έχουν παρατηρηθεί ισχυρά καιρικά φαινόμενα. Την ημέρα ολοκλήρωσης της έκθεσης, ήτοι στις 26/11/2019, το απόθεμα της Υλίκης βρισκόταν στα 515.5 hm³, που αντιστοιχεί σε στάθμη +76.40 m, ήτοι στα ίδια περίπου επίπεδα με τις αρχές του υδρολογικού έτους (απόθεμα 518.4 hm³, στάθμη +76.55 m). Με βάση την **Εικόνα 5.2**, φαίνεται ότι, προς το παρόν, κινούμαστε λίγο κάτω από το σενάριο των μέσων ιστορικών τιμών, θα πρέπει ωστόσο να περιμένουμε κάποιο διάστημα ακόμη ώστε να δώσουμε πιο ασφαλείς στατιστικές προγνώσεις. Ανάλογα και με την εξέλιξη των πραγμάτων, κρίνουμε σκόπιμο να γίνει μια επικαιροποίηση της παρούσας έκθεσης μετά την παρέλευση δύο τουλάχιστον μηνών, ώστε να έχουμε και μια πρώτη εικόνα των χιονοπτώσεων στην περιοχή, που κατά την περσινή περίοδο ήταν αρκετά έντονες και συνέβαλαν καθοριστικά στις πολύ αυξημένες εισροές στην Υλίκη.

Όσον αφορά στην Παραλίμνη, δεδομένου ότι οι κρίσιμες εγκαταστάσεις της ΔΕΥΑΧ βρίσκονται σε ασφαλές υψόμετρο, ήτοι +56.5 m, και λαμβάνοντας υπόψη την πολύ καλή υδραυλική συμπεριφορά του έργου υπερχειλίσης, θεωρούμε ότι ο πλημμυρικός κίνδυνος είναι σχετικά μικρός, εκτός και αν υπάρξουν πολύ μεγάλες εισροές λόγω υπερχειλίσης της Υλίκης. Δεδομένου ότι στις αρχές Νοεμβρίου η στάθμη της Παραλίμνης ήταν περίπου στα +48.2 m (εκτίμηση με βάση φωτογραφία της ΔΕΥΑΧ, ληφθείσα στις 5/11/2019), υπήρχε ένα περιθώριο της τάξης των 50 hm³ μέχρι την υπερχειλίση της Παραλίμνης. Σημειώνεται ότι σε υψηλές στάθμες, οι υπόγειες εκροές υπερκαλύπτουν τις εισροές στη λίμνη, το οποίο είναι ευνοϊκό, καθώς όσο δεν πραγματοποιείται εισροή νερού από υπερχειλίση της Υλίκης η Παραλίμνη θα τείνει να ισορροπήσει σε χαμηλότερη στάθμη (με βραδύ βεβαίως ρυθμό).

Σε κάθε περίπτωση, επειδή οι στατιστικές προγνώσεις των υπερχειλίσεων της Υλίκης παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά, θεωρούμε ότι στην παρούσα φάση είναι επισφαλές να δοθούν πιο ποσοτικές εκτιμήσεις σχετικά με την εξέλιξη των πραγμάτων στην Παραλίμνη. Πάντως, οι οποίες βελτιωτικές επεμβάσεις στη σήραγγα Ανθηδώνας πρέπει να γίνουν το ταχύτερο, καθώς εντός του επόμενου διμήνου είναι πολύ πιθανό να ξεκινήσουν οι εισροές από την Υλίκη.

