

Διόρθωση Μετρήσεων Παροχών Ποταμού με Χρήση Φυσικών Δεικτών

Π. Γιαννόπουλος

*Εργαστήριο Τεχνολογίας του Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Πατρών, 265 00 Πάτρα*

Περίληψη

Αναπτύσσεται μεθοδολογία για ποταμούς με ή χωρίς παραποτάμους, βασισμένη στις αρχές διατήρησης όγκου και μάζας φυσικών δεικτών, καθώς και στην βελτιστοποίηση με γραμμικό προγραμματισμό ώστε, όταν απουσιάζουν μόνιμες εγκαταστάσεις μέτρησης παροχής και ταυτόχρονα με την παροχή μετρώνται ποιοτικές παράμετροι για εκτίμηση φορτίων ρύπανσης, να προκύπτουν τιμές παροχών μεγαλύτερης αξιοπιστίας από εκείνες με ταχείες μεθόδους χαμηλής ακρίβειας. Η παρούσα εργασία σκοπεύει να μειώσει χρόνο, προσωπικό και κόστος εξορμήσεων κατά την εφαρμογή των Προγραμμάτων Παρακολούθησης της κατάστασης των υδάτων και Προγραμμάτων Μέτρων, καθώς και των Σχεδίων Διαχείρισης, που επιβάλλει η ισχύουσα νομοθεσία διαχείρισης υδάτων για τις υδρολογικές λεκάνες της χώρας. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στον ποταμό Αλφειό.

Correction of River Discharge Measurements Using Natural Tracers

P. Yannopoulos

*Laboratory of Environmental Engineering, Department of Civil Engineering,
University of Patras, 265 00 Patras, Greece*

Abstract

Based on both the principles of volume and mass conservation and the linear programming optimization modelling applied to discharge and quality measurements for pollution load estimations carried out simultaneously in rivers with or without tributaries, a methodology to correct discharge values measured at river cross-sections without permanent equipment is developed. This methodology yields discharge values more reliable than values measured using simple and quick methods of low reliability. The present methodology aims to reduce time, personnel and cost of campaigns required in the application of the water quality Monitoring Programs and the Programs of Measures, as well as of the Management Plans, imposed by the water management legislation valid for the river watersheds of the country. The methodology proposed is applied to the Alfeios River.

1. Εισαγωγή

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 23^{ης} 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 πρέπει να έχουν αρχίσει από 01.01.2007, ενώ τόσο το πρώτο Σχέδιο Διαχείρισης, όσο και το πρώτο Πρόγραμμα Μέτρων θα πρέπει να καταρτισθούν και εγκριθούν υποχρεωτικά έως 22.12.2009. Όλα τα μέτρα θα πρέπει να είναι έτοιμα προς εφαρμογή έως 01.01.2012.

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 συκέντρωσης, ήτοι το φορτίο q_{ij} στη διατομή i για τον ρύπο j , το οποίο είναι αδύνατο να μετρηθεί άμεσα, υπολογίζεται έμμεσα ως:

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

όπου Q_i είναι η παροχή και c_{ij} η συκέντρωση 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 προβλεπόμενες 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 μεταξύ τους συντονισμό, 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, Chartlon, 1978, Kinori & Mevorach, 1984, Τερζίδης, 1985, White, 1988, Müller, 1988, Τσόγκας, 1993). Στις μόνιμες εγκαταστάσεις παρακολούθησης η καταγραφή της στάθμης ειδικά διαμορφωμένης διατομής του ποταμού, ώστε η παροχή να υπολογίζεται 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 υποδιαίρεσεων 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. Παρόλα 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 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 αναδύομενων φυσαλλίδων αέρα, η μέθοδος απόκλισης ανηρητημένης σφαίρας, καθώς και άλλες. Οι μέθοδοι των αναδύομενων φυσαλλίδων και της απόκλισης ανηρητημένης σφαίρας έχουν βελτιωθεί σημαντικά από τον συγγραφέα και συνεργάτες του, έχουν δε χρησιμοποιηθεί στις μετρήσεις πεδίου που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία (Yannopoulos, 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 1995; Γιαννόπουλος κ.ά., 2000; Yannopoulos et al., 2007a).

