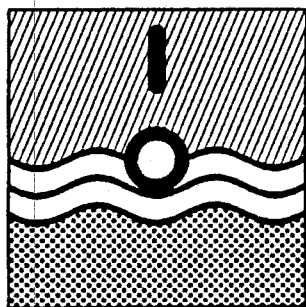


ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ STRIDE ΕΛΛΑΣ

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΘΝΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ
ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ
ΚΑΙ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΕΓΓΕΙΟΒΕΛΤΙΩΤΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
και
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ, ΥΔΡΑΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

MINISTRY OF ENVIRONMENT, PLANNING
& PUBLIC WORKS
DIVISION OF LAND RECLAMATION WORKS
and
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DIVISION OF WATER RESOURCES, HYDRAULIC &
MARITIME ENGINEERING

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΘΜΗΣ -
ΠΑΡΟΧΗΣ

FITTING THE STAGE - DISCHARGE
CURVES

Γ. Καββαδίας
Σ. Τζοβαρίδης ΥΠΕΧΩΔΕ

Ι. Ναλμπάντης
Ν. Μάμασης Ε.Μ.Π.

G. Kavvadias
S. Tzovaridis MEPPW

I. Nalbantis
N. Mamas NTUA

HYDROSCOPE

STRIDE HELLAS PROGRAMME

DEVELOPMENT OF A NATIONAL DATA
BANK FOR HYDROLOGICAL AND
METEOROLOGICAL INFORMATION

Αριθμός τεύχους 8/4
Report number 1/15

ΑΘΗΝΑ - ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 1993
ATHENS - DECEMBER 1993

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ABSTRACT.....	ii
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Ιστορικό.....	1
1.2 Αντικείμενο του τεύχους.....	1
2 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	3
3. ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ.....	4
4. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	7
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ (ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ).....	8
6. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ.....	9
6.1 Επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής για τις χαμηλές παροχές.....	9
6.2 Επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής για τις ψηλές παροχές.....	9
6.2.1 Μέθοδος παροχετευτικότητας-κλίσης.....	9
6.2.2 Μέθοδος με σύγκριση των παροχών αιχμής από διάφορες λεκάνες απορροής.....	10
6.2.3 Μέθοδος της διόδευσης πλημμύρας.....	10
6.2.3 Μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων για τον υπολογισμό της κατά μήκος τομής της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.....	10
7. ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ.....	12
7.1 Μετακίνηση (Shift) της καμπύλης στάθμης-παροχής.....	12
7.2 Εντοπισμός αλλαγών της καμπύλης στάθμης-παροχής.....	12
7.2.1 Γενικά.....	12
7.2.2 Στατιστικές δοκιμές για τον έλεγχο προσαρμογής καμπυλών.....	14
α. Δοκιμή ελέγχου αποκλίσεων.....	14
β. Δοκιμή ελέγχου αλλαγών προσήμου.....	14
γ. Δοκιμή εκατοστιαίων αποκλίσεων.....	15
8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ.....	16
9. ΕΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ.....	17
9.1 Εισαγωγή.....	17
9.2 Συλλογή στοιχείων πεδίου.....	18
9.3 Μέθοδος κλίσης-επιφάνειας.....	18
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	22

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζονται τα προβλήματα που σχετίζονται με την εκτίμηση της σχέσης στάθμης-παροχής και αφορούν τα ποτάμια του ελληνικού χώρου. Εξετάζονται οι φυσικές συνθήκες που επιτρέπουν τον έλεγχο της σχέσης στάθμης-παροχής όπως είναι η ύπαρξη διατομών ελέγχου και τμημάτων υδατορεύματος που επίσης επιτρέπουν τον έλεγχο. Ακόμη, εξετάζονται οι αναλυτικές μέθοδοι κατάρτισης της καμπύλης στάθμης-παροχής, οι μέθοδοι επέκτασης της καμπύλης στις χαμηλές και τις ψηλές παροχές καθώς και στατιστικές μέθοδοι εντοπισμού αλλαγών στην καμπύλη. Τέλος, θίγεται και το θέμα του έμμεσου υπολογισμού της παροχής πλημμυρικής αιχμής.

ABSTRACT

We present problems related to the estimation of the stage-discharge relationship that arise in Greek rivers. We examine the natural conditions that allow control of the stage-discharge relationship i.e. control sections and channel control. Analytical methods for establishing stage-discharge curves are reported along with extrapolation methods for low and high discharges and methods for detecting shifts in the curve. Finally, the issue of indirect estimation of flood peak discharge is discussed.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορικό

Το παρόν τεύχος συντάχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος ΥΔΡΟΣΚΟΠΙΟ - STRIDE HELLAS με σκοπό να αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη λογισμικού για τον υπολογισμό καμπυλών στάθμης-παροχής. Είναι το αποτέλεσμα συλλογικής εργασίας και συνοψίζει τις απόψεις που διατυπώθηκαν από μέλη ομάδας εργασίας - τους συγγραφείς του τεύχους- σε συσκέψεις που έγιναν στο ΕΜΠ.

Η αρχική επιλογή της ύλης του τεύχους αυτού έγινε από τους Γ. Καββαδία, Καθηγητή του Πανεπιστημίου McGill του Καναδά, Σ. Τζοβαρίδη, Δρ Πολιτικό Μηχανικό, Τμηματάρχη στη Διεύθυνση Εγγειοβελτιωτικών Έργων (Δ7) του ΥΠΕΧΩΔΕ. Συμβολή στην συγγραφή του τεύχους είχαν και οι Ι. Ναλμπάντης, Δρ Πολιτικός Μηχανικός και Ν. Μαμάσης, Αγρονόμος Τοπογράφος Μηχανικός. Η συγγραφή των επιμέρους κεφαλαίων έγινε ως εξής: (α) Κεφάλαια 1.2, 2, 3, 4, 5 και 9 από τους Γ. Καββαδία και Σ. Τζοβαρίδη, (β) Περίληψη, abstract, Κεφάλαια 1.1, 6, 7.1 και 8 από τον Ι. Ναλμπάντη και (γ) Κεφάλαιο 7.2 από τον Ν. Μαμάση. Τέλος, την ενοποίηση των επιμέρους κειμένων και της μορφής τους καθώς και την επιμέλεια του τεύχους στο σύνολό του είχε ο Ι. Ναλμπάντης.

1.2 Αντικείμενο του τεύχους

Συνεχείς καταγραφές παροχής σε σταθμημετρικούς σταθμούς υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την σχέση της παροχής του ρεύματος προς τις καταγραφές στάθμης. Το κεφάλαιο αυτό αφορά στις καμπύλες στις οποίες η παροχή μπορεί να σχετιστεί με τη στάθμη.

Οι καμπύλες παροχής των σταθμών συνήθως προσδιορίζονται εμπειρικά δια μετρήσεως των παροχών στο πεδίο, με κύριες εξαιρέσεις τους εμπειρικούς τύπους που χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες για τους ειδικούς υπερχειλιστές και αύλακες. Η κοινή πρακτική είναι να μετράται περιοδικά η παροχή ενός ρεύματος με μολίσκο. Η μετρημένη παροχή σχεδιάζεται με τη στάθμη για τον προσδιορισμό της καμπύλης στάθμης-παροχής. Σ' ένα καινούργιο σταθμό απαιτούνται πολλές μετρήσεις παροχής για τον προσδιορισμό της σχέσης στάθμης-παροχής, σε όλο το εύρος της στάθμης. Περιοδικές μετρήσεις απαιτούνται στη συνέχεια για επιβεβαίωση της σταθερότητας της καμπύλης ή για την παρακολούθηση των αλλαγών αυτής. Συνιστάται να γίνονται κατ' ελάχιστο δέκα (10) μετρήσεις το χρόνο, εκτός αν έχει αποδειχθεί ότι η σχέση σταθμης-παροχής είναι απολύτως αμετάβλητη με το χρόνο. Στην περίπτωση αυτή η συχνότητα των μετρήσεων μπορεί να μειωθεί. Είναι πρωταρχικής σημασίας η σχέση στάθμης-παροχής να καθοριστεί για συνθήκες πλημμύρας και για περιόδους όπου η καμπύλη υπόκειται σε αλλαγές ως

αποτέλεσμα σχηματισμού πάγου ή ως αποτέλεσμα των μεταβλητών συνθηκών του ρεύματος και του ελέγχου. Είναι ουσιώδες το πρόγραμμα μέτρησης της στάθμης του ρεύματος να προβλέπει τις εκτός ρουτίνας μετρήσεις παροχής στις περιόδους αυτές.