Αναφορές

- Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Ν. Μαμάσης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας – Έτος 2009, *Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ*, Τεύχος 1, 116 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2009.
- Ευστρατιάδης, Α., Ι. Ναλμπάντης, και Ε. Ρόζος, Μοντέλο προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου στη λεκάνη Βοιωτικού Κηφισού – Υλίκης, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 21, 196 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 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 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Ευστρατιάδης, Α., και Ν. Μαμάσης, Υδρομετεωρολογικά δεδομένα και επεξεργασίες, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 17, 72 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Ευστρατιάδης, Α., Ν. Μαμάσης, και Ι. Τσουκαλάς, Συνοπτική τεχνική έκθεση περί της αξιολόγησης του πλημμυρικού κινδύνου των περιοχών που επηρεάζονται από το εν εξελίξει φαινόμενο υπερχειλίσης του συστήματος Υλίκης-Παραλίμνης, *Εκσυγχρονισμός της διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας – Αναθεώρηση*, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 19 σ., Απρίλιος 2019.
- Ευστρατιάδης, Α., και Π. Παπανικολάου, Υδρολογικός σχεδιασμός έργων εκτροπής και υπερχειλίσης, *Σημειώσεις μαθήματος "Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα"*, 93 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
- Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, και Δ. Νικολόπουλος, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας — Έτος 2002–2003, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 14, 215 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2002.
- Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, 418 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
- Λαδόπουλος, Π. Δ., και Ν. Δ. Χωραφάς, Υδρολογική μελέτη: Έκθεσις – Πίνακες, *Μελέτη υδατικού ισοζυγίου μετά υδρογεωλογικής ερεύνης κοιλάδος Βοιωτικού Κηφισού και πεδιάδων Κωπαΐδος και Θηβών*, Υπουργείο Δημοσίων Έργων, Υπηρεσία Υδραυλικών Έργων – Διεύθυνσις Δ2, Αθήνα, Φεβρουάριος 1974.
- Μακρόπουλος, Χ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καρακατσάνης, Δ. Νικολόπουλος, και Α. Κουκουβίνος, Τελική έκθεση υπολογισμού χρηματοοικονομικού κόστους αδιύλιστου νερού, *Επικαιροποίηση του*

- χρηματοοικονομικού κόστους αδιύλιστου νερού για την ύδρευση της Αθήνας, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάιος 2018.
- Μαμάσης, Ν., Δ. Κωνσταντινίδης, και Ι. Γαβριηλίδης, Τεχνικά χαρακτηριστικά υδρομετεωρολογικών σταθμών και τηλεπικοινωνιακού συστήματος, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 4, 34 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- Μαμάσης, Ν., και Ι. Ναλμπάντης, Μελέτη υδρολογικών ισοζυγίων, *Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας – Φάση 2*, Τεύχος 20, 118 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1995.
- Μαμάσης, Ν., Μετρητικό σύστημα, *Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας*, Τεύχος 16, 88 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- Παγούνης, Μ., Θ. Γκέρτσος, και Α. Γκατζογιάννης, *Υδρογεωλογική έρευνα λεκάνης Βοιωτικού Κηφισού*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα, 1994.
- Πέππα, Μ. Β., *Εφαρμογή γεωστατιστικών μεθόδων στην εκτίμηση μέσης ταχύτητας ροής σε τραπεζοειδή διατομή*, Μεταπτυχιακή Εργασία, 91 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2008.
- Ραυτόπουλος, Θ., και Α. Σίνος, *Οριστική μελέτη υδρεύσεως εξ Υλίκης*, 1951.
- Ρώτη, Σ., Ν. Μαμάσης, και Κ. Τσολακίδης, Επεξεργασία υδρομετεωρολογικών δεδομένων λεκάνης Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών - Φάση 2*, Τεύχος 11, 167 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1990.
- Τζεράνης, Ι., και Κ. Τσολακίδης, Επισκόπηση υδρολογικών μελέτων της ευρύτερης περιοχής Υλίκης, *Διερεύνηση προσφερομένων δυνατοτήτων για την ενίσχυση της ύδρευσης μείζονος περιοχής Αθηνών – Φάση 2*, Τεύχος 9, 184 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Μάρτιος 1990.
- ΥΠΑΝ, ΕΜΠ, ΙΓΜΕ, και ΚΕΠΕ, Σχέδιο προγράμματος διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, *Συμπλήρωση της ταξινόμησης ποσοτικών και ποιοτικών παραμέτρων των υδατικών πόρων στα υδατικά διαμερίσματα της χώρας*, Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 549 σ., Υπουργείο Ανάπτυξης, Αθήνα, Ιανουάριος 2003.
- Amman and Whitney, Int. Ltd., *Υδρευσις Αθηνών – Έρευναι Παραλίμνης*, 1966.
- Continental Drilling, *Έρευναι δια την στεγανοποίησην των διαρροών λίμνης Παραλίμνης*, 1967.
- Efstratiadis, A., A. D. Koussis, D. Koutsoyiannis, and N. Mamassis, Flood design recipes vs. reality: can predictions for ungauged basins be trusted?, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 1417-1428, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014, 2014.
- Efstratiadis, A., I. Nalbantis, A. Koukouvinos, E. Rozos, and D. Koutsoyiannis, HYDROGEIOS: A semi-distributed GIS-based hydrological model for modified river basins, *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 989-1006, doi:10.5194/hess-12-989-2008, 2008.