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η χρησιμοποίηση ταχέων μεθόδων μέτρησης ή μάλλον εκτίμησης της παροχής του ποταμού και κατόπιν η κατάλληλη μαθηματική διόρθωση των παροχών με βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό στο σύνολο των μετρήσεων παροχών και ποιοτικών χαρακτηριστικών κάθε κόμβου, ώστε να προκύψουν παροχές 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. Ανάπτυξη μεθοδολογίας

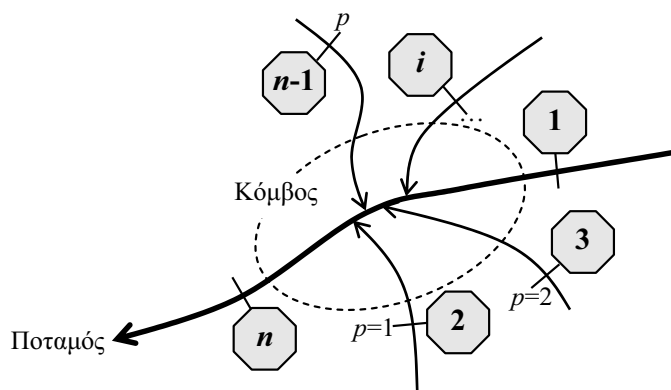
2.1. Γενική θεώρηση

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 δείχνονται 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:

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

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

όπου Q_i , q_i , c_{ij} οι εισερχόμενες ποσότητες παροχής, φορτίου και συγκέντρωσης στον κόμβο μέσω της διατομής i 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 και
 Q_i , q_i , c_{ij} , ($i=2, n-1$) οι αντίστοιχες εισερχόμενες ποσότητες μέσω των παραποτάμων, εφόσον υφίστανται.



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

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 συνόλω, οι οποίες συνιστούν γραμμικό σύστημα. Με την υπόθεση ότι οι τιμές συγκεντρώσεων έχουν προσδιοριστεί 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 ελάχιστης και μέγιστης παροχής σε κάθε διατομή ώστε να ικανοποιούνται όλοι οι τεθέντες περιορισμοί. Επειδή πρακτικώς τέτοιες λύσεις προκύπτουν για διάφορες τιμές υποτιθέμενων σφαλμάτων μέτρησης των παροχών, τελικώς ως πιθανότερες τιμές στον κόμβο επιλέγονται οι μέσες τιμές των παροχών των αντιστοίχων ζευγών των διατομών του κόμβου, για τα οποία ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των εκτιμώμενων από τις μετρηθείσες παροχές. Τελικώς, 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 το προκύπτον, συνήθως μικρό, υπόλοιπο κατά την ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως πιθανή λανθάνουσα παροχή ύδατος Q_k . Κατά την παρούσα ανάλυση η μικρή αυτή λανθάνουσα παροχή, η οποία δεν ήταν άμεσα αντιληπτή και μετρήσιμη, θεωρείται ότι εισέρρεε στον κόμβο 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 μετατρεπόμενες σε κατάλληλες ανισότητες.

2.2. Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου

Έστω X_i ($i=1, n$) 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 :

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

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

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

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:

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

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

Θεωρείται ότι στους ανωτέρω περιορισμούς (2.3) έως (2.7) οι μετρηθείσες τιμές παροχών και συγκεντρώσεων, λόγω των σφαλμάτων μέτρησής των, κείνται εντός των αντιστοίχων κλειστών διαστημάτων

$$[Q_i(1 - \varepsilon_i), Q_i(1 + \varepsilon_i)] \quad \text{και} \quad [c_{ij}(1 - \zeta_j), c_{ij}(1 + \zeta_j)].$$

