

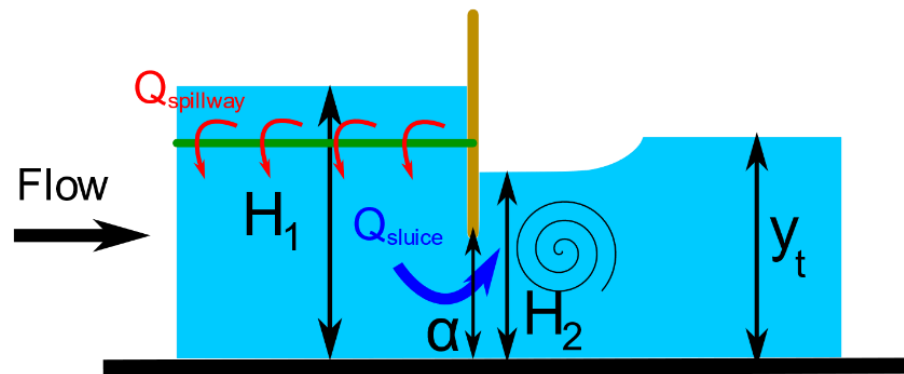


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

# Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για την ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών έργων δυναμικής ρύθμισης των υδραγωγείων: Η Περίπτωση Του Υδραγωγείου του Μόρνου



Μπουκογιάννης Ευστράτιος

## Επιβλέποντες Διπλωματικής:

Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κοσιέρης Παναγιώτης, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc, Δρ. Μηχανικός

Μπέλλος Βασίλειος, Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., MSc, Δρ. Μηχανικός

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη υπολογιστικού συστήματος για την  
ανάλυση των λειτουργικών χαρακτηριστικών  
έργων δυναμικής ρύθμισης των υδραγωγείων:  
Η Περίπτωση Του Υδραγωγείου του Μόρνου

Μπουκογιάννης Ευστράτιος

Επιβλέποντες Διπλωματικής:

Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κοσιέρης Παναγιώτης, Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc, Δρ. Μηχανικός

Μπέλλος Βασίλειος, Πολιτικός Μηχανικός Δ.Π.Θ., Επίκουρος Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

*Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.*

---

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Με την εκπόνηση και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, σηματοδοτείται και το τέλος της φοίτησής μου, στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ως εκ τούτου θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους βοήθησαν στην προσπάθειά μου αυτή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της διπλωματικής μου εργασίας τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., τον Δρ. Παναγιώτη Κοσσιέρη και τον Δρ. Βασίλη Μπέλλο. Τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη για την ευκαιρία που μου έδωσε αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και που συνεχίζει να μου δείχνει, καθώς και για την άψογη συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα. Τον Δρ. Παναγιώτη Κοσσιέρη και τον Δρ. Βασίλη Μπέλλο για την έμπρακτη και ουσιαστική συμβολή τους καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου. Η βαθιά τους αγάπη και γνώση για το αντικείμενο σε συνδυασμό με την ατελείωτη όρεξή τους να την μεταδώσουν, υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες για την ανοικοδόμηση του απαιτούμενου υποβάθρου για την εκπόνηση της εν λόγω εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για την στήριξη τους τόσο καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου όσο και στην έναρξη του επόμενου κεφαλαίου, της επαγγελματικής μου σταδιοδρομίας.

Μπουκογιάννης Στρατής

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	8
Abstract .....	10
1. Εισαγωγή.....	11
1.1 Αντικείμενο και Στόχοι .....	11
1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας .....	12
2. Γενική Επισκόπηση.....	14
2.1 Εξωτερικό υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας.....	14
2.2 Υδραγωγείο Μόρνου.....	15
2.3 Ρυθμιστές «Λ».....	18
2.4 Ρυθμιστής $\Lambda_{10}$ .....	21
2.5 Πρακτικές χειρισμού ρυθμιστών $\Lambda$ .....	22
3. Βιβλιογραφική επισκόπηση .....	25
3.1 Συναφείς έρευνες.....	25
3.1.1 Ροή μέσω θυροφράγματος: Wu and Rajaratnam (2015).....	25
3.1.2 Ροή άνωθεν υπερχειλιστή.....	26
4. Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	30
4.1 Θεωρητικό μοντέλο θυροφραγμάτων με υπερχείλιση <sup>(1)</sup> .....	30
4.1 Διόρθωση κατάντη βάθους ροής $\gamma_t$ .....	32
5. Δεδομένα και επεξεργασίες.....	34
5.1 Μετρητικό σύστημα <sup>(1)</sup> .....	34
5.2 Εκτίμηση παραμέτρων .....	37
5.2.1 Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας .....	37
5.2.2 Εκτίμηση συντελεστή υπερχείλισης.....	38
6. Επεξεργασίες.....	39
6.1 Περιγραφή Διεργασιών καθαρισμού δεδομένων .....	39
6.1.1 Φιλτράρισμα και διόρθωση εσφαλμένων τιμών.....	39
6.2 Εύρεση χρονικών παραθύρων .....	45
6.2.1 Εξαγωγή χαρακτηριστικών δεδομένων.....	47
6.2.2 Ανάλυση μεθόδων βαθμονόμησης και γενική ανασκόπηση μεθοδολογιών.....	48

6.3	Κατάστρωση μοντέλου ταυτόχρονης βαθμονόμησης.....	49
6.4	Κατάστρωση μοντέλου διαδοχικής επίλυσης και βαθμονόμησης.....	50
6.4.1	Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης $C_d$ .....	51
6.4.2	Κατάστρωση μοντέλου υπολογισμού $C_{spill}$ .....	52
6.4.3	Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης $C_{spill}$ .....	54
6.4.4	Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης συντελεστή απωλειών $k$ .....	56
6.5	Ανάλυση Διεργασιών προγραμματισμού .....	57
6.5.1	Εισαγωγή .....	57
6.5.2	Εισαγωγή δεδομένων προς επεξεργασία .....	59
6.5.3	Πρώτο στάδιο καθαρίσματος δεδομένων .....	60
6.5.4	Δεύτερο στάδιο αντιμετώπισης ισοπέδωσης σήματος .....	62
6.5.5	Εύρεση διαστημάτων .....	64
6.5.6	Εξαγωγή δεδομένων προς βαθμονόμηση .....	66
6.5.7	Μοντέλο ταυτόχρονης βελτιστοποίησης παραμέτρων ( $C_d$ , $C_{spill}$ , $k$ ).....	67
6.6	Μοντέλο διαδοχικής βαθμονόμησης.....	68
6.6.1	Βαθμονόμηση $C_d$ .....	68
6.6.2	Βαθμονόμηση $C_{spill}$ .....	70
6.6.3	Υπολογισμός $C_{spill}$ .....	71
6.6.4	Γραφική αποτύπωση αποτελεσμάτων.....	71
6.6.5	Συλλογή δεδομένων και εκτύπωση γραφημάτων για ανάλυση αποτελεσμάτων	71
7.	Αποτελέσματα.....	73
7.1	Αρχικά αποτελέσματα.....	73
7.2	Ανάλυση επιρροής διαφοράς ανοίγματος θυροφραγμάτων .....	74
7.3	Ανάλυση επιρροής διάρκειας επεισοδίου .....	76
7.4	Ανάλυση επιρροής υπερχειλίσης.....	79
7.5	Επιρροή τυπικής απόκλισης δεδομένων στάθμης κάθε επεισοδίου .....	83
7.6	Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή υπερχειλιστή $C_{spill}$ .....	87
7.7	Αποτελέσματα βαθμονόμησης συντελεστή υπερχειλίσης.....	89
7.8	Αποτελέσματα ταυτόχρονης βαθμονόμησης παραμέτρων .....	91
8.	Συμπεράσματα .....	92
8.1	Σύνοψη αποτελεσμάτων - Συνολικά συμπεράσματα .....	92

8.2	Γενικά συμπεράσματα – Αποτελέσματα μεθοδολογιών .....	92
8.3	Παρατηρήσεις .....	93
8.4	Περαιτέρω έρευνα .....	94
9.	Βιβλιογραφία.....	95
	Παραρτήματα.....	98
	Παράρτημα 1: Κατάλογος σχεδίων και γραφημάτων.....	98
	Γραφήματα .....	98
	Διαγράμματα.....	99
	Εικόνες.....	99

## Περίληψη

Η διαχείριση του υδραγωγείου του Μόρνου (και κατά προέκταση του συνολικού υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας) μέχρι το 1996 γινόταν από έμπειρα στελέχη της ΕΥΔΑΠ με οδηγό την εμπειρία τους. Εμπειρική διαχείριση σημαίνει την χειροκίνητη ρύθμιση των δικλίδων του υδραγωγείου έπειτα από οπτική επιτήρηση των μετρήσεων και αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης βάσει των προβλέψεων ζήτησης-απολήψεων. Έκτοτε η εταιρεία εκκίνησε ένα σχέδιο εκμοντερνισμού της λειτουργίας του καναλιού μέσω της διαμόρφωσης λεπτομερών κανόνων λειτουργίας που θα συνέβαλαν στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας του, διατηρώντας παράλληλα την ασφάλεια του συστήματος. Μία παράμετρος λειτουργίας του καναλιού αποτελεί ο συντελεστής παροχής  $C_d$  των θυροφραγμάτων που είναι τοποθετημένα στους ρυθμιστές Λ. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αποτύπωση της σχέσης  $C_d$  σε συνάρτηση με το λόγο  $a/H_1$  για το ρυθμιστή  $\Lambda_{10}$  του υδραγωγείου. Η καλύτερη χαρτογράφηση της κατανομής των τιμών του  $C_d$  μπορεί να εξασφαλίσει τον καλύτερο χειρισμό του καναλιού μέσω των υφιστάμενων συστημάτων τηλεχειρισμού. Αυτό, ως επί τω πλείστο, σημαίνει καλύτερη ρύθμιση της παροχής του υδραγωγείου και κατά προέκταση τη δυνατότητα εφαρμογής ενός πιο αυτοματοποιημένου συστήματος διαχείρισης. Η παραπάνω διεργασία εκπονείται μέσω ενός συνόλου διαδικασιών που εκτελούνται σε περιβάλλον προγραμματισμού (MATLAB). Σε πρώτο στάδιο, εκτελείται μία διαδικασία επικύρωσης και καθαρισμού των δεδομένων (data cleaning and validation) και εν συνεχεία απομονώνονται όλα τα διαστήματα της χρονοσειράς στα οποία δεν έχει παρατηρηθεί μεταβολή του ανοίγματος του θυροφράγματος για χρονικό διάστημα δεδομένης διάρκειας. Για κάθε διάστημα υπολογίζεται μία τιμή του  $C_d$  οπότε προκύπτει ένα νέφος τιμών για όλα τα διαστήματα. Οι παραπάνω διαδικασίες εκτελούνται πολλαπλές φορές μέσω βρόγχου εναλλάσσοντας τη διάρκεια του διαστήματος. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την ανάλυση της επιρροής ορισμένων παραγόντων στην απόκλιση της τιμής του  $C_d$  από τις θεωρητικές τιμές αλλά και στη γενικότερη διασπορά του νέφους των τιμών του  $C_d$ , η παραπάνω διαδικασία εκτελείται πολλαπλές φορές απομονώνοντας έναν ή περισσότερους παράγοντες κάθε φορά. Στη συνέχεια εισάγονται επιπλέον παράμετροι στη διαδικασία βαθμονόμησης, όπως ο συντελεστής παροχής του



υπερχειλιστή και ο συντελεστής τοπικών απωλειών του όρου της κινητικής ενέργειας που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου του υπερχειλιστή. Έτσι εκτελείται μία διαδικασία καθολικής βαθμονόμησης όλων των παραπάνω παραμέτρων λειτουργίας είτε μέσω διαδοχικών βαθμονομήσεων (sequential model) είτε μέσω ταυτόχρονης βαθμονόμησης μέσω μίας διαδικασίας βαθμονόμησης τυχαίων συνδυασμών επεισοδίων (Monte Carlo).

## Abstract

The management of the aqueduct of Mornos (and by extension of the total water supply system of Athens) until 1996 was done by experienced executives of EYDAP guided by their experience. Empirical management means the manual adjustment of the aqueduct's valves after visual surveillance of the measurements and evaluation of the current situation based on demand-abstraction forecasts. Since then, the company has launched a plan to modernize the operation of the canal through the formulation of detailed operating rules that would help optimize its operation, while maintaining the security of the system. One operating parameter of the channel is the flow factor  $C_d$  of the gates mounted on the regulators  $L$ . Objective of this paper is to capture the ratio  $C_d$  in relation to the ratio  $a/H_1$  for the regulator L10 of the aqueduct. Better mapping of the distribution of  $C_d$  values can ensure better handling of the channel through existing remote-control systems. This, for the most part, means better regulation of the aqueduct's supply and, by extension, the possibility of implementing a more automated management system. The above process is elaborated through a set of processes that run in a programming environment (MATLAB). In the first stage, a data cleaning and validation process is performed and then all intervals of the time series in which no change in the opening of the gate has been observed for a given period of time are isolated. A value of  $C_d$  is calculated for each interval, resulting in a cloud of values for all intervals. The above procedures are performed multiple times through a loop alternating the duration of the interval. In order to evaluate the results and analyze the influence of certain factors on the deviation of the  $C_d$  value from the theoretical values and on the general dispersion of the cloud of  $C_d$  values, the above procedure is performed multiple times while isolating one or more factors at a time. Additional parameters are then introduced into the calibration process, such as the spillway coefficient and the local loss factor that is used into the spillway hydraulic load calculation. Thus, a global calibration process of all the above-mentioned parameters is performed either through a sequential calibration model or through simultaneous calibration through a calibration process of random combinations of episodes (Monte Carlo).

# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο και Στόχοι

Το εξωτερικό υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας είναι ένα από τα πολυπλοκότερα υδροδοτικά συστήματα στην Ευρώπη. Η πολυπλοκότητα προκύπτει από τις πολλές πηγές επιφανειακού και υπόγειου νερού, τους διαφορετικούς χώρους ταμίευσης και τις εναλλακτικές διαδρομές μεταφοράς του νερού από τις πηγές μέχρι τις μονάδες επεξεργασίας νερού (ΜΕΝ). Επιπρόσθετα ένας ακόμη παράγοντας που συμβάλλει στην πολυπλοκότητα του συστήματος είναι η απομακρυσμένη χωροθέτηση των πηγών από την Αθήνα. Το σύστημα εκτείνεται σε τρία υδατικά διαμερίσματα της χώρας (Αττικής, Ανατολικής Στερεάς Ελλάδας και Δυτικής Στερεάς Ελλάδας), αναπτυσσόμενο σε έκταση της τάξης των 4000 km<sup>2</sup>. Περιλαμβάνει επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους, 4 ταμιευτήρες, γεωτρήσεις, υδραγωγεία, αντλιοστάσια.

Στα υδραγωγεία περιλαμβάνονται όλα τα έργα διασύνδεσης των μονάδων αποθήκευσης με τις μονάδες επεξεργασίας νερού. Οι δύο σημαντικότερες πηγές του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας είναι το σύστημα ταμιευτήρων Ευήνου-Μόρνου και η λίμνη Υλίκη. Κατά τη μεταφορά νερού από την Λίμνη Υλίκη, λόγω της χαμηλότερης στάθμης της λίμνης από τη στάθμη των διυλιστηρίων Γαλατσίου, όπου τελικώς μεταφέρεται το νερό, απαιτείται η άντληση του νερού που είναι ιδιαίτερα δαπανηρή. Αντίθετα, η μεταφορά νερού από τον ταμιευτήρα του Μόρνου γίνεται μέσω της βαρύτητας, παρά την πολύ απομακρυσμένη χωροθέτηση του ταμιευτήρα από τα διυλιστήρια Μενιδίου. Αυτό επιτυγχάνεται διότι ενώ ο ταμιευτήρας βρίσκεται 188χλμ. από τα κοντινότερα διυλιστήρια, το υψόμετρο του ταμιευτήρα (περί τα 450μ.) είναι αρκετά μεγάλο ώστε να επιτρέπει ροή με βαρύτητα σε όλο το μήκος του υδραγωγείου. Μάλιστα, σε ορισμένα σημεία του αγωγού υπάρχει επαρκές δυναμικό για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Συνεπώς οι υδατικοί πόροι διακρίνονται σε πρωτεύοντες που η εκμετάλλευσή τους είναι συνεχής, πρωτίστως λόγω του φτηνότερου κόστους εκμετάλλευσής τους, και δευτερεύοντες, που λόγω αυξημένου κόστους χρησιμοποιούνται μόνο όταν δεν αρκούν οι πρωτεύοντες ή όταν για οποιοδήποτε λόγο (π.χ. υψηλή κατανάλωση, βλάβη υδραγωγείων) δεν είναι εφικτή η έγκαιρη μεταφορά νερού από τους πρωτεύοντες

πόρους στην Αθήνα. Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι θεωρούνται ως εφεδρικοί και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έμμονης ξηρασίας ή έκτακτων περιστατικών (π.χ. βλάβες υδραγωγείων). Στο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας πρωτεύοντες υδατικοί πόροι είναι αυτοί που προέρχονται από το σύστημα ταμιευτήρων Ευήνου-Μόρνου ενώ δευτερεύοντες είναι αυτοί που προέρχονται από τη λίμνη Υλίκη.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το υδραγωγείο του Μόρνου λειτουργεί με ροή βαρύτητας γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με το πολύ μεγάλο μήκος του υδραγωγείου παρουσιάζει πολυπλοκότητα κατά τον χειρισμό του. Ο χειρισμός του καναλιού επιτυγχάνεται μέσω ενός συνόλου ρυθμιστικών αλλά και μετρητικών διατάξεων. Μία από τις διατάξεις ρύθμισης της ροής του καναλιού είναι οι λεγόμενοι «ρυθμιστές Λ» οι οποίοι αποτελούν ένα συνδυασμό θυροφραγμάτων και υπερχειλιστών. Πλησίον των ρυθμιστικών διατάξεων αυτών τοποθετούνται όλες οι μετρητικές διατάξεις οι οποίες μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν μετρητές στάθμης της ροής του καναλιού ανάντη και κατάντη του ρυθμιστή Λ, παροχόμετρο κατάντη του ρυθμιστή και μετρητές ανοίγματος των θυροφραγμάτων. Για την περιγραφή της λειτουργίας των ρυθμιστών Λ απαιτείται ο υπολογισμός του συντελεστή παροχής των θυροφραγμάτων. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η βαθμονόμηση του συντελεστή  $C_d$  που περιγράφει την λειτουργία του ρυθμιστή  $\Lambda_{10}$  με χρήση υπολογιστικών μοντέλων και προγραμματισμού, καθώς και των υπόλοιπων παραμέτρων λειτουργίας όπως ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή καθώς και ο συντελεστής τοπικών απωλειών του όρου της κινητικής ενέργειας που υπεισέρχεται στον υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου του υπερχειλιστή.

### 1.2 Δομή Διπλωματικής Εργασίας

Αρχικά στο **Κεφάλαιο 1** γνωστοποιούνται το αντικείμενο μελέτης και οι στόχοι της εν λόγω εργασίας. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία γενική ανασκόπηση του θέματος όπου παρουσιάζονται σχετικά στοιχεία και δεδομένα με την περιοχή μελέτης, τους ρυθμιστές Λ κ.ο.κ. Στο **Κεφάλαιο 3** εκπονείται μία βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία παρουσιάζονται συναφείς έρευνες και μεθοδολογίες. Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο με τις μεθόδους ανάλυσης όπου εφαρμόζονται και αναλύεται η επιλεγείσα μέθοδος ανάλυσης. Στη συνέχεια στο **Κεφάλαιο 5** περιγράφεται ο τρόπος συλλογής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η δομή του μετρητικού

συστήματος. Στο **Κεφάλαιο 6** αναλύονται οι επιμέρους διεργασίες που εκτελούνται για την βαθμονόμηση των συντελεστών παροχής των θυροφραγμάτων αλλά και του συντελεστή παροχής του υπερχειλιστή. Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται ανασκόπηση των αποτελεσμάτων και η εξαγωγή των συμπερασμάτων για κάθε εξεταζόμενη παράμετρο. Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζονται συνοπτικά τα συμπεράσματα που εξήχθησαν στις επιμέρους ενότητες του κεφαλαίου 7, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου 8 αναλύονται ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο θέμα της μοντελοποίησης των ρυθμιστών Λ.

## 2. Γενική Επισκόπηση

### 2.1 Εξωτερικό υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας

Το εξωτερικό υδροδοτικό σύστημα (ΕΥΣ) της Αθήνας αποτελεί το σύστημα φυσικών πόρων και τεχνικών έργων που υδρεύουν την Αθήνα. Μεταξύ άλλων στο (ΕΥΣ) περιλαμβάνονται:

- υδατικοί πόροι: επιφανειακοί και υπόγειοι·
- έργα αποθήκευσης επιφανειακού νερού (ταμιευτήρες, φράγματα)·
- έργα άντλησης υπόγειου νερού (γεωτρήσεις)·
- εξωτερικά υδραγωγεία·
- έργα διαχείρισης υδραγωγείων (αντλιοστάσια, ρυθμιστές ροής)·
- μονάδες επεξεργασίας νερού·
- μικρά υδροηλεκτρικά έργα·
- δίκτυο διασύνδεσης μονάδων επεξεργασίας.

Οι κύριοι υδατικοί πόροι του ΕΥΣ της Αθήνας προέρχονται από τους ταμιευτήρες Ευήνου Μόρνου με λεκάνες απορροής 350 km<sup>2</sup> και 557 km<sup>2</sup> αντίστοιχα και μέση ετήσια εισροή 322 hm<sup>3</sup> και 319 hm<sup>3</sup> αντίστοιχα. Παράλληλα η λίμνη της Υλίκης υδρεύεται μέσω της λεκάνης του βοιωτικού Κηφισού έκτασης 2400 km<sup>2</sup> με μέση ετήσια εισροή 353 hm<sup>3</sup>. Ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα υδρεύεται από τη λεκάνη απορροής του Χαράδρου έκτασης 120 km<sup>2</sup> παρέχοντας μέση ετήσια εισροή της τάξης των 10 hm<sup>3</sup>. Ο ταμιευτήρας Ευήνου, μέσω σήραγγας μήκους 29 km μέγιστης παροχετευτικότητας 27 m<sup>3</sup>/s, εκτρέπει νερό στον ταμιευτήρα του Μόρνου. Από τον ταμιευτήρα του Μόρνου μέσω του ομώνυμου υδραγωγείου μεταφέρεται το νερό στην Αθήνα. Η Λίμνη Υλίκη όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αποτελεί δευτερεύοντα υδατικό πόρο λόγω του υψηλού κόστους άντλησης των υδάτων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το υδραγωγείο της Υλίκης έχει συνολικό μήκος 63.7 km με μέγιστη παροχετευτικότητα της τάξης των 7.5 m<sup>3</sup>/s και συνολική εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίων της τάξης των 50MW. Ο ταμιευτήρας του Μαραθώνα λόγω της μικρής

του χωρητικότητας συγκριτικά με τους υπόλοιπους αποτελεί την κύρια αποθήκη ασφαλείας του υδροδοτικού συστήματος κυρίως λόγω της εγγύτητας του προς την Αθήνα. Τα κυριότερα υδραγωγεία του ΕΥΣ της Αθήνας είναι η σήραγγα Ευήνου - Μόρνου, το υδραγωγείο του Μόρνου, το υδραγωγείο της Υλίκης και το ενωτικό υδραγωγείο Μόρνου - Μαραθώνα. Από τις παραπάνω Η παρούσα εργασία εστιάζει στο υδραγωγείο του Μόρνου στον ρυθμιστή Λ<sub>10</sub> στα 130km και 959m του υδραγωγείου ο οποίος βρίσκεται στον δήμο Μάνδρας – Ειδυλλίας στο μεσοδιάστημα των Ερυθρών και της Θήβας.

## 2.2 Υδραγωγείο Μόρνου

Από τον ταμιευτήρα του Μόρνου ξεκινάει ο υδαταγωγός Μόρνου, μήκους 188 km από την υδροληψία του μέχρι τα διυλιστήρια Μενιδίου, που αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών έργων (σήραγγες, ανοιχτές διώρυγες, ανεστραμμένους σίφωνες). Η ρύθμιση της ροής στο υδραγωγείο γίνεται μέσω εγκατεστημένων ρυθμιστών ροής, οι οποίοι διακρίνονται στα Έργα Καταστροφής Ενέργειας (ΕΚΕ, τοποθετημένα στην έξοδο των σηράγγων υπό πίεση), στους μεριστές (σε διακλαδώσεις των υδραγωγείων) και στα συστήματα ελέγχου ροής τύπου "Λ" (συνδυασμοί θυροφραγμάτων και υπερχειλιστών, σε ανοιχτές διατομές). Με τα έργα αυτά είναι δυνατό να αποθηκευτεί νερό σε περίπτωση ατυχήματος ή βλάβης των υδραγωγείων. Έτσι, είναι δυνατό να αποθηκευτεί στις διώρυγες όγκος νερού 1.15 hm<sup>3</sup>, στις σήραγγες 0.7 hm<sup>3</sup> και στους σίφωνες 0.06 hm<sup>3</sup>. Συνολικά αποθηκεύονται 1.91 hm<sup>3</sup>. Εκτός από την ύδρευση της Αθήνας, ο υδαταγωγός Μόρνου χρησιμοποιείται και για την ύδρευση της Άμφισσας, των Ερυθρών, των Πλαταιών, των Βιλίων, της Οινόης, των Λεύκτρων, του Διστόμου, των Στείρων, της Ελλοπίας, της Ξηρονομής, του Προφήτη Ηλία, του Κυριακίου, της Θίσβης και της Δόμβραιννας<sup>(1)</sup>. Καλύπτει ημερήσιες ανάγκες κατανάλωσης των οικισμών αυτών ύψους 13.000 m<sup>3</sup>, με εγκατεστημένη ισχύ αντλιοστασίων περίπου 2.000 και δίκτυο κλειστών αγωγών συνολικού μήκους 50 km. Στο 146<sup>ο</sup> km της διαδρομής του, ο αγωγός διακλαδίζεται στο μεριστή Κιθαιρώνα και ο κύριος κλάδος συνεχίζει προς τα διυλιστήρια Μάνδρας και Μενιδίου μέσω της σήραγγας Κιθαιρώνα, ενώ ο δευτερεύον κλάδος, (που είναι περισσότερο γνωστός με το όνομα Ενωτικό

Υδραγωγείο Μόρνου - Μαραθώνα) κατευθύνεται προς το παλιό Υδραγωγείο Υλίκης - Μαραθώνα μέσω του ΕΚΕ Κλειδιού. Το υδραγωγείο άρχισε να κατασκευάζεται από το 1969, ενώ βρίσκεται σε λειτουργία από το 1981. Στην περίοδο λειτουργίας του εμφάνισε σημαντικά προβλήματα (διαρροές, καταρρεύσεις τμημάτων, υδραυλική επάρκεια) πολλά από τα οποία αντιμετωπίστηκαν ή έχει ήδη δρομολογηθεί η αντιμετώπισή τους.

Ο έλεγχος και η διαχείριση του υδραγωγείου του Μόρνου γίνεται μέσω τριών συστημάτων, τα οποία λειτουργούν σε αλληλουχία. Το πρώτο σύστημα αποτελείται από τους Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (Programmed Logical Controllers (PLC)). Οι ελεγκτές αυτοί στην ουσία αποτελούν πολλούς μικροϋπολογιστές, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κάθε θέση ρύθμισης και μέτρησης της ροής. Σκοπός τους είναι να δέχονται και να αποθηκεύουν τα απαραίτητα δεδομένα, όπως π.χ. το άνοιγμα των θυροφραγμάτων αν πρόκειται για θέση ρύθμισης ή τη στάθμη και την παροχή (π.χ. μέσω αισθητήριου και συσκευής ACDP αντίστοιχα) αν πρόκειται για θέση μέτρησης. Το Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)), συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες από τους επιμέρους ελεγκτές και τις μεταφέρει στο Γενικό Κέντρο Τηλεέλεγχου του υδραγωγείου που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΕΥΔΑΠ στο Μενίδι<sup>(1)</sup>. Τα δεδομένα όπου αξιοποιούνται στην παρούσα εργασία είναι τα δεδομένα που συλλέγονται από τους Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές και μεταφέρονται μέσω του SCADA στο Κέντρο Τηλεέλεγχου. Το Σύστημά Δυναμικής Ρύθμισης (DANAIS) είναι ο αποδέκτης όλων των πληροφοριών και με βάση τις συνθήκες στο δίκτυο προβαίνει σε δυναμική ρύθμιση του υδραγωγείου κάθε 15 min και ορίζει τις νέες θέσεις των θυροφραγμάτων. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως διαδικασία τηλεέλεγχου. Αφού το DANAIS ορίσει τις νέες θέσεις των θυροφραγμάτων, το SCADA αναλαμβάνει να μεταφέρει τα απαραίτητα σήματα στους ελεγκτές, οι οποίοι και υλοποιούν τις αποφάσεις του DANAIS<sup>(1)</sup>. Η διαδικασία αυτή χαρακτηρίζεται ως διαδικασία τηλεχειρισμού.





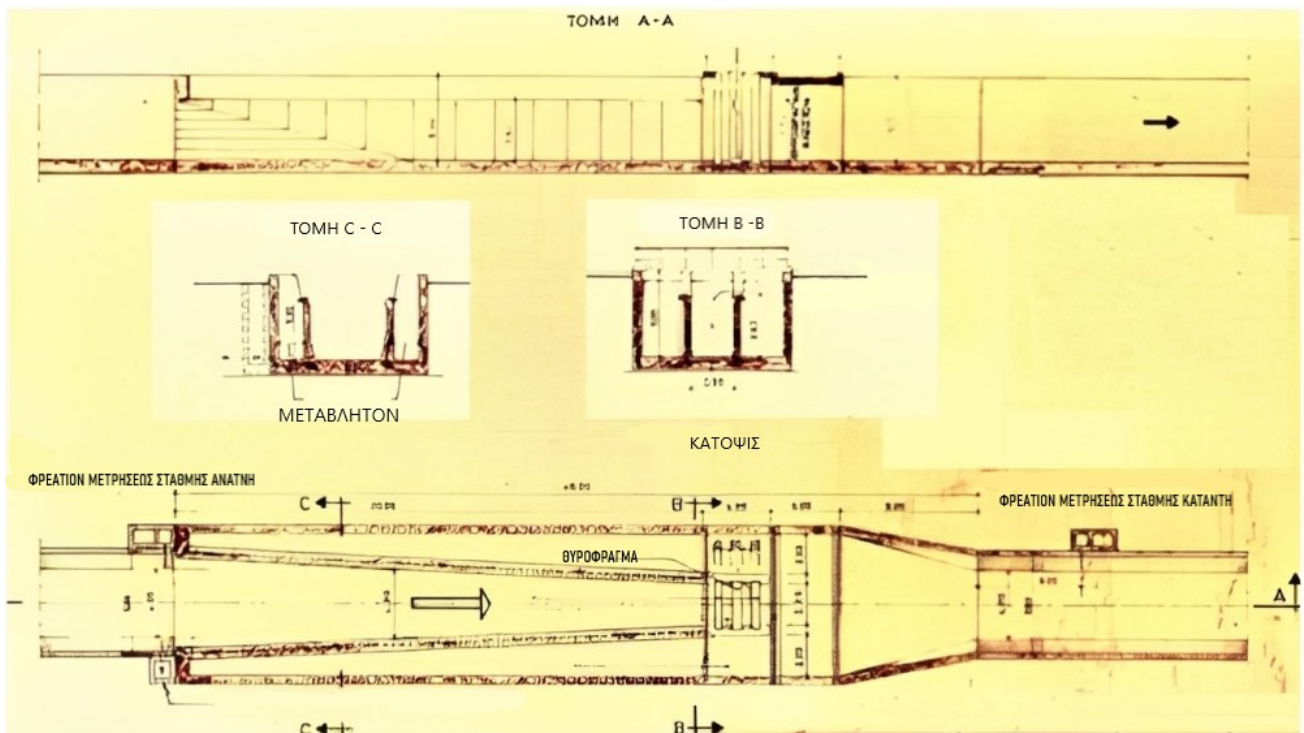
**Εικόνα 2.1:** Όψη υδραγωγείου.