- Efstratiadis, A., Y. Dialynas, S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis, A multivariate stochastic model for the generation of synthetic time series at multiple time scales reproducing long-term persistence, *Environmental Modelling and Software*, 62, 139-152, doi:10.1016/j.envsoft.2014.08.017, 2014.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, doi:10.1029/2000WR900044, 2000.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, doi:10.1029/96WR00488, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-391, doi:10.1029/2000WR900200, 2001.
- Koutsoyiannis, D., Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty, *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 481–495, doi:10.1111/j.1752-1688.2011.00543.x, 2011.
- 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, 6, 123–132, doi:10.13140/RG.2.1.4430.1041, Association Internationale de Climatologie, Aix-en-Provence Cedex, France, 1993.
- Natural Resources Conservation Service (NRCS), *National Engineering Handbook: Part 630 – Hydrology*, Washington, DC, USA, 2004.
- Noutsopoulos G. and P. Hadjipanos, Discharge computations in compound channels, *International Association for Hydraulic Research*, 173-180, 1983.
- Rodio & Co. ESPA – Ελληνική Εταιρεία Θεμελιώσεων (ΕΕΘ), *Έρευνα στεγανοποίησης Υλικής-Παραλίμνης*, 1967.
- Tegos, A., A. Efstratiadis, and D. Koutsoyiannis, A parametric model for potential evapotranspiration estimation based on a simplified formulation of the Penman-Monteith equation, *Evapotranspiration – An Overview*, edited by S. Alexandris, 143-165, doi:10.5772/52927, InTech, 2013.
- Tegos, A., N. Malamos, A. Efstratiadis, I. Tsoukalas, A. Karanasios, and D. Koutsoyiannis, Parametric modelling of potential evapotranspiration: a global survey, *Water*, 9(10), 795, doi:10.3390/w9100795, 2017.
- Tsoukalas, I., A. Efstratiadis, and C. Makropoulos, Building a puzzle to solve a riddle: A multi-scale disaggregation approach for multivariate stochastic processes with any marginal distribution and correlation structure, *Journal of Hydrology*, 575, 354-380, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.017, 2019.
- Tsoukalas, I., A. Efstratiadis, and C. Makropoulos, Stochastic periodic autoregressive to anything (SPARTA): Modelling and simulation of cyclostationary processes with arbitrary marginal distributions, *Water Resources Research*, 54(1), 161-185, WRCR23047, doi:10.1002/2017WR021394, 2018a.
- Tsoukalas, I., C. Makropoulos, and D. Koutsoyiannis, Simulation of stochastic processes exhibiting any-range dependence and arbitrary marginal distributions, *Water Resources Research*, 54(11), 9484–9513, doi:10.1029/2017WR022462, 2018b.

Tsoukalas, I., S. M. Papalexiou, A. Efstratiadis, and C. Makropoulos, A cautionary note on the reproduction of dependencies through linear stochastic models with non-Gaussian white noise, *Water*, 10(6), 771, doi:10.3390/w10060771, 2018c.

Tsoukalas, I., *Modelling and simulation of non-Gaussian stochastic processes for optimization of water-systems under uncertainty*, PhD thesis, 339 p., Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens, December 2018.