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

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

$$F = - \sum_{i=1}^{n-1} X_i + X_n \quad (2.8)$$

Για υποτιθέμενες τιμές απολύτως μεγίστων σχετικών σφαλμάτων ε_i ($i=1, n$) μέτρησης παροχών, γνωστές τιμές αντιστοίχων σφαλμάτων ζ_j ($j=1, m$) μέτρησης των συγκεντρώσεων ρύπων ή δεικτών j και επειδή $X_i \geq 0$ ($i=1, n$), τα ακρότατα των διορθωμένων παροχών $\max X_i$ ($i=1, n-1$) 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 $\min X_i$ ($i=1, n-1$) και $\max X_n$. Τελικώς, για κάθε υποτιθέμενη ομάδα σφαλμάτων ε_i ($i=1, n$) μέτρησης παροχών στις διατομές γύρωθεν του εξεταζόμενου κόμβου λαμβάνονται ζεύγη ακροτάτων τιμών παροχών ($\min X_i, \max X_i$) ($i=1, n$), τα οποία ικανοποιούν τους ανωτέρω περιορισμούς με αντίστοιχα υπόλοιπα αντικειμενικής συνάρτησης ($\min Q_i, \max Q_i$) ($i=1, n$). Ως πλέον αντιπροσωπευτική τιμή εκάστους ζεύγους ορίζεται η μέση τιμή των ακροτάτων,

ήτοι:

$$\text{mean } X_i = \frac{1}{2}(\min X_i + \max X_i) \quad (2.9)$$

$$\text{mean } Q_\lambda = \frac{1}{2}(\min Q_\lambda + \max Q_\lambda) \quad (2.10)$$

Επομένως, το απολύτως μέγιστο σφάλμα εκτίμησης της αντιπροσωπευτικής τιμής παροχής εκάστου ζεύγους με βάση την προτεινόμενη μέθοδο θα ισούται με

$$E = \max X_i - \text{mean } X_i \quad \text{και} \quad E_\lambda = \max Q_\lambda - \text{mean } Q_\lambda .$$

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:

$$\min S = \sum_{i=1}^n (Q_i - \text{mean } X_i)^2 \Rightarrow X_i = \text{mean } X_i \pm E, \quad Q_\lambda = \text{mean } Q_\lambda \pm E_\lambda \quad (2.11)$$