Εάν οι μετρήσεις παροχής καλύπτουν όλη την κλίμακα της στάθμης για μία περίοδο κατά την οποία η σχέση στάθμης-παροχής είναι σταθερή, ο καθορισμός της παροχής είναι εύκολος για την περίοδο αυτή. Από την άλλη πλευρά, αν όπως συνήθως συμβαίνει, δεν υπάρχουν μετρήσεις παροχών για τον καθορισμό του ανωτέρω πέρατος της καμπύλης, το καθορισθέν κατώτερο τμήμα της πρέπει να επεκταθεί μέχρι την ανώτερη στάθμη που μετρήθηκε. Τέτοιες επεκτάσεις υπόκεινται πάντοτε σε σφάλμα, αλλά το σφάλμα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εάν ο μελετητής έχει γνώση των αρχών που διέπουν την μορφή των καμπυλών.

Το μεγαλύτερο μέρος της ύλης του κεφαλαίου αυτού κατευθύνεται προς μία διερεύνηση των αρχών αυτών, έτσι ώστε όταν ο υδρολόγος αντιμετωπίζει το πρόβλημα της επέκτασης του τέλους των υψηλών σταθμών μίας καμπύλης στάθμης-παροχής, να μπορεί να αποφασίζει κατά πόσο η επέκταση πρέπει να είναι μία ευθεία γραμμή, ή πρέπει να στρέφει τα κοίλα προς τα άνω ή προς τα κάτω.

Το πρόβλημα της επέκτασης μπορεί να παρακαμφθεί, φυσικά, εάν η μή μετρηθείσα αιχμή παροχής προσδιοριστεί χρησιμοποιώντας τις έμμεσες μεθόδους που αναπτύσσονται παρακάτω. Εν απουσία τέτοιων προσδιορισμών της αιχμής πλημμύρας, μέρος της αβεβαιότητας στην επέκταση της καμπύλης μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας μία ή πολλές μεθόδους εκτίμησης της παροχής που αντιστοιχεί στις υψηλές τιμές της στάθμης.

Η σχέση στάθμης-παροχής καθορίζεται με τη σύνθετη αλληλεπίδραση των χαρακτηριστικών του ρεύματος (κατά πλάτος, διατομή, μορφή, κλίση και τραχύτητα). Ο συνδυασμός των επιδράσεων αυτών έδωσε τον ορισμό του ελέγχου. Ένας έλεγχος είναι αντίστοιχα μόνιμος ή μεταβαλλόμενος αν η σχέση στάθμης-παροχής την οποία καθορίζει αλλάζει ή δεν αλλάζει με το χρόνο.

Ο μεταβαλλόμενος έλεγχος και οι επιδράσεις του στη σχέση στάθμης-παροχής είναι μεγάλης σημασίας για τη λειτουργία του υδρομετρικού σταθμού και τον υπολογισμό της απορροής. Οι έλεγχοι μπορούν να αλλάζουν υπό την επίδραση ενός μεταβλητού ρεύματος, τη διάβρωση και απόθεση σε μία αλλουβιανή διώρυγα, του ανάρρου, την ταχέως μεταβαλλόμενη στάθμη, τη μεταβλητή αποθήκευση σε ρεύμα, τα υδροχαρή φυτά, και τη δημιουργία πάγου και τη θραύση πάγου.

2. ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Η σχέση της στάθμης προς την παροχή συνήθως ελέγχεται από μία διατομή ή ένα τμήμα του ρεύματος κατάντη του σταθμημέτρου και που είναι γνωστή ως έλεγχος του σταθμού. Μια διατομή ελέγχου μπορεί να είναι φυσική ή τεχνητή, μπορεί να είναι σειρά βράχων κάθετα στη διώρυγα, ένα εμπόδιο από κοτρώνες, ένας υπερχειλιστής ή οιαδήποτε άλλη φυσική μορφή ικανή να διατηρήσει μια αρκετά σταθερή σχέση μεταξύ στάθμης και παροχής. Οι διατομές ελέγχου συνήθως ισχύουν μόνο στις χαμηλές παροχές και κατακλύζονται παντελώς στις μεσαίες και υψηλές παροχές. Ο έλεγχος του ρεύματος αποτελείται από όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά του ρεύματος που καθορίζουν την στάθμη του ποταμού σε ένα δεδομένο σημείο για μια δεδομένη παροχή. Τα χαρακτηριστικά αυτά περιλαμβάνουν το μέγεθος, την κλίση, την τραχύτητα, τις ευθυγραμμίες, τις συστολές και διαστολές και τη μορφή του ρεύματος. Το τμήμα του ρεύματος που ενεργεί ως έλεγχος μπορεί να επιμηκυνθεί όσο αυξάνεται η παροχή, εισάγοντας νέα χαρακτηριστικά που επιδρούν στη σχέση στάθμης-παροχής.

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ρεύματος που ελέγχουν τη σχέση στάθμης-παροχής είναι σημαντική. Η ανάπτυξη των καμπυλών στάθμης-παροχής εκεί όπου υπάρχουν πλέον του ενός έλεγχοι, και όπου ο αριθμός των μετρήσεων είναι περιορισμένος απαιτεί συνήθως κρίση στην παρεμβολή μεταξύ των μετρήσεων και στην επέκταση πέραν των μεγαλύτερων μετρήσεων. Τούτο αληθεύει ιδιαίτερος εκεί όπου οι έλεγχοι δεν είναι μόνιμοι και οι διάφορες μετρήσεις παροχής αντιστοιχούν σε διάφορες θέσεις της καμπύλης στάθμης-παροχής.

3. ΕΞΙΣΩΣΗ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ

Οι σχέσεις στάθμης-παροχής συνήθως προσδιορίζονται από μία γραφική ανάλυση των μετρήσεων παροχής που σχεδιάζονται είτε σε ορθογώνιες γραμμικές συντεταγμένες είτε σε λογαριθμικό χαρτί. Σ'ένα προκαταρκτικό βήμα, οι προς ανάλυση διαθέσιμες μετρήσεις πινακοποιούνται με κάποια μορφή που να περιέχει όλα τα δεδομένα τους. Η παροχή σχεδιάζεται ως τετμημένη, η αντίστοιχη στάθμη ως τεταγμένη και προσαρμόζεται με το μάτι μια καμπύλη ή ευθεία στα σχεδιασμένα σημεία. Τα σημεία φέρουν αναγνωριστικούς αριθμούς του πίνακα. Οι μετρήσεις παροχής αριθμούνται διαδοχικά με χρονολογική τάξη ώστε να μπορούν ν'αναγνωρίζονται οι χρονικές τάσεις.