**Εικόνα 2.2:** Όψη υδραγωγείου.

### 2.3 Ρυθμιστές «Λ»

Οι ρυθμιστές Λ αποτελούν μία διάταξη ρύθμισης ροής σε αγωγούς όπου η ροή γίνεται με ελεύθερη επιφάνεια. Αποτελούνται από ένα ή και περισσότερα θυροφράγματα (συνήθως τουλάχιστον δύο ώστε σε περίπτωση βλάβης να διατηρείται η ικανότητα ρύθμισης της ροής), και δύο πλευρικούς υπερχειλιστές πάνω από τους οποίους διαφεύγει η ροή σε περίπτωση όπου υπάρξει ανύψωση στάθμης πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή.



**Σχέδιο 1:** Σχέδιο ρυθμιστή Λ από την ΕΥΔΑΠ. Φύλλο Δ3269Ε



**Εικόνα 2.3:** Όψη ρυθμιστή Λ9Α.



**Εικόνα 2.4:** Όψη ρυθμιστή Λ10.





**Εικόνα 2.5:** Όψη ρυθμιστή Λ8.



**Εικόνα 2.6:** Όψη ρυθμιστή Λ9, με πλευρική υπερχειλίση.

#### 2.4 Ρυθμιστής Λ<sub>10</sub>

Ο ρυθμιστής Λ<sub>10</sub> βρίσκεται στο 131<sup>ο</sup> km (130.96) του καναλιού σε πεδινή περιοχή όπου η κοίτη του καναλιού είναι τραπεζοειδής με πλάτος  $b = 4\text{m}$  και κλίση πρανών 1:1.5. Στην περιοχή του ρυθμιστή η διατομή του καναλιού μετασχηματίζεται από τραπεζοειδή σε ορθογωνική πλάτους 4.4m. Οι ακριβείς συντεταγμένες του Λ<sub>10</sub> σε WGS-84 σύστημα είναι 38°15'10.2"N, 23°20'33.1"E. Βρίσκεται 5.7km κατάντη του Λ<sub>9</sub> και 4.79km ανάντη του Λ<sub>11</sub>. Έχει δύο όμοια και παράλληλα θυροφράγματα πλάτους 2.2m έκαστο και ύψους 2.23m. Ο βασικότερος λόγος ύπαρξης των δύο θυροφραγμάτων είναι ώστε να διατηρείται η δυνατότητα χειρισμού του καναλιού σε περίπτωση βλάβης ενός εκ των δύο. Ανάντη των θυροφραγμάτων έχουν κατασκευαστεί δύο πλευρικοί υπερχειλιστές μήκους 30m έκαστος, οπότε κάθε ρυθμιστής έχει συνολικό μήκος υπερχειλιστών 60m. Η διάταξη των ρυθμιστών έχει ως εξής, στο μέσον του καναλιού βρίσκονται τοποθετημένα τα δύο θυροφράγματα, συνεπώς από το μέσον του καναλιού το κάθε θυροφράγμα εκτείνεται 2.2m αριστερά και δεξιά αντίστοιχα, κάθετα στον άξονα του καναλιού. Στα άκρα του καναλιού είναι τοποθετημένοι οι δύο υπερχειλιστές οι οποίοι εκτείνονται πλαγίως έως ότου καταλήξουν στο πλαϊνό άκρο του κάθε θυροφράγματος. Η κλίση πυθμένα του καναλιού στην περιοχή του Λ<sub>10</sub> είναι  $J=0.0003$ .

Στον ρυθμιστή διακρίνεται ανάπτυξη βρύων επί των πλευρικών υπερχειλιστών γεγονός όπου δυνητικά επηρεάζει την λειτουργία του καθώς και τη σταθερά όπου περιγράφει τη λειτουργία του καθώς και τη σταθερά τραχύτητας  $n$  στην περιοχή του Ρυθμιστή.



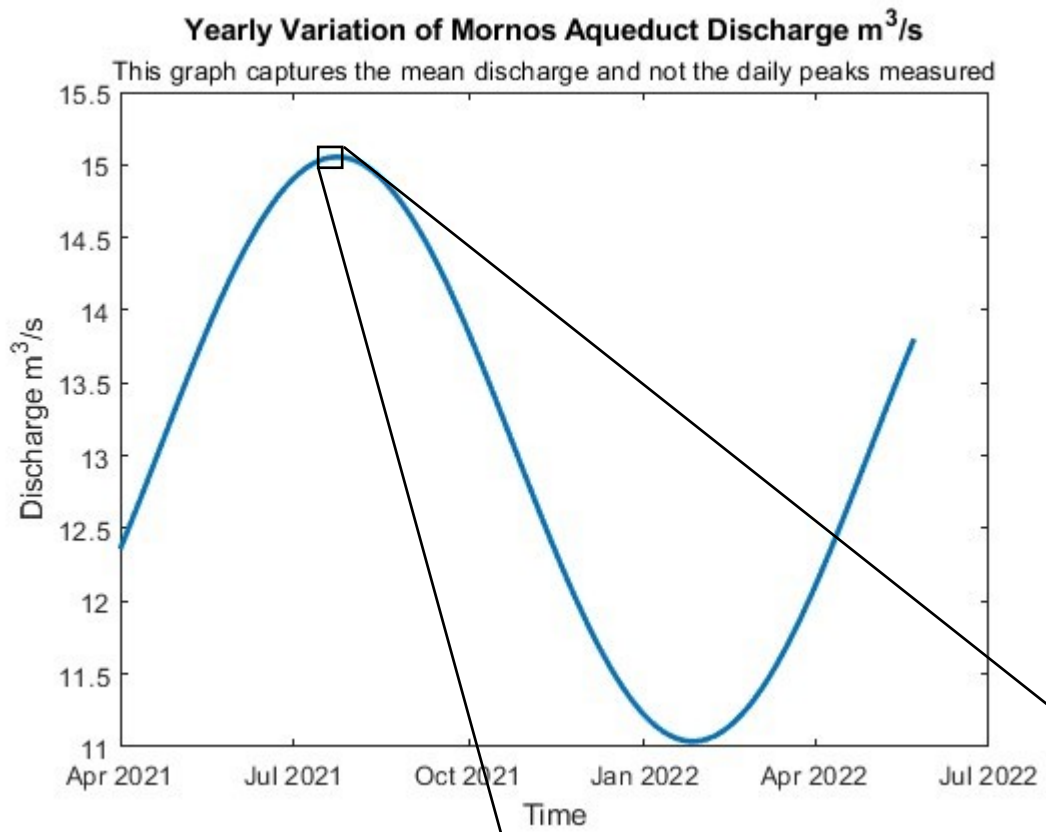
Εικόνα 2.7: Διάταξη ρυθμιστή Λ.

### 2.5 Πρακτικές χειρισμού ρυθμιστών Λ

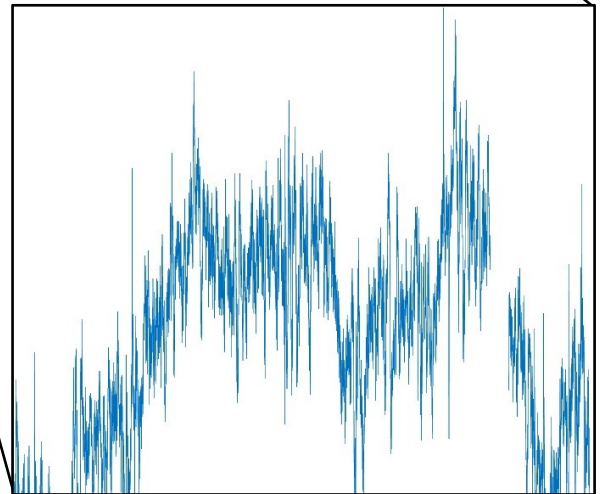
Σύμφωνα με μελέτη η οποία εξέταζε την βελτιστοποίηση ενός τμήματος του καναλιού από τον Λ7 έως τον Λ11 που εκπονήθηκε από τον τομέα Υδατικών Πόρων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, συγκεντρώθηκαν ορισμένες πληροφορίες έπειτα από συναντήσεις με τους χειριστές του καναλιού. Οι πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Κίνηση των θυροφραγμάτων διενεργείται στις παρακάτω περιπτώσεις:
  - i. Όταν έρθει εντολή αύξησης ή μείωσης της παροχής από τα διυλιστήρια. Συνήθως αυτή είναι της τάξης του  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  και κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η μεταβολή είναι συχνή.
  - ii. Όταν παρατηρείται από τους μετρητές απόκλιση από την επιθυμητή παροχή κατά μήκος του καναλιού.
    - Μεγαλύτερη παροχή συνήθως καταγράφεται κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω βροχόπτωσης
    - Μικρότερη παροχή συνήθως τους θερινούς μήνες λόγω κλοπής νερού από το κανάλι για άρδευση των παρακείμενων εκτάσεων
  - iii. Όταν διακόπτεται η ροή στο κανάλι για εργασίες συντήρησης, και απαιτείται αποθήκευση νερού στα κατάντη.

- Στην περίπτωση [i]:
  - Εντολή λαμβάνει πρώτα το ΕΚΕ Γκιώνας για να ανοίξει ή να κλείσει τη βάννα, ώστε να αυξηθεί ή να μειωθεί η παροχή (στην τιμή που έχουν δώσει τα διυλιστήρια), αντίστοιχα.
  - Ταυτόχρονα, ανοίγει ή κλείνει η βάννα στον Κιθαιρώνα (κατάντη του Λ11), για να δώσει άμεσα την παροχή που έχουν ζητήσει τα διυλιστήρια.
  - Γίνεται κίνηση στα θυροφράγματα Λ7 – Λ11 για να αποκατασταθεί η ζητούμενη παροχή στον Κιθαιρώνα πιο άμεσα.
- Στην περίπτωση [ii]:
  - Δίνεται εντολή στο ΕΚΕ Γκιώνας να ανοίξει ή να κλείσει η βάννα για να αυξήσουν ή να μειώσουν την παροχή, αντίστοιχα.
  - Δεν γίνεται κίνηση στη βάννα του Κιθαιρώνα
  - Γίνεται κίνηση στα θυροφράγματα Λ7 – Λ11 για να αποκατασταθεί η ζητούμενη πιο άμεσα.
- Μετά από κίνηση στα θυροφράγματα, η αποκατάσταση της ροής στο τμήμα Λ11 – Κιθαιρώνας λαμβάνει χώρα περίπου 3 ώρες (για παροχή 12 m<sup>3</sup>/s) μετά την κίνηση στον Λ11.
- Σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται ταυτόχρονη κίνηση σε όλα τα Λ, από τα κατάντη προς τα ανάντη.
- Περίπου το 80% των συνολικών κινήσεων που γίνονται στα θυροφράγματα σε ένα έτος, συμβαίνει τις ημέρες του Πάσχα. Την Μ. Εβδομάδα μπορεί τα διυλιστήρια να ζητάνε αύξηση (συνήθως ανά 0.5 m<sup>3</sup>/s) ανά μια ώρα.
- Οι ρυθμιστές Λ7 και Λ9 που δεν διαθέτουν τηλεχειρισμό, μένουν μόνιμα κλειστά, και δουλεύουν σε καθεστώς υπερχειλίσης, ώστε να αποθηκεύουν τη μέγιστη δυνατή ποσότητα νερού.



**Γράφημα 2.1:** Ετήσια διακύμανση παροχής υδραγωγείου





### 3. Βιβλιογραφική επισκόπηση

#### 3.1 Συναφείς έρευνες

Στα παρακάτω εδάφια εκπονείται βιβλιογραφική ανασκόπηση συναφών μεθοδολογιών και ερευνών. Γενικά, η ροή μέσα από θυροφράγμα αλλά και οι υπερχειλιστές τύπου Ogee αποτελούν αρκετά ερευνημένα θέματα με πολλές δημοσιεύσεις και παραπομπές στην διεθνή βιβλιογραφία. Αντίθετα, ο συνδυασμός των δυο διατάξεων για τη δημιουργία μίας ρυθμιστικής δικλείδας παρουσιάζει σημαντικά περιορισμένη βιβλιογραφία. Για τον λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν οι σημαντικότερες βιβλιογραφίες των επιμέρους διατάξεων ξεχωριστά (θυροφράγματα, υπερχειλιστές).

##### 3.1.1 Ροή μέσω θυροφράγματος: Wu and Rajaratnam (2015)

Το 2015 οι S. Wu και N. Rajaratnam δημοσίευσαν στο *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* του *American Society of Civil Engineers*, (December 2015 | Volume 141, Issue 12) μία ανάλυση συντελεστών παροχής για ροή δια μέσου θυροφράγματος σε ορθογωνική διατομή. Η εν λόγω ανάλυση περιγράφει μεθοδολογίες άμεσου υπολογισμού, ή υπολογισμού μέσω επαναληπτικών εξισώσεων, τεσσάρων προβλημάτων βυθισμένης ροής δια μέσου θυροφραγμάτων. Τα προβλήματα που αναλύονται είναι τα εξής:

1. εύρεση παροχής ανά μονάδα πλάτους ( $q$ ) για δεδομένο άνοιγμα θυροφράγματος ( $a$ ), ανάντη στάθμη ( $H_1$ ) και κατάντη στάθμη ( $y_t$ ) μετρούμενη σε περιοχή όπου έχει γίνει εξομάλυνση της ροής
2. εύρεση ανάντη βάθους ροής  $H_1$  για δεδομένα  $q$ ,  $a$  και  $y_t$
3. εύρεση κατάντη βάθους ροής  $y_t$  για δεδομένα  $q$ ,  $a$  και  $H_1$
4. εύρεση του ανοίγματος θυροφράγματος  $a$  για δεδομένο  $q$ ,  $H_1$  και  $y_t$

Επιπρόσθετα το άρθρο περιέχει μεθοδολογία ταυτοποίησης της κατάστασης ροής κατάντη (ελεύθερη ροή ή βυθισμένη ροή) για δεδομένες τιμές τριών από τις τέσσερις μεταβλητές ( $q$ ,  $a$ ,  $H_1$  και  $y_t$ ).

Από τα παραπάνω σημεία αξιοποιείται η μεθοδολογία (1) μέσω της οποίας υπολογίζεται η ροή των θυροφραγμάτων. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.1 όπου αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας διπλωματικής.

### 3.1.2 Ροή άνωθεν υπερχειλιστή

Υπάρχουν διάφορα μοντέλα που περιγράφουν την ροή υδάτων άνωθεν υπερχειλιστή όπως υπάρχουν και πολλοί τύποι υπερχειλιστών (π.χ. λεπτής στέψης, ευρείας στέψης, τύπου Ogee κ.ο.κ.). Οι ρυθμιστές στο υδραγωγείο του Μόρνου έχουν υπερχειλιστές τύπου Ogee, επομένως παρακάτω παρουσιάζονται τα επικρατέστερα μοντέλα που περιγράφουν υπερχειλιστές τύπου Ogee.

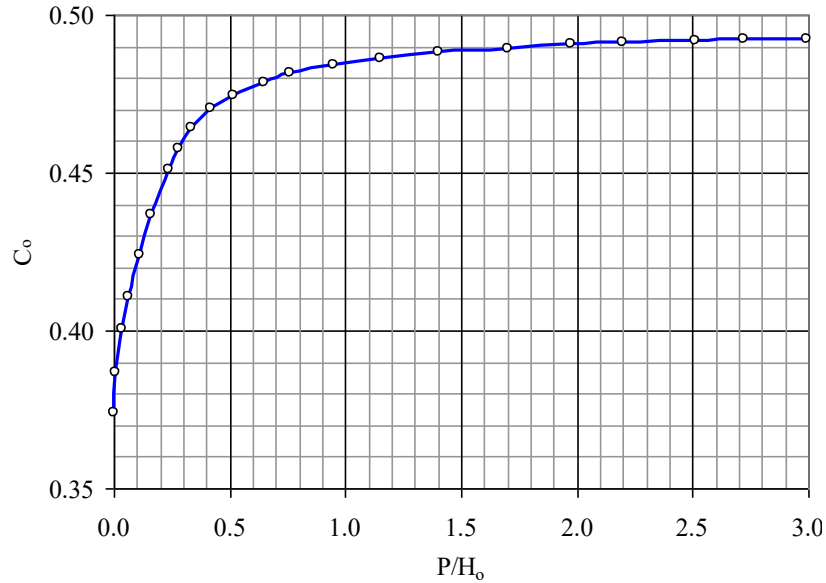
Σύμφωνα με τις σημειώσεις *Υδραυλικής των ανοικτών αγωγών και ποταμών*, 7<sup>ο</sup> Εξάμηνο Πολιτικών Μηχανικών η κύρια σχέση που περιγράφει την παροχή υπερχειλισής άνωθεν υπερχειλιστή τύπου Ogee είναι:

$$Q_0 = C_0 L \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}} \quad \text{όπου} \quad H_0 = H_1 + k * \frac{V^2}{2g} - h_{sluice}$$

(3.1),(3.2)

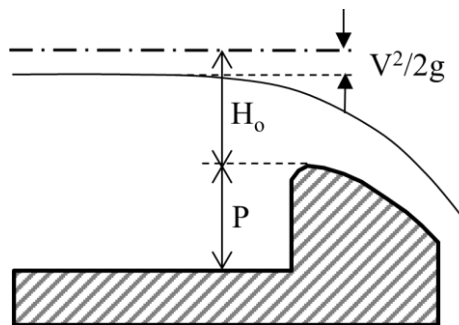
Όπου:

- ❖  $Q_0$  : η παροχή σχεδιασμού υπερχειλιστή
- ❖  $C_0$  : ο συντελεστής παροχής ο οποίος λαμβάνεται από το Γράφημα 3.1
- ❖  $L$  : το μήκος υπερχειλιστή
- ❖  $H_0$  : το υδραυλικό φορτίο ανάντη του υπερχειλιστή
- ❖  $H_1$  : η στάθμη υδάτων ανάντη του υπερχειλιστή
- ❖  $k$  : ο συντελεστής τοπικών απωλειών
- ❖  $V$  : η ταχύτητα ροής υδάτων ανάντη του υπερχειλιστή
- ❖  $g$  : η παγκόσμια σταθερά επιτάχυνσης της βαρύτητας
- ❖  $h_{sluice}$  : το ύψος θυροφράγματος το οποίο ταυτίζεται με τη στάθμη στη στέψη του υπερχειλιστή



**Γράφημα 3.1:** Συντελεστής παροχής ελεύθερου υπερχειλιστή

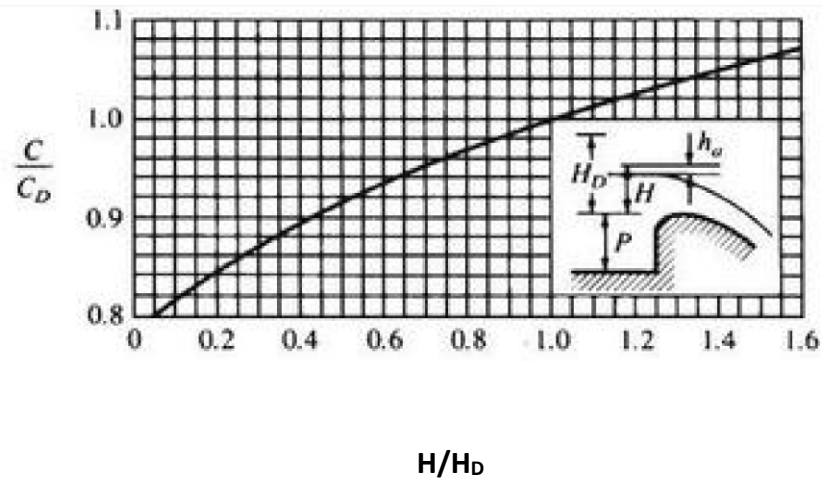
Όπως φαίνεται στο **Γράφημα 3.1** ο συντελεστής παροχής του Ogee σχετίζεται με τον λόγο  $P/H_0$ , όπου  $P$  το ύψος της κατακόρυφης ανάντη παρειάς του υπερχειλιστή.



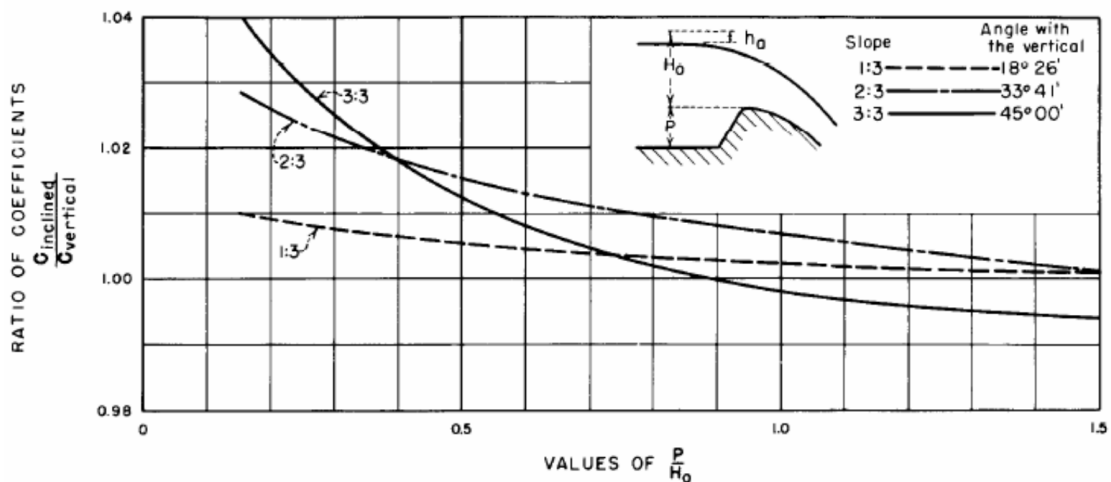
**Σχέδιο 2:** Γεωμετρικά και υδραυλικά μεγέθη υπερχειλιστή τύπου ogee με κατακόρυφη ανάντη παρειά.

Ο συντελεστής  $C_0$  που προκύπτει από το **Γράφημα 3.1** υπόκειται σε διόρθωση εφόσον αυτή απαιτείται. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που το ύψος ενέργειας πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή είναι διαφορετικό από το  $H_0$  με βάση το οποίο έχει σχεδιαστεί, ο συντελεστής παροχής μεταβάλλεται δεδομένου ότι σε περίπτωση μεγαλύτερης παροχής ( $H > H_0$ ) υπάρχει αποκόλληση λόγω υποπίεσης στην περιοχή της στέψης και επομένως  $C > C_0$ , ενώ στην περίπτωση μικρότερης παροχής από την παροχή σχεδιασμού έχουμε υπερπίεση στην περιοχή της στέψης και μείωση του συντελεστή παροχής. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται ο λόγος  $C/C_0$  σαν συνάρτηση του  $H/H_0$ . Εκτός από τη μεταβολή στην παροχή, ο συντελεστής παροχής  $C_0$  πρέπει να διορθωθεί όταν η κλίση του τοίχου του Ogee δεν είναι  $90^\circ$  (κατακόρυφος τοίχος) αλλά διαφορετική. Στο

διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται ο λόγος  $C_0'/C_0$  σε περίπτωση κεκλιμένου ανάντη τοίχου ( $C_0'$  είναι ο διορθωμένος συντελεστής) σαν συνάρτηση του λόγου  $P/H_0$  για κλίσεις 1:3, 2:3 και 1:1<sup>(1)</sup>. Οι δύο παραπάνω διορθώσεις αποτυπώνονται από τα **Γραφήματα 3.2 και 3.3**.



**Γράφημα 3.2:** Διορθωτικός συντελεστής  $C_0$  λόγω αποκόλλησης της ροής σε παροχές μεγαλύτερες της  $Q_d$



**Γράφημα 3.3:** Διορθωτικός συντελεστής λόγω λοξότητας της ανάντη παρειάς υπερχειλιστή

Βέβαια, είναι σύνηθες σε κάποιες περιπτώσεις ο όρος  $k * \frac{V^2}{2g}$  να αμελείται, καθώς σε ορισμένες κατασκευές η διαμόρφωση της συναρμογής από τραπεζοειδή σε τετραγωνική διατομή στην οποία η ροή γίνεται ολόενα και περισσότερο εμποδιζόμενη (από τα θυροφράγματα, και τους υπερχειλιστές), με αποτέλεσμα να παρατηρείται σχετική

επιβράδυνση της ροής και ο όρος  $k * \frac{V^2}{2g}$  να αμελείται. Τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις η σχέση (3.1) μπορεί να απλοποιηθεί στην παρακάτω μορφή:

$$Q = \kappa L H^\lambda$$

(3.3)

Όπου  $\kappa$ ,  $\lambda$  συντελεστές που μπορούν να βαθμονομηθούν κατάλληλα από μετρήσεις.

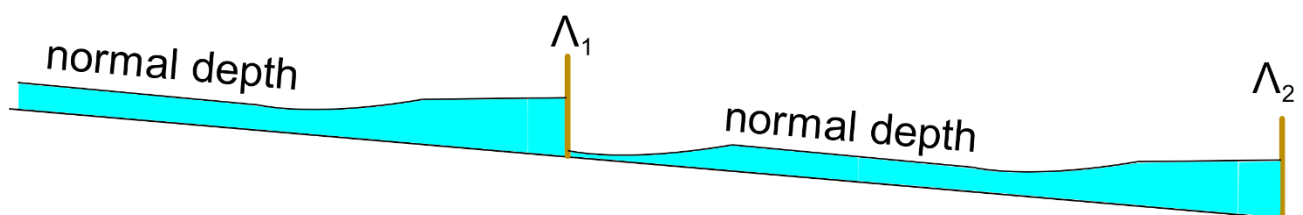
## 4. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 4.1 Θεωρητικό μοντέλο θυροφραγμάτων με υπερχειλίση<sup>(1)</sup>

Οι βασικές υδραυλικές αρχές πάνω στις οποίες στηρίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι οι παρακάτω:

1. Μόνιμη και ανομοιόμορφη ροή (βαθμιαία και ραγδαία μεταβαλλόμενη)
2. Ταχύτητα διάδοσης κυματισμών
3. Ροή μέσω θυροφράγματος
4. Ροή άνωθεν υπερχειλιστή

Η ροή στον αγωγό του Μόρνου θεωρείται ότι είναι μόνιμη, εφόσον για εύλογο χρονικό διάστημα δεν έχει γίνει καμία μεταβολή της παροχής στην είσοδο του αγωγού, και ανομοιόμορφη, εφόσον ο αγωγός έχει μεταβλητή κατά μήκος κλίση, αποτελείται από διαμέτρους με μεταβλητή γεωμετρία, ενώ κατά μήκος περιλαμβάνονται και οι διάφορες υδραυλικές διατάξεις τύπου Λ. Σε γενικές γραμμές είναι δυνατόν να θεωρηθεί ότι το βάθος ροής κατά μήκος του αγωγού είναι το ομοιόμορφο βάθος (για δεδομένη την παροχή) μέχρι την περιοχή ανάντη της εκάστοτε υδραυλικής διάταξης τύπου Λ, όπου η ροή γίνεται βαθμιαία ανομοιόμορφη και έχει τη μορφή της καμπύλης M1, όπου βάθος ροής  $y > y_n > y_c$ , όπου  $y_n$  το ομοιόμορφο βάθος (ή κανονικό βάθος) και  $y_c$  το κρίσιμο βάθος. Στη συνέχεια και εφόσον έχει δημιουργηθεί το βυθισμένο υδραυλικό άλμα στην περιοχή αμέσως κατάντη του θυροφράγματος (ραγδαία μεταβαλλόμενη ανομοιόμορφη ροή), η ροή γίνεται και πάλι ομοιόμορφη, κ.ο.κ. Αυτή η αλληλουχία καλύπτει όλο το υπό μελέτη τμήμα. Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 απεικονίζεται η γενική αυτή διάταξη της ροής.



**Σχήμα 4.1:** Γενική διάταξη ροής στον αγωγό του Μόρνου

(1) Παρατίθεται αυτούσιο από την μελέτη που έγινε από τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΕΜΠ στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Fiware4Water που εξετάζε την λειτουργία του τμήματος Λ7 - Λ11 του υδραγωγείου

Εφόσον πραγματοποιηθεί κάποια ενέργεια στα θυροφράγματα (άνοιγμα ή κλείσιμο), η ροή πλέον μετατρέπεται σε μη μόνιμη, καθότι η παροχή μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το χρόνο. Με το πέρας της εκάστοτε ενέργειας, δημιουργείται ένα κύμα το οποίο προελαύνει και προς τα ανάντη (με ταχύτητα  $c-V$ ), και προς τα κατόντη (με ταχύτητα  $c+V$ ) όπου  $c$  η ταχύτητα διάδοσης κυματισμού. Η ταχύτητα διάδοσης κυματισμών είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

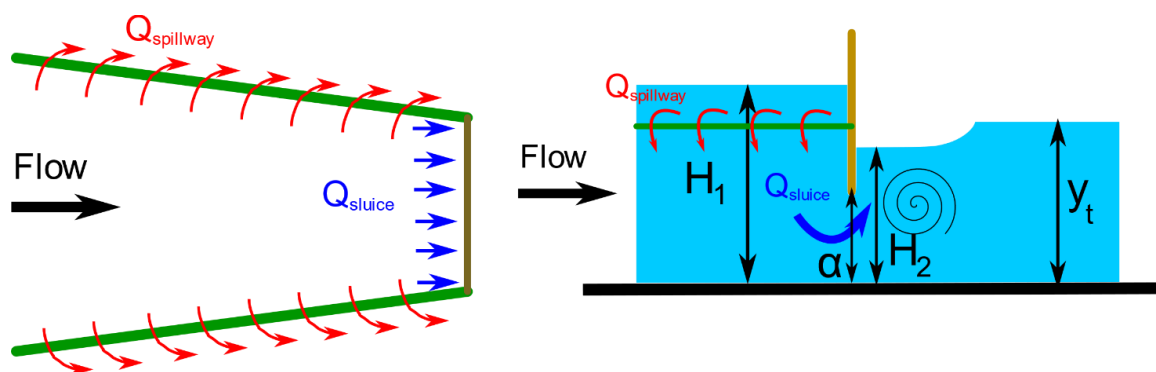
$$c = \sqrt{gD} \quad (2.1)$$

όπου  $D$  το ισοδύναμο υδραυλικό βάθος το οποίο είναι ίσο με το λόγο του εμβαδού της υγρής διατομής  $A$  προς το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας ροής  $T$ . Η ταχύτητα ροής μπορεί να υπολογιστεί με την εξίσωση ροής για μόνιμη και ομοιόμορφη ροή κατά Manning, όπου:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} \quad (2.2)$$

όπου  $R$  η υδραυλική ακτίνα (ίση με το λόγο του εμβαδού της υγρής διατομής  $A$  προς το μήκος της υγρής περιμέτρου  $P$ ) και  $S_f$  η κλίση της γραμμής ενέργειας η οποία μπορεί να ληφθεί ίση με την κλίση του πυθμένα  $S_0$ .

Φεύγοντας από την κλίμακα του αγωγού και εστιάζοντας στην κλίμακα της κάθε υδραυλικής διάταξης, η ροή σε κάθε διάταξη τύπου  $\Lambda$  απαρτίζεται από δύο μέρη: α) ροή μέσω θυροφράγματος και β) ροή άνωθεν του υπερχειλιστή. Συγκεκριμένα, όταν το βάθος ανάντη του θυροφράγματος ξεπεράσει κάποιο κατώφλι, τότε υπάρχει πλευρική υπερχειλίση από υπερχειλιστή τύπου ogee. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζεται τόσο σε κάτοψη όσο και σε τομή, μία γενική άποψη της διάταξης τύπου  $\Lambda$ .



**Σχήμα 4.2:** Κάτοψη και τομή διάταξης τύπου  $\Lambda$

Η ροή μέσω θυροφράγματος μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση (για βυθισμένο άλμα):

$$Q_{sluice} = C_d a b \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad (2.3)$$

όπου  $Q_{sluice}$  η παροχή μέσω υπερχειλιστή,  $b$  το πλάτος της διατομής,  $C_d$  συντελεστής παροχής,  $a$  το άνοιγμα του θυροφράγματος και  $H_2$  το βάθος αμέσως κατάντη του θυροφράγματος. Επειδή η μεταβλητή  $H_2$  είναι τεχνικά δύσκολο να μετρηθεί, οι περισσότερες μετρήσεις γίνονται κατάντη του θυροφράγματος όπου η ροή έχει εξομαλυνθεί σχετικά και είναι δυνατόν να μετρηθεί το βάθος ροής  $y_t$ . Οπότε το βάθος  $H_2$  μπορεί να υπολογιστεί:

$$H_2 = C_d a (2C + \sqrt{4C^2 + A^2 - 4BC}) \quad (2.4)$$

$$\text{όπου: } A = \frac{y_t}{C_d a}; B = \frac{H_1}{C_d a}; C = 1 - \frac{C_d a}{y_t} \quad (2.5)$$

Αν και το υδραυλικό άλμα κατάντη του θυροφράγματος είναι πάντα βυθισμένο, για λόγους πληρότητας δίνεται και η εξίσωση που περιγράφει τη ροή στην περίπτωση που το υδραυλικό άλμα είναι ελεύθερο:

$$Q_{sluice} = C_d a b \sqrt{2g(H_1 - 0.61a)} \quad (2.6)$$

Όσον αφορά τη ροή άνωθεν του υπερχειλιστή  $Q_{spill}$ , η εξίσωση που την περιγράφει είναι η εξής:

$$Q_{spill} = CLH^{3/2} \quad (2.7)$$

όπου  $C$  ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή,  $L$  το μήκος υπερχειλίστη και  $H$  το υδραυλικό φορτίο άνωθεν του υπερχειλιστή.

