

ΜΕΘΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΤΑΧΕΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΑΡΟΧΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Ελένη Σ. Μπεκρή⁽¹⁾⁽²⁾, Markus Disse⁽²⁾, Παναγιώτης Χρ. Γιαννόπουλος⁽¹⁾

⁽¹⁾Εργαστήριο Τεχνολογίας Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 04 Πάτρα,
e-mail: ebekri@upatras.gr; yannopp@upatras.gr

⁽²⁾Water Management and Resources Engineering, Institut of Hydro Sciences,
Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577
Neubiberg, Germany, τηλ.: +49 (0) 8960043490, τ/ο.: +49 (0) 8960044642

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη της μεθοδολογίας διόρθωσης των ταχέων μετρήσεων παροχής ποταμών με χρήση ποιοτικών χαρακτηριστικών, καθώς και την εφαρμογή της στον Αλφειό Ποταμό. Σε ποταμούς με απουσία μόνιμων εγκαταστάσεων παρακολούθησης ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών σε επιλεγμένες διατομές ποταμών, φαινόμενο σύνθησης κυρίως στις μεσογειακές χώρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά απλές, ταχείες και οικονομικές μέθοδοι μέτρησης παροχής, όπως για παράδειγμα του επιπλέοντος αντικειμένου, των αναδύομενων φυσαλίδων αέρα και της απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας. Στόχος της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι να προκύψουν τιμές παροχών μεγαλύτερης αξιοπιστίας από τις αρχικώς μετρηθείσες, μέσω κατάλληλης μαθηματικής διόρθωσης με γραμμικό προγραμματισμό, βασισμένης στις εξισώσεις διατήρησης μάζας διαφόρων δεικτών από τους οποίους εξαρτώνται οι μετρηθείσες τιμές ποιοτικών χαρακτηριστικών που έχουν ληφθεί ταυτόχρονα με τις ταχείες μετρήσεις παροχής.

METHODOLOGICAL FRAME FOR CORRECTION OF QUICK RIVER DISCHARGE MEASUREMENTS USING QUALITY CHARACTERISTICS

Eleni S. Bekri⁽¹⁾⁽²⁾, Markus Disse⁽²⁾, Panayotis C. Yannopoulos⁽¹⁾

⁽¹⁾Environmental Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering,
University of Patras, 265 04 Patras, Greece

ABSTRACT

The improvement and further development of the methodological framework, aiming at the correction of quick river discharge measurements by using river qualitative characteristics, is presented in this paper and is applied to the Alfeios River, in Greece. At river cross-sections without gauge stations or permanent equipment, a quite common fact in most Mediterranean countries, quick methods of low cost and reliability, such as floats, release of air bubbles and the pendulum, could be employed to estimate the river discharge. The goal of the proposed methodology is to compute river discharge with higher accuracy and reliability compared to the initial discharge estimates, through a proper mathematical correction of measured values. The *ad hoc* proposed methodology, using linear optimization, could be adopted, when simultaneous measurements of river discharge and water quality characteristics are available.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα Προγράμματα Μέτρων και Παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων, τα οποία προβλέπονται από τον Ν. 3199/2003 (ΦΕΚ Α'280/9-12-2003) «Προστασία και διαχείριση των υδάτων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Οκτωβρίου 2000», εκτός των άλλων πρέπει να περιλαμβάνουν προσδιορισμό των επιπέδων των ρύπων, αλλά και εκτίμηση των φορτίων ρύπανσης, προκειμένου να καθίσταται δυνατή η βελτιστοποίηση της χρήσης των υδάτων, η εκτίμηση της συνεισφοράς της ρύπανσης από τις λεκάνες απορροής στον ποταμό και τους τελικούς αποδέκτες, ο έλεγχος της βιωσιμότητας των δραστηριοτήτων και η λήψη των καταλλήλων διορθωτικών μέτρων (Manariotis and Yannopoulos, 2004; Yannopoulos et al., 2007b). Σημειώνεται ότι τα Προγράμματα Παρακολούθησης έπρεπε να έχουν αρχίσει από 01.01.2007, ενώ τόσο το πρώτο Σχέδιο Διαχείρισης, όσο και το πρώτο Πρόγραμμα Μέτρων θα έπρεπε να έχουν καταρτισθεί και εγκριθεί υποχρεωτικά έως 22.12.2009. Όλα τα μέτρα θα έπρεπε να είναι έτοιμα προς εφαρμογή έως 01.01.2012. Η Ελλάδα καταδικάστηκε στις 19 Απριλίου 2012 για τη μη εμπρόθεσμη ολοκλήρωση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής, σε εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ (Οδηγία Πλαίσιο για το νερό), γεγονός που καταδεικνύει τη σπουδαιότητα και την αναγκαιότητα εύρεσης άμεσων και οικονομικών λύσεων.

Η εκτίμηση των φορτίων ρύπανσης, που μεταφέρονται από τον ποταμό, γίνεται με ταυτόχρονη μέτρηση παροχής ύδατος και συγκεντρώσεως εκάστου ρύπου, και υπολογίζεται ως το γινόμενο παροχής επί την συγκέντρωση, ήτοι το φορτίο q_{ij} στη διατομή i για τον ρύπο j , το οποίο είναι αδύνατο να μετρηθεί άμεσα και υπολογίζεται έμμεσα ως:

$$q_{ij} = Q_i c_{ij} \quad (1.1)$$

όπου Q_i είναι η παροχή και c_{ij} η συγκέντρωση του ρύπου j στη διατομή i του ποταμού.