Στους καταγραφικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν θαλάμους ηρεμίας, υπάρχει συχνά μια διαφορά μεταξύ της καταγραφομένης (εσωτερικής) στάθμης και της εξωτερικής κατά τις περιόδους των υψηλών υδάτων. Όταν συμβαίνει αυτό, καταγράφονται τόσο η εσωτερική όσο και η εξωτερική στάθμη στον προαναφερθέντα πίνακα, και σχεδιάζοντας τις μετρήσεις για την ανάλυση της καμπύλης, διαβάζουμε πρώτα την εξωτερική στάθμη. Η σχέση στάθμης-παροχής εκτείνεται μέχρι τη στάθμη που σημειώνουν τα εξωτερικά υψηλά νερά που παρατηρούνται σε κάθε πλημμυρικό γεγονός. Στη συνέχεια η σχέση στάθμης-παροχής μετακινείται ώστε ν'αντιστοιχεί με εσωτερικές στάθμες που λαμβάνονται από το σταθμηγράφο κατά τις μετρήσεις παροχής και τις πλημμύρες. Το σκεπτικό πίσω απ' αυτή τη διαδικασία έχει ως εξής: Οι αναγνώσεις της εξωτερικής στάθμης χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της καμπύλης διότι οι αρχές της υδραυλικής στις οποίες βασίζεται αυτή απαιτούν τη χρήση της αληθούς στάθμης του ρεύματος. Η μεταφορά της καμπύλης στις εσωτερικές (καταγραμμένες) στάθμες γίνεται διότι αυτές θα χρησιμοποιηθούν με την καμπύλη για τον προσδιορισμό της παροχής, επειδή αν υπάρχουν κάποιες διαφορές μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής στάθμης, αυτές θα είναι γνωστές μόνο για τις στιγμές που οι δύο στάθμες διαβάζονται συγχρόνως. Εάν χρησιμοποιούσαμε τις εξωτερικές στάθμες με την καμπύλη για τον προσδιορισμό της παροχής θα έπρεπε να επιφέρουμε διαφορετικές, σε κάθε περίπτωση γνωστές ή υποθετικές, στα ύψη του σταθμηγράφου για να τα μετατρέψουμε σε εξωτερικές στάθμες.

Η χρήση λογαριθμικού χαρτιού σχεδίασης συνήθως προτιμάται στη γραφική ανάλυση της καμπύλης διότι στη συνήθη κατάσταση συνθέτων ελέγχων, αλλαγές στην κλίση της σχεδιασμένης λογαριθμικά καμπύλης προσδιορίζουν τα διαστήματα της στάθμης για τα οποία ισχύει ο κάθε έλεγχος ρεύματος. Επιπλέον, το τμήμα της καμπύλης που εφαρμόζεται σε οποιοδήποτε ιδιαίτερο έλεγχο μπορεί να γίνει γραμμικό για λογική επέκταση ή παρεμβολή.

Ας δούμε τώρα θεωρητικά τις καμπύλες στάθμης-παροχής όταν της σχεδιάσουμε σ'ένα λογαριθμικό χαρτί. Η καμπύλη στάθμης-παροχής που είναι ευθεία γραμμή σε λογαριθμικό χαρτί έχει την εξίσωση:

$$Q = C(h-a)^\beta \quad (1)$$

όπου

Q είναι η παροχή.

$h-a$ είναι το φορτίο ή το βάθος του νερού στον έλεγχο.

h είναι η στάθμη της επιφάνειας του νερού.

a είναι η στάθμη για μηδενική ροή για έναν έλεγχο κανονικού σχήματος ή ουσιαστικά μηδενική ροή για έναν έλεγχο ακανόνιστου σχήματος.

C είναι η παροχή όταν το φορτίο ισούται με 1.0 m.

β είναι η κλίση της καμπύλης στάθμης-παροχής (εδώ ως κλίση λαμβάνεται η οριζόντια προς την κατακόρυφη απόσταση και αυτό διότι η ανεξάρτητη μεταβλητή φέρεται πάντοτε στην τετμημένη).

Υποθέτουμε τώρα ότι ένα τμήμα της λογαριθμικής καμπύλης είναι γραμμικό και εξετάζουμε την επίδραση των αλλαγών στον έλεγχο. Αν το πλάτος του ελέγχου αυξάνει το C αυξάνει και η νέα καμπύλη θα είναι παράλληλη και προς τα δεξιά της αρχικής. Αν το πλάτος του ελέγχου μειώνεται, συμβαίνει το αντίθετο, το C μειώνεται και η νέα καμπύλη θα είναι παράλληλη και προς τα αριστερά της αρχικής.

Αν ο έλεγχος διαβρώνεται, το a μειώνεται και το βάθος ($h-a$) για δεδομένη στάθμη νερού αυξάνει, η νέα καμπύλη κινείται προς τα δεξιά και δεν θα είναι πλέον μια ευθεία γραμμή αλλά μια καμπύλη που στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω. Αν ο έλεγχος γίνεται υψηλότερος λόγω αποθέσεων, το a αυξάνεται και το βάθος ($h-a$) για δεδομένη στάθμη νερού μειώνεται, η νέα καμπύλη κινείται προς τα αριστερά και δεν είναι πλέον ευθεία αλλά καμπύλη γραμμή που στρέφει τα κοίλα προς τα άνω.

Η σταθερά a εκτιμάται με τις παρακάτω μεθόδους.

1. Γραφική μέθοδος (1)

Τα ζεύγη παρατηρήσεων (h, Q) σχεδιάζονται διπλό λογαριθμικό σε χαρτί και δοκιμάζονται διάφορες τιμές τα a έτσι ώστε τα σημεία $[(h-a), Q]$ να βρίσκονται κατά προσέγγιση στην ίδια ευθεία.

2. Γραφική μέθοδος (2)

Τοποθετούμε ζεύγη σημείων (h, Q) σε διπλό λογαριθμικό διάγραμμα και σχεδιάζουμε με το μάτι μία κατά προσέγγιση καμπύλη. Διαλέγουμε δύο ζεύγη

ακραίων τιμών $(\log h_1, \log Q_1)$ και $(\log h_2, \log Q_2)$ υπολογίζουμε την παροχή $Q_3 = \sqrt{Q_1 Q_2}$ και διαβάζουμε από την καμπύλη την αντίστοιχη τιμή h_3 . Η τιμή του a υπολογίζεται από τον τύπο:

$$a = \frac{h_1 h_2 - h_3^2}{h_1 + h_2 - 2h_3} \quad (2)$$

3. Αναλυτική μέθοδος

Οι συντελεστές της εξίσωσης (1) μπορούν να υπολογιστούν με τη χρήση ενός προγράμματος μη γραμμικής παλινδρόμησης (π.χ. SYSTAT Κεφάλαιο 10 (4)).

Στην πραγματικότητα, η σχέση στάθμης-παροχής πολύ σπάνια είναι μία ευθεία σε διπλό λογαριθμικό χαρτί. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχει διατομή ελέγχου η ευθεία αλλάζει κλίση για τις μεγάλες παροχές (υπέρβαση συνήθους όχθης). Άλλη συνήθης αιτία αλλαγής κλίσης είναι η κατάκλυση της διατομής ελέγχου λόγω υψηλής στάθμης.

4. ΦΥΣΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ

Οι διατομές αυτές είναι κατά σειρά μονιμότητας:

1. Βραχώδης έξαρση σε όλο το πλάτος μιας διατομής.
2. Τοπική συγκέντρωση βράχων, κροκάλων και χαλικιών.

Στην περίπτωση φυσικών διατομών ελέγχου η σχέση στάθμης-παροχής ακολουθεί τη μορφή της εξίσωσης υπερχειλιστών ευρείας στέψης (βλ. εξίσωση 1) όπου ο εκθέτης β είναι συνήθως μεγαλύτερος από την θεωρητική τιμή του 1.5 λόγω της ταχύτητας προσέγγισης και μη της ορθογωνικής διατομής του ρεύματος. Οι τιμές του β είναι συνήθως μεγαλύτερες του 2 και γενικώς κυμαίνονται μεταξύ 1 και 4.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στις περισσότερες περιπτώσεις η διατομή ελέγχου μεταβάλλεται με την στάθμη και για πολύ υψηλές στάθμες η διατομή ελέγχου κατακλύζεται και συνεπώς πρέπει να χρησιμοποιήσουμε έλεγχο τμήματος. Οι αλλαγές αυτές της καμπύλης στάθμης-παροχής έχουν ως συνέπεια τη σύνθετη μορφή της καμπύλης αυτής με διαφορετικές εξισώσεις για διάφορα ύψη στάθμης. Η περίπτωση αυτή είναι συνήθης και θα ερευνηθεί στα πλαίσια της πιλοτικής μελέτης για τις συνθήκες ελληνικών ποταμών.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ (ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ)

Στην παράγραφο αυτή κάνουμε λόγο για έλεγχο ρεύματος για μη μεταβαλλόμενους αγωγούς (stable channels). Ο όρος "μη μεταβαλλόμενος αγωγός" (stable channel), είναι σχετικός γιατί όλοι οι φυσικοί αγωγοί μεταβάλλονται λόγω εναποθέσεων, διαβρώσεων και υδρόβιων φυτών. Οι αλλαγές όμως αυτές είναι μικρότερες από τις αλλαγές των ρευμάτων η κοίτη των οποίων αποτελείται από άμμο. Πραγματευόμαστε την περίπτωση ελέγχου τμήματος (channel control) για όλες τις στάθμες. Αυτό ισχύει για μεγάλα ποτάμια ή για τεχνητά κανάλια.