#### 4.1 Διόρθωση κατάντη βάθους ροής $y_t$

Η κατάντη στάθμη ροής μετράται περίπου 20 μέτρα κατάντη του θυροφράγματος ώστε να εξασφαλίζεται η εξομάλυνση της ροής. Αυτό όμως εισαγάγει ένα σφάλμα στο μοντέλο διότι κατάντη του θυροφράγματος παρατηρείται μεταβολή του πλάτους του καναλιού διότι πλαγίως συμβάλουν οι ροές των δύο πλευρικών υπερχειλιστών. Συνεπώς μέσω συναρμογής μετασχηματίζεται η διατομή σε τραπεζοειδή διατομή ώστε να συνεχιστεί η



ροή μέχρι τον επόμενο ρυθμιστή Λ. Η θέση του σταθμήμετρου βρίσκεται εντός της συναρμογής με αποτέλεσμα το πλάτος της διατομής στην οποία μετράται η στάθμη είναι διαφορετικό από το πλάτος των δύο θυροφραγμάτων το οποίο χρησιμοποιείται στις εξισώσεις των Wu and Rajaratnam (2015). Είναι προφανές πως πρέπει να εξασφαλίζεται πως οι χρονοσειρές των μεγεθών  $H_1$  και  $y_t$  πρέπει να εκτελούνται σε σημεία όπου τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής είναι ίδια. Επειδή στην περίπτωση μας δεν εξασφαλίζεται αυτή η προϋπόθεση, θα πρέπει να εισαχθεί μία επιπλέον διαδικασία διόρθωσης της κατάντη στάθμης ροής  $y_t$ .

Ένας ακόμη παράγοντας που θα πρέπει να ενσωματωθεί στη διαδικασία διόρθωσης του κατάντη βάθους ροής είναι η παροχή. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διέλευση της ροής μέσω του ρυθμιστή Λ, παρατηρείται συνήθως (άνω του 80% των περιπτώσεων) επιμερισμός της ροής άνωθεν του υπερχειλιστή και υπό του θυροφράγματος. Το πρόβλημα υπεισέρχεται στη διαδικασία βαθμονόμησης του συντελεστή παροχής του θυροφράγματος. Αυτό διότι η όποια παροχή διέρχεται άνωθεν του υπερχειλιστή επηρεάζει υποχρεωτικά και την κατάντη στάθμη ροής  $y_t$ . Συνεπώς, η επιπλέον παροχή από τον υπερχειλιστή προκαλεί ανύψωση του βάθους  $y_t$  άρα μείωση του  $\Delta H$  με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται ο συντελεστής παροχής  $C_d$ . Συνεπώς θα πρέπει να υπολογιστεί το ισοδύναμο κατάντη βάθος ροής σε πλάτος ίσο με το πλάτος των δύο θυροφραγμάτων και παροχή ίση με την συνολική μείον την παροχή υπερχειλίσης. Σε περίπτωση όπου η μετρητική υποδομή εκτελούσε μέτρηση σε σημείο πριν την ανάμειξη της ροής υπερχειλιστών και θυροφραγμάτων και σε διατομή ίδια με αυτή του ανάντη καναλιού τότε η διόρθωση αυτή δεν θα ήταν απαραίτητη. Αυτό όμως αποτελεί μία τεχνικά δύσκολη διαδικασία ενώ απαιτεί και σημαντικές τροποποιήσεις στην υπάρχουσα γεωμετρία των ρυθμιστών.

Η διαδικασία διόρθωσης εκτελείται μέσω της σχέσης (4.1) η οποία χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις μεταβολής πλάτους σε ανοικτούς αγωγούς. Η (4.1) μετασχηματίζεται στην (4.2) στην περίπτωση μας η οποία περιλαμβάνει την μετρούμενη κατάντη στάθμη και παροχή καθώς και τις διορθωμένες, ενώ παράλληλα τα πλάτη  $b_1$  και  $b_2$  αποτελούν τα πλάτη του αγωγού στη θέση του θυροφράγματος και στη μέτρησης.

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gb_1^2y_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gb_2^2y_2^2} \quad (4.1) \rightarrow y_{t\_obs} + \frac{Q_{obs}^2}{2gb_1^2y_{t\_obs}^2} = y_{t\_corr} + \frac{Q_{sluice}^2}{2gb_2^2y_{t\_corr}^2} \quad (4.2)$$

## 5. Δεδομένα και επεξεργασίες

### 5.1 Μετρητικό σύστημα<sup>(1)</sup>

Στο ρυθμιστή Λ10 είναι εγκατεστημένα σταθμήμετρα, ένα παροχόμετρο, καθώς και βάνες ρύθμισης του ανοίγματος του θυροφραγμάτων, που στέλνουν δεδομένα στο κεντρικό σύστημα δεδομένων (SCADA) της ΕΥΔΑΠ. Συγκεκριμένα, η ροή παρακολουθείται από ένα παροχόμετρο κατάντη του ρυθμιστή Λ10, ενώ σταθμήμετρα υπάρχουν ανάντη και κατάντη του Λ10. Επίσης, υπάρχουν βάνες που παρακολουθούν και ελέγχουν ανεξάρτητα το άνοιγμα του δεξιού και αριστερού θυροφράγματος. Ο πίνακας 2 που ακολουθεί συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των μετρητών που είναι εγκατεστημένοι στο ρυθμιστή Λ10. Οι μετρητές στάθμης παρέχουν δεδομένα με βήμα καταγραφής 10 min, το παροχόμετρο με βήμα 5 min και οι διατάξεις μέτρησης των ανοιγμάτων με βήμα 15 min.

Σύμβολο μετρητή	Μεταβλητή	Ν° (GIS ΕΥΔΑΠ)	Τίτλος μετρητή (GIS ΕΥΔΑΠ)	Θέση (m)
0EQ110	Παροχή (m <sup>3</sup> /s)	17963414	Παροχόμετρο - Λ10	131265
0ENABC	Στάθμη (m)	17681521	Ανάντη Λ10	130958
0ENLBC	Στάθμη (m)	17681525	Κατάντη Λ10	130960
0EPVRD	Άνοιγμα (‰)	18125170	Λ10 - Δεξιά βάννα	130958
0EPVRG	Άνοιγμα (‰)	18125170	Λ10 - Αριστερή βάννα	130958

**Πίνακας 5.5.1:** Χαρακτηριστικά μετρητών που είναι εγκατεστημένοι στο ρυθμιστή Λ10

Συμπληρωματικά των παραπάνω μετρητών, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Fiware4Water εγκαταστάθηκαν στο ρυθμιστή Λ10 δύο νέα σταθμήμετρα. Τα χαρακτηριστικά και οι θέσεις των μετρητών αυτών δίνονται στον Πίνακα 5.2 που ακολουθεί.

Σύμβολο μετρητή	Μεταβλητή	N° (GIS ΕΥΔΑΠ)	Τίτλος μετρητή (GIS ΕΥΔΑΠ)
38421808WATL	Στάθμη (m)	201179	Ανάντη Λ10 (ΕΜΠ)
38421817WATL	Στάθμη (m)	200451	Κατάντη Λ10 (ΕΜΠ)

**Πίνακας 5.5.2:** Χαρακτηριστικά νέων μετρητών που εγκαταστάθηκαν στο ρυθμιστή Λ10

Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα από τους παραπάνω μετρητές, είναι δυνατόν να γίνει μία καθολική διαδικασία βαθμονόμησης, τόσο για το συντελεστή παροχής των θυροφραγμάτων, όσο και για το συντελεστή τραχύτητας του αγωγού. Ο συντελεστής παροχής των πλευρικών υπερχειλιστών έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή με σχετική ακρίβεια και βρέθηκε ίσος με  $C=1.85$ , υπεισέρχεται όμως στη διαδικασία βαθμονόμησης λόγω της αναμενόμενης μεταβολής του από την εκτέλεση της τελευταίας μέτρησης.

Οι διαθέσιμες χρονοσειρές είναι οι εξής:

- Παροχή κατάντη του ρυθμιστή Λ10
- Ανάντη βάθος από τη διάταξη Λ10
- Κατάντη βάθος από τη διάταξη Λ10
- Αριστερό άνοιγμα θυροφράγματος για τη διάταξη Λ10
- Δεξιό άνοιγμα θυροφράγματος για τη διάταξη Λ10

Οι διαθέσιμες χρονοσειρές χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό εσφαλμένων τιμών (τιμές με flags που υποδηλώνουν πρόβλημα στην καταμέτρηση ή αποστολή) και αστάθειες. Λόγω και της φύσης του συστήματος (υπάρχουν μεγάλα χρονικά διαστήματα όπου δε γίνεται καμία κίνηση), από την ανεπεξέργαστη χρονοσειρά μεγάλου μήκους των διαθέσιμων δεδομένων, γίνεται προσπάθεια φιλτραρίσματος και εξαγωγής χαρακτηριστικών δεδομένων. Η διαδικασία αυτή συντελείται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- φιλτράρισμα και διόρθωση εσφαλμένων τιμών
- εύρεση χρονικών παραθύρων όπου για σημαντικό χρονικό διάστημα δε γίνεται καμία κίνηση και στους δύο θυροφράγματα που αφορούν την ίδια διάταξη Λ
- εξαγωγή χαρακτηριστικών δεδομένων, θεωρώντας σε κάθε μεταβλητή ότι για το κοινό παράθυρο μη κίνησης των θυροφραγμάτων επιλέγεται η διάμεσος τιμή

Για την πρώτη διαδικασία, πρώτα κατηγοριοποιούνται τα ανοίγματα ανά 5‰ (όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα) και στη συνέχεια ορίζεται κατώφλι (10‰), σύμφωνα με το οποίο αν το άνοιγμα την επόμενη χρονική στιγμή είναι μικρότερο από το οριζόμενο κατώφλι, τότε δε θεωρείται ότι συντελέστηκε κίνηση και είναι σφάλμα του μετρητικού συστήματος.

Στη συνέχεια βρίσκεται το κοινό χρονικό παράθυρο που και τα δύο θυροφράγματα του ίδιου ρυθμιστή είναι σταθερά για ένα επαρκές χρονικό διάστημα, το οποίο και ορίζεται ίσο με 100 min. Το παραπάνω χρονικό διάστημα εναλλάσσεται ώστε να προκύψουν επεισόδια διαφόρων μηκών από 1 έως 24 ώρες με βήμα μίας ώρας. Έτσι εξετάζεται η επιρροή της διάρκειας των επιλεγέντων διαστημάτων στη διασπορά του νέφους τιμών  $C_d-a/H_1$ .

Το παραπάνω μετρητικό σύστημα αποτελεί μια πολύπλοκη δομή με πολλά επιμέρους συστήματα. Αρχικά, ξεκινώντας από τους Προγραμματιζόμενους Λογικούς Ελεγκτές (Programmed Logical Controllers (PLC)) οι οποίοι αποτελούν μία συστοιχία μικροϋπολογιστών οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε κάθε θέση ρύθμισης και μέτρησης της ροής. Σκοπός τους είναι να δέχονται και να αποθηκεύουν τα απαραίτητα δεδομένα, όπως π.χ. το άνοιγμα των θυροφραγμάτων αν πρόκειται για θέση ρύθμισης ή τη στάση και την παροχή αν πρόκειται για θέση μέτρησης. Το Σύστημα Εποπτικού Ελέγχου και Συλλογής Πληροφοριών (Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)), συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες από τους επιμέρους ελεγκτές και τις μεταφέρει στο Γενικό Κέντρο Τηλελέγχου του υδραγωγείου που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της ΕΥΑΠ στο Μενίδι<sup>(2)</sup>. Τέλος, αποδέκτης όλων των πληροφοριών είναι το Σύστημα Δυναμικής Ρύθμισης (DANAIS) που αποτελεί το βασικό εργαλείο τηλελέγχου και τηλεχειρισμού του καναλιού.

(1) Σύμφωνα με την μελέτη που έγινε από τον Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος του ΕΜΠ στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Fiware4Water που εξέταζε την λειτουργία του τμήματος Λ7 - Λ11 του υδραγωγείου

(2) Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, Δ. Κουτσογιάννης

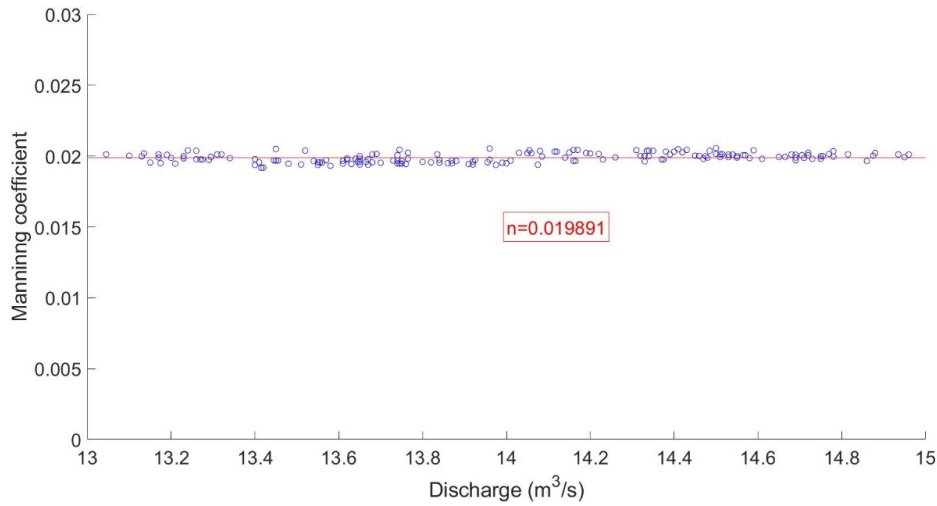
## 5.2 Εκτίμηση παραμέτρων

### 5.2.1 Εκτίμηση συντελεστή τραχύτητας

Για την εκτίμηση του χρόνου απόκρισης, ο οποίος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που πραγματοποιείται κάποια ενέργεια στα θυροφράγματα (άνοιγμα ή κλείσιμο) μέχρι τη στιγμή που η μεταβολή στην παροχή (που είναι αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας) είναι πλέον αντιληπτή και μετρήσιμη από το παροχόμετρο το οποίο είναι εγκατεστημένο κατάντη της διάταξης Λ10, χρησιμοποιείται η ταχύτητα ροής όπως υπολογίζεται σε συνθήκες μόνιμης ροής με την εξίσωση Manning. Εφόσον τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής είναι γνωστά (πλάτος πυθμένα, κλίση πρανών και κατά μήκος κλίση), απαιτείται η εκτίμηση του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning  $n$ .

Παρόλο που υπάρχει μεγάλος όγκος βιβλιογραφίας ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του εν λόγω συντελεστή με βάση το υλικό κατασκευής του αγωγού, στην παρούσα μελέτη αποφασίστηκε ο συντελεστής αυτός να βαθμονομηθεί για λόγους ακριβείας. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση είναι οι παροχές του παροχόμετρου Λ10 και οι τιμές του βάθους ροής όπως μετρήθηκαν από τον εγκατεστημένο μετρητή στάθμης μεταξύ των εγκαταστάσεων Λ9α και Λ10, όπου και θεωρείται ότι εφόσον δεν έχει γίνει κάποια ενέργεια στα θυροφράγματα για εύλογο χρονικό διάστημα και η ροή είναι μόνιμη, το βάθος ροής στον εν λόγω μετρητή προσεγγίζει ικανοποιητικά το ομοιόμορφο βάθος ροής.

Για την εξαγωγή ενός ρεαλιστικού συνόλου δεδομένων ακολουθήθηκε ανάλογη διαδικασία επεξεργασίας στα πρωτογενή δεδομένα, όπως αυτή της εκτίμησης του συντελεστή παροχής θυροφραγμάτων η οποία αναλύθηκε προηγουμένως (φιλτράρισμα και διόρθωση, εύρεση χρονικών παραθύρων, εξαγωγή χαρακτηριστικών δεδομένων). Με βάση αυτή τη διαδικασία προκύπτει το παρακάτω σχήμα, όπου φαίνεται ότι ο συντελεστής τραχύτητας είναι σταθερός και περίπου ίσος με  $n=0.02$ , για ένα εύρος παροχής που καλύπτει από 13 έως 15 m<sup>3</sup>/s.



**Σχήμα 5.1** Βαθμονομημένος συντελεστής τραχύτητας για διάφορες παροχές.

### 5.2.2 Εκτίμηση συντελεστή υπερχειλίσης

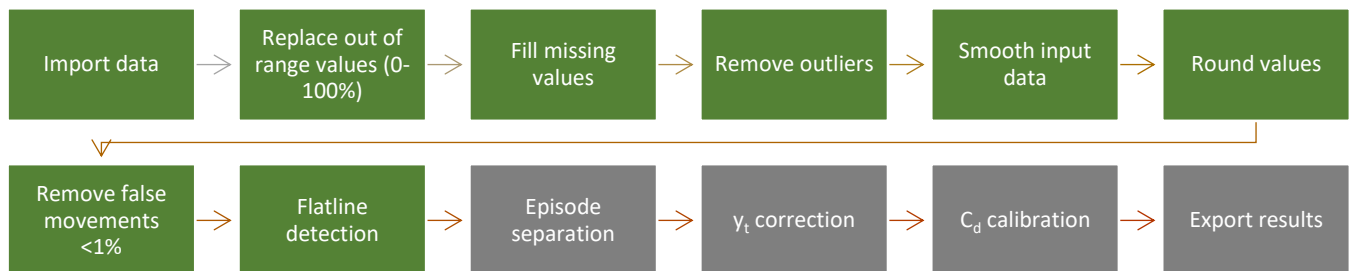
Ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή μετρήθηκε με από τον κατασκευαστή του υδραγωγείου έπειτα από κατάλληλα πειράματα και βρέθηκε ίσος με  $C_{spill} = 1.85$ . Στα παρακάτω κεφάλαια εξετάζεται η ενδεχόμενη μεταβολή του εν λόγω συντελεστή εξαιτίας φαινομένων διάβρωσης ή ανάπτυξης υδρόβιας χλωρίδας επί του υπερχειλιστή.

## 6. Επεξεργασίες

### 6.1 Περιγραφή Διεργασιών καθαρισμού δεδομένων

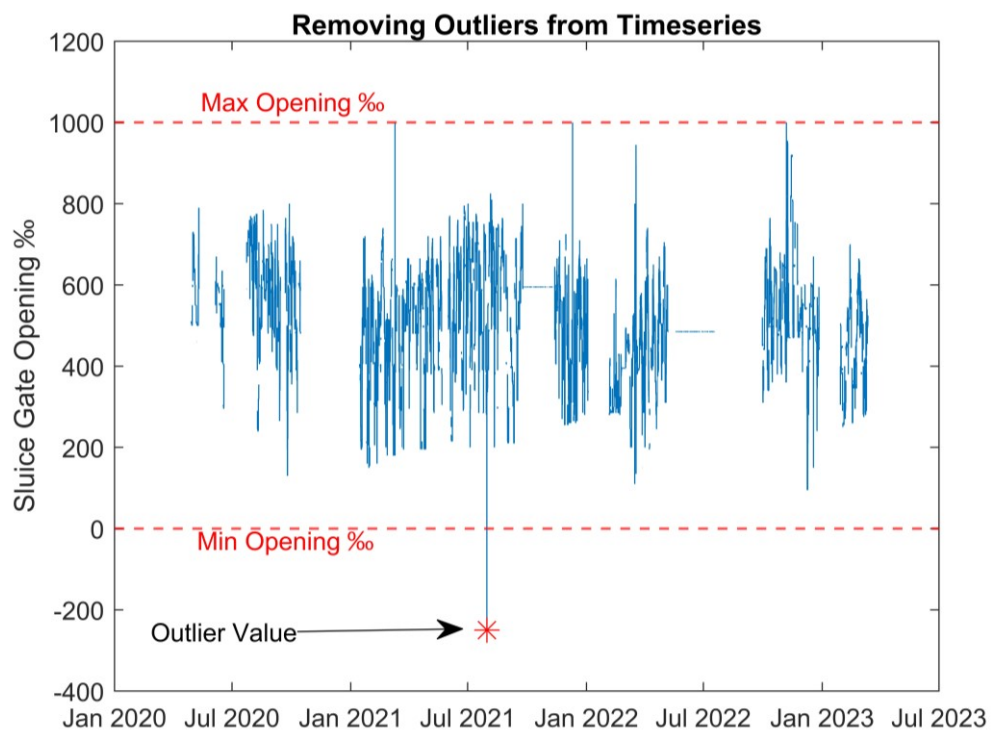
#### 6.1.1 Φιλτράρισμα και διόρθωση εσφαλμένων τιμών

Στο στάδιο αυτό εκτελούνται ένα σύνολο ενεργειών έτσι ώστε τυχόν σφάλματα της χρονοσειράς να διορθωθούν. Παρακάτω παρατίθεται και διάγραμμα των διαδικασιών που εκτελούνται κατά σειρά εκτέλεσής τους, για καλύτερη εποπτεία. Σε πρώτη φάση αφαιρούνται τα προφανή σφάλματα τα οποία είναι το σύνολο των μετρήσεων μικρότερα ή μεγαλύτερα του 0% και 100% αντίστοιχα καθώς και οι τιμές των οποίων η μέτρηση έχει flag, το οποίο σηματοδοτεί εσφαλμένη μέτρηση ή πρόβλημα κατά την καταχώρηση της μέτρησης. Στη συνέχεια γίνεται συμπλήρωση των κενών της χρονοσειράς με γραμμική παρεμβολή, ενώ η μέγιστη διάρκεια συμπλήρωσης ορίζεται 2 ώρες (2 hr). Στην συνέχεια γίνεται εξομάλυνση των τιμών της χρονοσειράς με κυλιόμενο μέσο μίας ώρας (1 hr) το οποίο απομακρύνει σύντομες απότομες μεταβολές που οφείλονται σε σφάλμα του μετρητικού συστήματος (χωρίς όμως να υπάρξει flag). Τέλος, τα δεδομένα στρογγυλοποιούνται και διακριτοποιούνται. Η στρογγυλοποίηση γίνεται στην ακρίβεια του συστήματος (μέγιστη διακριτική ικανότητα του συστήματος) που είναι 5 ‰. Με τον όρο διακριτοποίηση νοείται ο έλεγχος της μεταβολής διαδοχικών τιμών καθώς ελάχιστη δυνατή μεταβολή ενός θυροφράγματος είναι 10 ‰. Σε περίπτωση που είναι μικρότερη δεν θεωρείται πως έχει συντελεστεί κάποια μεταβολή.

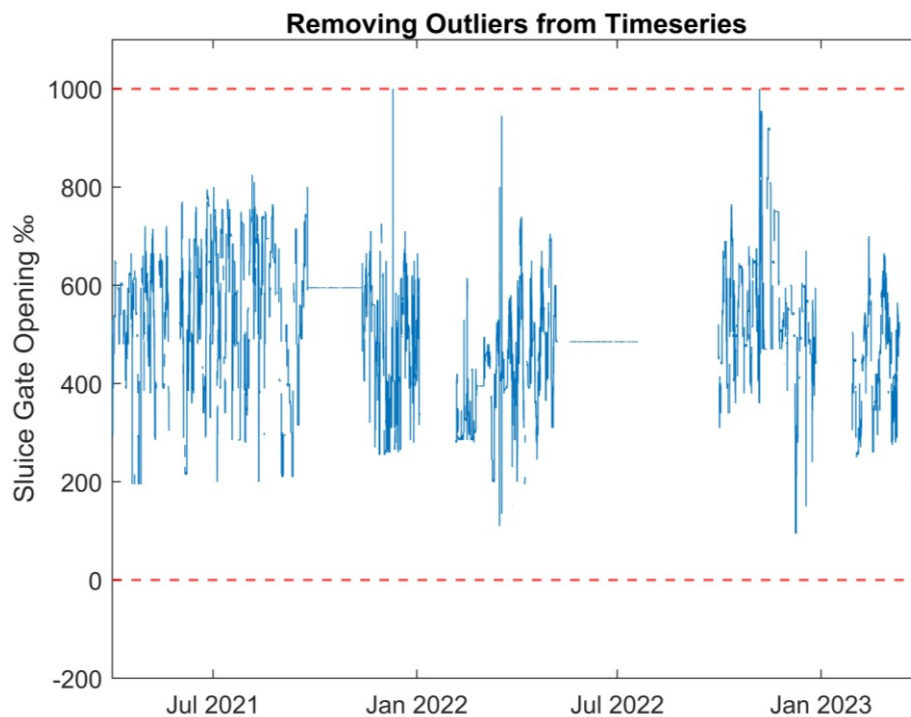


**Διάγραμμα 6.1:** Διάγραμμα διεργασιών προγραμματισμού.

Στα Γράφημα 6.1 - Γράφημα 6.7 φαίνεται το σύνολο των διαδικασιών επεξεργασίας δεδομένων όπως αυτές παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 6.1.

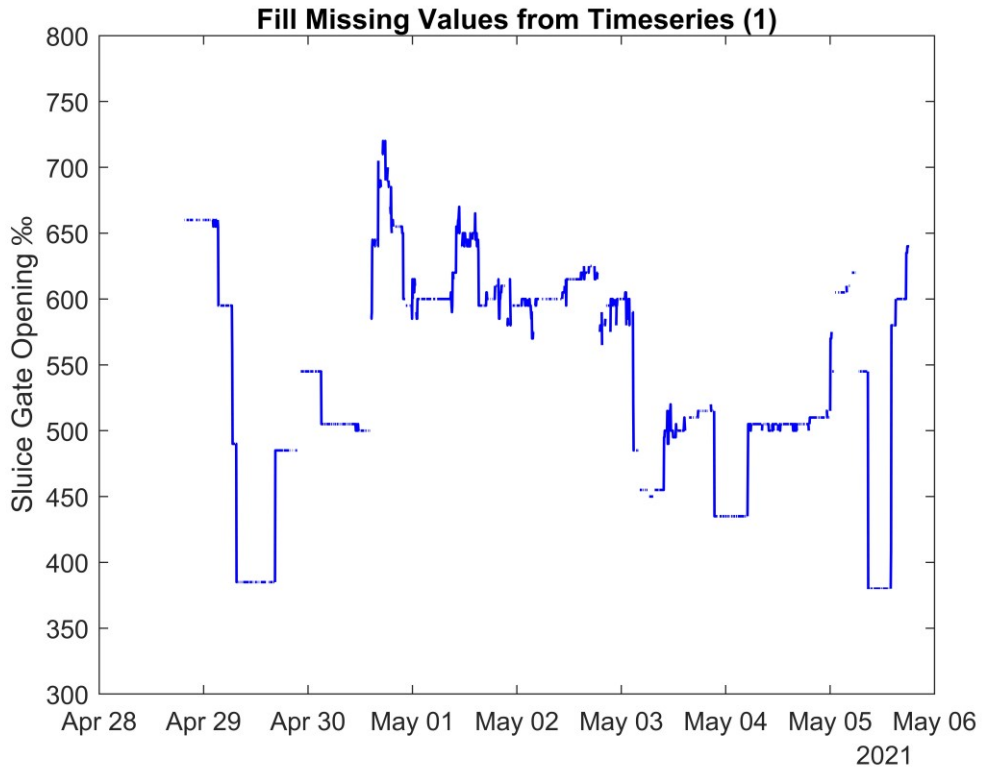


**Γράφημα 6.1:** Γραφική παράσταση αρχικής χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με τις εκτός εύρους τιμές.

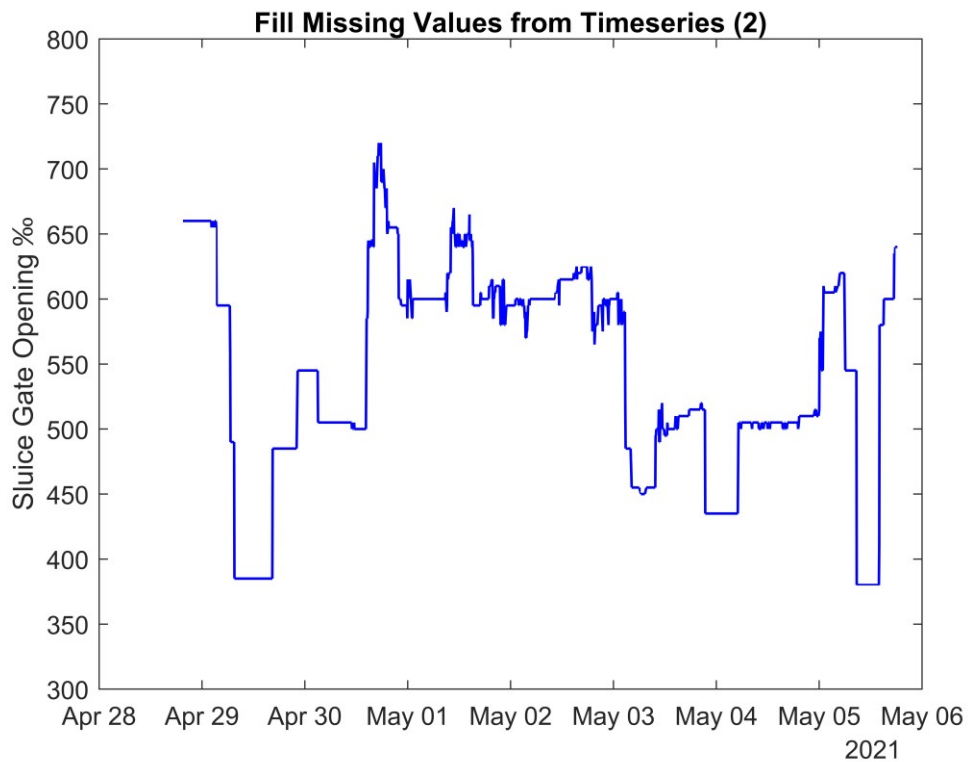


**Γράφημα 6.2:** Γραφική παράσταση αρχικής χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με τις εκτός εύρους τιμές.