Η καταγραφή ολοκληρωμένης εικόνας για το συνολικό μήκος του ποταμού, συμπεριλαμβανομένων των παραποτάμων του, προϋποθέτει την σχεδόν ταυτόχρονη εκτέλεση των μετρήσεων σε όλες τις κατάλληλα επιλεγμένες διατομές του ποταμού. Αυτό είναι δυνατόν, όταν στις διατομές ελέγχου υπάρχουν μόνιμες εγκαταστάσεις μέτρησης της παροχής και αυτόματοι δειγματολήπτες ή αναλυτές συνεχούς λειτουργίας για την μέτρηση των συγκεντρώσεων των ρύπων. Όμως, μια τέτοια πλήρης οργάνωση και υποδομή απουσιάζει σήμερα από το σύνολο μάλλον των ποταμών της χώρας. Για το πλείστον των περιπτώσεων, πιθανά προγράμματα παρακολούθησης της παροχής και των ποιοτικών παραμέτρων ελέγχονται από διαφορετικούς φορείς χωρίς συντονισμό μεταξύ τους, με δυσμενή επακόλουθα στον συγχρονισμό, την πληρότητα και την συνέχεια. Η κάλυψη όλων αυτών των αναγκών απαιτεί αλλαγή της οργανωτικής δομής, αύξηση της στελέχωσης των παλαιών υπηρεσιών με δημιουργία και νέων υπηρεσιών, πύκνωση του δικτύου παρακολούθησης με μόνιμους εξοπλισμούς στο πεδίο και στο εργαστήριο, παράταση χρόνου και υψηλές δαπάνες.

Στη διεθνή αλλά και ελληνική βιβλιογραφία περιγράφεται μεγάλος αριθμός μεθόδων και οργάνων μέτρησης της παροχής ποταμού (Frazier, 1974; Charlton, 1978; Kınori & Mevorach, 1984; Τερζίδης, 1985; White, 1988; Müller, 1988; Τσόγκας, 1993; Morgenschweis, 2010). Στην περίπτωση μόνιμων εγκαταστάσεων παρακολούθησης, η καταγραφή της στάθμης ειδικά διαμορφωμένης διατομής του ποταμού και ο υπολογισμός της παροχής με βάση την διαθέσιμη καμπύλη στάθμης – παροχής μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση, συνιστά την πλέον συνήθη μέθοδο. Για μετρήσεις σε διατομές όπου δεν υπάρχει μόνιμη υποδομή, χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι με

κινητά όργανα μέτρησης. Από τις πλέον δημοφιλείς και αξιόπιστες μεθόδους είναι η μέθοδος, που περιλαμβάνει αποτύπωση της διατομής και μέτρηση ταχυτήτων με ρευματομέτρο σε προδιαγεγραμμένες εγκάρσιες θέσεις και βάθη ύδατος, ώστε η παροχή στη διατομή να προκύψει από το άθροισμα των γινομένων των επί μέρους εμβαδών των υποδιαίρέσεων επί τις αντίστοιχες ταχύτητες, που μετρήθηκαν στο μέσον αυτών. Η ύπαρξη εγκάρσιας πρόσβασης στον ποταμό διευκολύνει σημαντικά την εφαρμογή της μεθόδου, ενώ μειώνει τον χρόνο, τον εξοπλισμό και το κόστος. Παρ' όλα αυτά, η προαναφερόμενη μέθοδος απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο από τον απαιτούμενο για τις αναγκαίες επί τόπου μετρήσεις και δειγματοληψίες μιας εξόρμησης, που στοχεύει να προλάβει πιθανή αλλαγή των ροϊκών συνθηκών. Συνεπώς, για την παράλληλη εκτέλεση μετρήσεων παροχής και ποιοτικών χαρακτηριστικών σε κάθε διατομή θα πρέπει να επιλεγεί ταχύτερη μέθοδος μέτρησης της παροχής, ώστε να είναι δυνατόν κατά την διάρκεια της ημέρας να ολοκληρώνονται οι επί τόπου μετρήσεις και οι δειγματοληψίες σε ολόκληρο ή μεγάλο μέρος του μήκους του ποταμού. Στις απλές, ταχείες και οικονομικές μεθόδους ανήκουν η μέθοδος του επιπλέοντος αντικειμένου, η μέθοδος των αναδυόμενων φυσαλλίδων αέρα, η μέθοδος απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας, καθώς και άλλες. Οι μέθοδοι των αναδυόμενων φυσαλλίδων και της απόκλισης ανηρτημένης σφαίρας έχουν βελτιωθεί σημαντικά (Yannopoulos, 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 2000; Yannopoulos *et al.*, 2007a), ενώ επιπροσθέτως έχουν χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις πεδίου του Αλφειού Ποταμού, που αναλύονται στην παρούσα εργασία.

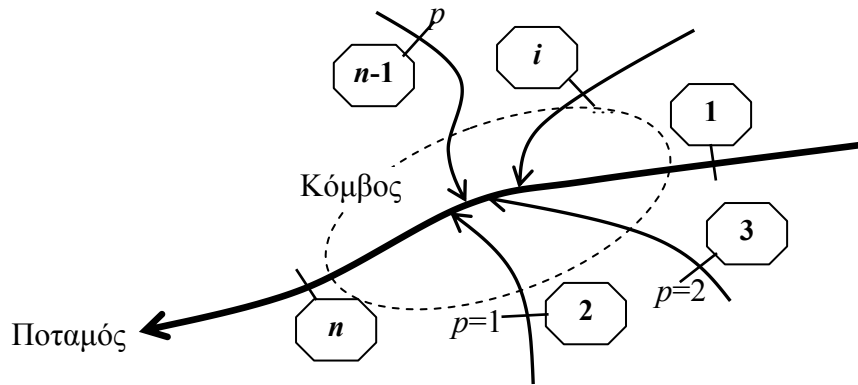
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση και περαιτέρω εξέλιξη της μεθοδολογίας διόρθωσης των ταχέων μετρήσεων της παροχής ποταμών με χρήση ποιοτικών χαρακτηριστικών. Μέσω κατάλληλης μαθηματικής διόρθωσης με βελτιστοποίηση, χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό στο σύνολο των μετρήσεων παροχών και ποιοτικών χαρακτηριστικών κάθε κόμβου, επιχειρείται ο υπολογισμός διορθωμένων τιμών παροχών μεγαλύτερης αξιοπιστίας από τις μετρηθείσες. Τελικώς, με τις διορθωμένες παροχές σε κάθε διατομή μπορούν να υπολογισθούν ακριβέστερα και τα φορτία ρύπανσης. Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται στον Αλφειό Ποταμό, στον οποίον έχουν εκπονηθεί εκπαιδευτικά και ερευνητικά Προγράμματα από το Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών και διατίθενται ταυτόχρονες μετρήσεις παροχών και ποιοτικών παραμέτρων.