1. Τεχνητά κανάλια. Αν υπάρχουν αποτελέσματα μετρήσεων και με την υπόθεση ομοιομόρφου βάρους, όλα τα μεγέθη της εξίσωσης (1) είναι γνωστά εκτός από τον εκθέτη β . Η τιμή του β μπορεί να υπολογιστεί από μία ή περισσότερες μετρήσεις και έτσι εκτιμάται μια πρώτη προσέγγιση της σχέσης στάθμης-παροχής. Η καμπύλη αυτή μπορεί να διορθωθεί και να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας άλλες μετρήσεις παροχής.

2. Φυσικοί αγωγοί

Η σχέση (1) μπορεί να ερμηνευθεί με βάση την εξίσωση Manning $Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$

και μερικές απλουστευτικές παραδοχές

1. Για υψηλές στάθμες το n είναι σταθερό.
2. Για υψηλές στάθμες η κλίση S της γραμμής ενέργειας είναι σταθερή θέτουμε

$$\frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} = C_1$$

3. Το εμβαδόν διατομής $A=HW$ όπου H =βάθος και W =πλάτος διατομής.

4. W =σταθερό

5. $R = H$

Η εξίσωση Manning γίνεται:

$$Q = C_1(H)^{\frac{2}{3}}(W)H = C_1WH^{\frac{5}{3}} = CH^{\frac{5}{3}} = C(h-a)^{1.67}$$

Όταν το ρεύμα δεν είναι πολύ πλατύ το R είναι πολύ μικρότερο του H και αυτό μειώνει τον εκθέτη που μπορεί όμως να μεγαλώσει αν η κλίση S και το πλάτος W αυξάνονται για μεγαλύτερες παροχές.

Τα αποτελέσματα όλων αυτών των επιδράσεων είναι η γενική εξίσωση (1) όπου το β μεταβάλλεται από 1.3-1.8 και σπάνια είναι ίσο με 2, σε αντίθεση με την περίπτωση που υπάρχει διατομή ελέγχου για την οποία όπως αναφέραμε παραπάνω η τιμή του β είναι συνήθως μεγαλύτερη του 2.

6. ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ

Στο σύνολο σχεδόν των περιπτώσεων μετασχηματισμού της στάθμης σε παροχή, είναι απαραίτητη η επέκτασή της καμπύλης στάθμης-παροχής για στάθμες και παροχές που είναι έξω από τα όρια εκείνων που αντιστοιχούν στις υδρομετρήσεις. Όπως είναι όμως ευνόητο, μια τέτοια επέκταση αυξάνει σημαντικά την αβεβαιότητα των εκτιμήσεων της παροχής. Στη συνέχεια περιγράφουμε συνοπτικά μεθόδους επέκτασης τόσο για τις χαμηλές όσο και για τις ψηλές παροχές.

6.1 Επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής για τις χαμηλές παροχές

Η επέκταση βασίζεται στην μέθοδο με την οποία χαράχτηκε η καμπύλη στάθμης-παροχής μέχρι το σημείο της κατώτερης στάθμης (π.χ. ευθεία ελαχίστων τετραγώνων σε διπλές λογαριθμικές συντεταγμένες). Γραφικά, η επέκταση φαίνεται καλύτερα σε διάγραμμα με αριθμητικές και όχι λογαριθμικές συντεταγμένες καθώς αυτό επιτρέπει την σχεδίαση του σημείου με μηδενική παροχή. Ο νέος κλάδος της καμπύλης χαράσσεται έτσι ώστε, μαζί με την προϋπάρχουσα, να προκύπτει ενιαία λεία καμπύλη που να περνά από το σημείο μηδενισμού της παροχής.

6.2 Επέκταση της καμπύλης στάθμης-παροχής για τις ψηλές παροχές

Οι μέθοδοι που προτείνονται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO, 1980) είναι οι ακόλουθες:

- (1) Μέθοδος παροχετευτικότητας-κλίσης,
- (2) Σύγκριση παροχών αιχμής για διάφορες λεκάνες,
- (3) Διόδευση πλημμύρας, και
- (4) Με διαδοχικές προσεγγίσεις (βήμα προς βήμα).

Στη συνέχεια περιγράφουμε συνοπτικά τις παραπάνω μεθόδους.

6.2.1 Μέθοδος παροχετευτικότητας-κλίσης

Η μέθοδος βασίζεται στις εξισώσεις μόνιμης ροής του Manning και του Chezy. Η γενική εξίσωση είναι η ακόλουθη:

$$Q = KS^{0.5} \quad (3)$$

όπου Q είναι η παροχή και S η κλίση της γραμμής ενέργειας. Το K στη σχέση του Chezy ισούται με $CA^2R^{0.5}$ όπου C είναι ο συντελεστής Chezy, A είναι η επιφάνεια

της υγρής διατομής και R η υδραυλική ακτίνα. Αντίστοιχα στη σχέση του Manning το K ισούται με $(1/n)AR^{0.6667}$ όπου n είναι ο συντελεστής Manning.

Οι υδρομετρήσεις δεν περιλαμβάνουν μετρήσεις της κλίσης S . Παρ' όλα αυτά είναι δυνατή η εκτίμησή της από την εξίσωση (1) για κάθε ζεύγος τιμών παροχής και στάθμης. Στη συνέχεια χαράσσεται διάγραμμα κλίσης-ύψους σε αριθμητικές συντεταγμένες. Για μεγάλες τιμές της στάθμης η κλίση τείνει σε μία σταθερή τιμή που είναι η κλίση της ομοιόμορφης ροής, ίση με την κλίση πυθμένα του υδατορεύματος που εξετάζεται. Από την σχέση αυτή υπολογίζουμε, για οποιαδήποτε στάθμη, την κλίση S . Επίσης από την σχέση παροχетеυτικότητας-στάθμης υπολογίζουμε την παροχетеυτικότητα K και τέλος την παροχή από την σχέση (2).

Στην περίπτωση που η καμπύλη $S=S(h)$ έχει φθάσει, με βάση τις μετρήσεις, σε κάποια σταθερή τιμή τότε η επέκταση της καμπύλης μπορεί να γίνει με αρκετή αξιοπιστία. Στην αντίθετη περίπτωση, θα υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στην εκτίμηση των ψηλών παροχών. Τότε είναι προτιμότερο να αναχθεί κανείς σε τοπογραφικούς χάρτες, ώστε να έχει μια εκτίμηση της κλίσης πυθμένα όπου είναι και η οριακή κλίση ενέργειας για τις ψηλές παροχές.

6.2.2 Μέθοδος με σύγκριση των παροχών αιχμής από διάφορες λεκάνες απορροής

Η παροχή αιχμής, εκφρασμένη σε μονάδες παροχής ανά μονάδα επιφάνειας, μεταφέρεται από τη θέση όπου υπάρχουν μετρήσεις στη θέση που ενδιαφέρει. Το μέγεθος αυτό έχει προηγουμένως συσχετιστεί, για την περιοχή μελέτης, με την επιφάνεια της λεκάνης απορροής ή/και την ένταση της βροχόπτωσης. Η εισαγωγή της τελευταίας μεταβλητής είναι απαραίτητη κυρίως για ορεινές λεκάνες απορροής όπου η χωρική μεταβλητότητα της βροχής είναι μεγάλη.