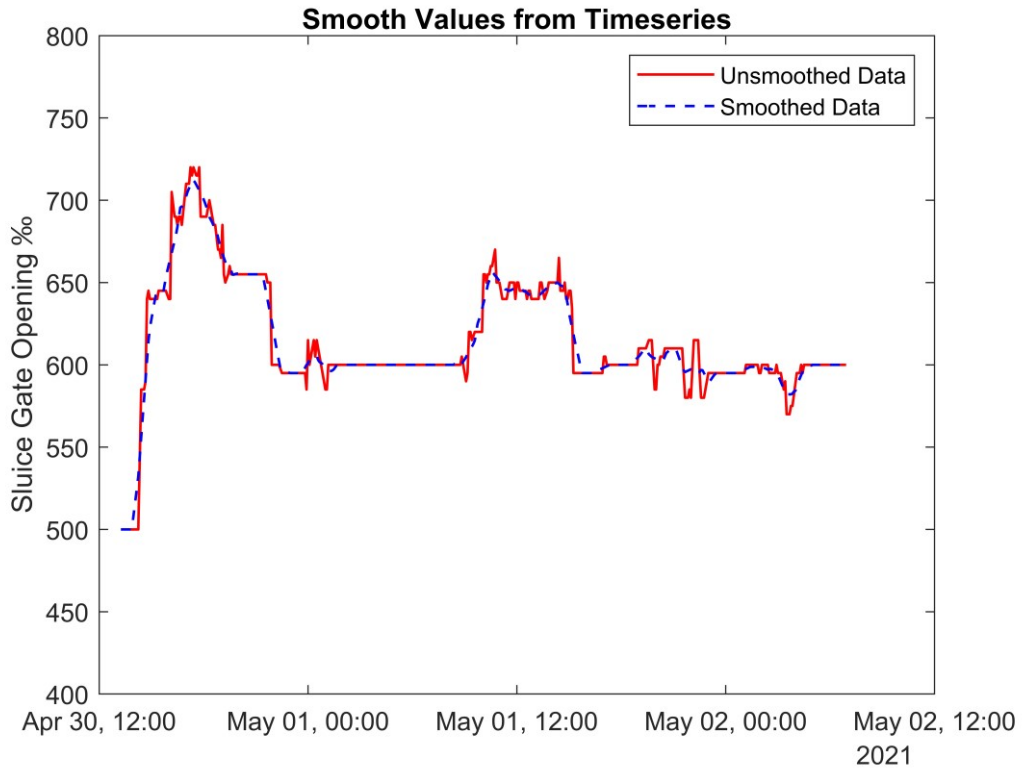




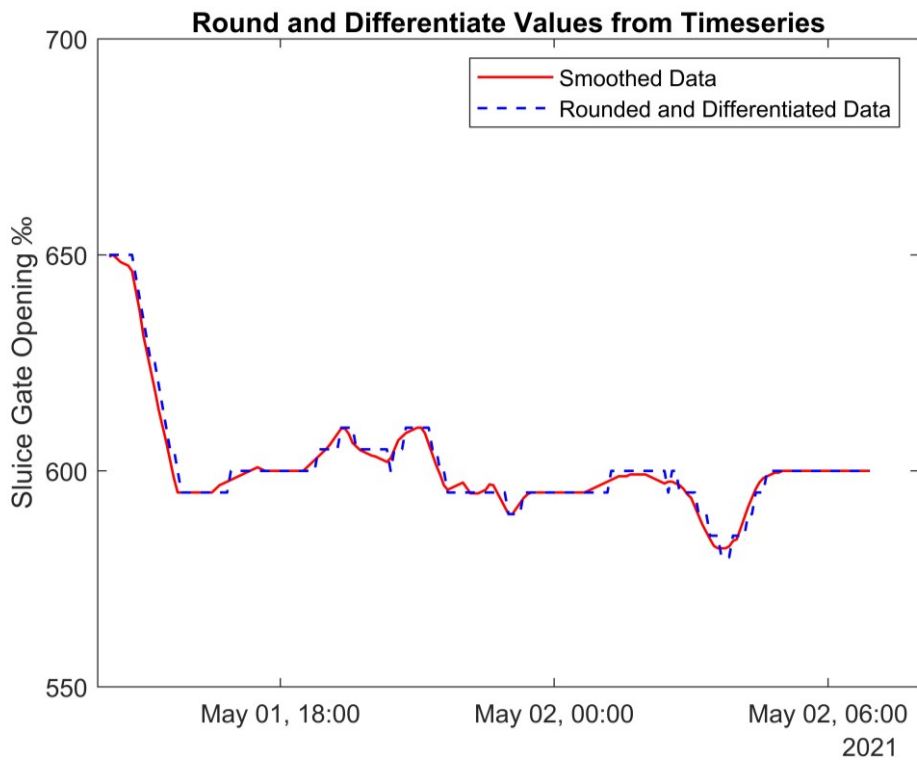
**Γράφημα 6.3:** Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος χωρίς συμπλήρωση κενών.



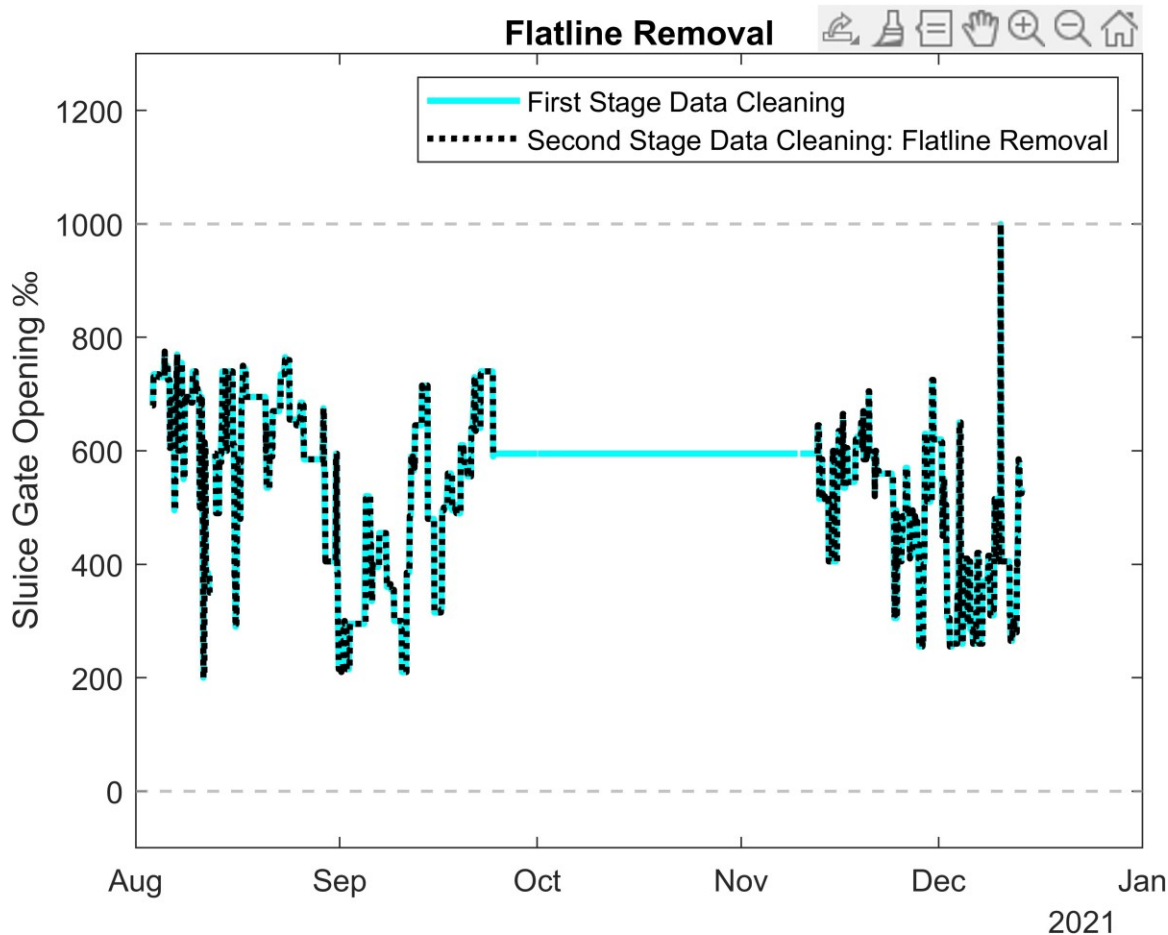
**Γράφημα 6.4:** Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος χωρίς συμπλήρωση κενών.



**Γράφημα 6.5:** Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση με και χωρίς εξομάλυνση.



**Γράφημα 6.6:** Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση εξομαλυμένων δεδομένων και των δεδομένων κατόπιν στρογγυλοποίησης και διακριτοποίησης.



**Γράφημα 6.7:** Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση αποτελέσματος πρώτου και δεύτερου σταδίου καθαρίσματος δεδομένων. Το δεύτερο στάδιο δεν περιλαμβάνει τμήματα με ισοπέδωση σήματος.

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρούμε τα εξής:

- ❖ Στα Γράφημα 6.1Γράφημα 6.2 αποτυπώνεται η επιρροή της αφαίρεσης ακραίων τιμών στην χρονοσειρά, οι οποίες βρίσκονται εκτός του λογικού εύρους της εκάστοτε παραμέτρου. Μερικά παραδείγματα είναι πχ. άνοιγμα θυροφράγματος μεγαλύτερο του 100% και μικρότερο του 0%, στάθμη ροής μικρότερη του μηδενός ή μεγαλύτερη από την μέγιστή επιτρεπτή στάθμη του καναλιού κ.ο.κ.
- ❖ Στα Γράφημα 6.3Γράφημα 6.4 αποτυπώνεται η λειτουργία του αλγορίθμου συμπλήρωσης δεδομένων εύρους. Παρατηρούμε πως ενώ κενά μικρού μήκους παρουσιάζονται συμπληρωμένα, αυτά που είναι μεγαλύτερου μήκους πχ. των 2 ωρών δεν έχουν συμπληρωθεί.
- ❖ Στο Γράφημα 6.5 αποτυπώνεται η επιρροή της εξομάλυνσης στη χρονοσειρά. Το εν λόγω βήμα επιτυγχάνει την απομείωση του «θορύβου» των δεδομένων

(denoising). Πιο συγκεκριμένα, σε περιοχές όπου το σήμα παρουσιάζει πολύ μεγάλη κινητικότητα, η εξομάλυνση μειώνει σημαντικά την κινητικότητα του σήματος.

- ❖ Στο Γράφημα 6.6 αποτυπώνεται η διαδικασία στρογγυλοποίησης και διακριτοποίησης των τιμών της χρονοσειράς έπειτα από την διαδικασία καθαρίσματος. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη ώστε να έχουμε μία χρονοσειρά η οποία να έχει όμοια χαρακτηριστικά με την αρχική. Πιο συγκεκριμένα, η μετρητική υποδομή έχει δεδομένη ανάλυση η οποία έχει αλλοιωθεί μέσω της παραπάνω διαδικασίας επομένως είναι σημαντικό να επανέλθουν οι μετρήσεις σε ακέραια πολλαπλάσια του 0.5% αλλά και να μην παρουσιάζονται μετρήσεις μικρότερες του 1% καθώς η μεταβολή αυτή είναι μικρότερη από τη διακριτική ικανότητα της υφιστάμενης υποδομής.
- ❖ Στο Γράφημα 6.7 αποτυπώνεται η λειτουργία του αλγορίθμου εντοπισμού και αφαίρεσης περιοχών με ισοπέδωση σήματος. Παρατηρούμε χαρακτηριστικά το διάστημα με την ισοπέδωση σήματος που έχει αφαιρεθεί μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου.

Σχετικά με τη συμπλήρωση δεδομένων αναφέρεται πως ακόμα και για κενό μέγιστης διάρκειας 20 min (3 διαδοχικές τιμές) συμπληρώνεται το 85% των κενών εξαιρώντας τα κενά πολύ μεγάλης διάρκειας (π.χ. άνω των 7 ημερών).

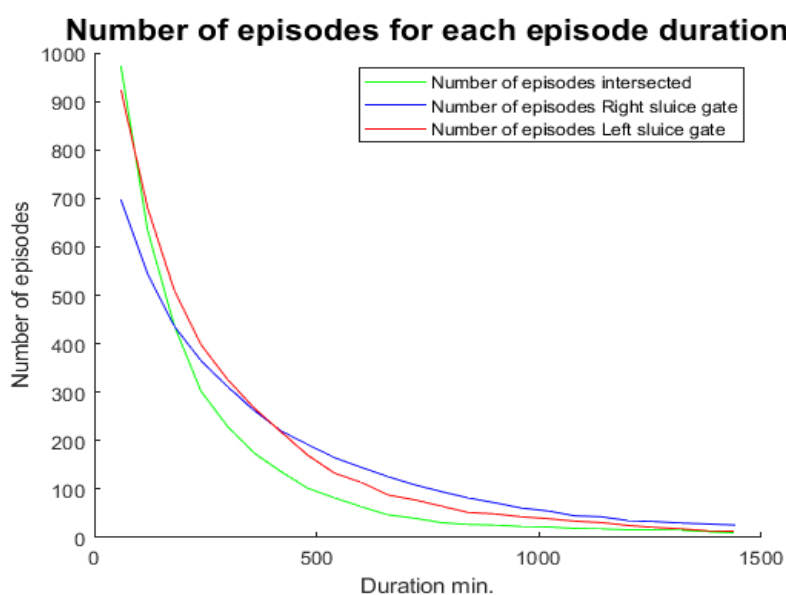
Το πρόβλημα της ισοπέδωσης σήματος αποτελεί ένα γνωστό και συνηθισμένο πρόβλημα δεδομένων που προέρχονται από αισθητήρες. Με τον όρο «ισοπέδωση σήματος» ή αλλιώς flatlining ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία παρουσιάζεται σταθερή τιμή π.χ. ανοίγματος του ενός θυροφράγματος, ασχέτως με το αν στο θυρόφραγμα μεταβάλλεται το άνοιγμά του. Αυτό συμβαίνει για πολλούς λόγους όπως κόλλημα του μετρητικού συστήματος, αδυναμία αποστολής σήματος (από τους PLC προς το SCADA), ή οποιαδήποτε άλλη τεχνική δυσλειτουργία μπορεί να εμφανίσει το σύστημα. Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται μέσω ενός αλγορίθμου ανίχνευσης τέτοιων περιοχών και αφαίρεσής τους.

Αυτό που επιτυγχάνει η παραπάνω διαδικασία είναι η ποιοτική αναβάθμιση της διαθέσιμης χρονοσειράς διατηρώντας παράλληλα πολύ κοντινά χαρακτηριστικά με την αρχική. Συνεπώς μέσω των παραπάνω βημάτων επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός της

αρχικής χρονοσειράς η οποία περιλαμβάνει όλα τα παραπάνω σφάλματα σε μία συνεχή στα περισσότερα τμήματα χρονοσειρά χωρίς σφάλματα και με λιγότερο θόρυβο. Αυτό πρόκειται να επιταχύνει αλλά και να εξασφαλίσει την σωστή την λειτουργία του αλγορίθμου εντοπισμού και εξαγωγής των επεισοδίων που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.

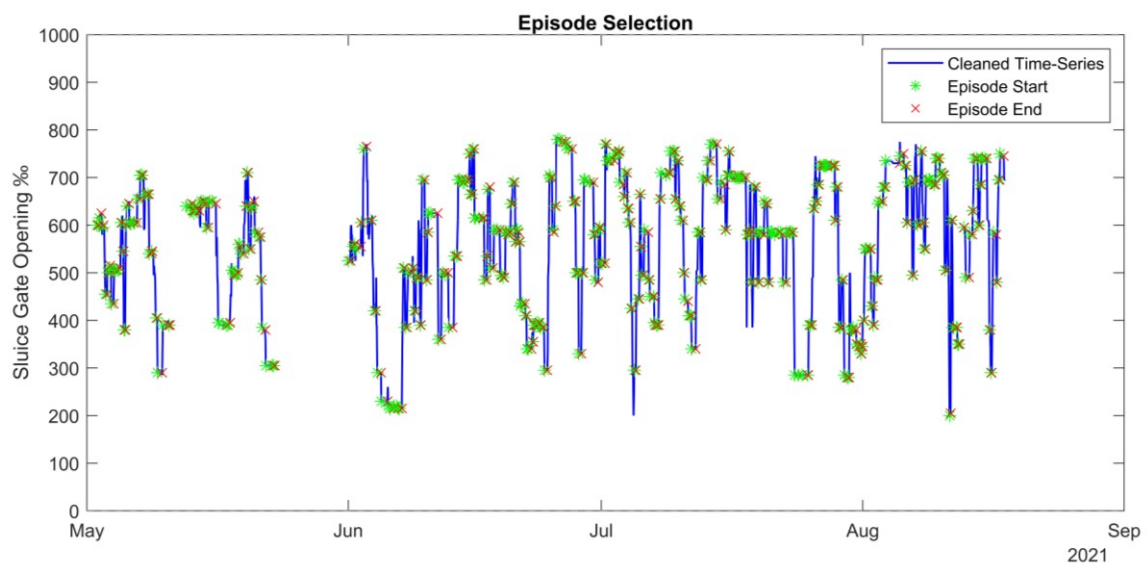
## 6.2 Εύρεση χρονικών παραθύρων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ο γενικότερος στόχος των διαδικασιών που εκτελούνται είναι η εύρεση όλων των χρονικών παραθύρων στη χρονοσειρά ανοίγματος των θυροφραγμάτων στα οποία δεν συντελείται κάποια μεταβολή στο άνοιγμα. Από τα χρονικά παράθυρα αυτά όπου παρακάτω αναφέρονται και ως επεισόδια, εξάγεται το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση του συντελεστή  $C_d$  των θυροφραγμάτων. Η διαδικασία εύρεσης των επεισοδίων συντελείται μέσω ενός αλγορίθμου ο οποίος εντοπίζει τα επεισόδια σε κάθε χρονοσειρά θυροφράγματος (αριστερού-δεξιού) και κατόπιν βρίσκει την τομή των ευρεθέντων διαστημάτων. Η διάρκεια των επεισοδίων που εντοπίζονται εναλλάσσεται από τον αλγόριθμο ώστε να προκύψουν διαστήματα διάρκειας από 1 έως 24hr με βήμα μίας ώρας. Ο αριθμός των ευρεθέντων διαστημάτων για κάθε χρονική διάρκεια επεισοδίου αποτυπώνεται παρακάτω στο Γράφημα 6.8. Όσο αυξάνεται η διάρκεια των αναζητούμενων επεισοδίων, μειώνεται ο αριθμός των ευρεθέντων διαστημάτων.



**Γράφημα 6.8:** Πλήθος χρονικών παραθύρων για κάθε διάρκεια αναζητούμενων διαστημάτων

Στο Γράφημα 6.8 παρατηρούμε πως η τομή των διαστημάτων δεξιού και αριστερού θυροφράγματος έχει μεγαλύτερο αριθμό διαστημάτων και από τον μέγιστο αριθμό διαστημάτων δεξιού-αριστερού θυροφράγματος. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την συναλήθευση των διαστημάτων δεξιού και αριστερού θυροφράγματος διχοτομούνται ορισμένα μεγάλα διαστήματα σε επιμέρους μικρότερα. Σε αυτό συμβάλλουν δύο βασικοί παράγοντες. Αρχικά, η κίνηση των θυροφραγμάτων δεν είναι πάντοτε ταυτόχρονη και εν συνεχεία το γεγονός ότι η αναζήτηση εκτελείται για εύρεση χρονικών διαστημάτων  $\geq X$  min. Έτσι, κατά μήκος ενός μεγάλου διαστήματος π.χ. του αριστερού θυροφράγματος μπορεί να συντελεί μία μικρή κίνηση το δεξί θυροφράγμα οπότε διχοτομείται το εν λόγω διάστημα σε μικρότερα. Όσο αυξάνεται η διάρκεια των αναζητούμενων διαστημάτων, τόσο λιγότερο τα ενδιάμεσα διαστήματα ικανοποιούν το κριτήριο της διάρκειας οπότε παύουν να αποτελούν «χρονικά παράθυρα» και το πλήθος των διαστημάτων της τομής υποσκελίζεται κάτω από τις καμπύλες πλήθους επεισοδίων αριστερού-δεξιού θυροφράγματος.



**Γράφημα 6.9:** Γραφική αποτύπωση λειτουργίας αλγορίθμου ανίχνευσης και εξαγωγής επεισοδίων. Ο αλγόριθμος «σαρώνει» την χρονοσειρά και καταχωρεί τα σημεία αρχής και τέλους των επεισοδίων.

Όπως φαίνεται στο Γράφημα 6.9, ο αλγόριθμος εντοπισμού και εξαγωγής «σαρώνει» την χρονοσειρά και καταχωρεί τα σημεία αρχής και τέλους των επεισοδίων. Στην συνέχεια τα σημεία αρχής και τέλους των επεισοδίων θα αξιοποιηθούν για την εξαγωγή των χαρακτηριστικών μεγεθών κάθε επεισοδίου.

### 6.2.1 Εξαγωγή χαρακτηριστικών δεδομένων

Έπειτα από τον εντοπισμό όλων των επεισοδίων, απαιτείται η εξαγωγή όλων των χαρακτηριστικών δεδομένων για όλα τα μεγέθη που απαιτούνται για τη βαθμονόμηση. Ως χαρακτηριστική τιμή θεωρείται η διάμεσος τιμή εκτός από τις περιπτώσεις όπου διευκρινίζεται κάποιο άλλο μέγεθος. Λόγος επιλογής της διαμέσου τιμής ως χαρακτηριστική, είναι ώστε τυχόν ακραίες τιμές να μην έχουν κάποια επιρροή στην χαρακτηριστική τιμή του μεγέθους που θα χρησιμοποιηθεί. Η εξαγωγή των δεδομένων αποτελεί απλή διαδικασία καθώς από τον αλγόριθμο διαχωρισμού των επεισοδίων δίνεται το index αρχής και τέλους κάθε επεισοδίου. Τα δεδομένα που εξάγονται για την βαθμονόμηση είναι τα παρακάτω:

1. Η διάμεσος τιμή του ανοίγματος του δεξιού θυροφράγματος για κάθε επεισόδιο
2. Η διάμεσος τιμή του ανοίγματος του αριστερού θυροφράγματος για κάθε επεισόδιο
3. Η διάμεσος τιμή του ανοίγματος της ανάντη στάθμης για κάθε επεισόδιο
4. Η διάμεσος τιμή του ανοίγματος της κατόντη στάθμης για κάθε επεισόδιο
5. Η διάμεσος τιμή της παροχής για κάθε επεισόδιο

Επιπρόσθετα, παράλληλα με τα παραπάνω δεδομένα εξάγονται και ορισμένα δεδομένα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1. Η διαφορά της διάμεσης τιμής ανοίγματος των δύο θυροφραγμάτων για κάθε επεισόδιο
2. Η τυπική απόκλιση της ανάντη και κατόντη στάθμης στο εν λόγω επεισόδιο

Τα υπόλοιπα μεγέθη τα οποία συμβάλλουν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτουν μέσω του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του συντελεστή  $C_d$ .

## 6.2.2 Ανάλυση μεθόδων βαθμονόμησης και γενική ανασκόπηση μεθοδολογιών

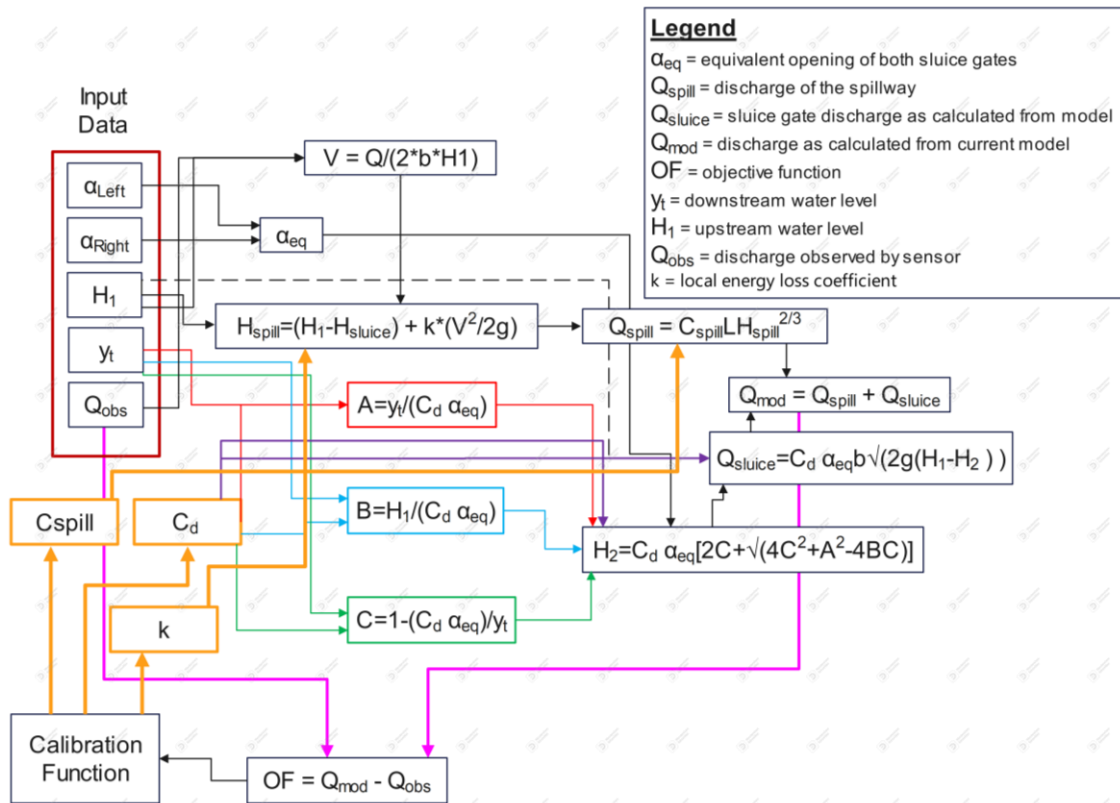
Κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης διακρίνονται δύο βασικές προσεγγίσεις. Η κατάστρωση ενός μοντέλου καθολικής βαθμονόμησης όλων των παραμέτρων λειτουργίας και η σειριακή βαθμονόμηση όλων των παραμέτρων λειτουργίας. Το βασικό πρόβλημα της καθολικής βαθμονόμησης είναι πως επειδή για την βαθμονόμηση των λειτουργικών παραμέτρων χρησιμοποιείται μία συστοιχία επεισοδίων ώστε να εξασφαλίζεται η καλή σύγκλιση και να μην παρουσιάζονται φαινόμενα ισοτελικότητας, δεν είναι δυνατή η αποτύπωση των βαθμονομημένων τιμών για κάθε παράμετρο σε κάθε μεμονωμένο επεισόδιο. Αυτό σημαίνει πως ενώ είναι δυνατόν να προκύψει ένα νέφος τιμών για τιμές των συντελεστών, δεν είναι δυνατή η συσχέτιση της τιμής των συντελεστών με κάποιο μετρούμενο μέγεθος της ροής καθώς για τη βαθμονόμηση έχει χρησιμοποιηθεί μία συστοιχία επεισοδίων με διαφορετικές συνθήκες ροής. Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα της μελέτης της συσχέτισης των συντελεστών μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης των σημείων και της προσαρμογής της βέλτιστης σχέσης (επιφάνειας) από τα σημεία. Αξιοποιώντας τη συσχέτιση των σταθερών μπορεί να επιλυθεί ξανά το πρόβλημα της βαθμονόμησης με μία λιγότερη σταθερά προς βαθμονόμηση, επιτυγχάνοντας έτσι καλύτερη σύγκλιση. Σε κάθε περίπτωση, η γενικότερη συσχέτιση των τριών παραμέτρων που προκύπτει από την καθολική βαθμονόμηση, χαρτογραφεί στην ουσία την επιφάνεια πάνω στην οποία κινούνται οι εν λόγω παράμετροι.

Στη συνέχεια στη διαδικασία της σειριακής βαθμονόμησης εκτελούνται διαδοχικές βαθμονομήσεις έως ότου προσδιοριστούν όλες οι τιμές των συντελεστών. Πιο συγκεκριμένα εκτελούνται βαθμονομήσεις με ομάδες των δεδομένων στις οποίες δεν παρατηρείται συσχέτιση των μεγεθών. Έτσι, μέσω των επεισοδίων στα οποία η ροή διέρχεται μόνο μέσω του θυροφράγματος μπορεί να βαθμονομηθεί η σχέση του συντελεστή παροχής του θυροφράγματος συναρτήσει των λόγων  $a/H_1$ . Έτσι, αξιοποιώντας τη σχέση αυτή μπορεί να προκύψει με ευθύ υπολογισμό μέσω της εξίσωσης του Ogee ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή.



### 6.3 Κατάσρωση μοντέλου ταυτόχρονης βαθμονόμησης

Όπως αναλύθηκε στην εισαγωγική παράγραφο υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις βελτιστοποίησης. Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται η μεθοδολογία με την οποία καταστρώνεται το μοντέλο ταυτόχρονης βαθμονόμησης των παραμέτρων λειτουργίας των ρυθμιστών  $\Lambda$ . Η μεθοδολογία βαθμονόμησης μίας παραμέτρου και τριών δεν παρουσιάζει ουσιαστικά μεγάλη διαφοροποίηση από την μεθοδολογία βαθμονόμησης μίας παραμέτρου. Η μόνη ουσιαστική διαφοροποίηση σχετικά με τα μοντέλα βαθμονόμησης μίας παραμέτρου είναι αυτή που αναλύθηκε στην εισαγωγική παράγραφο της ενότητας 6.1.4. Ειδικότερα, η βασικότερη διαφοροποίηση εντοπίζεται στον τρόπο τροφοδοσίας των δεδομένων στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, καθώς δεν είναι δυνατή η βαθμονόμηση μεμονωμένων επεισοδίων, εισάγονται στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης τυχαίες πεντάδες ή/και δεκάδες επεισοδίων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται καλύτερη βαθμονόμηση. Σε όσες πεντάδες προκύπτει αρνητική διακρίνουσα, απορρίπτεται η συγκεκριμένη πεντάδα χωρίς να επηρεάζεται το σύνολο των αποτελεσμάτων. Η δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής.

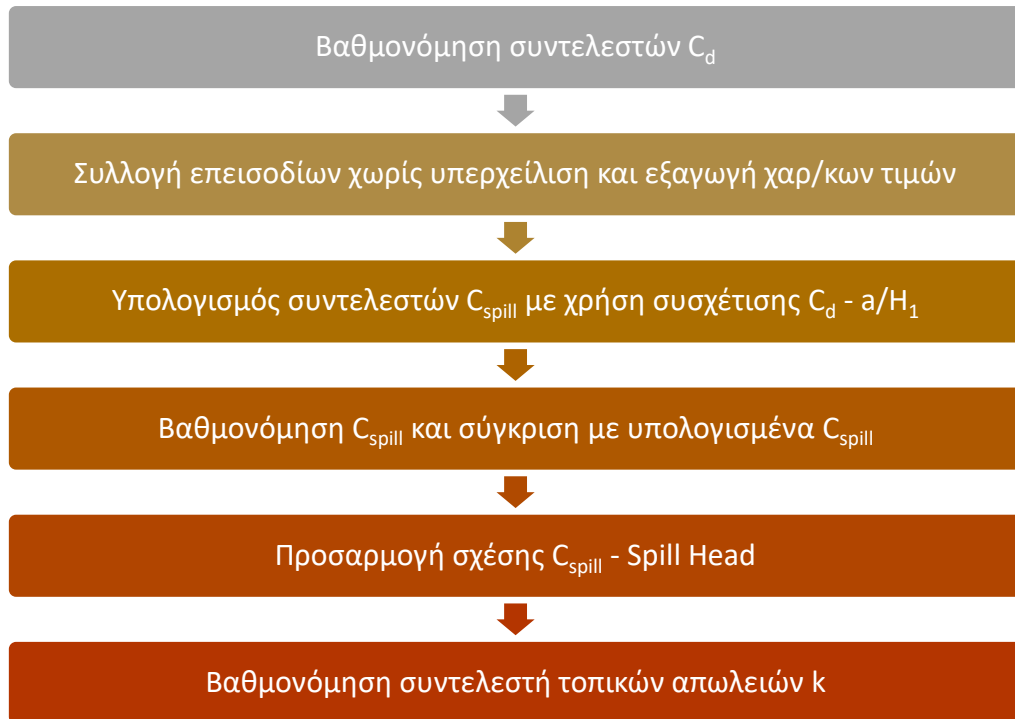


**Διάγραμμα 6.2:** Δομή αλγορίθμου ταυτόχρονης βαθμονόμησης συντελεστών

Από τον παραπάνω αλγόριθμο βελτιστοποίησης μπορούν να προκύψουν ποικίλα σενάρια βαθμονόμησης κλειδώνοντας μία ή περισσότερες παραμέτρους και βαθμονομώντας τις υπόλοιπες.

#### 6.4 Κατάστρωση μοντέλου διαδοχικής επίλυσης και βαθμονόμησης

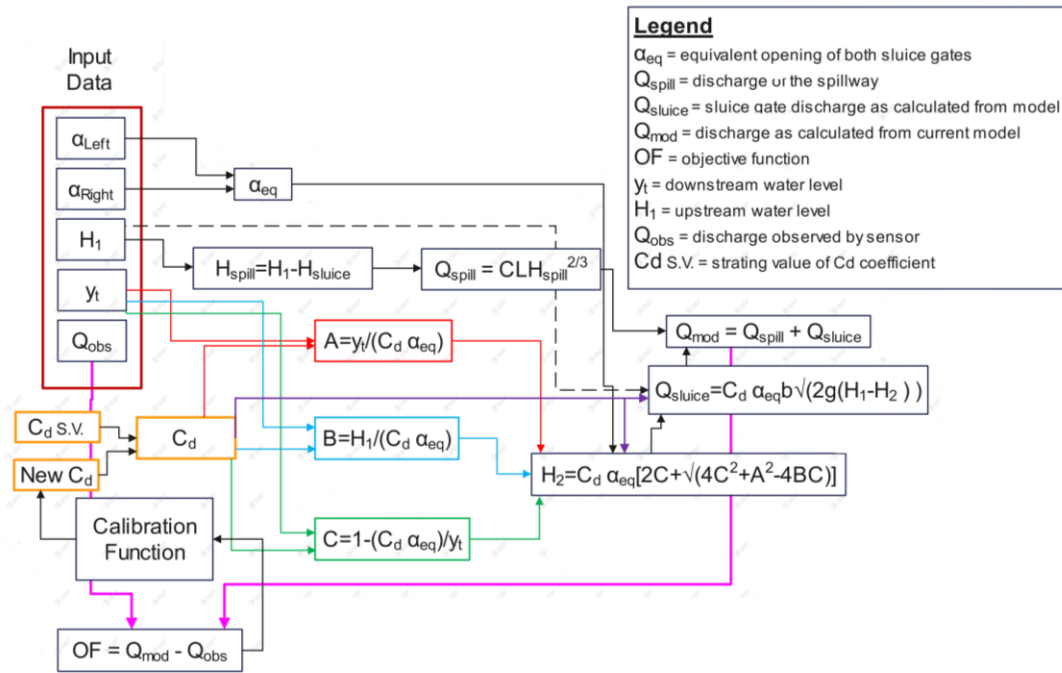
Ο δεύτερος τρόπος βαθμονόμησης των παραμέτρων λειτουργίας των ρυθμιστών  $\Lambda$  είναι με χρήση ενός μοντέλου διαδοχικής επίλυσης (sequential model). Για την καλύτερη παρουσίαση και περιγραφή της πορείας των υπολογισμών παρατίθεται παρακάτω ένα διάγραμμα ροής με τις διαδικασίες υπολογισμού και βαθμονόμησης κατά τη σειρά εκτέλεσής τους.