2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας αναπτύσσεται ακολουθώντας τους Γιαννόπουλο (2009), και Yannopoulos & Bekri (2010), ήτοι: Έστω ποταμός στον οποίον καταλήγουν p ($p \geq 0$) παραπόταμοι. Οι θέσεις μέτρησης παροχής και δειγματοληψίας γύρω από έναν κόμβο, με ή χωρίς συμβολή παραποτάμων, είναι n ($n \geq 2$), όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Υποτίθεται ότι οι θέσεις αυτές βρίσκονται σε σχετικώς μικρές αποστάσεις μεταξύ τους, ώστε να δύναται να αμεληθούν τυχόν ενδιάμεσες εισροές υδάτων, αλλά και επαρκώς απέχουσες, ώστε να επιτυγχάνεται ομοιομορφισμός συγκεντρώσεων από σημειακές απορρίψεις φορτίων ρύπανσης.

Υπό τις προϋποθέσεις αυτές, στον εξεταζόμενο κόμβο ισχύουν η διατήρηση όγκου ύδατος και η διατήρηση της μάζας εκάστου ρύπου ή δείκτη j , ήτοι:



Σχήμα 1. Ποταμός με p παραποτάμους που συμβάλλουν στην ίδια περιοχή (κόμβος) και n διατομές ελέγχου περί τον κόμβο, όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις.

$$Q_n = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \pm Q_\lambda \quad (2.1)$$

$$q_{nj} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{ij} \pm q_\lambda \Leftrightarrow Q_n c_{nj} = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i c_{ij} \pm Q_\lambda c_\lambda \quad (2.2)$$

όπου Q_1, q_1, c_{1j} οι εισερχόμενες ποσότητες παροχής, φορτίου και συγκέντρωσης στον κόμβο μέσω της διατομής 1 του κυρίως ποταμού ανάντη του κόμβου, Q_n, q_n, c_{nj} οι αντίστοιχες εξερχόμενες ποσότητες από τον κόμβο μέσω της διατομής n του κυρίως ποταμού κατόντη του κόμβου, Q_i, q_i, c_{ij} , ($i=2, n-1$) οι αντίστοιχες εισερχόμενες ποσότητες μέσω των παραποτάμων, εφόσον υφίστανται, και $Q_\lambda, q_\lambda, c_\lambda$ η αντίστοιχη εξερχόμενη ή εισερχόμενη ποσότητα μιας υποτιθέμενης λανθάνουσας (μη άμεσα υπολογιζόμενης) παροχής από γειτονικές, παρακείμενες περιοχές, A_λ , στον εκάστοτε εξεταζόμενο κόμβο. Είναι προφανές ότι, εάν έχουν μετρηθεί οι συγκεντρώσεις m το πλήθος ρύπων ή δεικτών εν γένει, μπορούν να γραφούν m εξισώσεις της μορφής (2.2).

Επομένως στον εξεταζόμενο κόμβο, γράφονται οι εξισώσεις (2.1) και (2.2), $1+m$ εν σύνολο, οι οποίες συνιστούν γραμμικό σύστημα. Με την υπόθεση ότι οι τιμές συγκεντρώσεων έχουν προσδιορισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια, ώστε το σφάλμα τους να είναι αρκετά περιορισμένο, με ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της κατάλληλης αντικειμενικής συνάρτησης του προαναφερόμενου γραμμικού συστήματος θα προσδιοριστούν ζεύγη τιμών ελάχιστης και μέγιστης παροχής σε κάθε διατομή του υπό εξέταση κόμβου, ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι τεθέντες περιορισμοί.

Πρακτικώς, τέτοιες λύσεις προκύπτουν για διάφορες τιμές υποτιθέμενων σφαλμάτων μέτρησης των παροχών της κάθε διατομής. Τελικώς, ως πιθανότερες τιμές στον κόμβο επιλέγονται οι μέσες τιμές των παροχών των αντιστοίχων ζευγών (ελαχίστων και μεγίστων) των διατομών του κόμβου, που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές των σφαλμάτων μέτρησης παροχής, για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των εκτιμώμενων από τις μετρηθείσες παροχές. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας την μέση τιμή και τα ακρότατα παροχών, που προέκυψαν για κάθε διατομή, προσδιορίζεται το πιθανό σφάλμα εκτίμησης της παροχής με την χρήση της προτεινόμενης μεθόδου, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψη μια πιθανή λανθάνουσα παροχή ύδατος Q_λ , η οποία μπορεί να ερμηνευτεί σαν το προκύπτον, συνήθως μικρό, υπόλοιπο κατά την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Κατά την παρούσα ανάλυση η μικρή αυτή λανθάνουσα

παροχή, η οποία δεν ήταν άμεσα αντιληπτή και μετρήσιμη, θεωρείται ότι εισέρεε /εξέρεε στον/από τον κόμβο, είτε επιφανειακώς, είτε υπογείως από την αντιστοιχούσα υπολεκάνη απορροής στην περιοχή μεταξύ των διατομών των μετρήσεων, οπότε οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια με τον συνυπολογισμό αυτής της λανθάνουσας παραμέτρου σε κατάλληλες ανισότητες.