6.2.3 Μέθοδος της διόδευσης πλημμύρας

Η πραγματοποίηση υδρομετρήσεων σε πολλές θέσεις ενός υδατορεύματος δεν είναι γενικά εφικτή για οικονομικούς κυρίως λόγους. Στην περίπτωση που τέτοιες καμπύλες έχουν καταρτιστεί ήδη σε μερικές θέσεις του υπό μελέτη υδατορεύματος, είναι δυνατόν να υπολογιστεί η παροχή στη θέση που ενδιαφέρει με εφαρμογή μιας μεθόδου διόδευσης πλημμύρας. Έτσι λαμβάνονται ζεύγη τιμών στάθμης και παροχής που επιτρέπουν μια πρώτη, αρκετά όμως χονδροειδή, εκτίμηση της καμπύλης στάθμης-παροχής.

6.2.3 Μέθοδος των διαδοχικών προσεγγίσεων για τον υπολογισμό της κατά μήκος τομής της ελεύθερης επιφάνειας του νερού

Υπολογίζεται η κατά μήκος τομής της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στο υπό μελέτη υδατόρευμα με διαδοχικές προσεγγίσεις (κατά τμήματα) ξεκινώντας από μία κατάντη διατομή όπου η σχέση στάθμης-παροχής είναι γνωστή. Αν η απόσταση της

θέσης εκκίνησης από την υπό μελέτη θέση είναι αρκετά μεγάλη τότε η κατά μήκος τομή της ελεύθερης επιφάνειας συγκλίνει στην υπό μελέτη θέση έστω και αν η σχέση στάθμης-παροχής στην θέση εκκίνησης δεν είναι μοναδική, όπως στην περίπτωση φράγματος με θυροφράγματα. Η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή αυτής της απόστασης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{LS_0}{d} = 0.86 - 0.64 \frac{S_0 C^2}{g} \quad (4)$$

όπου S_0 είναι η κλίση πυθμένα του υδατορεύματος, d το μέσο βάθος, C ο συντελεστής Chezy και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο υπολογισμός βασίζεται στη σχέση Manning η εκείνη του Chezy υποθέτοντας μια συγκεκριμένη τιμή της παροχής στην θέση εκκίνησης (βλ. WMO, 1980, σ. 24-25). Σε κάθε περίπτωση η καμπύλη στάθμης-παροχής που εξάγεται με την παραπάνω μέθοδο αποτελεί μια πρώτη μόνο προσέγγιση του θέματος και απαιτείται τουλάχιστον μια υδρομέτρηση για επαλήθευση.

7. ΑΛΛΑΓΕΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ

7.1 Μετακίνηση (Shift) της καμπύλης στάθμης-παροχής

Η μετακίνηση της καμπύλης στάθμης-παροχής είναι αποτέλεσμα απότομων και βαθμιαίων αλλαγών των φυσικών χαρακτηριστικών της διατομής ή του τμήματος ελέγχου της ροής στον υπό μελέτη σταθμό. Αν η μετακίνηση της καμπύλης εμμένει περισσότερο από ένα ή δύο μήνες τότε είναι απαραίτητο να καταρτιστεί νέα καμπύλη. Στην αντίθετη περίπτωση συνιστάται η μετακίνηση της παλιάς καμπύλης.

Αν μια ομάδα σημείων της καμπύλης παραμένει συστηματικά από την μια πλευρά της καμπύλης, αυτό είναι ένδειξη μετακίνησης. Στην περίπτωση που αυτά τα σημεία είναι 1 ή 2 δεν υπάρχει γενικά ομόφωνη άποψη στην βιβλιογραφία σχετικά με τον τρόπο αντιμετώπισης του προβλήματος. Στις Η.Π.Α. γίνεται αποδεκτό ότι ένα μέγιστο σχετικό σφάλμα στην εκτίμηση της παροχής ίσο με $\pm 5\%$ επιβεβαιώνει την ύπαρξη μιας μοναδικής καμπύλης. Αν τα σημεία των μετρήσεων παραμένουν συστηματικά από τη μια πλευρά της καμπύλης ικανοποιώντας το κριτήριο του 5% τότε αυτό θεωρείται ότι αποτελεί ένδειξη μετακίνησης. Τα δεδομένα ελέγχονται στη φάση της υδρομέτρησης με χάραξη κάθε φορά του νέου σημείου που δίνει η υδρομέτρηση στο διάγραμμα της ήδη υπάρχουσας καμπύλης στάθμης-παροχής. Αν η καμπύλη δεν επιβεβαιώνεται, τότε η μέτρηση επαναλαμβάνεται για δεύτερη φορά με αλλαγή των συνθηκών μέτρησης (αλλαγή οργάνων μέτρησης, θέσης κατακορύφων, κλπ.). Αν πάλι δεν επιβεβαιώνεται η παλιά καμπύλη τότε γίνεται και τρίτη μέτρηση.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο αντί του παραπάνω ορίου του 5% εφαρμόζεται στατιστική μέθοδος (WMO, 1980, σ. 28-35). Διάφορα ειδικά θέματα όπως είναι τα υδατορεύματα με αμμώδεις πυθμένες ή με πάγο στην επιφάνειά τους αντιμετωπίζονται ξεχωριστά από τον WMO (1980, τόμος II, σ. 44-68). Στο παρόν τεύχος δε θα γίνει ειδική αναφορά σε αυτά.

7.2 Εντοπισμός αλλαγών της καμπύλης στάθμης-παροχής

7.2.1. Γενικά.

Ο προσδιορισμός των χρονικών στιγμών στη λειτουργία ενός υδρομετρικού σταθμού, όπου διαφοροποιήθηκε η σχέση μεταξύ στάθμης και παροχής, αποτελεί μια σημαντική αλλά και δύσκολη εργασία κατά τη διαδικασία κατάρτισης των καμπυλών στάθμης-παροχής του σταθμού. Συνήθως αυτές οι χρονικές στιγμές εντοπίζονται εμπειρικά κατά τη σχεδίαση των δεδομένων των υδρομετρήσεων (στάθμη προς παροχή σε διπλό λογαριθμικό χαρτί) με χρονική σειρά. Ο μηχανικός τοποθετώντας τα σημεία με χρονική σειρά αντιλαμβάνεται τις αλλαγές στη σχέση

στάθμης και παροχής μεταξύ δύο διαδοχικών υδρομετρήσεων, όπως και τυχόν αναξιόπιστα δεδομένα. Βέβαια, μετά τον εντοπισμό των αλλαγών, είναι απαραίτητο να ανατρέξει στα πρωτογενή δεδομένα για να προσδιορίσει ακριβώς τις περιόδους ισχύος των διαφόρων καμπυλών, αλλά και να επιβεβαιώσει την αλλαγή στη σχέση που εντόπισε σχεδιάζοντας τις υδρομετρήσεις. Έτσι, για παράδειγμα, ανατρέχοντας στα ημερήσια σταθμημετρικά δεδομένα ενός σταθμού για την περίοδο μεταξύ δύο διαδοχικών υδρομετρήσεων όπου έχει αλλάξει η σχέση μεταξύ στάθμης και παροχής, μπορούμε να εντοπίσουμε την ημέρα όπου πέρασε πλημμύρα και να τη θεωρήσουμε αρχή της περιόδου που ισχύει η νέα σχέση. Ακόμη αξιοποιήσιμα στοιχεία είναι (α) τα σκαριφήματα της διατομής κατά την εκτέλεση της υδρομέτρησης για τον εντοπισμό αλλαγών στη διατομή και (β) η ημερομηνία που πραγματοποιήθηκε η υδρομέτρηση έτσι ώστε να είναι γνωστό το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών υδρομετρήσεων.