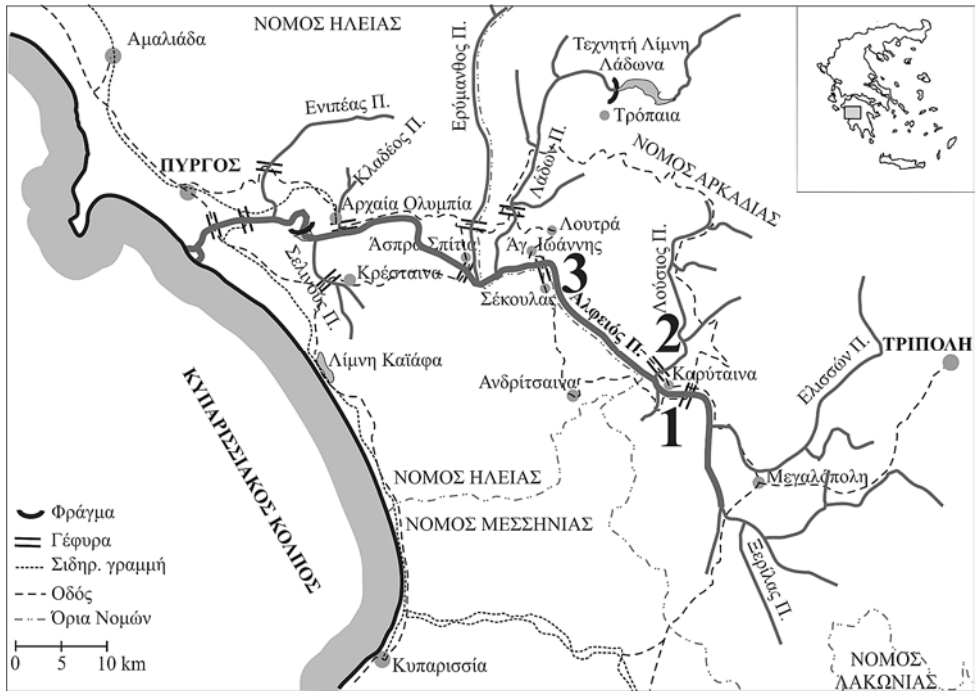
3. Εφαρμογή προτεινόμενης μεθοδολογίας

3.1. Περιγραφή δεδομένων

Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται στον Ποταμό Αλφειό και συγκεκριμένα στον κόμβο συμβολής του κυρίως ποταμού με το Παραπόταμο Λούσιο. Οι μετρήσεις-εκτιμήσεις παροχών και οι επιτόπιες μετρήσεις ή δειγματοληψίες για εργαστηριακές αναλύσεις διαφόρων χαρακτηριστικών έγιναν στις διατομές 1 – Γέφυρα Καρύταινας, 2 – Γέφυρα Λούσιου και 3 – Γέφυρα Αγίου Ιωάννη-Σέκουλα, όπως φαίνονται στον χάρτη του Σχήματος 2. Συνολικά έχουν μέχρι σήμερα πραγματοποιηθεί έξι (6) εξορμήσεις στην περιοχή του εν λόγω κόμβου για σχετικές μετρήσεις που ενδιαφέρουν την παρούσα εργασία. Η πρώτη εξόρμηση πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διπλωματικής εργασίας υπό την επίβλεψη του συγγραφέα, ενώ οι υπόλοιπες έγιναν 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 ≤ 0.05).

- β) Η συγκέντρωση θειικών ανιόντων (SO_4^{-2}), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με επίσης καλή ακρίβεια (σφάλμα ≤ 0.10).
- γ) Η συγκέντρωση ανιόντων χλωρίου (Cl^-), η οποία προσδιορίζεται στο εργαστήριο επί δείγματος με ικανοποιητική ακρίβεια (σφάλμα ≤ 0.15).



Σχήμα 2. Κόμβος συμβολής Αλφειού Ποταμού με Παραπόταμο Λούσιο: 1 – Γέφυρα Καρύταινας, 2 – Γέφυρα Λούσιου, 3 – Γέφυρα Αγίου Ιωάννη-Σέκουλα.

Γενικώς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όσες παράμετροι κρίνονται ότι έχουν σφάλμα προσδιορισμού σχετικά μικρό, πρακτικά ≤ 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 ταυτόχρονα 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 κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τον Παραπόταμο Λούσιο. Οι τιμές των παροχών έχουν εκτιμηθεί με αποτύπωση της διατομής και μέτρηση

της μέγιστης επιφανειακής ταχύτητας με την απλή μέθοδο επιπλέοντος αντικειμένου. Στις περισσότερες περιπτώσεις έγιναν και μετρήσεις της γωνίας απόκλισης με ανηρτημένη σφαίρα βυθισμένη στο μέσον του βάθους (Γιαννόπουλος κ.ά., 2000). Στην διατομή 3 χρησιμοποιήθηκε επίσης η μέθοδος των φυσαλλίδων αέρα (Υαποπουλος, 1995, Γιαννόπουλος κ.ά., 1995, Υαποπουλος et al., 2007a).

Πίνακας 1. Μετρήσεις - εκτιμήσεις στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τον Παραπόταμο Λούσιο.