2.2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Έστω X_i ($i=1, n$ και λ) οι διορθωμένες παροχές των διατομών γύρω από ένα κόμβο, οι οποίες πρόκειται να εκτιμηθούν χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο. Έστω, επίσης, ε_i το απολύτως μέγιστο σχετικό σφάλμα μέτρησης της αντίστοιχης παροχής, Q_i . Υπό τις προαναφερόμενες προϋποθέσεις και με βάση την εξίσωση (2.1) είναι δυνατόν να γραφούν οι ακόλουθοι περιορισμοί για τις διορθωμένες παροχές, X_i :

$$0 \leq Q_k(1 - \varepsilon_k) \leq - \sum_{i=1 \wedge i \neq k}^{n-1} X_i \mp X_\lambda + X_n \leq Q_k(1 + \varepsilon_k) \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} X_i \pm X_\lambda \geq Q_n(1 - \varepsilon_n) \quad (2.4)$$

$$0 \leq Q_i(1 - \varepsilon_i) \leq X_i \leq Q_i(1 + \varepsilon_i) \quad (2.5)$$

Εάν ζ_j ($j=1, m$) είναι τα απολύτως μέγιστα σχετικά σφάλματα μέτρησης των συγκεντρώσεων των ρύπων j ($j=1, m$), από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας εκάστου ρύπου είναι δυνατόν να προκύψουν οι ακόλουθοι διπλοί περιορισμοί:

$$Q_n(1 - \varepsilon_n) \frac{1 - \zeta_j}{1 + \zeta_j} \leq \sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_{ij}}{c_{nj}} X_i \pm \frac{c_{\lambda j}}{c_{nj}} X_\lambda \leq Q_n(1 + \varepsilon_n) \frac{1 + \zeta_j}{1 - \zeta_j} \quad (2.6)$$

$$Q_k(1 - \varepsilon_k) \frac{c_{kj}}{c_{nj}} \frac{1 - \zeta_j}{1 + \zeta_j} \leq - \sum_{i=1 \wedge i \neq k}^{n-1} \frac{c_{ij}}{c_{nj}} X_i \mp \frac{c_{\lambda j}}{c_{nj}} X_\lambda + X_n \leq Q_k(1 + \varepsilon_k) \frac{c_{kj}}{c_{nj}} \frac{1 + \zeta_j}{1 - \zeta_j} \quad (2.7)$$

Θεωρείται ότι στους ανωτέρω περιορισμούς (2.3) έως (2.7), οι μετρηθείσες τιμές παροχών και συγκεντρώσεων, λόγω των σφαλμάτων μέτρησής των, κείνται εντός των αντιστοιχών κλειστών διαστημάτων $[Q_i(1 - \varepsilon_i), Q_i(1 + \varepsilon_i)]$, $[Q_\lambda(1 - \varepsilon_\lambda), Q_\lambda(1 + \varepsilon_\lambda)]$, $[c_{ij}(1 - \zeta_j), c_{ij}(1 + \zeta_j)]$ και $[c_{\lambda j}(1 - \zeta_j), c_{\lambda j}(1 + \zeta_j)]$.

Σημειώνεται ότι, επειδή η αγωγιμότητα φυσικών υδάτων ποταμών δεν μεταβάλλεται σημαντικά, αλλά πρακτικώς παραμένει στην γραμμική περιοχή αναλογίας με την συγκέντρωση των ποικίλων διαλελυμένων ουσιών - ιόντων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις σχέσεις διατήρησης μάζας αντί της συγκέντρωσης ενός συνολικού δείκτη των ουσιών αυτών. Επιπλέον, υπάρχουν διάφορα όργανα πεδίου, τα οποία διαθέτουν αλγόριθμο υπολογισμού της συγκέντρωσης των ολικών διαλελυμένων στερεών με βάση την μέτρηση της αγωγιμότητας που πραγματοποιούν.

Όσον αφορά την λανθάνουσα παροχή, Q_λ , καθώς και το αντίστοιχο σφάλμα μέτρησής της, ε_λ , θεωρείται ότι μπορούν να υπολογιστούν όπως φαίνεται στην σχέση, ως συνάρτηση της παροχής εξόδου από τον κόμβο:

$$Q_\lambda = Q_n \frac{A_\lambda}{A_n} \quad \text{και} \quad \varepsilon_\lambda = \varepsilon_n \quad (2.8)$$

όπου A_λ και A_n είναι οι αντίστοιχες επιφάνειες της λεκάνης, από τις οποίες απορρέουν η λανθάνουσα παροχή, Q_λ και η παροχή εξόδου, Q_n . Με βάση αυτή τη θεώρηση και για λόγους συνέπειας, προκύπτουν τα ακόλουθα διαστήματα τιμών της συγκέντρωσης, c_λ , για θετική (2.9) και αρνητική (2.10) λανθάνουσα παροχή. Στην παρούσα εργασία, η τιμή της λανθάνουσας συγκέντρωσης κάθε ρύπου προκύπτει από την μέση τιμή του παραπάνω εύρους τιμών. Ωστόσο, θεωρείται ότι ένα πεδίο περαιτέρω διερεύνησης είναι το μοντέλο για τον υπολογισμό αυτής της παραμέτρου, καθώς και η εξέταση πληθώρας τιμών από το εν λόγω διάστημα.

$$\left[c_n - (1 + \zeta_j) \times \text{Max}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \leq c_\lambda \leq \left[c_n - (1 - \zeta_j) \times \text{Min}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \quad (2.9)$$

$$\left[-c_n + (1 - \zeta_j) \times \text{Min}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \leq c_\lambda \leq \left[-c_n + (1 + \zeta_j) \times \text{Max}(c_{1j}, \dots, c_{nj}) \right] \frac{A_n}{A_\lambda} \quad (2.10)$$