Εκτός από τον εμπειρικό προσδιορισμό των αλλαγών στη σχέση στάθμης και παροχής υπάρχουν και μια σειρά από στατιστικές δοκιμές που ελέγχουν αν ένα σύνολο υδρομετρήσεων ανήκει στην ίδια καμπύλη. Βέβαια, συνήθως οι δοκιμές αυτές συνδυάζονται με την εμπειρική μέθοδο και απλώς επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της. Σε όλες τις δοκιμές εκτιμάται μια προσωρινή καμπύλη που προσαρμόζεται στα συγκεκριμένα σημεία (ευθεία ή καμπύλη των ελαχίστων τετραγώνων σε διπλό λογαριθμικό χαρτί), και κατόπιν ελέγχεται στατιστικά η προσαρμογή της. Έτσι, ελέγχοντας διάφορα υποσύνολα των συνολικών υδρομετρήσεων προσδιορίζονται οι αλλαγές στη σχέση στάθμης-παροχής και οι περίοδοι ισχύος των διαφόρων καμπυλών. Στο επόμενο υποκεφάλαιο περιγράφονται τρεις από τις μεθόδους αυτές που συνίστανται από το Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (I.S.O.). Το κοινό μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι ότι δε λαμβάνουν υπόψη τη διαφορά της ακρίβειας που πρέπει να προσαρμόζεται η καμπύλη στις υψηλές παροχές σε σχέση με τις χαμηλές. Πιο συγκεκριμένα, για την εξαγωγή αξιόπιστων παροχών με τη χρήση των καμπυλών στάθμης παροχής, πρέπει οι τελευταίες να προσαρμόζονται αρκετά καλά στις υψηλές υδρομετρήσεις, ενώ στις χαμηλές η προσαρμογή μπορεί να είναι λιγότερο καλή. Αυτό γίνεται αποδεκτό λόγω της χειμαρρώδους δίαιτας των Ελληνικών ποταμών και της ροής σε πολλούς κλάδους που παρουσιάζουν, με αποτέλεσμα τη μεγάλη διασπορά των μικρών υδρομετρήσεων. Ακόμη το μειωμένο βάρος των χαμηλών παροχών στον υπολογισμό του συνολικού όγκου απορροής επιτρέπει κάποια ανοχή της προσαρμογής στα χαμηλά σημεία. Οι στατιστικές δοκιμές που παρουσιάζονται μεταχειρίζονται όλα τα σημεία με το ίδιο βάρος, με αποτέλεσμα να απορρίπτονται καμπύλες με ικανοποιητική διασπορά στα υψηλά σημεία λόγω της σημαντικής απόκλισης

κάποιου σημείου στις χαμηλές παροχές, ή το αντίθετο, να γίνονται δεκτές καμπύλες που παρουσιάζουν μέτρια διασπορά σε όλο το φάσμα των τιμών.

7.2.2 Στατιστικές δοκιμές για τον έλεγχο προσαρμογής καμπυλών.

α. Δοκιμή ελέγχου αποκλίσεων.

Η δοκιμή αυτή ελέγχει στατιστικά τη διαφορά μεταξύ του αριθμού των θετικών και αρνητικών αποκλίσεων των υδρομετρήσεων από την εκτιμημένη καμπύλη. Ο αριθμός των αποκλίσεων αυτών θα πρέπει να είναι ομαλά κατανεμημένος και η διαφορά μεταξύ του αριθμού των θετικών και αρνητικών αποκλίσεων δε θα πρέπει να είναι στατιστικά σημαντική.

Έστω :

- n ο συνολικός αριθμός των σημείων
- n_1 ο αριθμός των θετικών αποκλίσεων δηλαδή των σημείων που κείνται δεξιά από την καμπύλη
- p η πιθανότητα της απόκλισης να είναι θετική (στην περίπτωση μας 1/2)

Εξετάζουμε την ανηγμένη μεταβλητή $\tau = \frac{|n - n_1| - 0.5}{\sqrt{np(1-p)}}$ με την κανονική

κατανομή. Η διαφορά μεταξύ των αποκλίσεων δεν είναι στατιστικά σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης $\alpha\%$ αν ισχύει $\tau < w_{\alpha/2}$ όπου $w_{\alpha/2}$ η τυποποιημένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής για πιθανότητα υπέρβασης $\alpha/2$.

β. Δοκιμή ελέγχου αλλαγών προσήμου

Η δοκιμή αυτή ελέγχει στατιστικά τον αριθμό των αλλαγών του προσήμου στις σειρές των αποκλίσεων. Συγκεκριμένα γράφονται τα πρόσημα των αποκλίσεων με χρονική σειρά και σημειώνονται οι περιπτώσεις όπου το πρόσημο δε συμφωνεί με το αμέσως προηγούμενο. Αν οι παρατηρημένες τιμές προέρχονται από τυχαίες μεταβολές σε σχέση με τις τιμές που προσδιορίζονται από την καμπύλη, η πιθανότητα αλλαγής προσήμου είναι 1/2.

Έστω :

- n ο συνολικός αριθμός των σημείων
- n_1 ο αριθμός των αλλαγών προσήμου
- p η πιθανότητα αλλαγής προσήμου (στην περίπτωση μας 1/2)

Εξετάζουμε την ανηγμένη μεταβλητή $\tau = \frac{|n_1 - (n-1)p| - 0.5}{\sqrt{(n-1)p(1-p)}}$ με την κανονική

κατανομή. Η διαφορά μεταξύ των αλλαγών προσήμου δεν είναι στατιστικά

σημαντική σε επίπεδο εμπιστοσύνης $\alpha\%$ αν ισχύει $t < w_{\alpha/2}$ όπου $w_{\alpha/2}$ η τυποποιημένη μεταβλητή της κανονικής κατανομής για πιθανότητα υπέρβασης $\alpha/2$.

γ. Δοκιμή εκατοστιαίων αποκλίσεων

Η δοκιμή αυτή ελέγχει στατιστικά το μέσο όρο των εκατοστιαίων αποκλίσεων των σημείων από την καμπύλη. Συγκεκριμένα για κάθε σημείο υπολογίζεται η εκατοστιαία διαφορά του από την καμπύλη με βάση τη σχέση

$$p = \frac{Q_{\text{παρ}} - Q_{\text{εκτ}}}{Q_{\text{εκτ}}} \times 100 \quad \text{όπου } Q_{\text{παρ}} \text{ είναι η παρατηρημένη και } Q_{\text{εκτ}} \text{ είναι η}$$

εκτιμημένη από την καμπύλη παροχή.

Αν διατίθενται n παρατηρήσεις το τυπικό σφάλμα δίδεται από τη σχέση

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - p_m)^2}{n(n-1)}} \quad \text{και στη συνέχεια εξετάζεται αν αυτό είναι στατιστικά}$$

διάφορο από το μηδέν

8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ-ΠΑΡΟΧΗΣ

Η πιο συνηθισμένη αναλυτική μορφή καμπύλης στάθμης-παροχής είναι η ακόλουθη διπλή λογαριθμική σχέση:

$$Q = C(h+a)^\beta \quad (5)$$

όπου Q είναι η παροχή, h η στάθμη και C , a και β παράμετροι.

Αν τεθεί $y = \log Q$ και $x = \log(h+a)$ τότε το πρόβλημα ανάγεται, για συγκεκριμένη τιμή του a , σε μια απλή γραμμική παλινδρόμηση όπου x είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και y η εξαρτημένη. Έναν πρώτο δείκτη της ποιότητας της προσαρμογής της γραμμής παλινδρόμησης στα διαθέσιμα δεδομένα αποτελεί η τυπική απόκλιση s_e των σφαλμάτων της γραμμής αυτής, η οποία γίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$s_e = \left(\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}{N-2} \right)^{1/2} \quad (6)$$

όπου N είναι ο αριθμός των σημείων, και \bar{y} η μέση τιμή των $y = \log Q$.