Εξόρμηση / Θέση	Διατομή	Παροχή Q (m ³ /s)	Σφάλμα παροχής	Αγωγιμότητα (μS/cm) ¹	Αγωγιμότητα (μS/cm) ²	SO ₄ ²⁻ (mg/l) ³	Cl ⁻ (mg/l) ⁴	Cl ⁻ (mg/l) ⁵
Εξόρμηση 1								
Καρύταινα	1	0.25	Μεγάλο	1080.7		360.2	18.1	
Λούσιος	2	4.30	Μεγάλο	425.0		55.1	7.5	
Άγιος Ιωάννης	3	4.13	Μικρό	408.6		51.0	6.1	
Εξόρμηση 2								
Καρύταινα	1	3.01	Μεγάλο	637.0	621.0	117.0		
Λούσιος	2	6.00	Μεγάλο	392.0	377.0	45.0		
Άγιος Ιωάννης	3	19.66	Μικρό	461.0	448.0	59.0		
Εξόρμηση 3								
Καρύταινα	1	3.37	Μεγάλο	780.0	743.0	165.0		
Λούσιος	2	5.21 ⁶	Μεγάλο	422.0	403.0	49.0		
Άγιος Ιωάννης	3	8.58	Μικρό	463.0	449.0	60.0		
Εξόρμηση 4								
Καρύταινα	1	1.82	Μεγάλο	1120.0	942.5			
Λούσιος	2	4.24	Μεγάλο	432.0	398.0			
Άγιος Ιωάννης	3	10.76	Μικρό	493.0	480.0			
Εξόρμηση 5								
Καρύταινα	1	3.05	Μεγάλο	752.0	712.0	155.0		
Λούσιος	2	4.54	Μεγάλο	435.0	357.0	45.0		
Άγιος Ιωάννης	3	9.58	Μικρό	413.0	392.0	51.0		
Εξόρμηση 6								
Καρύταινα	1	2.12	Μεγάλο	829.0	813.0	139.7	13.8	15.2
Λούσιος	2	7.56	Μεγάλο	434.0	402.0	42.5	3.6	5.4
Άγιος Ιωάννης	3	9.11	Μικρό	471.0	458.0	56.3	6.1	7.0

¹ Αγωγιμόμετρο Horiba U-10

² Αγωγιμόμετρο Hanna HI 9033

³ 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 test

⁶ Η παροχή εκτιμήθηκε

Η διατομή 1 είναι δυσπρόσιτη και ανώμαλη. Ο πυθμένας έχει σημαντική κλίση και προεξέχοντες ογκολίθους με αποτέλεσμα να εισάγεται σημαντικό σφάλμα, τόσο στον προσδιορισμό του εμβαδού, όσο και στη μέτρηση ταχυτήτων λόγω ανομοιομορφίας και στροβιλισμών. Η διατομή 2 είναι επίσης σε κοίτη ανώμαλη με σημαντική κλίση και μεγάλους διάσπαρτους ογκολίθους. Η ροή είναι ανομοιόμορφη, έντονα στροβιλώδης (χειμαρρώδης) και το εισαγόμενο σφάλμα επίσης μεγάλο. Η διατομή 3 είναι αρκετά ομαλή, σχετικώς ευρεία, ευκόλως προσπελάσιμη και τις περισσότερες φορές ήταν δυνατή η χρησιμοποίηση και της μεθόδου των αναδυόμενων φυσαλλίδων αέρα, επιτυγχάνοντας εν γένει ικανοποιητική ακρίβεια μέτρησης της παροχής (σφάλμα μικρότερο από 20%).

3.2. Συζήτηση αποτελεσμάτων

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 μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης με γραμμικό προγραμματισμό, το οποίο αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπολογίζονται τα ακρότατα παροχών κάθε διατομής που ικανοποιούν το σύνολο των τεθέντων περιορισμών. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LINDO (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). Τα τελικά αποτελέσματα δίδονται στον Πίνακα 2, όπου επί πλέον των ακροτάτων έχουν υπολογισθεί οι μέσες τιμές και το σφάλμα εκτίμησής τους με βάση την προτεινόμενη μεθοδολογία.

Τα αποτελέσματα διορθωμένων παροχών που προέκυψαν είναι προφανώς πλέον αξιόπιστα συγκρινόμενα με τις μάλλον πρόχειρες ταχείες μετρήσεις – εκτιμήσεις παροχών, καθόσον επαληθεύουν το σύνολο των περιορισμών, οι οποίοι υπαγορεύονται από τις αρχές της διατήρησης όγκου και μαζών όσων δεικτών μετρήθηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Επί προσθέτως, η προτεινόμενη 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.
- β) Της πιθανής λανθάνουσας παροχής της υπολεκάνης απορροής, η οποία ορίζεται από τις διατομές ελέγχου του κόμβου.