#### 6.4.1 Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης $C_d$

Στο παρόν εδάφιο καταστρώνεται το μοντέλο βαθμονόμησης των συντελεστών  $C_d$ . Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4 όπου αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο, είναι δυνατόν μέσω δοκιμών να βρεθεί μία βέλτιστη τιμή του συντελεστή  $C_d$ . Στο Διάγραμμα 6.3 παρουσιάζεται η υπολογιστική διαδικασία και η δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Συνολικά έχουν διαχωριστεί 1374 επεισόδια διάρκειας  $\geq 60$  min. Τα επεισόδια αυτά διαχωρίζονται σε μία ομάδα για βαθμονόμηση (calibration set) και μία ομάδα για επικύρωση των αποτελεσμάτων (validation set). Η κατανομή των επεισοδίων στις δύο ομάδες γίνεται με τυχαίο τρόπο αλλά και ώστε να μην υπάρχουν επεισόδια και στις δύο ομάδες εξαντλώντας το σύνολο των επεισοδίων. Η αναλογία που χρησιμοποιείται είναι 85% των επεισοδίων για το calibration set και 15% για το validation set. Πρώτα εκτελείται η διαδικασία βαθμονόμησης στην οποία εν συνεχεία προσαρμόζεται η βέλτιστη εξίσωση. Έπειτα εισάγονται μέσα στο υπολογιστικό μοντέλο τα δεδομένα του validation set ώστε να προκύψει το σφάλμα του κάθε επεισοδίου από τη χρήση της προσαρμοσμένης καμπύλης.



**Διάγραμμα 6.3:** Αλγόριθμος βαθμονόμησης  $C_d$

Πιο συγκεκριμένα για τα δεδομένα εισόδου που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.1 γίνονται διαδοχικές δοκιμές του συντελεστή  $C_d$  ώστε η συνάρτηση στόχου να ελαχιστοποιηθεί. Η διαδικασία εκκινείται για μία αρχική τιμή με την οποία προκύπτει η τιμή της συνάρτησης στόχου OF. Η συνάρτηση βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται (annealing, MATLAB) εναλλάσσει την τιμή του  $C_d$  για κάθε σετ δεδομένων έτσι ώστε να βαθμονομηθεί μία μια τιμή του  $C_d$  για κάθε επεισόδιο (και κάθε διάρκεια). Τα δεδομένα αυτά αποτελούν την βάση όλων των αναλύσεων. Από την διαδικασία της βαθμονόμησης η παροχή υπερχειλίσης αλλά και η τελική τιμή της OF αποθηκεύονται πίνακες καθώς αποτελούν σημαντικά μεγέθη για την ανάλυση των αποτελεσμάτων. Μάλιστα για τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης διερευνήθηκαν και τα αποτελέσματα εναλλακτικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης όπως ο ga και ο fminsearch, από όπου διαπιστώνεται πως η δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή των αποτελεσμάτων με εναλλαγή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

#### 6.4.2 Κατάστρωση μοντέλου υπολογισμού $C_{spill}$

Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 5.2.2** ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή μετρήθηκε από τον κατασκευαστή και βρέθηκε ίσος με  $C_{spill} = 1.85$ . Ωστόσο, η τρέχουσα

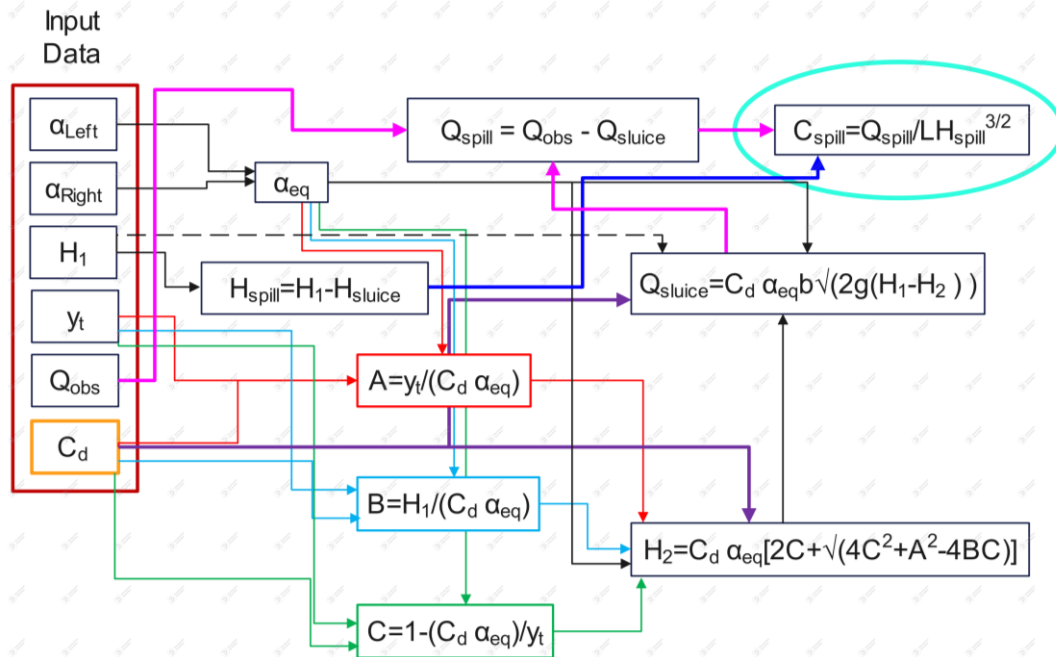
κατάσταση των υπερχειλιστών στους ρυθμιστές σε συνδυασμό με την αναμενόμενη υδραυλική φθορά από τη λειτουργία του καναλιού που οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας στο κανάλι, δύναται να έχει επηρεάσει τον συντελεστή που περιγράφει τη λειτουργία του καναλιού. Παρακάτω στην Εικόνα 6.1 φαίνεται η όψη του υπερχειλιστή Λ9 συγκριτικά με τον υπερχειλιστή του Λ8. Είναι εμφανές πως εξαιτίας της παρατεταμένης χρήσης των υπερχειλιστών κάποιων ρυθμιστών έχει προκληθεί εμφανής μεταβολή της τραχύτητας των υπερχειλιστών. Η μεταβολή της τραχύτητας των υπερχειλιστών καθιστά απαραίτητη την αναζήτηση μίας πιο επίκαιρης και αντιπροσωπευτικής τιμής του συντελεστή υπερχείλισης. Για τον λόγο αυτό γίνονται δύο διαδοχικές διαδικασίες. Η πρώτη διαδικασία αποτελεί ευθύ υπολογισμό του συντελεστή υπερχείλισης θεωρώντας συντελεστή παροχής  $C_d$  των θυροφραγμάτων που προκύπτει από την προσαρμοσμένη σχέση  $C_d - a/H_1$  στα δεδομένα των επεισοδίων που βαθμονομήθηκαν χωρίς πλευρική υπερχείλιση. Η δεύτερη διαδικασία αποτελεί βαθμονόμηση του συντελεστή υπερχείλισης για ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων (Σφάλμα = Παροχή μοντέλου – Μετρούμενη παροχή), και παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.



**Εικόνα 6.1:** Άποψη υπερχειλιστών ρυθμιστή Λ8 και Λ9

Όπως παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 4.1** που αναλύθηκε το θεωρητικό υπόβαθρο αλλά και όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 6.4**, ο υπολογισμός του  $C_{spill}$  για κάθε επεισόδιο θεωρώντας σταθερό  $C_d$  αποτελεί απλή διαδικασία καθώς γίνεται με ευθύ υπολογισμό

χωρίς να απαιτείται κάποιος τύπος βαθμονόμησης. Σχολιάζεται βέβαια πως ενώ ο παρακάτω αλγόριθμος μπορεί να ευρίσκει μία τιμή του  $C_{spill}$  ώστε να μην υπάρχει σφάλμα παροχής, το γενικότερο σφάλμα (εφόσον υπάρχει) θα αποτυπωθεί στην τιμή του συντελεστή  $C_{spill}$ . Συνεπώς, από την κατανομή των τιμών του  $C_{spill}$  μπορούμε να εξαγάγουμε ορισμένα συμπεράσματα, τα οποία αναλύονται στο **Κεφάλαιο 7.6**.



**Διάγραμμα 6.4:** Αλγόριθμος υπολογισμού  $C_{spill}$

Όπου:

$\alpha_{eq}$  = equivalent opening of both sluice gates

$Q_{spill}$  = discharge of the spillway

$Q_{sluice}$  = sluice gate discharge as calculated from model

$Q_{mod}$  = discharge as calculated from current model

$C_d$  =  $C_d$  coefficient value with no spill

OF = objective function

$y_t$  = downstream water level

$H_1$  = upstream water level

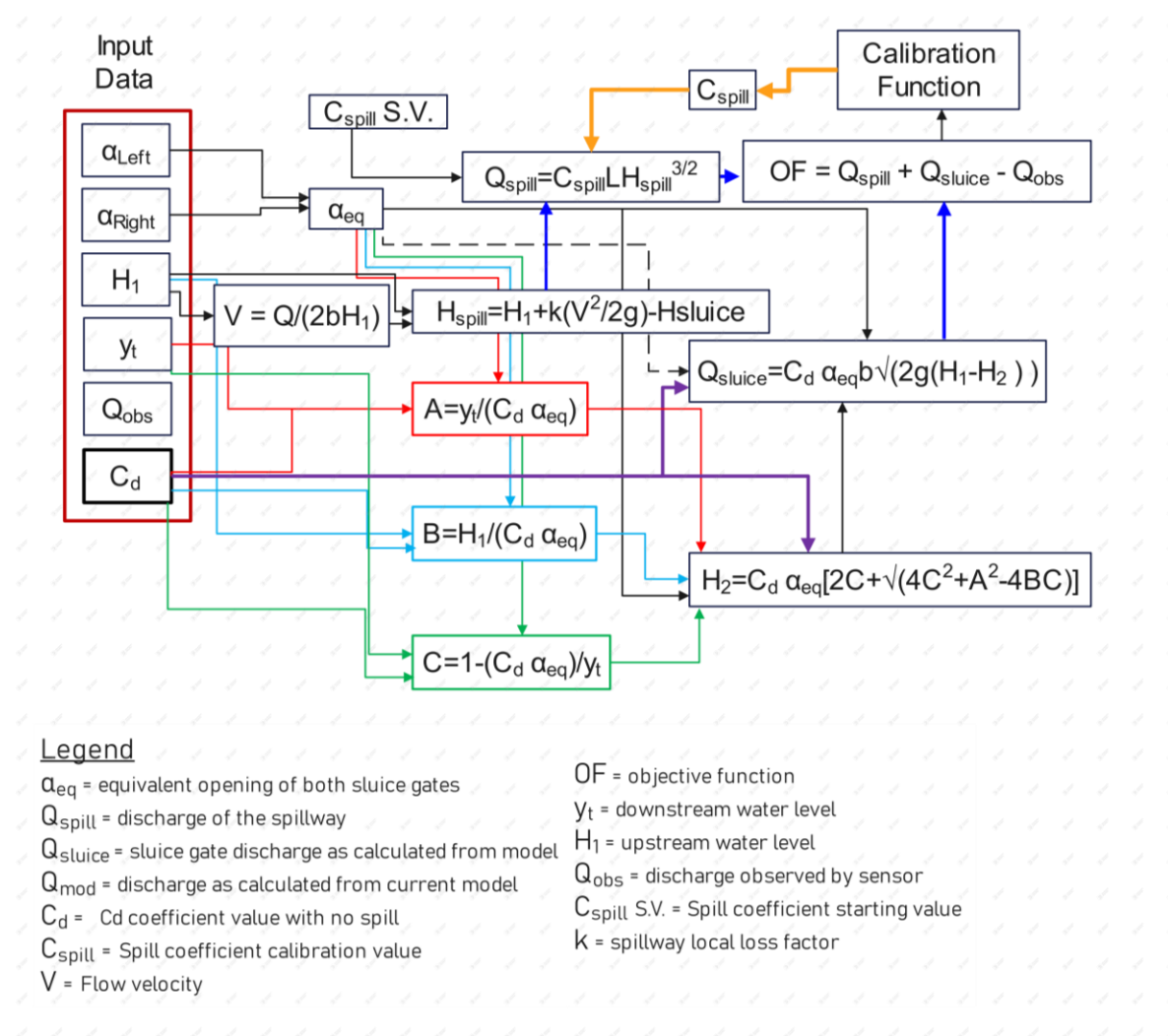
$Q_{obs}$  = discharge observed by sensor

### 6.4.3 Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης $C_{spill}$

Σε συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου παρουσιάζεται ο αλγόριθμος βαθμονόμησης του συντελεστή  $C_{spill}$ , καθώς οι βαθμονομημένοι συντελεστές περιγράφουν την υφιστάμενη κατάσταση λειτουργίας του καναλιού, αναλογίζοντας το ενδεχόμενο σφάλμα του μετρητικού συστήματος. Συνεπώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η

σύγκριση μεταξύ υπολογισμένων και βαθμονομημένων συντελεστών αποτελεί μία σημαντική βάση εξαγωγής συμπερασμάτων.

Η διαδικασία βαθμονόμησης των  $C_{spill}$  είναι παραπλήσια με αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για τη βαθμονόμηση των  $C_d$ . Η βασική διαφορά των δύο αλγορίθμων είναι πως ενώ ο αλγόριθμος που παρουσιάστηκε στο **Κεφάλαιο 6.4.1** δεν χρειαζόντανε την τιμή του  $C_{spill}$  καθώς επρόκειτο για επεισόδια χωρίς υπερχειλίση, στην παρούσα περίπτωση οι τιμές του  $C_d$  προκύπτουν από την προσαρμοσμένη σχέση που προέκυψε από την βαθμονόμηση του  $C_d$ .



**Διάγραμμα 6.5:** Διάγραμμα ροής βαθμονόμησης του συντελεστή  $C_{spill}$

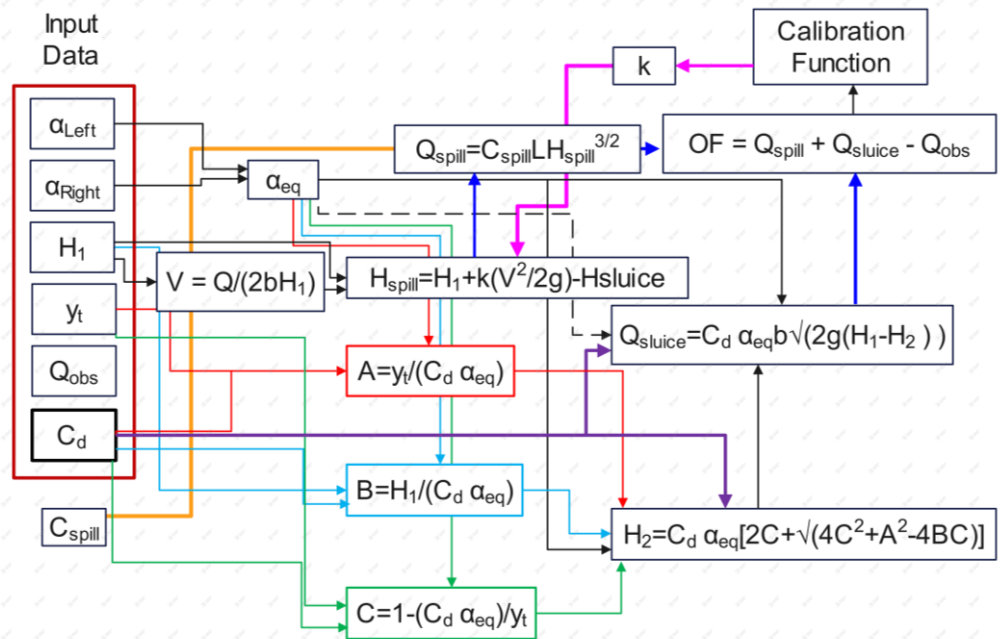
Βασική διαφοροποίηση της διαδικασίας υπολογισμού και βαθμονόμησης του  $C_{spill}$  είναι πως στην διαδικασία υπολογισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μεμονωμένες τιμές  $C_d$  που υπολογίστηκαν κατά την πρώτη βαθμονόμηση χωρίς να υπεισέρχεται κάποιο

σφάλμα στην όλη διαδικασία. Αντίθετα, η διαδικασία βαθμονόμησης χρησιμοποιείται για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος από την χρήση της προσαρμοσμένης καμπύλης για το  $C_d$ . Συνεπώς στην διαδικασία βαθμονόμησης στην ουσία εξετάζεται η εφαρμογή της προσαρμοσμένης πολυωνυμική καμπύλης 2<sup>ου</sup> βαθμού.

#### 6.4.4 Κατάστρωση μοντέλου βαθμονόμησης συντελεστή απωλειών $k$

Κατά τον υπολογισμό του υδραυλικού φορτίου του υπερχειλιστή υπεισέρχεται ο όρος της κινητικής ενέργειας, για τον υπολογισμό του οποίου χρησιμοποιείται η ταχύτητα ροής των υδάτων στην περιοχή του ρυθμιστή. Είναι εμφανές από την γεωμετρία του ρυθμιστή  $\Lambda$  πως εξαιτίας της χωροθέτησης των υπερχειλιστών στα πλευρικά τοιχεία, δεν συμβάλλει το σύνολο της κινητικής ενέργειας στο υδραυλικό φορτίο αλλά ένα μέρος της καθώς ο άξονας του υπερχειλιστή σχηματίζει γωνία περίπου  $80^\circ$  με την διεύθυνση της ταχύτητας ροής στο κανάλι. Έτσι κρίνεται σκόπιμη και αναγκαία η βαθμονόμηση του συντελεστή  $k$  αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω βημάτων. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του συντελεστή  $k$  παρουσιάζεται παρακάτω. Επισημαίνεται πως στα δεδομένα εισόδου των συντελεστών  $C_d$  και  $C_{spill}$  χρησιμοποιούνται οι σχέσεις  $C_d-a/H_1$  που προκύπτουν από την πρώτη βαθμονόμηση και η σχέση  $C_{spill} - S_{spill} \text{ Head}$  που προκύπτει από τις βαθμονομημένες τιμές του συντελεστή  $C_{spill}$ .





#### Legend

$\alpha_{eq}$ = equivalent opening of both sluice gates	OF = objective function
$Q_{spill}$ = discharge of the spillway	$y_t$ = downstream water level
$Q_{sluice}$ = sluice gate discharge as calculated from model	$H_1$ = upstream water level
$Q_{mod}$ = discharge as calculated from current model	$Q_{obs}$ = discharge observed by sensor
$C_d$ = $C_d$ coefficient value with no spill	$k$ = local energy loss factor
$C_{spill}$ = Spill coefficient calibration value	
$V$ = Flow velocity	

**Διάγραμμα 6.6:** Αλγόριθμος βαθμονόμησης συντελεστή τοπικών απωλειών

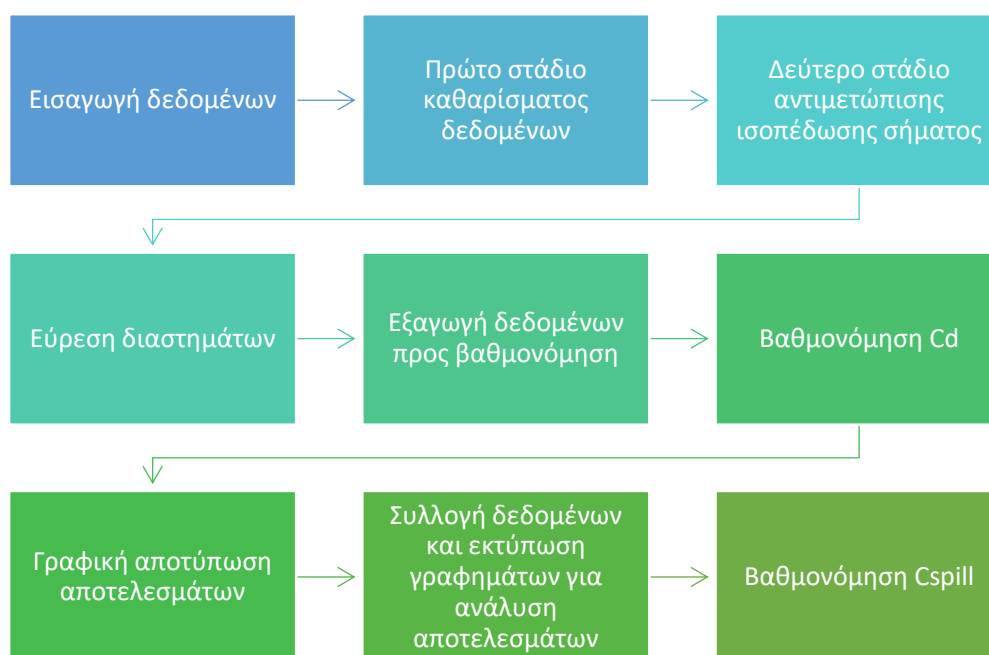
## 6.5 Ανάλυση Διεργασιών προγραμματισμού

### 6.5.1 Εισαγωγή

Ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού των παρακάτω διαδικασιών είναι κατά τις επεξεργασίες που λαμβάνουν χώρα να μην γίνονται αντικαταστάσεις μεταβλητών (overwrite). Συνεπώς έπειτα από κάθε επεξεργασία που γίνεται στα δεδομένα μίας χρονοσειράς, αποθηκεύονται σε νέα μεταβλητή καθώς έτσι είναι εφικτή η αξιολόγηση των διαδικασιών. Έτσι, η κάθε χρονοσειρά ονοματίζεται βάσει των μετασχηματισμών όπου έχουν εκτελεστεί ώστε να διακρίνεται εύκολα η πρόοδος των επεξεργασιών.

Οι επεξεργασίες που αναφέρθηκαν παραπάνω εκτελούνται μέσω κώδικα σε περιβάλλον προγραμματισμού MATLAB. Για την καλύτερη εποπτεία της πρόοδου των μετασχηματισμών οι διαδικασίες έχουν συνταχθεί σε ξεχωριστά scripts έτσι ώστε κάθε

script να εκτελεί ένα τμήμα των παραπάνω διεργασιών. Για την ομαλή εκτέλεση όλων των script συντάχθηκε ένα επιπλέον script το οποίο εκτελεί όλα τα script κατά την προγραμματισμένη σειρά εκτέλεσης ελέγχοντας παράλληλα την ύπαρξη όλων των δεδομένων εισόδου σε καθένα από τα επιμέρους scripts. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει κάποιο από τα απαιτούμενα δεδομένα εισόδου, τότε εκτελούνται όλες οι απαιτούμενες διεργασίες ώστε να δημιουργηθεί η μεταβλητή που λείπει. Οι διαδικασίες που εκτελούνται είναι οι εξής:



**Διάγραμμα 6.7:** Συνοπτική παρουσίαση διαδικασιών προγραμματισμού

Αρχικά εκτελείται η διαδικασία [“import data.m”](#) που αποτελεί διαδικασία εισαγωγής δεδομένων. Έπειτα ακολουθεί το καθάρισμα δεδομένων όπου χωρίζεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο, εκτελείται με το [“data cleaning 1st stage.m”](#) το οποίο εκτελεί την προεπεξεργασία των δεδομένων και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων επικύρωση τιμών, εξομάλυνση, συμπλήρωση και άλλα. Έπειτα εκτελείται το [“data cleaning 2nd stage.m”](#) το οποίο αφαιρεί τμήματα της χρονοσειράς που παρουσιάζουν ισοπέδωση σήματος (flatlining). Εν συνεχεία μέσω του [“episodes separation.m”](#) απομονώνονται όλα τα διαστήματα των οποίων η χαρακτηριστικές τιμές θα χρησιμοποιηθούν για την

βαθμονόμηση του  $C_d$  και μέσω του [“calibration data export.m”](#) αποθηκεύονται σε κατάλληλη διαμόρφωση οι διάμεσες τιμές των μεταβλητών για κάθε διάστημα. Ακολούθως εκτελείται το [“calibration script.m”](#) το οποίο αξιοποιεί την συνάρτηση [“coef.m”](#) για την βαθμονόμηση του συντελεστή  $C_d$  για κάθε διάστημα. Έπειτα, εκτελούνται τα [“Plot Cd-a/H1 values.m”](#) , [“plot Cd a/H1 values.m”](#) , [“plot data scenarios.m”](#), [“plot data colormap.m”](#) τα οποία κατά σειρά αφαιρούν τυχόν μιγαδικές λύσεις κατά την βαθμονόμηση, τυπώνουν γραφικά τα αρχικά αποτελέσματα, δημιουργούν όλα τα σενάρια που αξιολογούν την απόκλιση των τιμών του  $C_d$  και τα αποτυπώνουν γραφικά σε διασπορά τύπου colormap. Τέλος, εκτελείται η βαθμονόμηση του  $C_{spill}$  η οποία γίνεται μέσω των [“spill calibration script.m”](#) και [“coef spill.m”](#).

#### 6.5.2 Εισαγωγή δεδομένων προς επεξεργασία

Τα δεδομένα εξάγονται σε μορφοποίηση `datetime`, `double`, `double` με τον διαχωρισμό των δεδομένων να γίνεται με κόμμα και ως υποδιαστολή χρησιμοποιείται η τελεία (.). Αρχικά καθορίζεται το πλήθος των μεταβλητών προς εισαγωγή (τρεις μεταβλητές οι οποίες είναι οι `timestamp`, `value`, `flag` με την μεταβλητή `value` να περιγράφει το ποσοστό ανοίγματος επί τοις χιλίοις στους πίνακες ανοιγμάτων των θυροφραγμάτων και εν συνεχεία την στάθμη σε μέτρα στους αντίστοιχους πίνακες στάθμης. Έπειτα καθορίζεται το εύρος εισαγωγής των τιμών όπου αφαιρώντας την πρώτη γραμμή η οποία περιλαμβάνει τους τίτλους των στηλών το εύρος είναι το `[2, Inf]` και ως οριοθέτης δεκαδικών χρησιμοποιείται το κόμμα (,). Κατά την εισαγωγή ονομάζονται οι μεταβλητές που εισάγονται όπου στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται τα ονόματα `["timestamp", "value", "flag"]` όπου θα είναι τύπου `["datetime", "double", "double"]`. Τέλος αφού έχουν καθοριστεί όλες οι απαραίτητες μεταβλητές χρησιμοποιείται η εντολή `readtimetable` για την ανάγνωση και εισαγωγή των πινάκων. Οι μεταβλητές που εισάγονται ονομάζονται κατάλληλα π.χ. τα αρχικά δεδομένα ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος ονομάζονται `L10R` ήτοι `L10-Right`. Τα ονόματα και οι μεταβλητές όπου εισάγονται στο παρόν στάδιο παρουσιάζονται στον πίνακα παρακάτω.

L10R	Αρχικά δεδομένα ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος
L10L	Αρχικά δεδομένα ανοίγματος αριστερού θυροφράγματος
UWLL10	Αρχικά δεδομένα στάθμης ανάντη
DWLL10	Αρχικά δεδομένα στάθμης κατόντη
QL10	Αρχικά δεδομένα παροχής

**Πίνακας 6.1:** Ονομασία και περιγραφή των δεδομένων που εισάγονται προς επεξεργασία

### 6.5.3 Πρώτο στάδιο καθαρίσματος δεδομένων

Τα δεδομένα που καταγράφονται από τους αισθητήρες ανοίγματος ή στάθμης, αλλά και γενικότερα από κάθε τύπου αισθητήρα παρουσιάζει κάποιες φορές ορισμένα σφάλματα τα οποία πρέπει να διορθώνονται ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν. Αρχικά αφαιρούνται οι τιμές που είναι εκτός του αναμενόμενου εύρους τιμών πχ. άνοιγμα θυροφράγματος μεγαλύτερο του 100% ή μικρότερο του 0% κ.ο.κ. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή `rmoutliers` (remove outliers) η οποία χρησιμοποιώντας τον κυλιόμενο μέσο αφαιρεί τις τιμές που παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση σε σχέση με τις κοντινές τιμές τους, στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ο κυλιόμενος μέσος των τελευταίων 12 ωρών με κέντρο την εκάστοτε τιμή. Με τον τρόπο αυτό αφαιρούνται ορισμένες διακυμάνσεις οι οποίες είτε δεν συμβαίνουν πραγματικά είτε τους συμβαίνουν αλλά η συμπερίληψή δεν συνεισφέρει στην παρούσα ανάλυση. Στη συνέχεια με την εντολή `fillmissing` γίνεται συμπλήρωση των κενών που έχει η χρονοσειρά χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή. Επειδή όμως η συμπλήρωση μεγάλων κενών με γραμμική παρεμβολή θα αλλοίωνε σημαντικά τα δεδομένα, συμπληρώνεται στις επιλογές της συνάρτησης `fillmissing` η προσθήκη `"MaxGap"`, `hours(2)` η οποία δεν προχωρά σε συμπλήρωση κενών μεγαλύτερα των 2 ωρών. Η διάρκεια των 2 ωρών έχει προκύψει από δοκιμές ώστε κατόπιν οπτικού ελέγχου να μην αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της χρονοσειράς στην περιοχή των συμπληρωμένων τιμών. Έπειτα από την συμπλήρωση των κενών, είναι σημαντική η «ομαλοποίηση» των τιμών ώστε να μειωθεί ο θόρυβος των δεδομένων.

Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος των δεδομένων σε ποιες περιοχές η μεταβολή του ανοίγματος των θυροφραγμάτων είναι μικρότερη από την διακριτική ικανότητα κίνησης του θυροφράγματος (1%), με αποτέλεσμα να γίνεται διόρθωση όλων των ψευδών κινήσεων. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας την απόλυτη τιμή της διαφοράς των όρων  $i$  και  $i+1$ , ώστε σε περιπτώσεις όπου είναι μικρότερη από 1% η τιμή  $i$  λαμβάνεται ίση με την  $i+1$ . Τέλος καθώς ορισμένες τιμές, έπειτα από την παραπάνω επεξεργασία προκύπτουν με περισσότερα δεκαδικά ψηφία από αυτά που ενδιαφέρεται η παρούσα ανάλυση γίνεται στρογγυλοποίηση των τιμών σε πολλαπλάσια του 0.5%.

Οι διαδικασίες που περιλάφτηκαν παραπάνω ήταν κατά σειρά: remove outliers (O), fill missing (F), smooth data (S), round values (R), differentiate values (D). Συνεπώς κατά την εκτέλεση των παραπάνω διαδικασιών από τη χρονοσειρά L10R προκύπτουν κατά σειρά οι χρονοσειρές L10R\_O, L10R\_OF, L10R\_OFS, L10R\_OFSR, L10R\_OFSRD. Η ίδια μεθοδολογία ονομασίας ακολουθείται και για τις υπόλοιπες μεταβλητές. Τα δεδομένα στάθμης και παροχής δεν χρειάζονται στρογγυλοποίηση και διακριτοποίηση οπότε η κατάληξη των μεταβλητών αυτών θα είναι QL10\_OFS αντί για QL10\_OFSRD.