Ως αντικειμενική συνάρτηση, F , της οποίας ζητείται η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση, ορίζεται η ακόλουθη:

$$F = -\sum_{i=1}^{n-1} X_i \mp X_\lambda + X_n \quad (2.11)$$

Στο εξεταζόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνονται υπόψη όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί υποτιθέμενων τιμών απολύτως μεγίστων σχετικών σφαλμάτων, ε_i ($i=1, n$ και λ) μέτρησης παροχών, ενώ θεωρούνται γνωστές οι τιμές των αντιστοίχων απολύτως μεγίστων σφαλμάτων, ζ_j ($j=1, m$) μέτρησης των συγκεντρώσεων ρύπων ή δεικτών j , με βάση τα σφάλματα που δίδονται από τους κατασκευαστές των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιούνται. Επειδή $X_i \geq 0$ ($i=1, n$ και λ), τα ακρότατα των διορθωμένων παροχών $\max X_i$ ($i=1, n-1$), $\max X_\lambda$ (για θετική Q_λ) ή $\min X_\lambda$ (για αρνητική Q_λ) και $\min X_n$ είναι προφανές ότι θα προκύπτουν με ελαχιστοποίηση της F υπό τους περιορισμούς (2.3) έως (2.7), ενώ με μεγιστοποίηση της F θα λαμβάνονται τα ακρότατα $\min X_i$ ($i=1, n-1$), $\min X_\lambda$ (για θετική Q_λ) ή $\max X_\lambda$ (για αρνητική Q_λ) και $\max X_n$. Τελικώς, για κάποια από τις υποτιθέμενες ομάδες σφαλμάτων ε_i ($i=1, n$ και λ) μέτρησης παροχών στις διατομές γύρωθεν του εξεταζόμενου κόμβου λαμβάνονται ζεύγη ακροτάτων τιμών παροχών ($\min X_i, \max X_i$) ($i=1, n$ και λ), τα οποία ικανοποιούν τους ανωτέρω περιορισμούς. Ως πλέον αντιπροσωπευτική τιμή εκάστου ζεύγους ορίζεται η μέση τιμή των ακροτάτων, ήτοι:

$$\text{mean} X_i = \frac{1}{2} (\min X_i + \max X_i) \quad (2.12)$$

Επομένως, το απολύτως μέγιστο σφάλμα εκτίμησης της αντιπροσωπευτικής τιμής παροχής εκάστου ζεύγους με βάση την προτεινόμενη μέθοδο θα ισούται με $E = \max X_i - \text{mean} X_i$. Για την επιλογή της βέλτιστης ομάδας ζευγών ακροτάτων του κόμβου, η οποία συνιστά και την βέλτιστη λύση, προτείνεται το κριτήριο ελαχιστοποίησης του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων των διορθωμένων παροχών από τις μετρηθείσες τιμές τους, ήτοι:

$$\min S = \sum_{i=1}^n (Q_i - \text{mean } X_i)^2 \quad (2.13)$$

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στον Αλφειό Ποταμό και συγκεκριμένα στον κόμβο συμβολής του κυρίως ποταμού με τους παραπόταμους Ερύμανθο και Λάδωνα. Οι μετρήσεις - εκτιμήσεις παροχών και οι επιτόπιες μετρήσεις ή δειγματοληψίες για εργαστηριακές αναλύσεις διαφόρων χαρακτηριστικών έγιναν στις διατομές 1 – Γέφυρα Αγίου Ιωάννη-Σέκουλα (Αλφειός), 2 – Γέφυρα Κοκλαμά-Λουτρών Ηραίας (Λάδωνας), 3 – Γέφυρα Πύργου-Τριπόλεως (Ερύμανθος) και 4 – Γέφυρα Άσπρα Σπίτια-Καλλιθέα (Αλφειός). Συνολικά έχουν πραγματοποιηθεί έξι (6) εξορμήσεις στην περιοχή του εν λόγω κόμβου για σχετικές μετρήσεις, που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Πυθαγόρας II-Περιβάλλον (Γιαννόπουλος, 2005). Οι φυσικοί δείκτες είναι κατάλληλοι για χρήση από την προτεινόμενη μεθοδολογία, όταν συνδυάζουν την ευκολία με την ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης, ενώ παρέχουν αξιόλογη χρονική σταθερότητα (Eaton *et al.*, 1995). Οι ακόλουθοι δείκτες συνιστούν κατάλληλες παραμέτρους προς χρήση από την παρούσα εργασία:

- α) Η αγωγιμότητα, η οποία μετράται επί τόπου με καλή ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,05$).
- β) Η συγκέντρωση θεικών ανιόντων (SO_4^{-2}), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με επίσης καλή ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,10$).
- γ) Η συγκέντρωση ανιόντων χλωρίου (Cl^-), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με ικανοποιητική ακρίβεια (σφάλμα $\leq 0,15$).

Γενικώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες παράμετροι κρίνονται ότι έχουν σφάλμα προσδιορισμού σχετικώς μικρό, πρακτικά $\leq 0,20$, έτσι ώστε να περιορισθούν κατά το δυνατόν περισσότερο τα σφάλματα εκτίμησης διορθωμένων τιμών ταχυτήτων. Είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθούν μετρήσεις της ίδιας παραμέτρου χρησιμοποιώντας άλλο όργανο ή εναλλακτική μέθοδο, ίδιας ή διαφορετικής ακρίβειας, στα ίδια ή και σε πρόσθετα δείγματα, προερχόμενα σχεδόν ταυτοχρόνως από την ίδια θέση. Κατ' αυτόν τον τρόπο αυξάνονται οι περιορισμοί και μειώνεται το εύρος τιμών διορθωμένων παροχών και το σφάλμα που εκτιμάται με την προτεινόμενη διαδικασία. Στον Πίνακα 1 δίδονται τα στοιχεία των προς χρήση μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί στον υπό εξέταση κόμβο.

Οι τιμές των παροχών έχουν εκτιμηθεί με αποτύπωση της διατομής και μέτρηση της μέγιστης επιφανειακής ταχύτητας με την απλή μέθοδο επιπλέοντος αντικειμένου. Η διατομή 1 είναι αρκετά ομαλή, σχετικώς ευρεία, ευκόλως προσπελάσιμη και τις περισσότερες φορές χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος των αναδυόμενων φυσαλλίδων αέρα, επιτυγχάνοντας εν γένει ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης της παροχής (σφάλμα μικρότερο από 20%). Οι διατομές 2 και 3 είναι προσπελάσιμες και το σφάλμα μέτρησής τους μπορεί να χαρακτηριστεί μέτριο. Ωστόσο, η ροή της διατομής 2 είναι λοξή ως προς την γέφυρα κατά 45° περίπου. Η διατομή 4 είναι προσπελάσιμη και βρίσκεται σε γέφυρα με τρία φατνώματα. Στα δύο ακραία, η παροχή μπορεί να μετρηθεί με σχετικά καλή ακρίβεια, σε αντίθεση με το μεσαίο φατνώμα όπου το βάθος είναι πολύ μεγάλο λόγω διάβρωσης και προκαλούνται στροβιλισμοί, οι οποίοι εισάγουν μεγάλα σφάλματα κατά την μέτρηση της παροχής με οποιαδήποτε μέθοδο.