Επίσης για μια συγκεκριμένη τιμή της στάθμης h_j -ή αλλιώς $x_j = \log(h_j+a)$ - υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης 95% από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{mr} = \pm t s_e \left(\frac{1}{N} + \frac{(x_j - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right)^{1/2} \quad (7)$$

όπου S_{mr} είναι τα όρια εμπιστοσύνης t της κατανομής Student, s_e είναι η τυπική απόκλιση των σφαλμάτων της γραμμής παλινδρόμησης, N είναι ο αριθμός των σημείων, και \bar{x} η μέση τιμή των $x = \log(h+a)$. Με τη βοήθεια της σχέσης (7) χαράσσουμε γύρω από την καμπύλη στάθμης-παροχής τα όρια εμπιστοσύνης και εξετάζουμε αν τα σημεία από τις διαθέσιμες υδρομετρήσεις βρίσκονται μέσα στη ζώνη που ορίων οι δύο καμπύλες των ορίων εμπιστοσύνης. Τέλος σημειώνεται ότι η παραπάνω στατιστική ανάλυση εφαρμόζεται κυρίως στο Ηνωμένο Βασίλειο.

9. ΕΜΜΕΣΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ

9.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια των πλημμυρών, συχνά είναι αδύνατο ή άσκοπο να μετρώνται αιχμές πλημμυρών όταν συμβαίνουν, λόγω των συνθηκών εκτός ελέγχου. Οι δρόμοι μπορεί να είναι αδιάβατοι, οι κατασκευές από τις οποίες οι μετρήσεις με μιλίσκο θα μπορούσαν να γίνουν μπορεί να μην υπάρχουν, να μην είναι τοποθετημένες κατάλληλα ή να έχουν καταστραφεί. Η γνώση της ανόδου των νερών μπορεί να μη διατίθεται αρκετά νωρίτερα για να μας επιτρέψει να φθάσουμε στη θέση κατά το χρόνο της πλημμύρας. Η πλημμύρα μπορεί να είναι τόσο ξαφνική ώστε μια ικανοποιητική μέτρηση με μιλίσκο να μη μπορεί να γίνει ακόμα και με την παρουσία ενός μηχανικού. Η ροή θραυσμάτων μπορεί να είναι τέτοια ώστε να αποτρέψει την χρήση μιλίσκου. Περιορισμοί προσωπικού μπορεί να καθιστούν αδύνατη την επίτευξη άμεσων μετρήσεων παροχής υψηλών υδάτων σε πολυάριθμα σημεία κατά τη διάρκεια βραχείας περιόδου πλημμύρας. Συνεπώς πολλές αιχμές παροχής πρέπει να προσδιοριστούν μετά τη διέλευση της πλημμύρας με έμμεσες μεθόδους όπως αυτή της κλίσης-επιφανείας, του συνεσταλμένου ανοίγματος, της ροής, υπεράνω φράγματος ή της ροής διά οχετού.

Οι έμμεσοι προσδιορισμοί της παροχής χρησιμοποιούν την εξίσωση της ενέργειας για τον υπολογισμό της ροής. Οι ειδικές εξισώσεις διαφέρουν για τους διάφορους τύπους ροής σε ανεμπόδιστες ανοιχτές διώρυγες κ.λπ. Σε κάθε περίπτωση, όλες οι μέθοδοι εμπεριέχουν τρεις γενικούς παράγοντες:

(α) Φυσικά χαρακτηριστικά του ρεύματος όπως διαστάσεις και διαμόρφωση του ρεύματος εντός του τμήματος που χρησιμοποιήθηκε και συνθήκες στα όρια.

(β) Υψόμετρα της επιφάνειας του νερού κατά την αιχμή της στάθμης για τον προσδιορισμό του άνω ορίου της επιφάνειας της διατομής και της διαφοράς στην ανύψωση μεταξύ δύο ή περισσότερων σημαντικών διατομών.

(γ) Υδραυλικοί παράγοντες βασισμένοι σε φυσικά χαρακτηριστικά, υψόμετρα υδάτων και παροχή, όπως συντελεστές τραχύτητας και συντελεστές παροχής.

Θα πρέπει να υπομνησθεί ότι η παροχή που προσδιορίζεται είτε με άμεση μέτρηση είτε με έμμεσες μεθόδους περιλαμβάνει όχι μόνο το νερό, αλλά επίσης οποιεσδήποτε ουσίες σε αιώρηση ή διάλυση στο νερό. Η συγκέντρωση των αιωρούμενων ή διαλυμένων στο μίγμα μεταβάλλεται ευρέως, εξαρτώμενη από κλιματικές ή φυσιογραφικές συνθήκες στη λεκάνη απορροής. Ο όγκος των διαλυμένων στερεών, όσο σημαντικός και αν είναι, είναι συνήθως ασήμαντος σε σχέση με τον όγκο των νερών στην παροχή, αλλά κατά τη διάρκεια των πλημμυρών η ποσότητα των μεταφερόμενων υλών από ένα ρεύμα μπορεί να είναι εξαιρετικά σημαντική. Σε πολλά μέρη του κόσμου, ιδιαίτερα σε ξηρές περιοχές, η ανάμιξη των

φερτών με νερό στην αιχμή παροχής πλημμύρας συνήθως περιέχει άνω του 10% κατ' όγκο, ενώ έχουν μετρηθεί συγκεντρώσεις φερτών άνω του 30%. Έχει γίνει η σκέψη να δημοσιεύονται οι παροχές με ένδειξη του ποσοστού των φερτών, εκεί όπου το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μεγάλο.

9.2. Συλλογή στοιχείων πεδίου

Τα δεδομένα που χρειάζονται για τον υπολογισμό της παροχής με έμμεσες μεθόδους λαμβάνονται με αποτύπωση στο πεδίο ενός τμήματος του ανοιχτού αγωγού. Η αποτύπωση περιλαμβάνει την χωροστάθμιση και τοποθέτηση των ιχνών των υψηλών υδάτων που αντιστοιχούν στη στάθμη αιχμής, διατομές εντός του τμήματος του αγωγού, επιλογή ενός συντελεστή τραχύτητας και περιγραφή των γεωμετρικών στοιχείων των υπερχειλιστών, οχετών ή γεφυρών που εξαρτάται από τον τύπο του προσδιορισμού της αιχμής παροχής που θα γίνει. Η επιλογή κατάλληλης θέσης είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο κατά την εφαρμογή του προσδιορισμού της παροχής με την έμμεση μέθοδο.

Συνιστάται η χρήση ενός ταχύμετρου για ταχυμετρική αποτύπωση της επιλεγείσας περιοχής. Η μέθοδος αυτή συνδυάζει κατακόρυφη και οριζόντια αποτύπωση και είναι ακριβής, απλή και ταχεία.

Η επιλογή ενός συντελεστή τραχύτητας παραμένει ουσιαστικά μια "τέχνη" που αναπτύσσεται με την εμπειρία. Οι παράγοντες που εξασκούν την μεγαλύτερη επιρροή στον συντελεστή τραχύτητας είναι η φύση του υλικού της κοίτης του ρεύματος, η ανωμαλία της διατομής, η παρουσία φυτοκάλυψης και η ευθυγραμμία του αγωγού. Στην εξίσωση του Manning ο συντελεστής τραχύτητας μεταβάλλεται από 0.012 για διώρυγα από σκυρόδεμα σε καλή κατάσταση ή για διώρυγα λείας άμμου κανονικής γεωμετρίας σε περισσότερο από 0.1 για περιοχές που έχουν πυκνή θαμνώδη κάλυψη. Πάντως, σε αγωγούς με σοβαρή ανάπτυξη υδρόβιων φυτών είχαν καταγραφεί από τον Powell (1978) τιμές του n ή μέχρι 4.48.