#### 6.5.4 Δεύτερο στάδιο αντιμετώπισης ισοπέδωσης σήματος

Ένα ακόμα συχνό πρόβλημα που παρουσιάζεται σε δεδομένα όπου προέρχονται από αισθητήρες είναι το flatlining ή αλλιώς η «ισοπέδωση» του σήματος όπου επιστρέφουν. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε πλήθος λόγων και το αποτέλεσμα συνήθως είναι να παραμένουν στάσιμες οι τιμές όπου προέρχονται από τους αισθητήρες ακόμα και όταν υπάρχουν πραγματικά μεταβολές. Αυτές οι περιοχές είναι εύκολα αναγνωρίσιμες και με οπτικό έλεγχο των δεδομένων καθώς παρουσιάζονται ασυνήθιστα μεγάλες ευθυγραμμίες (περιοχές χωρίς μεταβολές). Όταν παρουσιάζεται flatlining θεωρούμε ότι τα δεδομένα στην εν λόγω περιοχή είναι αναξιόπιστα και πρέπει να αγνοούνται. Στόχος είναι η διαμόρφωση κώδικα όπου να αναγνωρίζει και να αφαιρεί τμήματα με τέτοια συμπεριφορά.

Για την αναγνώριση περιοχών στις οποίες παρουσιάζεται ισοπέδωση σήματος αρχικά ορίζεται η διάρκεια ευθυγραμμίας πάνω από την οποία θεωρούμε ότι έχουμε flatlining. Αυτό επιτυγχάνεται εξετάζοντας τη χρονοσειρά L10R και L10L σε αντιπαραβολή με τα δεδομένα στάθμης, τα οποία δεν παρουσιάζουν πρόβλημα flatlining. Εντοπίζουμε τις περιοχές όπου τα ανοίγματα των θυροφραγμάτων παραμένουν στάσιμα για ασυνήθιστα μεγάλο χρονικό διάστημα ενώ παράλληλα τα δεδομένα στάθμης παρουσιάζουν μεταβολή. Αυτό γίνεται διότι σύμφωνα με τις πρακτικές χειρισμού των θυροφραγμάτων δεν είναι ασυνήθιστο να μην εκτελείται μεταβολή του ανοίγματος για κάποιες μέρες ακόμα και μία εβδομάδα, ιδίως τους μήνες όπου έχει σχετικά σταθεροποιηθεί η ζήτηση νερού (πχ. κατά τους χειμερινούς μήνες). Συνεπώς, υπάρχουν περιοχές όπου το σήμα παρουσιάζει ευγραμμία χωρίς να αποτελεί περίπτωση ισοπέδωσης σήματος. Κατά συνέπεια πρέπει να γίνει διαχωρισμός των περιπτώσεων ευθυγραμμίας λόγω ακινησίας των θυροφραγμάτων και λόγω ισοπέδωσης του σήματος. Έπειτα από οπτική επιτήρηση των δεδομένων το κατώφλι πάνω από το οποίο θεωρούμε ισοπέδωση σήματος ορίστηκε 1 μήνας ευθυγραμμίας. Το κατώφλι αυτό ονομάζεται fln\_interval και αντιστοιχεί σε 44.640 λεπτά τα αντιστοιχούν σε 8.928 τιμές αφού τα δεδομένα είναι σε ανάλυση πεντάλεπτου.

Ο εντοπισμός των περιοχών όπου παρουσιάζουν flatlining γίνεται μέσω της πρώτης παράγωγου της χρονοσειράς των ανοιγμάτων των θυροφραγμάτων. Σε περιοχές όπου η

πρώτη παράγωγος μηδενίζεται για  $fln\_interval$  διαδοχικά βήματα, όπου  $fln\_interval$  είναι η παράμετρος όπου αναλύθηκε παραπάνω και ισούται με 8.928 βήματα, θεωρούμε ότι έχουμε flatlining. Ένα βασικό πρόβλημα που προκύπτει είναι πως επειδή τα δεδομένα παρουσιάζουν βαθμιδωτή συμπεριφορά με σχετικά συχνές μεταβολές, η πρώτη παράγωγος μηδενίζεται πολύ συχνά. Ως εκ τούτου είναι αρκετά δύσκολο να γίνει οπτική επιτήρηση των αποτελεσμάτων. Για το λόγο αυτό, δημιουργείται μια νέα χρονοσειρά στην οποία γίνεται εξομάλυνση της πρώτης παραγώγου με κυλιόμενο μέσο, με αποτέλεσμα περιοχές όπου παρατηρείται συχνός μηδενισμός της πρώτης παραγώγου να μην μηδενίζονται, καθώς με τη χρήση του κυλιόμενου μέσου η μέση τιμή του μηδέν και κάποιας άλλης τιμής μεγαλύτερης του μηδενός προκύπτει επίσης μία τιμή μεγαλύτερη του μηδενός. Παράλληλα, περιοχές όπου παρουσιάζουν συνεχόμενο μηδενισμό της πρώτης παραγώγου (περιοχές με flatlining) δεν επηρεάζονται καθώς ο μ.ο. μηδενικών όρων προκύπτει επίσης μηδέν. Έτσι με χρήση ενός βρόγχου ο οποίος εξετάζει μηδενισμό της παραγώγου από  $ii$  έως  $ii+fln\_interval$  δημιουργείται ένας πίνακας στον οποίο καταχωρείται 0 ή 1 αναλόγως με την ύπαρξη ή μη flatling (0 περιοχές με ισοπέδωση, 1 περιοχές χωρίς ισοπέδωση σήματος). Έτσι προκύπτει ο πίνακας  $L10R\_FL\_ind$  με διάσταση ίση με τη διάσταση της παραγώγου μείον 8.928 στον οποίο έχουν αποθηκευτεί η ύπαρξη ή μη flatlining. Στη συνέχεια με ξεχωριστό βρόγχο δίνεται η εντολή όπου  $L10R\_FL\_ind.L10R\_FL\_ind(ii)==0$  τότε γίνεται η απαλοιφή  $L10R\_FL.L10R\_OFSRD(ii) = NaN$ . Έτσι, προκύπτει η χρονοσειρά  $L10R\_FL$  η οποία αποτελείται από τη χρονοσειρά  $L10R\_OFSRD$  (τελικό βήμα του 1<sup>ου</sup> σταδίου) αφού αφαιρεθούν οι περιοχές με flatlining.

Αξίζει να αναφερθεί πως αντί της αναλυτικής παραγώγου χρησιμοποιείται η προσεγγιστική παράγωγος η οποία υπολογίζεται με την εντολή  $diff$  του MATLAB και αντιστοιχεί στο  $f(ii+1)-f(ii)$  οπότε παραλείπεται η διαίρεση  $t(ii+1)-t(ii)$  καθώς το  $dt$  είναι σταθερό και ίσο με 5 λεπτά. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω από την  $L10R\_diff$  προκύπτει η  $L10R\_Sdiff$  η οποία αποτελεί την εξομαλυμένη χρονοσειρά η οποία χρησιμοποιείται για οπτικό εντοπισμό των περιοχών με flatlining.

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται για το αριστερό και δεξί θυρόφραγμα. Οι χρονοσειρές στάθμης δεν παρουσιάζουν flatling οπότε εξαιρούνται της παρούσας διαδικασίας. Η χρονοσειρά των παροχών σπανίως παρουσιάζει flatlining οπότε η διαδικασία εκτελείται υπό όρους. Υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις των διαστημάτων

$ii:ii+fln\_interval$ ,  $ii+1:ii+1+fln\_interval$  κ.ο.κ. έως ότου υπολογιστούν οι τυπικές αποκλίσεις όλων των διαστημάτων μέσα στο κυλιόμενο παράθυρο ενός μήνα μέχρι εξαντλήσεως της χρονοσειράς. Εν συνεχεία εντοπίζεται η ελάχιστη τιμή των τυπικών αποκλίσεων που υπολογίστηκαν και αν αυτή είναι μικρότερη από μία τιμή  $e=0.05$ , τότε θεωρούμε ότι υπάρχει διάστημα μήκους  $fln\_interval$  όπου δυνητικά παρουσιάζει flatlining και εκτελείται η διαδικασία αφαίρεσης των τμημάτων με flatlining. Διαφορετικά η διαδικασία παρακάμπτεται και επομένως αντιπροσωπευτική θεωρείται η χρονοσειρά QL10\_OFS που προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο.

#### 6.5.5 Εύρεση διαστημάτων

Έπειτα από την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών ο επόμενος στόχος είναι ο εντοπισμός των τμημάτων στα οποία δεν έχει προηγηθεί σημαντική μεταβολή του ανοίγματος των θυροφραγμάτων για τουλάχιστον  $k$  λεπτά όπου καθώς τα δεδομένα είναι σε 5 λεπτά χρησιμοποιούμε την μεταβλητή  $n = k/5$ , με το  $k$  να παίρνει τέτοιες τιμές ώστε το  $n$  να προκύπτει ακέραιος (με αποτέλεσμα να λειτουργεί και ως index). Ο λόγος που αναζητούμε διαστήματα στα οποία δεν έχει γίνει κάποια μεταβολή στο άνοιγμα των θυροφραγμάτων για μία χρονική διάρκεια  $k$ , είναι διότι είναι σημαντικό τα δεδομένα με τα οποία θα βαθμονομηθούν οι συντελεστές  $C_d$  να μην προέρχονται από περιοχές όπου υπάρχουν διαταραχές στο βάθος ροής, την παροχή κ.ο.κ. Αυτό εξασφαλίζεται επιλέγοντας σειρές δεδομένων που προέρχονται από χρονικές στιγμές όπου δεν έχει εκτελεστεί κάποια μεταβολή για χρονική διάρκεια που να επαρκεί για την σταθεροποίηση των μετρήσεων στο κανάλι. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης επεισοδίων σε κάθε θυρόφραγμα ξεχωριστά, διότι η κίνηση του αριστερού και δεξιού θυροφράγματος συνήθως δεν είναι ταυτόχρονη. Γι' αυτό εν συνεχεία απαιτείται συναλήθευση των διαστημάτων ώστε να προκύψουν τα διαστήματα στα οποία δεν παρατηρείται κίνηση από κανένα εκ των δύο θυροφραγμάτων.

Αφού η μεταβλητή  $n$  αντίστοιχη και με τα indexes δημιουργούμε ένα for loop στο οποίο ελέγχουμε ότι από  $ii$  έως  $ii+n$  δεν έχει υπάρξει κάποια μεταβολή στο άνοιγμα των θυροφραγμάτων. Έτσι εφαρμόζοντας την ίδια λογική με αυτήν που εφαρμόστηκε για το flatline detection δημιουργείται ένας πίνακας στον οποίο όταν η συνθήκη ελέγχου είναι αληθής σημειώνονται από το σημείο  $ii$  έως το  $ii+n$  μονάδες (1). Όταν η συνθήκη ελέγχου



παύει να είναι αληθής τότε στο σημείο αυτό καταχωρείται ο αριθμός μηδέν (0). Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εντολή find η οποία επιστρέφει τον αύξοντα αριθμό (index) σε κάθε σημείο όπου βρίσκεται μια μονάδα. Έτσι δημιουργείται ένας πίνακας ο οποίος περιέχει όλα τα indexes των περιοχών στις οποίες δεν έχει παρατηρηθεί μεταβολή του ανοίγματος των θυροφραγμάτων για k συνεχόμενα λεπτά. Έτσι αξιοποιώντας τον παραπάνω πίνακα που περιέχει τους δείκτες των σημείων των επιλεχθέντων διαστημάτων, με ένα επιπλέον βρόγχο κρατάμε τα indexes αρχής και τέλους κάθε επεισοδίου.

Μεταβάλλοντας τη χρονική διάρκεια k των διαστημάτων που αναζητούμε, προκύπτει διαφορετικός αριθμός διαστημάτων και διαφορετικά διαστήματα για κάθε διάρκεια k. Συνεπώς επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία από n=12:12:288 όπου αντιπροσωπεύουν διαστήματα (60 120 180 κ.ο.κ.). Τα επεισόδια αποθηκεύονται με το index αρχής και τέλους σε πίνακα με διάταξη στήλης, ώστε ανά δύο γραμμές να έχουμε το index αρχής και τέλους του επεισοδίου. Σε κάθε στήλη αποθηκεύονται τα επεισόδια που προκύπτουν για κάθε διάρκεια k. Αφού η παρούσα ανάλυση εξετάζει τιμές n = 12:12:288 ήτοι 24 διαφορετικές τιμές του n, έτσι και τα αποτελέσματα θα έχουν 24 στήλες. Το πλήθος στοιχείων της κάθε στήλης δια δύο εκφράζει τον αριθμό διαστημάτων που έχουν εντοπιστεί για κάθε διάρκεια. Συγκεντρώνουμε τη διάρκεια κάθε διαστήματος με τον αριθμό επεισοδίων που έχει βρεθεί για την εν λόγω διάρκεια σε ένα πίνακα στα οποία δεδομένα προσαρμόζεται μια εκθετική συνάρτηση 2 όρων (fit exp 2). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται εκ νέου και για το άλλο θυρόφραγμα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στόχος είναι η εύρεση διαστημάτων στα οποία δεν παρατηρείται κίνηση σε κανένα εκ των δύο θυροφραγμάτων. Στο προηγούμενο βήμα προέκυψαν τα επεισόδια του αριστερού και δεξιού θυροφράγματος. Έτσι το επόμενο βήμα είναι η συναλήθευση των παραπάνω διαστημάτων όπου με τον όρο συναλήθευση νοείται η εύρεση της τομής των παραπάνω διαστημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται δημιουργώντας δύο πίνακες (ένα για κάθε θυρόφραγμα) με πλήθος στοιχείων ίσο με το πλήθος στοιχείων της κάθε χρονοσειράς που έχει προκύψει από το ["data cleaning 2nd stage.m"](#) που είναι οι χρονοσειρές L10R\_FL και L10R\_FL αντίστοιχα. Στους παραπάνω πίνακες καταχωρείται μηδέν (0) αν η εν λόγω τιμή περιλαμβάνεται σε επεισόδιο και ένα (1). Στη συνέχεια οι παραπάνω πίνακες συγχρονίζονται ώστε να

έρθουν στην ίδια χρονική βάση και να μπορούν να γίνουν συγκρίσεις των δύο πινάκων. Έτσι στο επόμενο βήμα μέσω βρόγχου προκύπτει μία τρίτη χρονοσειρά με πλήθος στοιχείων ίσο με το πλήθος στοιχείων των συγχρονισμένων χρονοσειρών, στην οποία καταχωρείται μονάδα μόνο σε περίπτωση που και οι δύο χρονοσειρές έχουν μονάδα στη θέση αυτή. Έτσι προκύπτει μία χρονοσειρά που περιλαμβάνει μηδέν (0) και ένα (1) αναλόγως με την ύπαρξη ή μη επεισοδίου στη θέση αυτή. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται συνολικά 24 φορές, μία φορά για κάθε n.

#### 6.5.6 Εξαγωγή δεδομένων προς βαθμονόμηση

Έπειτα από την εύρεση των διαστημάτων απαιτείται η συγκέντρωση όλων των δεδομένων εισαγωγής στον αλγόριθμο βαθμονόμησης του  $C_d$ . Όπως είδαμε παραπάνω, ο αλγόριθμος εύρεσης επεισοδίων επιστρέφει το index αρχής και τέλους του κάθε επεισοδίου. Ως χαρακτηριστική τιμή κάθε μεταβλητής για οποιοδήποτε επεισόδιο επιλέγεται η διάμεσος τιμή, καθώς δεν επηρεάζεται από ακραίες παρατηρήσεις. Συνεπώς για τα ανοίγματα των θυροφραγμάτων, εφόσον στον αλγόριθμο βαθμονόμησης χρησιμοποιείται το μέσο άνοιγμα, υπολογίζεται η διάμεσος τιμή του ανοίγματος κάθε επεισοδίου κάθε θυροφράγματος και εν συνεχεία υπολογίζεται η μέση τιμή των τιμών αυτών. Εν συνεχεία, εξάγονται οι διάμεσες τιμές της ανάντη και κατάντη στάθμης καθώς και της παροχής των επεισοδίων. Εφόσον τα επεισόδια κάθε διάρκειας αποθηκεύονται ως array αρχής και τέλους (όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2), η παραπάνω διαδικασία εκτελείται με loop με φορά κίνησης κατά ii και εν συνεχεία κατά jj. Συνεπώς ο βρόγχος κινείται ii = 1:2:end και jj = 1:end. Έτσι αποθηκεύονται στη δομή ExportData (structure) όλα τα δεδομένα εισόδου της βαθμονόμησης. Παράλληλα με τα παραπάνω εξάγονται και ορισμένα δεδομένα που θα χρειαστούν στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων όπως η τυπική απόκλιση των δεδομένων στάθμης και παροχής των επεισοδίων, καθώς και η διαφορά του διάμεσου ανοίγματος του δεξιού – αριστερού θυροφράγματος σε κάθε επεισόδιο.

Episode Duration 120min	Episode Duration 180min	Episode Duration 240min	Episode Duration 300min	Episode Duration 360min	Episode Duration 420min	
Start_index1	Start_index1	Start_index1	Start_index1	Start_index1	Start_index1	...
End_inde1	End_inde1	End_inde1	End_inde1	End_index1	End_inde1	...
Start_index2	Start_index2	Start_index2	Start_index2	Start_index2	Start_index2	...
End_index2	End_index2	End_index2	End_index2	End_index2	End_index2	...
Start_index3	Start_index3	Start_index3	Start_index3	Start_index3	Start_index3	...
End_index3	End_index3	End_index3	End_index3	End_index3	End_index3	...
...	...	...	...	...	...	...

**Πίνακας 6.2:** Διάταξη output επεισοδίων

#### 6.5.7 Μοντέλο ταυτόχρονης βελτιστοποίησης παραμέτρων ( $C_d$ , $C_{spill}$ , $k$ )

Η δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται το προγραμματιστικό σκέλος της εν λόγω βαθμονόμησης και οι όποιες διαφοροποιήσεις από τις διαδικασίες βαθμονόμησης λιγότερων σταθερών. Αρχικά αναφέρεται πως για την διαδικασία βελτιστοποίησης εξετάστηκαν τρεις διαφορετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης: ο `fminsearch`, ο `ga` και ο `annealing`. Αναφέρεται πως ανεξαρτήτως του αλγορίθμου που επιλέχθηκε τα αποτελέσματα συνέκλιναν στις ίδιες τιμές. Οι περιπτώσεις στις οποίες δεν υπήρξε σύγκλιση, αυτό οφείλεται όπως προαναφέρθηκε στην φύση του προβλήματος και τη δομή του μοντέλου βελτιστοποίησης.

Σε προβλήματα βελτιστοποίησης περισσότερων της μίας παραμέτρου, δημιουργείται ένα διάνυσμα, έστω  $x$ , με τις συντεταγμένες του να αντιπροσωπεύουν την κάθε μεταβλητή προς βελτιστοποίηση. Στην περίπτωσή μας, επιλέγεται ο συμβολισμός  $x = [C_d, C_{spill}, k]$  το οποίο σημαίνει πως  $C_d = x(1)$ ,  $C_{spill} = x(2)$  και  $k = x(3)$ . Έπειτα δημιουργείται μία συνάρτηση στόχου της βελτιστοποίησης η οποία δέχεται τα δεδομένα εισόδου που παρουσιάστηκαν στον αλγόριθμο παραπάνω και επιστρέφει μία τιμή της σφάλματος. Σε

προβλήματα που χρησιμοποιείται ο εξελικτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης  $ga$  η συνάρτηση στόχου αναφέρεται και ως `fitness_function`. Η συνάρτηση στόχου εκτελεί όλες τις υπολογιστικές διεργασίες που παρουσιάστηκαν στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και επιστρέφει το αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα, το οποίο ορίζεται ως την απόκλιση της υπολογισμένης παροχής του μοντέλου από την μετρούμενη. Συνηθίζεται μέσα στην συνάρτηση στόχου να τοποθετείται και μία συνάρτηση ποινής ή ρήτρας (`penalty function`) που έχει ως στόχο να αποθαρρύνει τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης από το να καταλήγει σε ανεπιθύμητες τιμές. Η λειτουργία της συνάρτησης ρήτρας είναι σχετικά απλή, με χρήση ενός ή περισσότερων `if statement` καθορίζουμε τις περιπτώσεις στις οποίες επιβάλλεται η ρήτρα και όταν συμβαίνει αυτό, προσαυξάνουμε το σφάλμα της συνάρτησης στόχου κατά ένα μεγάλο αριθμό (συνήθως  $10^6$  ή και μεγαλύτερο).

Έπειτα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, τα δεδομένα εισάγονται σε «πακέτα». Αυτό αποτελεί την ενδιάμεση μεθοδολογία που αναφέρθηκε προηγουμένως και ουσιαστικά σημαίνει πως στη βαθμονόμηση εισάγονται 5 ή/και 10 επεισόδια ταυτόχρονα προς βελτιστοποίηση. Αυτό γίνεται εισάγοντας ένα κυλιόμενο παράθυρο από τα δεδομένα των επεισοδίων. Πιο συγκεκριμένα κατά την πρώτη βαθμονόμηση εισάγεται μία διάταξη 10 επεισοδίων, από το πρώτο έως το δέκατο. Κατά την δεύτερη βαθμονόμηση εισάγεται μία διάταξη από το δεύτερο έως το ενδέκατο κ.ο.κ. έως ότου ο δείκτης τέλους της διάταξης φτάσει το τελευταίο επεισόδιο. Είναι σημαντικό για την εκτέλεση των παραπάνω διαδικασιών να επαληθευτεί πως η συνάρτηση στόχου και ποινής έχουν συνταχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εκτελούν τις πράξεις μητρωικά.

## 6.6 Μοντέλο διαδοχικής βαθμονόμησης

### 6.6.1 Βαθμονόμηση $C_d$

Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου βαθμονόμησης του  $C_d$  έχει παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 6.4.1. Όπως φαίνεται στο κεφάλαιο αυτό μέσα στη διαδικασία βαθμονόμησης υπεισέρχονται ορισμένοι συντελεστές εξαρτώμενοι από το  $C_d$ . Συνεπώς προκειμένου να ολοκληρωθεί επιτυχώς η διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να δημιουργηθεί μία συνάρτηση που να περιέχει όλα τα εξαρτώμενα από το  $C_d$  μεγέθη. Αυτό διότι για την

βαθμονόμηση χρησιμοποιείται η συνάρτηση `fminsearch` η οποία μέσω διαδοχικών δοκιμών ελαχιστοποιεί μία συνάρτηση στόχου. Παρακάτω παρατίθεται η συνάρτηση `coef.m` η οποία υπολογίζει το σύνολο των εξαρτημένων μεγεθών από το  $C_d$  καθώς και τη συνάρτηση στόχου, ώστε η εντολή `fminsearch` ελαχιστοποιώντας την OF να καταλήξει στην βέλτιστη τιμή του  $C_d$ .

```
function out = coef(a,yt,H1,Q,width,Cd)

g=9.81;

q = Q./(2*width);
y = a.*Cd;
alpha = yt./y;
beta = H1./y;
gamma = 1-(y./yt);

DELTA = 4*gamma.^2+alpha.^2-(4*beta).*gamma;

H2 = (2*gamma+DELTA.^0.5).*y;

DH = H1-H2;

q_mod = (Cd.*a).*((2*g*DH).^0.5);

out = (q_mod-q).^2;

end
```

Από την παραπάνω διαδικασία αποθηκεύονται τρία είδη αποτελεσμάτων:

- ❖ ο βαθμονομημένος συντελεστής παροχής των θυροφραγμάτων
- ❖ η τιμή της συνάρτησης στόχου κατά την ολοκλήρωση της βαθμονόμησης του επεισοδίου
- ❖ η λογική μεταβλητή `exitflag` που αντιπροσωπεύει την επιτυχημένη ή μη βαθμονόμηση του συντελεστή

Έπειτα από την εκτέλεση της βαθμονόμησης είναι υποχρεωτικό να γίνει επικύρωση των αποτελεσμάτων διότι σε περίπτωση όπου η διακρίνουσα που φαίνεται στον παραπάνω κώδικα (`DELTA`) είναι αρνητική, τότε προκύπτει μιγαδική λύση στην συνάρτηση στόχου. Συνεπώς μέσω μίας επιπλέον διαδικασίας αφαιρούνται όλες οι μιγαδικές ρίζες που έχουν προκύψει από τη βαθμονόμηση καθώς και τιμές όπου η τελική τιμή της συνάρτησης στόχου είναι μεγάλη ή έχουν `exitflag` μηδέν (0).

### 6.6.2 Βαθμονόμηση Cspill

Σε αντιστοιχία με το Κεφάλαιο 6.6.1 η μεθοδολογία βαθμονόμησης των συντελεστών  $C_{spill}$ ,  $k$  είναι παραπλήσια με αυτή που παρουσιάστηκε στο εν λόγω κεφάλαιο. Συνεπώς στο παρόν κεφάλαιο δίνεται έμφαση στις όποιες διαφοροποιήσεις των δύο μεθοδολογιών. Οι βασικές διαφοροποιήσεις είναι δύο, αρχικά η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση δύο παραμέτρων έναντι μίας στο κεφάλαιο 6.6.1 και η ανάγκη ορισμού πεδίου τιμών για τη βελτιστοποίηση. Η αναζήτηση δύο μεταβλητών δεν διαφοροποιεί σημαντικά την μεθοδολογία εκτός από την μεθοδολογία αποθήκευσης των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός structure στο οποίο θα αποθηκεύονται τα outputs με το τέλος κάθε βρόγχου κατά  $ii$ , καθώς εξαιτίας της συνάρτησης τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε local variable της συνάρτησης και με την εναλλαγή από  $jj = 1$  σε  $jj = 2$ , η στήλη  $jj = 1$  από  $ii = 1:end$  γίνονται αυτομάτως rewrite (οι συναρτήσεις δημιουργούν τοπικές μεταβλητές local variables που δεν αποθηκεύονται μαζί με τις global variables με αποτέλεσμα με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης της συνάρτησης να καταργούνται όλες οι μεταβλητές που έχουν δημιουργηθεί εκτός από τα outputs). Στη συνέχεια, η δεύτερη διαφοροποίηση είναι πως σύμφωνα με την εξίσωση 6.1 φαίνεται για δεδομένες τιμές παροχής και στάθμης υπάρχει ένα σύνολο σημείων ( $C_{spill}$ ,  $k$ ) με τα οποία διέρχεται η μετρούμενη παροχή. Συνεπώς θέτοντας το πεδίο τιμών στο εύρος των αναμενόμενων τιμών από τη βιβλιογραφία βρίσκεται η βέλτιστη τιμή των δύο μεταβλητών η οποία θεωρείται πιο αντιπροσωπευτική.

$$Q_0 = C_{spill} L \sqrt{2g} \left( H_1 + k * \frac{V^2}{2g} - h_{sluice} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6.1)$$

```
function out = coefspill(V,H1,Q,q_sluice,Cspill,k)
h = 2.23;
g = 9.81;
L = 60;

head = (k.*(V.^2))./(2*g) + H1 - h;
q_spill = Cspill.*L.*(head.^1.5);

out = abs(Q - q_sluice - q_spill);

end
```

Όπως φαίνεται στην παραπάνω συνάρτηση οι μεταβλητές που βελτιστοποιούνται είναι οι  $C_{spill,k}$  επομένως καλούνται ως εξής:

```
%construction of the function
fun = @(x)coefspill(InputData.FlowVelocity(i),InputData.upstream(i),
InputData.discharge(i),InputData.Qsluice(i),x(1),x(2));

%optimization
[xsol,fval,exitflag,output] = simulannealbnd(fun,(lb+ub)./2,lb,ub);
```

### 6.6.3 Υπολογισμός $C_{spill}$

Αποτελεί απλή υπολογιστική διαδικασία σύμφωνα με το διάγραμμα ροής που παρουσιάστηκε και συνεπώς δεν απαιτείται περαιτέρω ανάλυση. Αναφέρεται μόνο πως η βασική διαφορά υπολογισμού του  $C_{spill}$  σε σχέση με τη βαθμονόμηση του είναι πως στην περίπτωση της βαθμονόμησης ελαχιστοποιείται εκ νέου το όποιο υπολογιστικό σφάλμα έχει προκύψει με τους προηγουμένως εκτελεσμένους υπολογισμούς.

### 6.6.4 Γραφική αποτύπωση αποτελεσμάτων

Η αποτύπωση των αποτελεσμάτων γίνεται μέσω scatter plot (νέφος τιμών) του συντελεστή  $C_d$  συναρτήσει του λόγου  $a/H_1$ , ενώ μέσω βρόγχου τυπώνεται ένα γράφημα για κάθε διάρκεια επεισοδίων. Στα γραφήματα αυτά τυπώνεται και κατανομή  $C_d$ - $a/H_1$  κατά Wu and Rajaratnam καθώς και η διάμεση τιμή του νέφους των σημείων μέσω της  $gline$ . Τέλος δημιουργούνται οι απαιτούμενες μεταβλητές ώστε το κάθε γράφημα να έχει αντιπροσωπευτική περιγραφή, τίτλο κ.ο.κ..

### 6.6.5 Συλλογή δεδομένων και εκτύπωση γραφημάτων για ανάλυση αποτελεσμάτων

Για την καλύτερη ανάλυση και εποπτεία των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμη η δημιουργία στοχευμένων γραφημάτων. Συνεπώς αναλόγως με τη φύση των δεδομένων, χρησιμοποιούνται τα παρακάτω γραφήματα ώστε να αποτυπωθεί η κάθε πληροφορία με τον αποδοτικότερο τρόπο. Έτσι, μεταξύ άλλων χρησιμοποιούνται:

- ❖ scatter plots
- ❖ line plots
- ❖ colormap scatter plots
- ❖ histograms
- ❖ boxplots

Τα διαγράμματα σημείων χρησιμοποιούνται για αποτύπωση ενός νέφους τιμών. Τα διαγράμματα γραμμής χρησιμοποιούνται για συνεχείς μεταβλητές και μπορεί να είναι από ευθείες τύπου  $y=c$  ή  $x=c$  μέχρι και αποτέλεσμα προσαρμογής καμπύλης σε νέφος τιμών όπως εκθετική ή πολυωνυμική συνάρτηση. Τα scatter plots με colormap κατά κανόνα χρησιμοποιούνται για αποτύπωση τριών μεταβλητών σε ένα διάγραμμα όπου η τρίτη μεταβλητή αποτυπώνεται μέσω χρωματισμού των σημείων. Τα ιστογράμματα αποτελούν βασικό εργαλείο της στατιστικής και βοηθούν στην αποτύπωση της κατανομής μίας μεταβλητής. Τέλος τα boxplots αποτελούν μία εναλλακτική μέθοδο αποτύπωσης κατανομών όπου το βασικό τους πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα αποτύπωσης πολλών κατανομών σε ένα διάγραμμα.

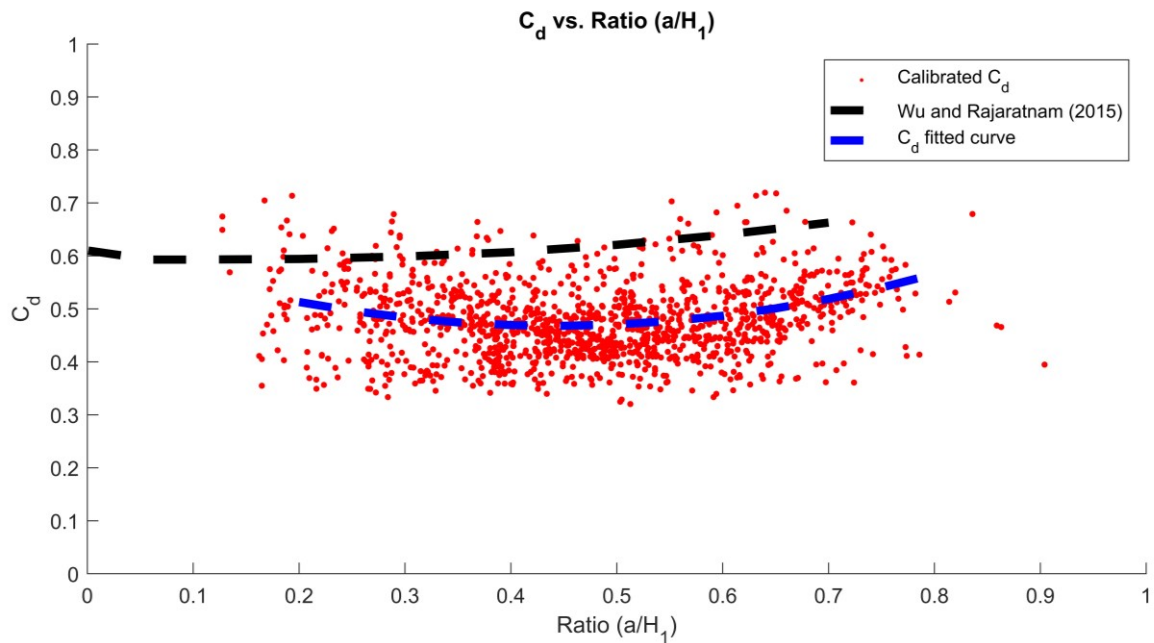


## 7. Αποτελέσματα

### 7.1 Αρχικά αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω διαγραμμάτων του συντελεστή  $C_d$  συναρτήσει του λόγου  $\alpha/H_1$ . Στα διαγράμματα φαίνεται αποτυπωμένη η σχέση  $C_d$ - $\alpha/H_1$  όπως προκύπτει από τις εργαστηριακές μετρήσεις των Wu and Rajaratnam (2015). Στην παρούσα ανάλυση εξετάζονται τα αποτελέσματα για διαστήματα διάρκειας τουλάχιστον 2 ωρών. Στην παράγραφο 7.3 αναλύεται επίσης η επιρροή της διάρκειας των επεισοδίων στην διάμεση τιμή αλλά και διασπορά του νέφους τιμών  $C_d$ - $\alpha/H_1$ .