Πίνακας 1. Μετρήσεις - εκτιμήσεις στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τους παραπόταμους Λάδωνα και Ερύμανθο.

<i>Εξόρμηση / Θέση</i>	<i>Διατομή</i>	<i>Παροχή Q (m³/s)</i>	<i>Σφάλμα παροχής</i>	<i>Αγωγιμότητα (μS/cm)¹</i>	<i>Αγωγιμότητα (μS/cm)²</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/l)³</i>	<i>Cl⁻ (mg/l)⁴</i>	<i>Cl⁻ (mg/l)⁵</i>
<i>Εξόρμηση 2</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	19,66	Μικρό	461	448	60		
Λάδωνας	2	42	Μέτριο	428	408	17		
Ερύμανθος	3	7,08	Μέτριο	322	312	6		
Άσπρα Σπίτια	4	67,70	Μεγάλο	430,5	416,5	30		
<i>Εξόρμηση 3</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	8,58	Μικρό	463	449	60	5,4	
Λάδωνας	2	24,89	Μέτριο	415,5	408,5	24	6,4	
Ερύμανθος	3	2,63	Μέτριο	326	322	6	7,4	
Άσπρα Σπίτια	4	22,62	Μεγάλο	476	442,5	42	6,8	
<i>Εξόρμηση 4</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	10,76	Μικρό	493	480			
Λάδωνας	2	5,43	Μέτριο	459	436			
Ερύμανθος	3	3,84 ⁶	Μέτριο	327	315			
Άσπρα Σπίτια	4	23,50	Μεγάλο	452	415			
<i>Εξόρμηση 5</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,58	Μικρό	413	392	51		
Λάδωνας	2	3,22	Μέτριο	408	393	35		
Ερύμανθος	3	3,63	Μέτριο	309	284	9		
Άσπρα Σπίτια	4	20,2	Μεγάλο	420	387	45		
<i>Εξόρμηση 6</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,11	Μικρό	471	458	56	6,1	
Λάδωνας	2	3,81	Μέτριο	459	445	36	5,6	
Ερύμανθος	3	3,63	Μέτριο	321	278	8	4,6	
Άσπρα Σπίτια	4	22,62	Μεγάλο	462	413	48	5,1	
<i>Εξόρμηση 7</i>								
Άγιος Ιωάννης	1	9,23	Μικρό	570,5	558	89	10	
Λάδωνας	2	9,99	Μέτριο	436,5	433,5	28	9	
Ερύμανθος	3	5,60	Μέτριο	336	337,5	5	7	
Άσπρα Σπίτια	4	27,82	Μεγάλο	400,5	401	38	8	

¹ Αγωγιμόμετρο Horiba U-10² Αγωγιμόμετρο Hanna HI 9033³ 4500-SO₄²⁻ E. Turbidimetric Method (Eaton *et al.*, 1995)⁴ 4500-Cl⁻ B. Argentometric Method (Eaton *et al.*, 1995)⁵ Merck Spectroquant NOVA 60 – Chloride test⁶ Η παροχή εκτιμήθηκε

3.2. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Με βάση τις ως άνω διαθέσιμες πληροφορίες μετρήσεων πεδίου δοκιμάζονται διάφοροι συνδυασμοί απολύτως μεγίστων τιμών πιθανών σχετικών σφαλμάτων μέτρησης των παροχών και με χρήση του προαναφερόμενου μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης με γραμμικό προγραμματισμό, υπολογίζονται τα ακρότατα παροχών κάθε διατομής, που ικανοποιούν το σύνολο των τεθέντων περιορισμών (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Εκτιμήσεις διορθωμένων παροχών και σφαλμάτων αυτών στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Π. με τους παραποτάμους Λάδωνα και Ερύμανθο.

<i>Εξόρμηση (Ημερομηνία) / Θέση</i>	<i>Διατομή i</i>	<i>Παροχή min X_i (m³/s)</i>	<i>Παροχή max X_i (m³/s)</i>	<i>Παροχή mean X_i ± E_i (m³/s)</i>	<i>Σφάλμα E_i/X_{mean_i (%)}</i>
<i>Εξόρμηση 2 (9.4.2006)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	17,891	18,211	18,051 ± 0,160	0,9
Λάδωνας	2	50,4	33,600	42,000 ± 8,400	20,0
Ερύμανθος	3	7,393	4,956	6,175 ± 1,219	19,7
Άσπρα Σπίτια	4	77,401	60,415	68,908 ± 8,493	12,3
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,718	0,430	1,074 ± 0,644	60,0
<i>Εξόρμηση 4 (18.11.2006)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	10,868	10,652	10,760 ± 0,108	1,0
Λάδωνας	2	5,011	5,047	5,029 ± 0,018	0,4
Ερύμανθος	3	3,928	4,001	3,964 ± 0,037	0,9
Άσπρα Σπίτια	4	20,815	23,356	22,086 ± 1,271	5,8
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,009	3,440	2,225 ± 1,216	54,6
<i>Εξόρμηση 5 (15-16.3.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	12,091	12,454	12,273 ± 0,182	1,5
Λάδωνας	2	2,576	3,261	2,920 ± 0,343	11,7
Ερύμανθος	3	2,178	2,178	2,178 ± 0,000	0,0
Άσπρα Σπίτια	4	17,745	17,894	17,820 ± 0,074	0,4
Λανθάνουσα κόμβου	-	0,616	0,000	0,308 ± 0,308	100,0
<i>Εξόρμηση 6 (2.6.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	11,753	11,454	11,604 ± 0,15	1,5
Λάδωνας	2	2,286	3,727	3,007 ± 0,721	11,7
Ερύμανθος	3	2,178	2,513	2,347 ± 0,168	0,0
Άσπρα Σπίτια	4	18,716	20,212	19,464 ± 0,748	0,4
Λανθάνουσα κόμβου	-	1,517	2,513	2,015 ± 0,498	24,7
<i>Εξόρμηση 7 (24- 25.11.2007)</i>					
Άγιος Ιωάννης	1	7,384	7,384	7,384 ± 0	0,0
Λάδωνας	2	10,040	10,294	10,167 ± 0,127	1,2
Ερύμανθος	3	4,568	4,148	4,358 ± 0,21	4,8
Άσπρα Σπίτια	4	25,293	25,556	25,425 ± 0,131	0,5
Λανθάνουσα κόμβου	-	0,029	0,038	0,034 ± 0,004	13,4