Είναι αξιοπρόσεκτο ότι το εύρος της διορθωμένης παροχής βρέθηκε σημαντικά περιορισμένο για την αρκούντως ομαλή διατομή 3, με σφάλματα κυμαινόμενα από 0% έως $\pm 18.5\%$ για τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Τα σφάλματα παροχής για την διατομή 2 προέκυψαν να κυμαίνονται από $\pm 0.8\%$ έως $\pm 19.4\%$, ήτοι επίσης σε αρκετά περιορισμένο εύρος, παρόλο που η διατομή 2 είναι ανώμαλη με χειμαρρώδη ροή και

Πίνακας 2. Εκτιμήσεις διορθωμένων παροχών και σφαλμάτων αυτών στον κόμβο συμβολής του Αλφειού Ποταμού με τον Παραπόταμο Λούσιο.

Εξόρμηση (Ημερομηνία) /Θέση	Διατομή i	Παροχή min X_i (m ³ /s)	Παροχή max X_i (m ³ /s)	Παροχή mean $X_i \pm E_i$ (m ³ /s)
Εξόρμηση 1 (15.7.1998)				
Καρύταινα	1	0.220	0.028	0.124 ± 0.096
Λούσιος	2	3.500	3.692	3.596 ± 0.096
Άγιος Ιωάννης	3	4.303	4.540	4.422 ± 0.118
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.583	0.820	0.702 ± 0.118
Εξόρμηση 2 (9.4.2006)				
Καρύταινα	1	7.932	4.885	6.409 ± 1.524
Λούσιος	2	7.798	10.845	9.321 ± 1.524
Άγιος Ιωάννης	3	15.730	22.885	19.308 ± 3.578
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.000	7.150	3.575 ± 3.575
Εξόρμηση 3 (24.8.2006)				
Καρύταινα	1	3.011	3.300	3.156 ± 0.144
Λούσιος	2	5.269	3.560	4.415 ± 0.855
Άγιος Ιωάννης	3	8.280	10.300	9.290 ± 1.010
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.000	3.440	1.720 ± 1.720
Εξόρμηση 4 (18.11.2006)				
Καρύταινα	1	3.790	2.795	3.292 ± 0.497
Λούσιος	2	4.820	5.815	5.318 ± 0.497
Άγιος Ιωάννης	3	8.610	11.275	9.943 ± 1.333
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.000	2.665	1.333 ± 1.333
Εξόρμηση 5 (15-16.3.2007)				
Καρύταινα	1	2.536	2.536	2.536 ± 0.000
Λούσιος	2	6.810	5.124	5.967 ± 0.843
Άγιος Ιωάννης	3	9.346	9.346	9.346 ± 0.000
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.000	1.686	0.843 ± 0.843
Εξόρμηση 6 (2.6.2007)				
Καρύταινα	1	2.264	1.800	2.032 ± 0.232
Λούσιος	2	7.696	7.580	7.638 ± 0.058
Άγιος Ιωάννης	3	9.960	10.020	9.990 ± 0.030
Λανθάνουσα κόμβου	–	0.000	0.640	0.320 ± 0.320

δύσκολα μετρήσιμη. Τέλος, τα σφάλματα παροχής για την δυσπρόσιτη και ανώμαλη διατομή 1, με εντελώς ανομοιόμορφη στροβιλώδη ροή, προέκυψαν να κυμαίνονται από 0% έως $\pm 23.8\%$ για τις 5 τελευταίες εξορμήσεις και μόνο για την πρώτη εξορμηση προέκυψε σφάλμα $\pm 77.5\%$. Πάντως, λαμβανομένων υπόψη των αντίξωων συνθηκών της διατομής 1, η επιτευχθείσα ακρίβεια θεωρείται ικανοποιητική.

Η εκτίμηση της λανθάνουσας παροχής του κόμβου για τις 5 τελευταίες εξορμήσεις προέκυψε με σφάλμα $\pm 100\%$, ενώ για την πρώτη το σφάλμα ήταν $\pm 16.9\%$. Με δεδομένο ότι είναι αδύνατη η άμεση μέτρηση της παροχής αυτής, η εκτίμησή της έστω και με αυτή την χαμηλή ακρίβεια αποτελεί αρκούντως σημαντική πληροφορία.