9.3. Μέθοδος κλίσης-επιφάνειας

Η μέθοδος κλίσης-επιφάνειας είναι η συνηθέστερη τεχνική εμμέσου προσδιορισμού της παροχής. Στη μέθοδο αυτή η παροχή υπολογίζεται επί τη βάση της εξίσωσης ομοιόμορφης ροής που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του αγωγού, τις μηκοτομές και ένα συντελεστή τραχύτητας ή υστέρησης. Η πτώση της γραμμής του νερού για ένα ομοιόμορφο τμήμα του αγωγού παρουσιάζει τις απώλειες ενέργειας λόγω τραχύτητας της κοίτης και της όχθης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου κλίσης-επιφάνειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις γνωστές μορφές της εξίσωσης του Chezy. Εν τούτοις προτιμάται στις περισσότερες χώρες η εξίσωση του Manning επειδή είναι απλή στην

εφαρμογή και η πολυετής εμπειρία από τη χρήση της έδειξε ότι δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η εξίσωση Manning είναι:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

όπου

Q = παροχή σε m^3/s

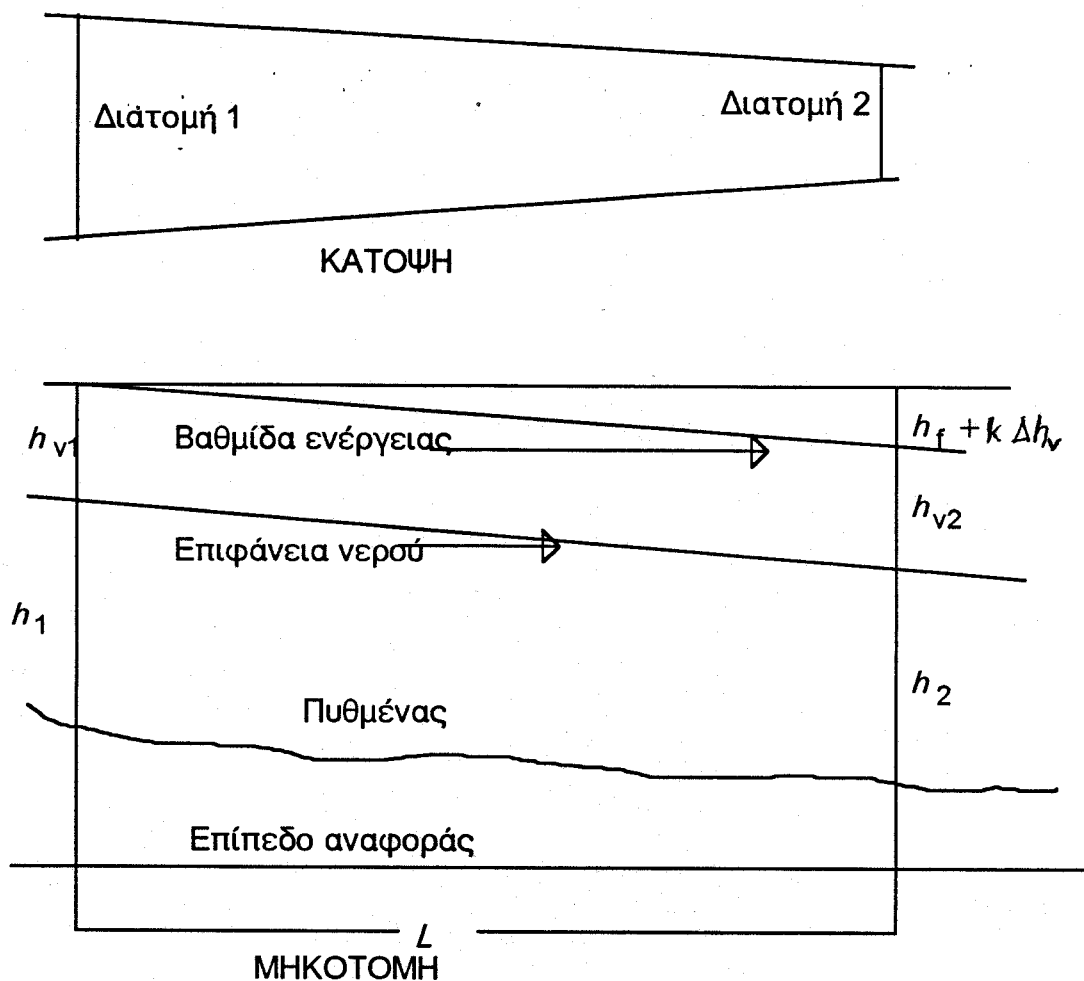
A = εμβαδόν διατομής

R = υδραυλική ακτίνα σε $R = \frac{A}{p}$ όπου p = βρεχομένη περίμετρος

S = κλίση τριβής (πυθμένα και γραμμής ενέργειας)

n = συντελεστής τριβής

Η εξίσωση του Manning ανεπτύχθη για συνθήκες ομοιόμορφης ροής στις οποίες η μηκοτομή της γραμμής του νερού και η βαθμίδα ενέργειας είναι παράλληλες προς την κοίτη, ενώ το εμβαδόν, η υδραυλική ακτίνα και το βάθος παραμένουν σταθερά κατά μήκος όλου του τμήματος. Ελλείψει καλύτερης λύσης, υποτίθεται ότι η εξίσωση ισχύει επίσης για τα μη ομοιόμορφα τμήματα τα οποία συνήθως απαντώνται στις φυσικές διώρυγες, εάν η βαθμίδα της γραμμής του νερού μεταβάλλεται από τη διαφορά του κινηματικού φορτίου μεταξύ διατομών. Η εξίσωση της ενέργειας για ένα τμήμα της ομοιόμορφης διώρυγας μεταξύ των διατομών 1 και 2, όπως φαίνονται στο σχήμα είναι:



$$(h+h_{v1}) = (h+h_{v2}) + (h_{f1-2}) + k(\Delta h_{v1-2})$$

όπου

h = υψόμετρο της γραμμής νερού στις αντίστοιχες διατομές

h_v = κινηματικό φορτίο στις αντίστοιχες διατομές = $av^2/2g$

v = μέση ταχύτητα,

h_f = απώλεια ενέργειας λόγω περιμετρικών τριβών στο τμήμα

Δh_v = κινηματικό φορτίο ανάντη μείον κινηματικό φορτίο κατόντη,

χρησιμοποιούμενες ως κριτήριο για διαστολή ή στένωση του τμήματος

$k(\Delta h_v)$ = απώλεια φορτίου οφειλόμενη στην επιτάχυνση ή επιβράδυνση σε συστελλόμενο ή διαστελλόμενο τμήμα, όπου:

k = συντελεστής απώλειας ενέργειας.

Η κλίση τριβής S που θα χρησιμοποιηθεί στον τύπο του Manning, ορίζεται επομένως ως
$$S = \frac{h_f}{L} - \frac{\Delta h - \Delta h_v + k\Delta h_v}{L}$$

όπου Δh είναι η διαφορά υψομέτρου της γραμμής νερού στις δύο διατομές και L το μήκος του τμήματος.

Χρησιμοποιώντας τον τύπο του Manning η παροχευτικότητα K υπολογίζεται για κάθε διατομή ως $(\frac{1}{n})AR^{\frac{2}{3}}$. Η μέση παροχευτικότητα στο τμήμα υπολογίζεται ως ο γεωμετρικός μέσος της παροχευτικότητας στις δύο διατομές. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η παροχευτικότητα μεταβάλλεται ομαλά μεταξύ των διατομών. Η παροχή υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση $Q = \sqrt{k_1 k_2 S}$, όπου S η κλίση τριβής όπως ορίστηκε προηγουμένως.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. WMO, 1982: *GUIDE TO HYDROLOGICAL PRACTICES, Report No 168*. Vol 1, Vol 2.
2. WMO, 1980. *MANUAL ON STREAM GAUGING, Report No 13*, Vol. 1, Vol. 2.
3. CHOW, V.T., 1964. *HANDBOOK OF APPLIED HYDROLOGY*, McGRAW - HILL BOOK COMPANY
4. *SYSTAT for Windows, Version 5*, 1992. Evanston Uillinois.