Όπως φαίνεται στο **Γράφημα 7.1** η σχέση των μεγεθών  $C_d$ - $\alpha/H_1$  κατά Wu and Rajaratnam (2015) περιγράφεται από μία καμπύλη η οποία εκκινεί από  $C_d = 0.61$  για  $\alpha/H_1 = 0.001$  και εν συνεχεία μειώνεται μέχρι τον  $\alpha/H_1 = 0,06$  στον οποίο ο συντελεστής έχει τιμή  $C_d = 0.593$ . Από σημείο αυτό αυξάνει σταθερά έως τον λόγο  $\alpha/H_1 = 0,7$  όπου παίρνει την τιμή  $C_d = 0.6628$ . Όπως φαίνεται στο **Γράφημα 7.1**, η διασπορά των συντελεστών  $C_d$  μειώνεται όσο αυξάνεται ο λόγος  $\alpha/H_1$  καθώς η πυκνότητα των σημείων κοντά στην προσαρμοσμένη καμπύλη είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Στο γράφημα παρατηρούμε επίσης πως η τιμές των συντελεστών  $C_d$  είναι χαμηλότερες από το αναμενόμενο εύρος τιμών [0.59-0.66]. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε ένα πλήθος παραγόντων με κύριο παράγοντα το σφάλμα των μετρητικών υποδομών. Αμελώντας την απόκλιση των τιμών από το αναμενόμενο εύρος, παρατηρούμε πως η κατανομή του νέφους τιμών παρουσιάζει παραπλήσια κατανομή με αυτή των Wu and Rajaratnam (2015). Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται παρακάτω και από τα διαστήματα εμπιστοσύνης, οι τιμές του συντελεστή εκκινούν από μία τιμή περίπου  $C_d = 0.51$  για μικρά ανοίγματα ( $\alpha/H_1 \approx 0.2$ ), εν συνεχεία μειώνονται μέχρι το σημείο  $\alpha/H_1 = 0.4$  όπου λαμβάνει τιμή  $C_d = 0.46$  και τελικώς αυξάνεται μέχρι τον λόγο  $\alpha/H_1 = 0.78$  όπου λαμβάνει τιμή  $C_d = 0.55$ . Συνεπώς παρόλο που το εύρος των ευρεθέντων τιμών είναι εκτός του αναμενόμενου (γεγονός όπου διερευνάται σε επόμενη παράγραφο), η κατανομή των μεγεθών έχει όμοια χαρακτηριστικά με αυτή των Wu and Rajaratnam (2015).

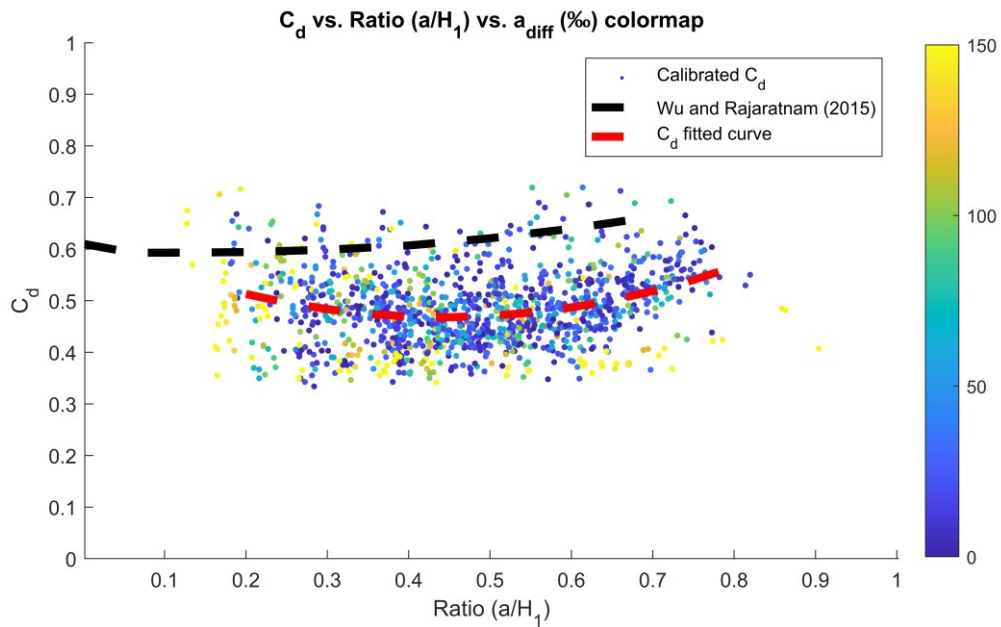


**Γράφημα 7.1:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεως του λόγου  $a/H_1$  με προσαρμοσμένη σχέση στο νέφος τιμών

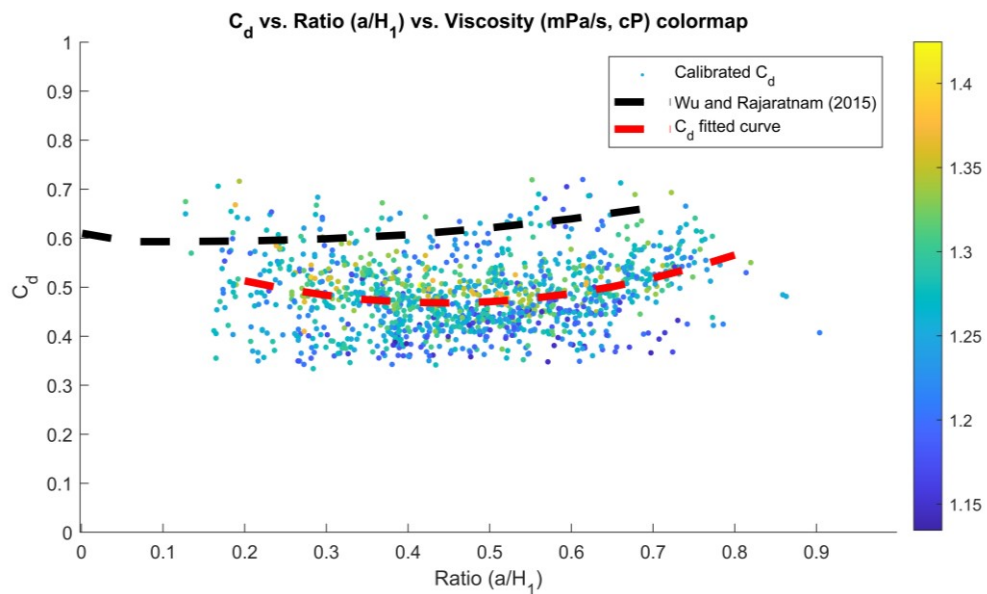
### 7.2 Ανάλυση επιρροής διαφοράς ανοίγματος θυροφραγμάτων

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, ένας από τους παράγοντες που δυνητικά να εξηγεί την απόκλιση των αποτελεσμάτων είναι η διαφορά του ανοίγματος των θυροφραγμάτων σε κάθε επεισόδιο. Πιο συγκεκριμένα, τα θυροφράγματα σπανίως κινούνται ταυτόχρονα ενώ είναι πολύ λίγα τα επεισόδια όπου τα θυροφράγματα παρουσιάζουν το ίδιο άνοιγμα. Αντίθετα με τη παραπάνω περιγραφή, κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης των συντελεστών  $C_d$  βελτιστοποιείται ένας συντελεστής και θεωρείται ένα ισοδύναμο άνοιγμα των θυροφραγμάτων. Σε περίπτωση που είχαν θεωρηθεί δύο συντελεστές, έστω  $C_{d\_Left}$  και  $C_{d\_Right}$ , το σύστημα των εξισώσεων έχει άπειρες λύσεις και επομένως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει. Με την θεώρηση του ισοδύναμου ανοίγματος προκύπτει ακριβής λύση αλλά παρουσιάζεται ένα διαφορετικό πρόβλημα με την θεώρηση αυτή. Θεωρητικά βάσει της κατανομής των Wu and Rajaratnam (2015) για διαφορετικά ανοίγματα θυροφραγμάτων προκύπτουν και διαφορετικοί συντελεστές  $C_d$ . Καθώς όμως η σχέση  $C_d$ - $a/H_1$  δεν είναι γραμμική και συνεπώς αν υπήρχε τρόπος υπολογισμού ξεχωριστού συντελεστή για κάθε θυροφράγμα, η μέση τιμή των συντελεστών δεν θα πρόκυπτε απαραίτητα ίση με την τιμή του συντελεστή για το μέσο άνοιγμα, ιδίως στα μικρά ανοίγματα. Για το λόγο αυτό

αποτυπώνεται το νέφος των σημείων που υπολογίστηκε σε γράφημα scatter plot με colormap που αναπαριστά την διαφορά ανοίγματος στο εν λόγω επεισόδιο.

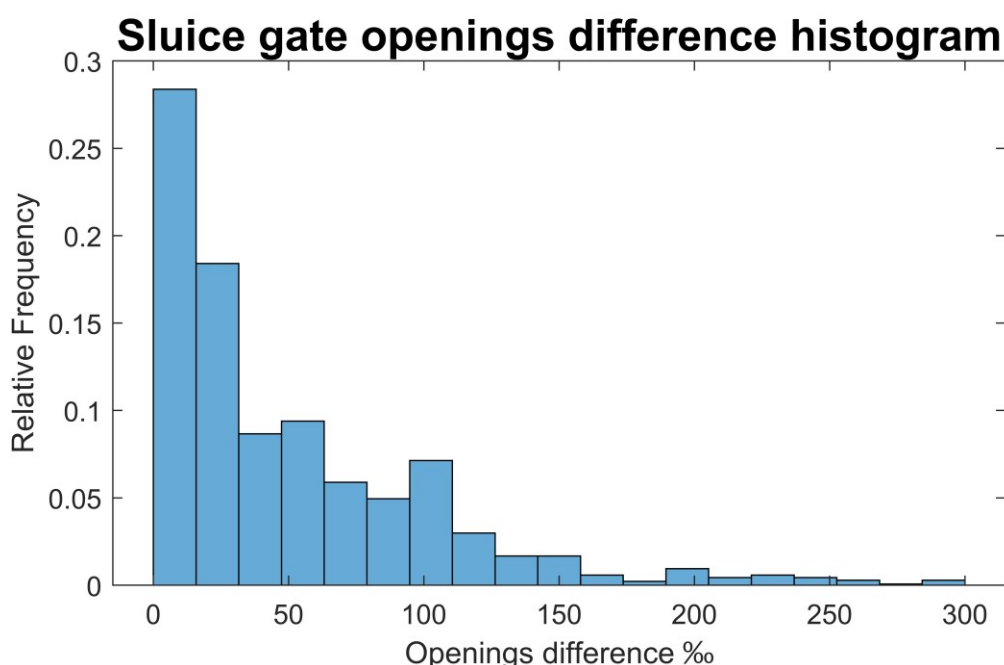


**Γράφημα 7.2:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεϊ του λόγου  $a/H_1$  με χρωματισμό βάσει διαφοράς ανοίγματος δεξιού – αριστερού θυροφράγματος



**Γράφημα 7.3:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεϊ του λόγου  $a/H_1$  με χρωματισμό βάσει ιξώδους νερού (υπολογισμός μέσω της θερμοκρασίας νερού).

Παρατηρούμε στο Γράφημα 7.2 πως καθ' όλο το εύρος των λόγων  $\alpha/H_1$  παρουσιάζονται τόσο επεισόδια με μικρή διαφορά ανοίγματος όσο και με μεγαλύτερη. Άλλωστε όπως φαίνεται και στο ιστόγραμμα κατανομής διαφοράς ανοιγμάτων βλέπουμε πως το μεγαλύτερο μέρος των επεισοδίων έχει μικρή σχετικά διαφορά στο άνοιγμα των θυροφραγμάτων. Υπάρχουν και ορισμένα επεισόδια με διαφορά ανοίγματος  $>20\%$  αλλά όπως φαίνεται και στο Γράφημα 6.3 αποτελούν εξαίρεση και όχι τον γενικότερο κανόνα. Συμπερασματικά αναφέρεται πως δεν υπάρχει κάποια συμπεριφορά στο παραπάνω διάγραμμα που να αποδίδει ούτε την διαφορά εύρους των τιμών αλλά και ούτε την αυξημένη διασπορά των τιμών για μικρούς λόγους  $\alpha/H_1$  στη διαφορά ανοίγματος των θυροφραγμάτων.



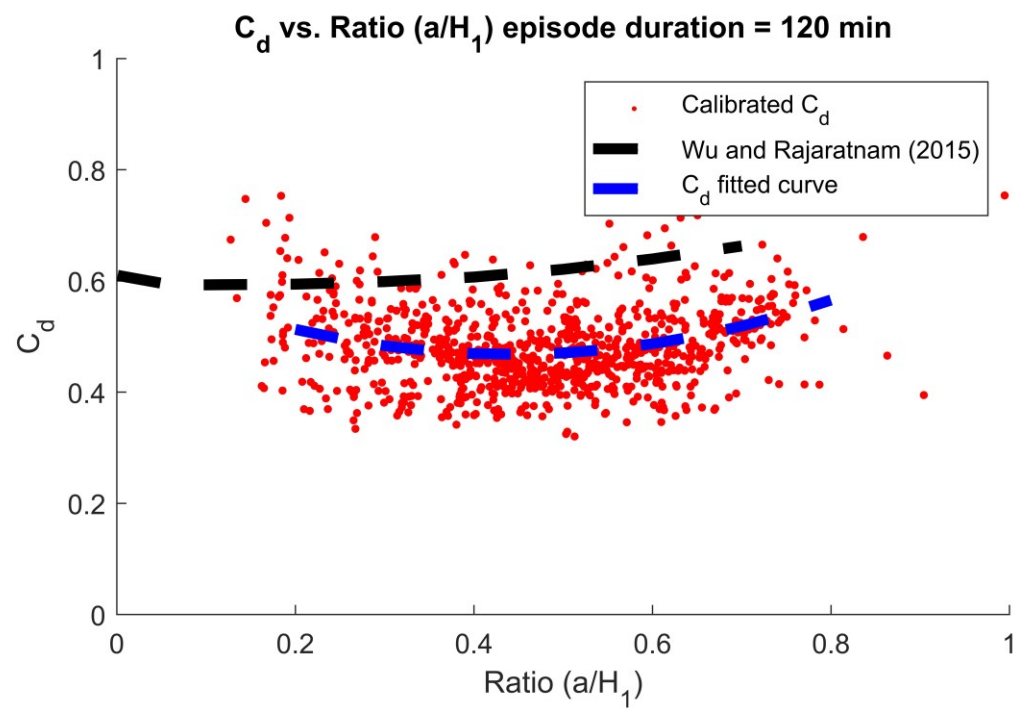
**Γράφημα 7.4:** Ιστόγραμμα συχνοτήτων διαφοράς ανοίγματος δεξιού – αριστερού

### 7.3 Ανάλυση επιρροής διάρκειας επεισοδίου

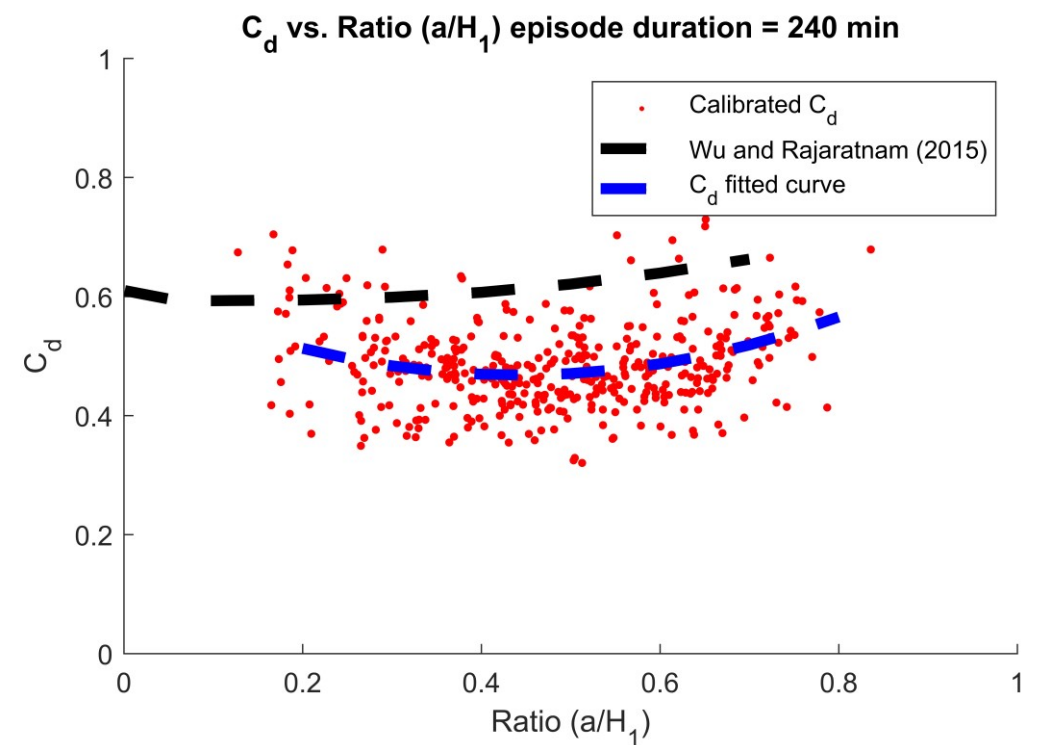
Μια ακόμη συνιστώσα που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην παρούσα ανάλυση είναι η διάρκεια του διαστήματος που χρησιμοποιείται για την βαθμονόμηση των συντελεστών. Αυτό, συμβαίνει διότι κατά την ροή των υδάτων στον υδαταγωγό, με κάθε μεταβολή ανοίγματος προκαλείται μία αναταραχή στην ροή η οποία χρειάζεται ένα εύλογο χρονικό διάστημα για να εξισσοροπιστεί. Όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα, τόσο περισσότερος χρόνος έχει παρέλθει ώστε να εξισσοροπιστεί η ροή στο κανάλι. Σε

θεωρητική βάση η τυπική απόκλιση των μεγεθών εισαγωγής στον αλγόριθμο βελτιστοποίηση οφείλει κατά κανόνα να είναι μικρότερη από αυτή των μικρών διαστημάτων. Στα παρουσιάζεται η κατανομή των συντελεστών  $C_d$  έναντι του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια μεγαλύτερα ή ίσα των 2, 4, 8, 10 ωρών αντίστοιχα.

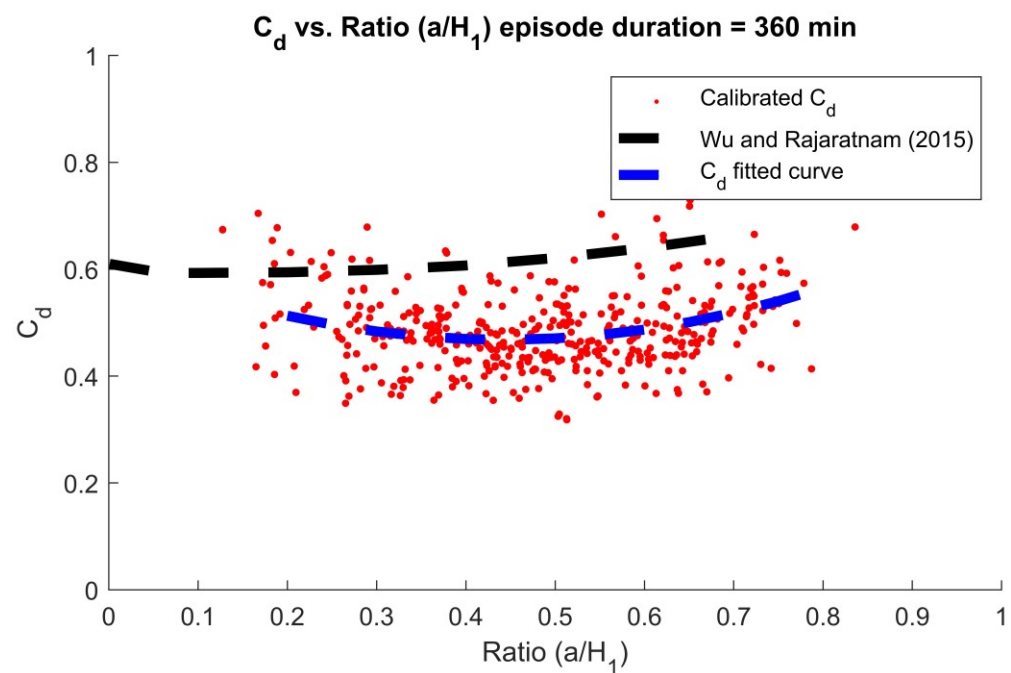
Η βασικότερη παρατήρηση από τα Γραφήματα είναι πως μεταβάλλεται σημαντικά το πλήθος των επεισοδίων. Συνεπώς, πρέπει να βρεθεί μία βέλτιστη διάρκεια ώστε να εξασφαλίζεται επαρκές πλήθος σημείων και επαρκής διάρκεια επεισοδίου ώστε να έχει παρέλθει επαρκές χρονικό διάστημα για την σταθεροποίηση της ροής. Έπειτα από ανάλυση των μεγεθών ροής αλλά και του πλήθους και της διασποράς των επεισοδίων επιλέχθηκε βέλτιστη διάρκεια επεισοδίου ίση με 120 min.



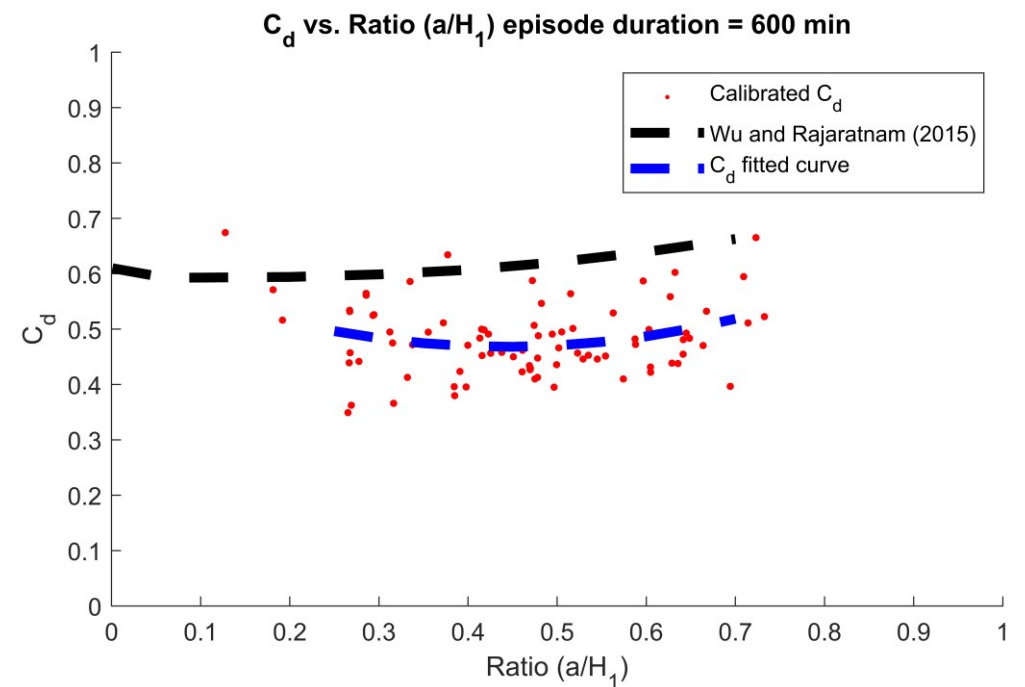
**Γράφημα 7.5:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεσι του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια  $\geq 2$ hr



**Γράφημα 7.6:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεσι του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια  $\geq 4$ hr



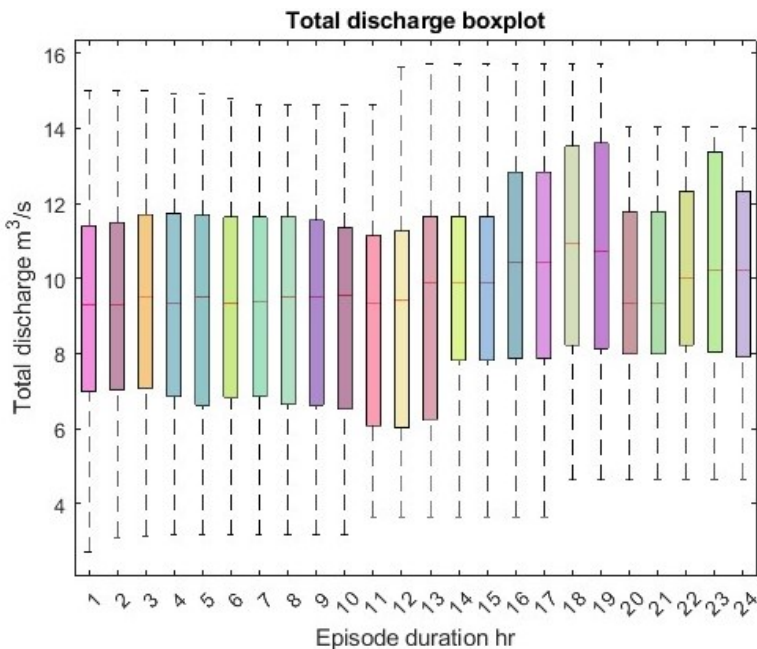
**Γράφημα 7.7:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεσι του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια  $\geq 6$ hr



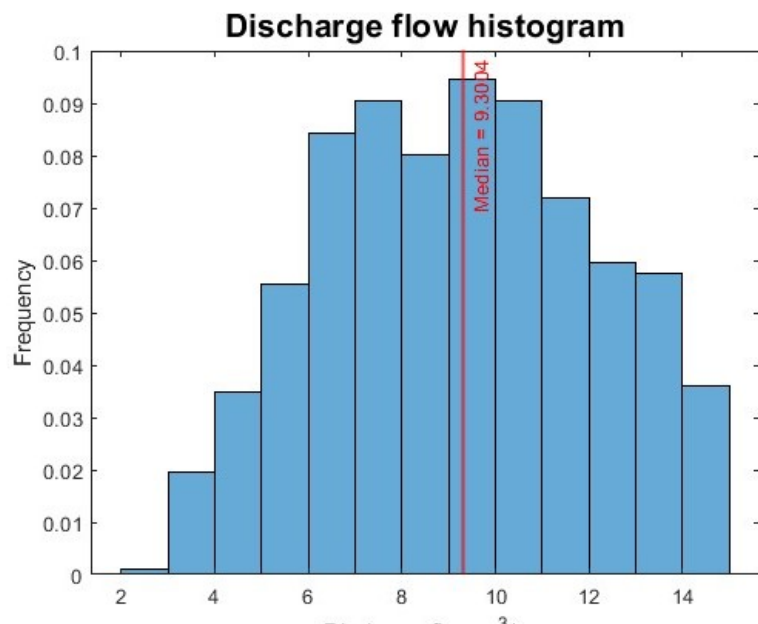
**Γράφημα 7.8:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεσι του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια  $\geq 10$ hr

#### 7.4 Ανάλυση επιρροής υπερχείλισης

Μία ακόμη παράμετρος που δυνητικά επηρεάζει τη μορφή των αποτελεσμάτων είναι η παροχή υπερχείλισης στο κάθε επεισόδιο. Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω ο συντελεστής παροχетеυτικότητας των υπερχειλιστών έχει μετρηθεί από τον κατασκευαστή τους και έχει προκύψει  $C_{spill} = 1.85$ . Το πρόβλημα είναι ότι όλες τις υδραυλικές κατασκευές οι σταθερές που υπολογίζονται με την κατασκευή τους μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό οφείλεται κυρίως στην φθορά των εξαρτημάτων και των διατομών από την χρόνια ροή των υδάτων με αποτέλεσμα την αύξηση της τραχύτητας. Συνεπώς, υπάρχει πιθανότητα η τιμή που είχε δοθεί από τον κατασκευαστή να μην είναι πλέον αντιπροσωπευτική. Έτσι κατά την βαθμονόμηση των συντελεστών, αν ο συντελεστής υπερχείλισης παρουσιάζει απόκλιση από την πραγματικότητα, το ίδιο θα συμβαίνει και με τους συντελεστές των θυροφραγμάτων που βαθμονομούνται. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμο να απομονωθούν όλα τα επεισόδια στα οποία δεν συμβαίνει καθόλου υπερχείλιση ώστε να προκύψει ο συντελεστής  $C_d$  χωρίς καμία επιρροή του  $C_{spill}$ .