4. Συμπεράσματα

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 και μαζών των δεικτών, των οποίων οι μετρήσεις παρουσιάζουν ευκολία, ικανοποιητική ακρίβεια και χρονική σταθερότητα, 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. Επί πλέον, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει την δυνατότητα αρχικής 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, όταν υπάρχουν και ταυτόχρονες μετρήσεις συγκεντρώσεων καταλλήλων φυσικών δεικτών.

Η εφαρμογή της μεθόδου στον κόμβο συμβολής του Ποταμού Αλφειού με τον Παραπόταμο Λούσιο 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%.

Τα παρουσιαζόμενα αποτελέσματα καθιστούν την προτεινόμενη μέθοδο αναγκαία για ενσωμάτωση στα Προγράμματα Παρακολούθησης της ρύπανσης υδρολογικών λεκανών, προκειμένου να διατίθενται αξιόπιστες τιμές παροχών και να υπολογίζονται αξιόπιστα φορτία ρύπανσης, ελαχιστοποιώντας την διάρκεια κάθε εξορμησης δειγματοληψίας, το προσωπικό και τελικώς το συνολικό κόστος των προγραμμάτων.

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ), Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευση και Αρχική Επαγγελματική Κατάρτιση (ΕΠΕΑΕΚ ΙΙ), και ειδικότερα το Πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ ΙΙ, για την χρηματοδότηση του παρόντος έργου.

Βιβλιογραφία

1. Charlton, F.G., 1978. *Measuring Flow in Open Channels: A Review of Methods*, CIRIA, London.
2. Eaton, A.D., Clesceri, L.S. and Greenberg, A.E., 1995. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 19th Edition, APHA, NW, Washington.
3. 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.
4. 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.
5. Lindo Systems Inc., 1996. *LINDO User's Manual*. Lindo Systems Inc., Chicago, Illinois, 390 pp.
6. 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.
7. Müller, A., (ed.), 1988. *Discharge and Velocity Measurements*, IAHR Proceedings, Zurich 1987, Balkema, Rotterdam, Vol. 2, pp. 1-207.
8. Schrage, L.E., 1997. *Optimization Modeling with LINDO*. 5th ed., ITP Duxbury Press, USA, 470 pp.
9. 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.
10. 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.
11. Yannopoulos, P. C., Demetrapoulos, A. C. and Hatjitheodorou, Ch., 2007a. Quick method for open channel discharge measurements using air bubbles. *J. Hydr. Eng. (ASCE)* (in print).
12. 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.
13. Γιαννόπουλος, Π.Χ., 2005. Ανάπτυξη Μεθοδολογιών Χαμηλού Κόστους για Ταχεία Πρόβλεψη και Παρακολούθηση Ρύπανσης Ποταμών. Έκθεση Προόδου, Πυθαγόρας II – Περιβάλλον, ΕΠΕΑΕΚ II – ΕΚΤ, 42 σελίδες.
 14. Γιαννόπουλος, Π. Χ., Δημητρακόπουλος, Α. Κ. και Χατζηθεοδώρου, Χρ., 1995. Μέτρηση παροχής ποταμού με αναδύμενες φουσαλλίδες αέρα, Πρακτικά 4^{ου} Συνεδρίου Περιβαλλοντικής Επιστήμης και Τεχνολογίας, Μόλυβος Λέσβου, 4-7 Σεπτ. 1995, Εκδ. Θ. Λέκκας, Τόμος Β΄, σελ. 389-398.
 15. 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 Εκδοσης: Γ. Χριστοδούλου, Α. Στάμιου, Αικ. Νάνου, σελ. 127-134.
 16. Τερζίδης, Γ.Α., 1985. Μαθήματα Υδραυλικής 1. Γενική Υδραυλική. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
 17. Τσόγκας, Χ.Ε., 1993. Μηχανική των Ποταμών. Εκδόσεις Ίων, Περιστέρι, Αθήνα.