Παρατήρηση. Τα δεδομένα της Εξόρμησης 3 (Πίνακας 1) δείχνουν σαφώς ότι η μετρηθείσα παροχή στην διατομή 4, που προηγήθηκε της μέτρησης στη διατομή 2, ήταν μικρότερη από την παροχή στη 2, αλλά και η εκροή από τον κόμβο (22,62 m³/s) προέκυψε μικρότερη από την συνολική εισροή στον κόμβο (36,1 m³/s). Αυτό υποδηλώνει μη μονιμότητα ροής κατά τη διάρκεια της Εξόρμησης 3 και, επομένως, είναι αδύνατη η αξιοποίηση των μετρήσεων.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LINGO (Schrage, 1997; Lindo Systems Inc., 1996). Τελικώς, από σημαντικό πλήθος συνδυασμών, που εξετάστηκαν για τις μετρήσεις κάθε εξόρμησης, επιλέχθηκε ο συνδυασμός που ελαχιστοποιεί την εξίσωση (2.11). Στον Πίνακα 2, εκτός από τα τελικά αποτελέσματα

ακροτάτων, δίδονται και οι μέσες τιμές και το σφάλμα εκτίμησής τους που έχουν υπολογισθεί με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Τα αποτελέσματα διορθωμένων παροχών που προέκυψαν είναι προφανώς πλέον αξιόπιστα συγκρινόμενα με τις μάλλον πρόχειρες ταχείες μετρήσεις – εκτιμήσεις παροχών. Αυτό οφείλεται στο προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο, όπου οι λύσεις πρέπει να επαληθεύουν το σύνολο των περιορισμών, οι οποίοι υπαγορεύονται από τις αρχές της διατήρησης όγκου και μαζών όσων δεικτών μετρήθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Επιπροσθέτως, η μεθοδολογία έδωσε δύο σημαντικές δυνατότητες εκτίμησης: α) Του πιθανού εύρους, εντός του οποίου κείται η διορθωμένη παροχή της κάθε διατομής ή διαφορετικά του πιθανού σφάλματος εκτίμησης της παροχής αυτής, και β) της πιθανής λανθάνουσας παροχής της υπολεκάνης απορροής, η οποία ορίζεται από τις διατομές ελέγχου του κόμβου.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το εύρος της διορθωμένης παροχής βρέθηκε σημαντικά περιορισμένο, συγκριτικά με την αρχική εκδοχή της μεθοδολογίας για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Για την διατομή 4, τα σφάλματα (E_i/X_{mean_i}) κυμαίνονται από 0,4% έως $\pm 12,3\%$. Τα σφάλματα παροχής για τις διατομές 2 και 3 προέκυψαν να κυμαίνονται αντίστοιχα από 0,4% έως $\pm 20\%$ και από 0% έως $\pm 19,7\%$, ήτοι επίσης σε αρκετά περιορισμένο εύρος. Για την διατομή 1 υπολογίστηκαν στο εύρος τιμών από 0% έως $\pm 1,5\%$. Τέλος, για την λανθάνουσα (επιφανειακή ή/και υπόγεια μη άμεσα μετρήσιμη) παροχή, με την βελτιωμένη προσέγγιση υπολογισμού του πεδίου τιμών της, προέκυψαν πολύ πιο περιορισμένα σφάλματα κυμαινόμενα από 13,4% έως 54,6% για όλες τις εξορμήσεις εκτός από την 5, για την οποία το αντίστοιχο σφάλμα προκύπτει 100%.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διόρθωσης των παροχών, οι οποίες μετρώνται ή εκτιμώνται με απλές και ταχείες τεχνικές χαμηλής ακρίβειας σε διατομές ποταμών, εκμεταλλεύεται τις αρχές διατήρησης όγκου του ύδατος και μαζών των δεικτών, των οποίων οι μετρήσεις παρουσιάζουν ευκολία, ικανοποιητική ακρίβεια και μονιμότητα, και καταστρώνει την κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση σε συνδυασμό με το γραμμικό σύστημα περιορισμών της. Η βελτιστοποίηση γίνεται με χρήση γραμμικού προγραμματισμού και οι προτιμώμενες τιμές διορθωμένων παροχών επιλέγονται με βάση την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των αποκλίσεων των παροχών αυτών από τις μετρηθείσες. Επιπλέον, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει την δυνατότητα εκτίμησης της λανθάνουσας παροχής που προέρχεται από την αντιστοιχούσα υπολεκάνη απορροής μεταξύ των διατομών ελέγχου του κόμβου. Η μέθοδος αυτή δύναται να εφαρμοσθεί σε ποταμούς με ή χωρίς παραποτάμους και ταυτόχρονες μετρήσεις συγκεντρώσεων καταλλήλων φυσικών δεικτών. Η εφαρμογή της μεθόδου στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τους παραπόταμους Λάδωνα και Ερύμανθο έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα διορθωμένων παροχών, περιορίζοντας σημαντικά τα σχετικά σφάλματα εκτίμησης των παροχών αυτών. Για τις περισσότερες περιπτώσεις, που εξετάστηκαν, ακόμη και των πλέον ανώμαλων διατομών με ανομοιόμορφη στροβιλώδη ροή, τα σφάλματα εκτίμησης ήσαν μικρότερα από 20%, εκτός από την λανθάνουσα της οποίας το σφάλμα περιορίστηκε σημαντικά σε σχέση με την αρχική μορφή της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα καθιστούν την προτεινόμενη μέθοδο χρήσιμη και ενδιαφέρουσα για ενσωμάτωση στα Προγράμματα Παρακολούθησης της ρύπανσης υδρολογικών λεκανών, προκειμένου να διατίθενται αξιόπιστες τιμές παροχών και να υπολογίζονται αξιόπιστα φορτία ρύπανσης, ελαχιστοποιώντας τη διάρκεια κάθε εξόρμησης δειγματοληψίας, το προσωπικό και τελικώς το συνολικό κόστος των προγραμμάτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Ερευνητικό Χρηματοδοτούμενο Έργο: Ηράκλειτος II. Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Charlton, F.G., 1978. *Measuring Flow in Open Channels: A Review of Methods*, CIRIA, London.
- Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and Greenberg, A.E., 1995. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition, APHA, NW, Washington.
- Frazier, A.H., 1974. *Water Current Meters in the Smithsonian Collections of the National Museum of History and Technology*, No. 28, Smithsonian Institution Press, Washington.
- Kinori, B.Z. and Mevorach, J., 1984. *Manual of Surface Drainage Engineering, Vol. II: Stream Flow Engineering and Flood Protection*, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.
- Lindo Systems Inc., 1996. *LINDO User's Manual*. Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 390 pp.
- Manariotis, I.D. and Yannopoulos, P.C., 2004. *Adverse effects on Alfeios River Basin and an integrated management framework based on sustainability*. *Environmental Management*, 34(2): 261-269.
- Morgenschweis, G., 2010. *Hydrometrie: Theorie Und Praxis Der Durchflussmessung in Offenen Gerinnen*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 582 pp.
- Müller, A., (ed.), 1988. *Discharge and Velocity Measurements*, IAHR Proceedings, Zurich 1987, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 1-207.
- Schrage, L.E., 1997. *Optimization Modeling with LINDO.5th ed.*, ITP Duxbury Press, USA, 470 pp.
- White, W.R., 1988. *Discharge measuring methods in open channels*, IAHR Proceedings on Discharge and Velocity Measurements, Zurich 1987, Müller (ed.), Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 17-37.
- Yannopoulos, P. C., 1995. *Bubble size and movement in wide channel flows*. Proc. of the 4th Greek National Congress on Mechanics, Demokritus University of Thrace, June 26-29, 1995, Xanthi, Greece, P.S. Theocaris, E.E. Gdoutos (Editors), Vol. II: Mechanics of Fluids and Thermal Sciences, pp. 886-893.
- Yannopoulos, P. C., Demetracopoulos, A. C. and Hatjithodorou, Ch., 2007a. *Quick method for open channel discharge measurements using air bubbles*. *J. Hydr. Eng. (ASCE)* (in print).
- Yannopoulos, P.C., Manariotis, I.D., Ziogas, A.I. and Kaleris, V.K. 2007b. *Methodology of river pollution assessment and preliminary results*. Proc. of 32nd IAHR Congress "Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics", Giampolo Di Silvio and Stefano Lanzoni (editors), July 1-6 2007, Venice, Italy, Theme A – Engineering and Management of Freshwater Systems, A1.c: Water resources and river basin management, 059-O, pp. 307; 12 pages in CD-ROM Proc.
- Γιαννόπουλος, Π.Χρ., 2005. *Ανάπτυξη Μεθοδολογιών Χαμηλού Κόστους για Ταχεία Πρόβλεψη και Παρακολούθηση Ρύπανσης Ποταμών*. Έκθεση Προόδου, Πυθαγόρας II – Περιβάλλον, ΕΠΕΑΕΚ II – ΕΚΤ, 42 σελίδες.

- Γιαννόπουλος Π.Χρ., 2009. Διόρθωση Μετρήσεων Παροχών Ποταμού με Χρήση Φυσικών Δεικτών. *ΥΔΡΟΓΑΙΑ*, τιμητικός τόμος στον Καθηγητή Χρήστο Τζιμόπουλο, επιμέλεια έκδοσης: Σταύρος Γιαννόπουλος, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, σελ. 171-184.
- Γιαννόπουλος, Π. Χρ., Δημητρακόπουλος, Α. Κ. και Χατζηθεοδώρου, Χρ., 1995. *Μέτρηση παροχής ποταμού με αναδύμενες φυσαλλίδες αέρα*, Πρακτικά 4^{ου} Συνεδρίου Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Λέσβου, 4-7 Σεπτ. 1995, Εκδ. Θ. Λέκκας, Τόμος Β', σελ. 389-398.
- Γιαννόπουλος, Π., Μαυρίκος, Γ., Δημητρακόπουλος Α. και Χατζηθεοδώρου, Χρ., 2000. *Μέτρηση Ταχυτήτων σε Διώρυγες με την Βοήθεια Σφαίρας*, Πρακτικά 8ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (Ε.Υ.Ε.), 19-21 Απριλίου 2000, Αθήνα, Επιμέλεια Έκδοσης: Γ. Χριστοδούλου, Α. Στάμου, Αικ. Νάνου, σελ. 127-134.
- Yannopoulos P.C. and Bekri E.S., 2010. *Correction of quick discharge measurements in rivers using natural tracers*, in Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, 23-25 June 2010, Environmental Hydraulics – Christodoulou & Stamou (eds), Taylor & Francis Group, London, Vol. 2, pp. 857-862.
- Τερζίδης, Γ.Α., 1985. *Μαθήματα Υδραυλικής 1. Γενική Υδραυλική*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Τσόγκας, Χ.Ε., 1993. *Μηχανική των Ποταμών*. Εκδόσεις Ίων, Περιστερί, Αθήνα.