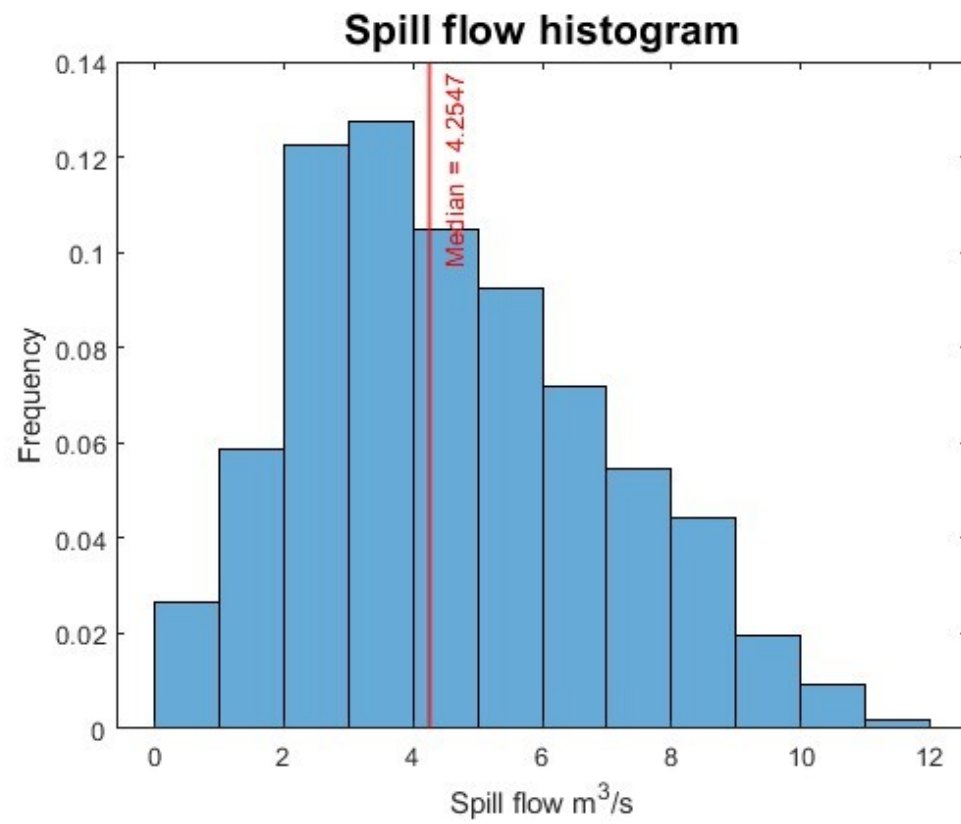


Γράφημα 7.5: Διάγραμμα τύπου boxplot υδραυλικού φορτίου υπερχειλιστών για κάθε διάρκεια επεισοδίων

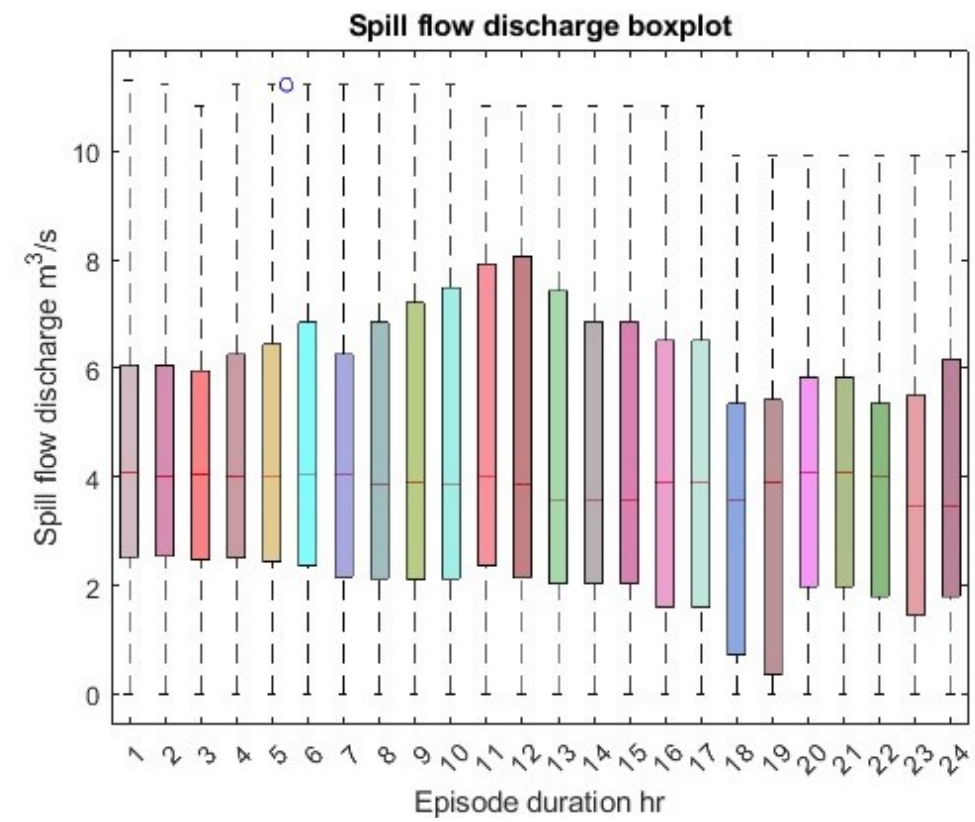


Γράφημα 7.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων συνολικής παροχής υδραγωγείου

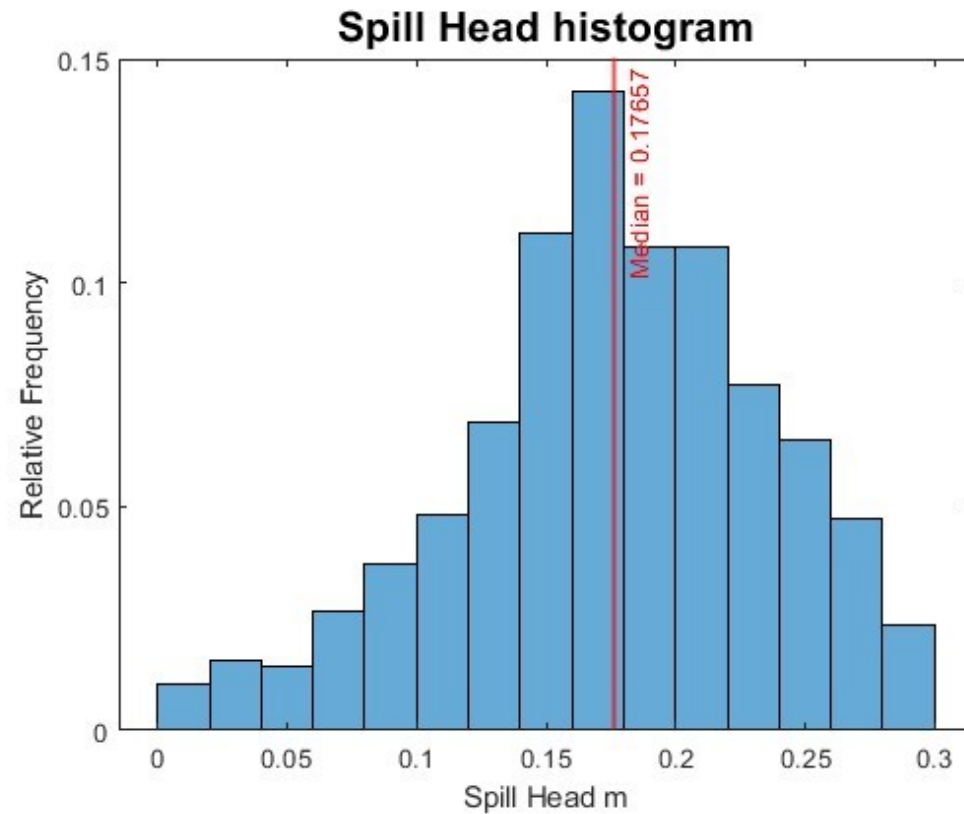




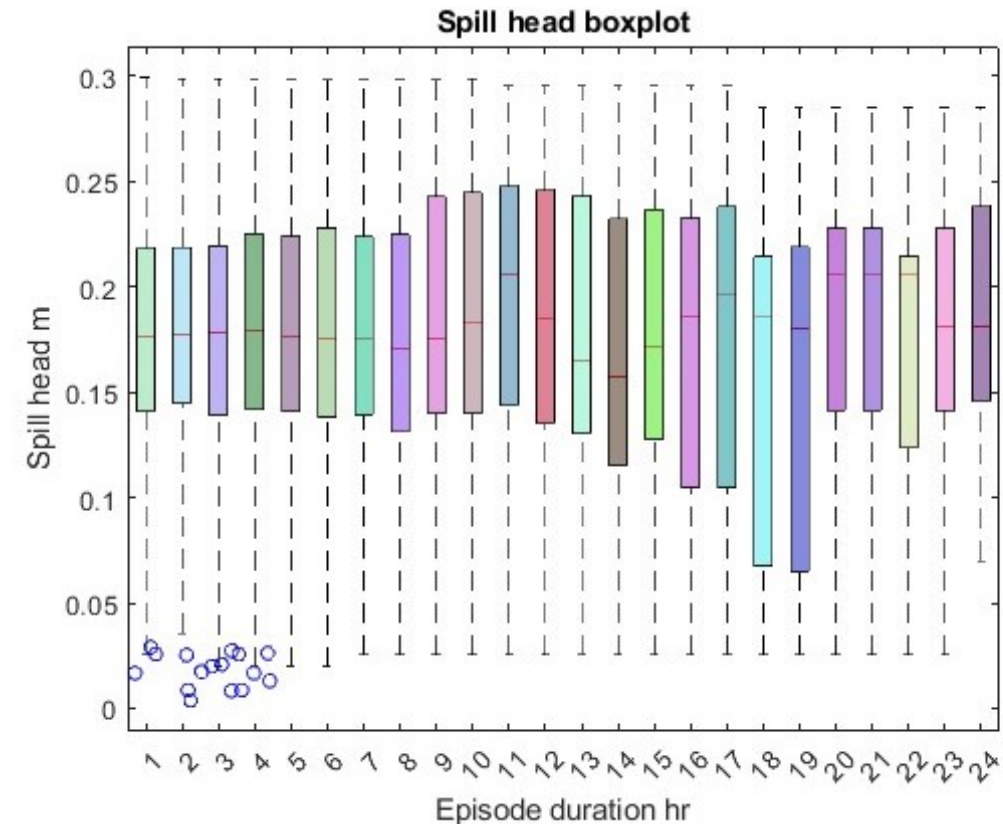
Γράφημα 7.11: Ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων παροχών υπερχειλιστών ρυθμιστή Λ10



Γράφημα 7.12: Διάγραμμα τύπου boxplot παροχών υπερχειλιστών ρυθμιστή Λ10



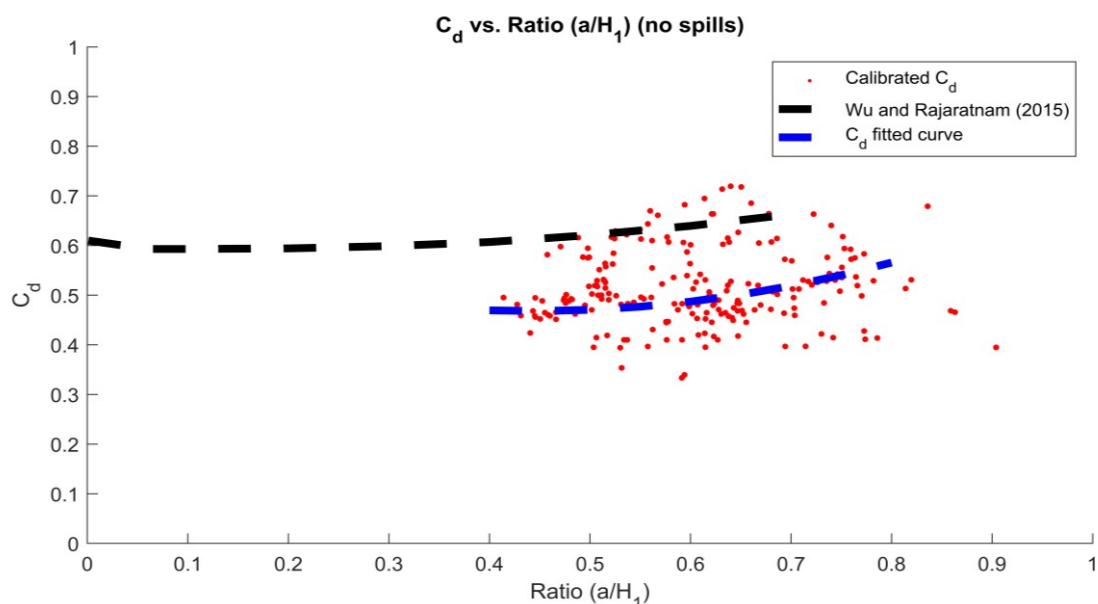
Γράφημα 7.13: Ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων υδραυλικού φορτίου υπερχειλιστών



Γράφημα 7.14: Διάγραμμα τύπου boxplot υδραυλικού φορτίου υπερχειλιστών για κάθε διάρκεια επεισοδίων

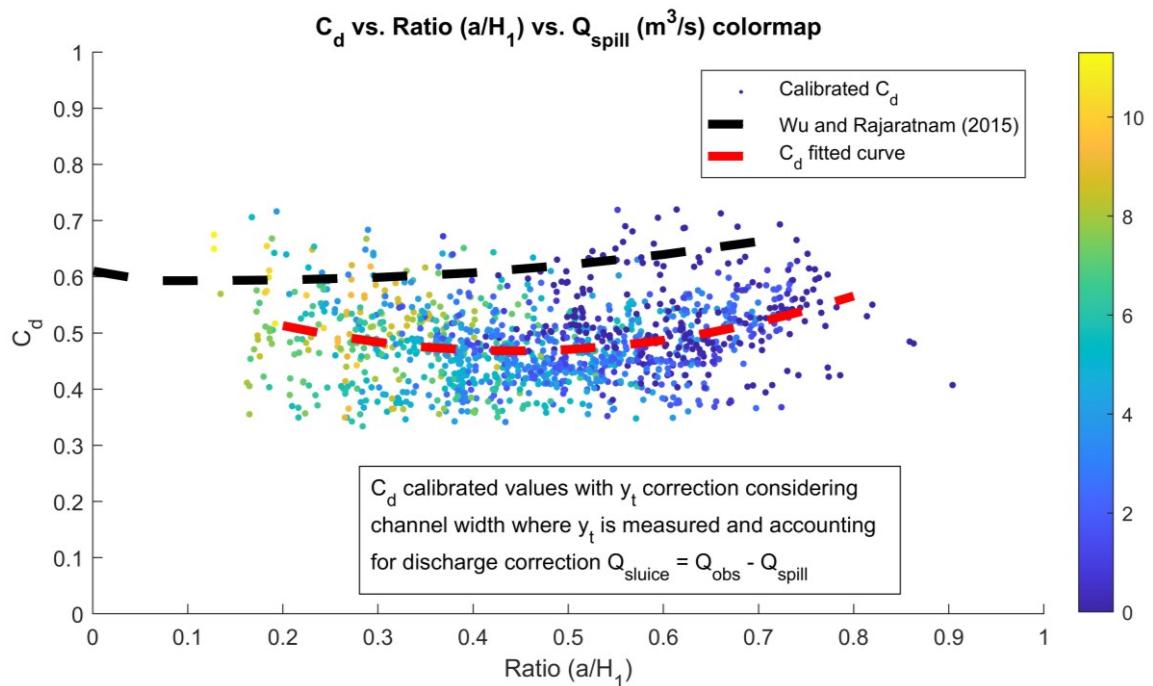


Στα Γράφημα 7. και Γράφημα 7. παρουσιάζονται τα ιστογράμματα συχνοτήτων του υδραυλικού φορτίου κατά την υπερχείλιση και των παροχών υπερχείλισης βάσει των υδραυλικών φορτίων που παρουσιάστηκαν. Παρατηρούμε αρχικά πως υπάρχουν επεισόδια στα οποία δεν συμβαίνει καθόλου υπερχείλιση. Κατά κανόνα τα επεισόδια αυτά είναι επεισόδια που αντιστοιχούν σε μεγάλο άνοιγμα των θυροφραγμάτων άρα και σε μεγάλο λόγο  $a/H_1$ . Αυτό συμβαίνει καθώς όταν έχουμε μεγάλο άνοιγμα των θυροφραγμάτων, η ροή μέσω του ρυθμιστή συμβαίνει ανεμπόδιστα και η ανάντη στάθμη είναι χαμηλότερη από την στέψη του υπερχειλιστή οπότε δεν έχουμε υπερχείλιση (το σύνολο της παροχής διέρχεται μέσω των ανοιγμάτων των θυροφραγμάτων). Το παραπάνω επιβεβαιώνεται από το Γράφημα 7.7 το οποίο αποτυπώνει τα επεισόδια χωρίς υπερχείλιση. Το σύνολο των σημείων βρίσκεται στην περιοχή του γραφήματος όπου αντιστοιχεί σε λόγους  $a/H_1$  μεγαλύτερους από 0.4. Στο Γράφημα 7.7 παρουσιάζεται το ιστογράμμο παροχών του υδαταγωγού όπως έχουν μετρηθεί από το παροχόμετρο κατάντη του  $\Lambda_{10}$ . Στο γράφημα αυτό, σε αντιστοιχία με το Γράφημα 7.7, φαίνεται πως ένα μεγάλο μέρος της παροχής διέρχεται μέσω του υπερχειλιστή. Η πρακτική αυτή έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια και στην πράξη γίνεται έτσι ώστε να λειτουργούν οι ρυθμιστές  $\Lambda$  και ως μέσο αποθήκευσης.

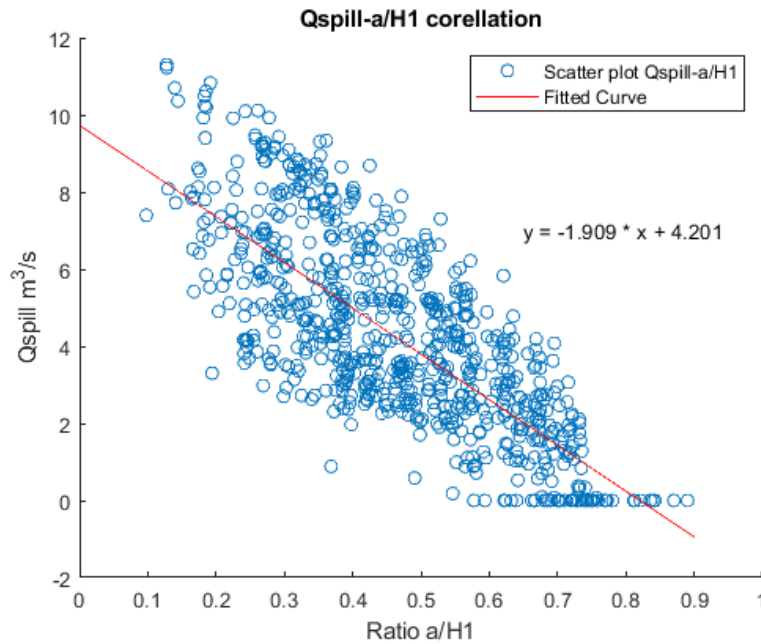


**Γράφημα 7.7:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεως του λόγου  $a/H_1$  για επεισόδια χωρίς υπερχείλιση

Μάλιστα, στο Γράφημα 7.8 φαίνεται το σύνολο των επεισοδίων συναρτήσει της παροχής υπερχειλίσης. Παρατηρούμε στο γράφημα αυτό πως η παραπάνω παρατήρηση γενικεύεται περισσότερο καθώς για μικρούς λόγους  $a/H_1$  έχουμε μεγάλες παροχές υπερχειλίσης, ενώ όσο αυξάνεται ο λόγος  $a/H_1$  τόσο μειώνεται και η παροχή υπερχειλίσης. Έτσι σε μία προσπάθεια αποτύπωσης της σχέσης  $Q_{spill}$ -  $a/H_1$  προκύπτει το Γράφημα 7.9 το οποίο παρουσιάζει το νέφος τιμών παροχών υπερχειλίσης και λόγων  $a/H_1$  μαζί με μία ευθεία που αποτελεί την βέλτιστα προσαρμοσμένη καμπύλη σε αυτό το νέφος τιμών.



**Γράφημα 7.8:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσει του λόγου  $a/H_1$  και της παροχής υπερχειλίσης ( $m^3/s$ )



**Γράφημα 7.9:** Συσχέτιση παροχής υπερχειλίσσης συγκριτικά με το λόγο  $a/H_1$

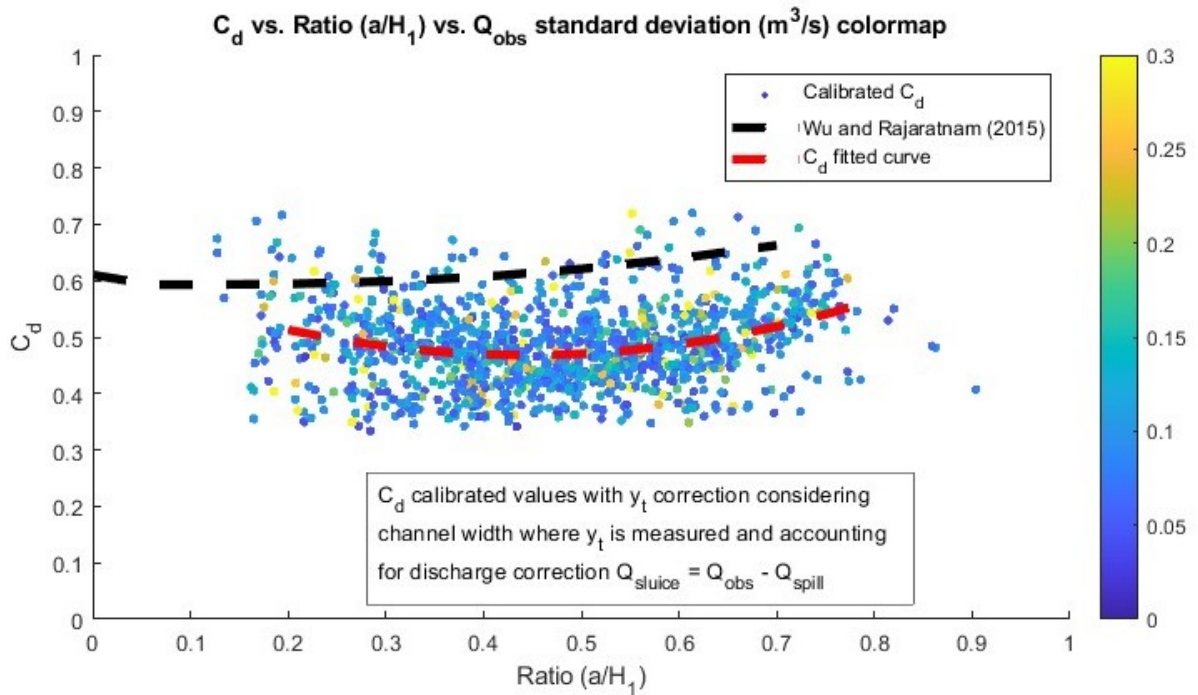
Συμπερασματικά, σχετικά με την επιρροή της υπερχειλίσσης αναφέρουμε πως τα σημεία στο νέφος τιμών που παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόκλιση από τη διάμεση τιμή και άρα και μεγαλύτερη διασπορά, αντιστοιχούν σε επεισόδια με μεγάλη παροχή υπερχειλίσσης. Για το λόγο αυτό είναι εύλογο να θεωρήσουμε πως υπάρχει επιρροή της υπερχειλίσσης στην μορφή των αποτελεσμάτων η οποία μεταξύ άλλων ενδέχεται να οφείλεται στην τιμή του συντελεστή υπερχειλίσσης των πλευρικών υπερχειλιστών. Έτσι, στα Κεφάλαια 7.6 και 7.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βαθμονόμησης αλλά και του υπολογισμού του συντελεστή υπερχειλίσσης χρησιμοποιώντας προσαρμοσμένη εκθετική καμπύλη δύο όρων που να περιγράφει τις τιμές του  $C_d$  για τους διάφορους λόγους  $a/H_1$ . Γενικά η τιμή του  $C_d$  θα μπορούσε να ληφθεί ίση με 0.4804 ίση με τη διάμεση τιμή των επεισοδίων χωρίς υπερχειλίση, όμως για λόγους ελαχιστοποίησης του σφάλματος η ευρεθείσα σχέση των  $C_d$  και  $a/H_1$ .

### 7.5 Επιρροή τυπικής απόκλισης δεδομένων στάθμης κάθε επεισοδίου

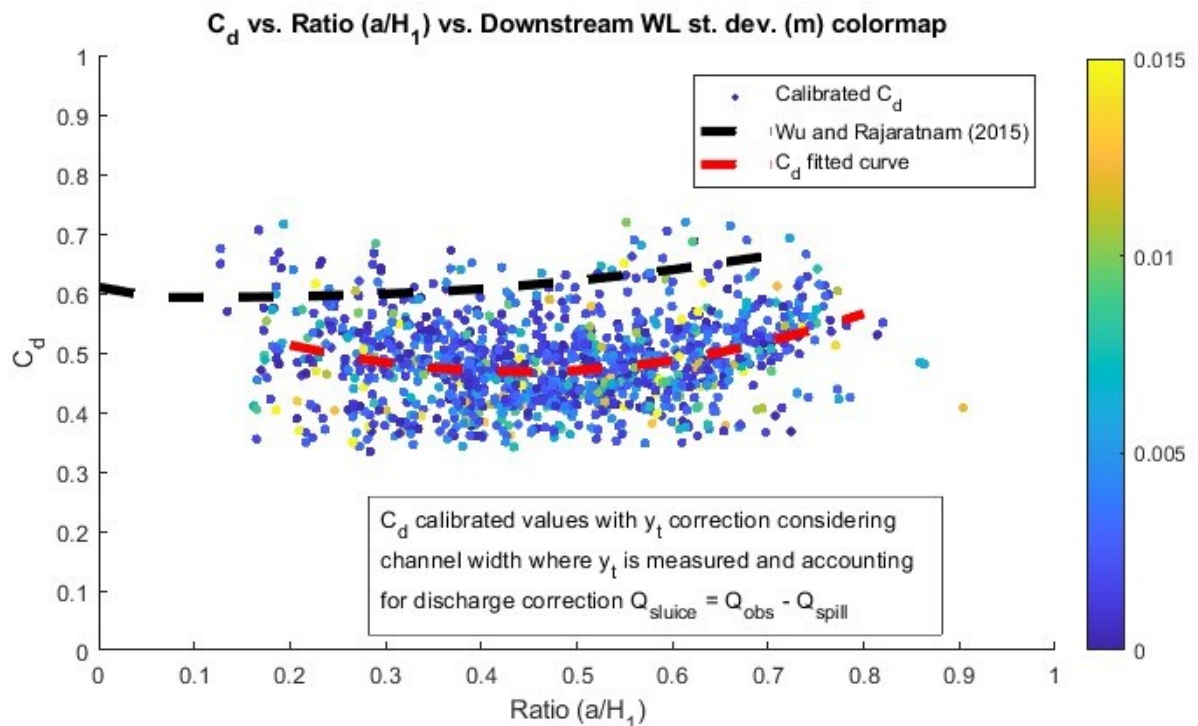
Ένας ακόμη παράγοντας που εξετάζεται είναι η τυπική απόκλιση της ανάντη και κατάντη στάθμης σε κάθε επεισόδιο. Ο λόγος ελέγχου της τυπικής απόκλισης της κάθε τιμής εισόδου στο μοντέλο είναι για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον, Ο λόγος που εξετάζεται η συνιστώσα αυτή, είναι πρώτον διότι ενώ έχουμε εξασφαλίσει μέσω του αλγορίθμου

επιλογής των επεισοδίων πως δεν θα υπάρχει διακύμανση στα ανοίγματα των θυροφραγμάτων, δεν έχει ελεγχθεί η διακύμανση της στάθμης σε κάθε επεισόδιο. Γενικά, η στάθμη δεν ελέγχεται διεξοδικά διότι ως μέγεθος παρουσιάζει αμελητέες μεταβολές σε διαστήματα που τα θυροφράγματα παραμένουν σταθερά. Υπάρχει παρ' όλα αυτά πιθανότητα να παρουσιαστεί κάποια μεταβολή στην στάθμη χωρίς να μεταβληθεί το άνοιγμα. Αυτό κατά κανόνα συμβαίνει όταν ο ανάντη ή ο κατάντη ρυθμιστής (Λ9 ή Λ11) εκτελέσουν κάποια μεταβολή με αποτέλεσμα να υπάρξει μεταφορά του κύματος με ταχύτητα  $c+V$  ή  $c-V$  όπως αναλύεται στο κεφάλαιο της θεωρίας. Στην περίπτωση αυτή θα παρατηρήσουμε μία μεταβολή των δεδομένων στάθμης (και κατά προέκταση της παροχής) με τα θυροφράγματα να παραμένουν αμετάβλητα. Συνεπώς ο παρακάτω έλεγχος αποσκοπεί στον εντοπισμό ενδεχόμενων επεισοδίων που βρίσκονται σε περιοχή ανομοιόμορφης ροής ( $dQ/dt \neq 0$ ). Δεύτερον, ο έλεγχος αυτός καθ' αυτός συμβάλλει στην επαλήθευση της ορθότητας των δεδομένων. Παρατηρούμε στο Γράφημα 7.13 πως η μέγιστη τυπική απόκλιση στο άνοιγμα των θυροφραγμάτων είναι 3 ‰ το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως αμελητέο. Συνεπώς επαληθεύουμε πως ο αλγόριθμος επιλογής επεισοδίων λειτουργεί σωστά ενώ παράλληλα διαπιστώνουμε πως για το μεγαλύτερο μέρος των επεισοδίων η τυπική απόκλιση στα μεγέθη στάθμης είναι της τάξης των 0.5 cm το οποίο είναι το επίπεδο σφάλματος της μετρητικής υποδομής.

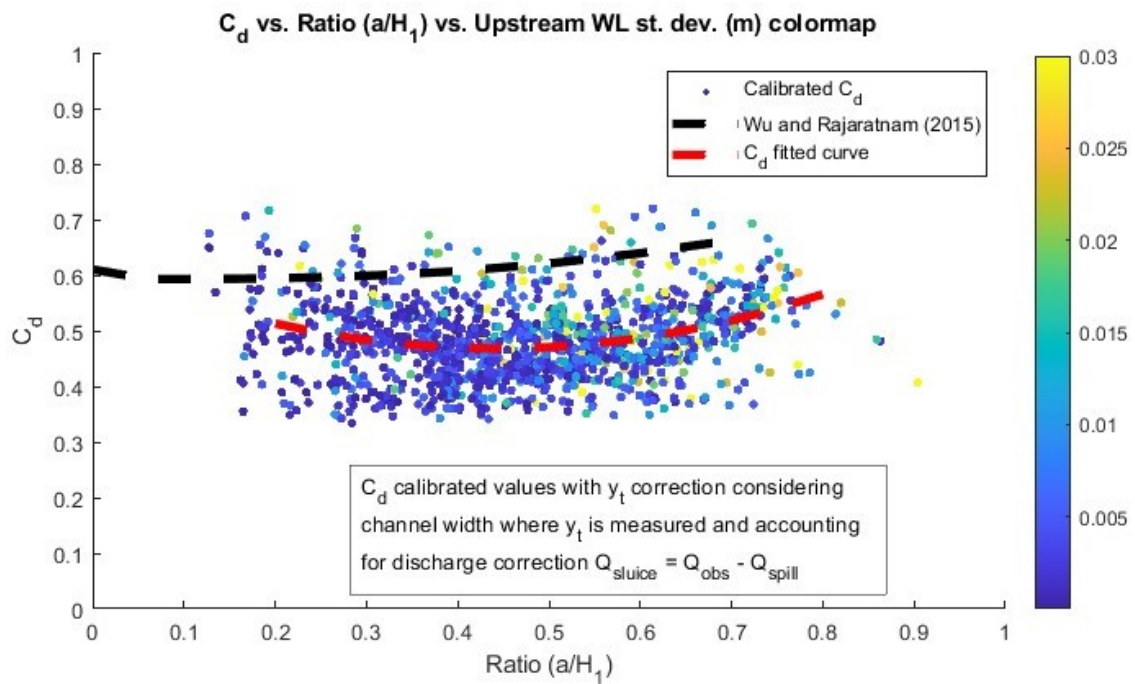
Στα Γράφημα 7.10 - Γράφημα 7.13 παρουσιάζεται η τυπική απόκλιση των τεσσάρων μεγεθών που αναφέρθηκαν παραπάνω (παροχή, στάθμη ανάντη και κατάντη, άνοιγμα θυροφραγμάτων) σε colormap στα διαγράμματα νέφους τιμών  $C_d-\alpha/H_1$ . Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται πως τα επεισόδια με μεγάλη τυπική απόκλιση παρουσιάζουν τυχαία κατανομή.



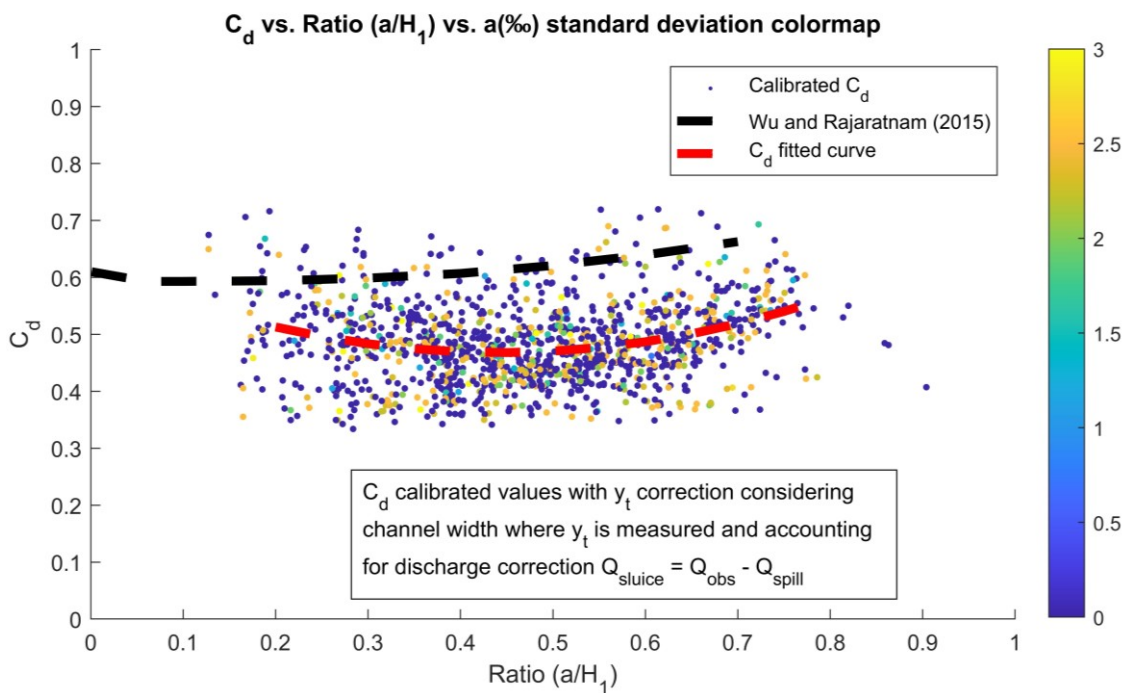
**Γράφημα 7.10:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσει του λόγου  $a/H_1$  και της τυπικής απόκλισης της παροχής σε κάθε επεισόδιο ( $m^3/s$ )



**Γράφημα 7.11:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσει του λόγου  $a/H_1$  και της τυπικής απόκλισης της κατάντη στάθμης σε κάθε επεισόδιο (m)



**Γράφημα 7.12:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεως του λόγου  $a/H_1$  και της τυπικής απόκλισης της ανάντη στάθμης σε κάθε επεισόδιο (m)



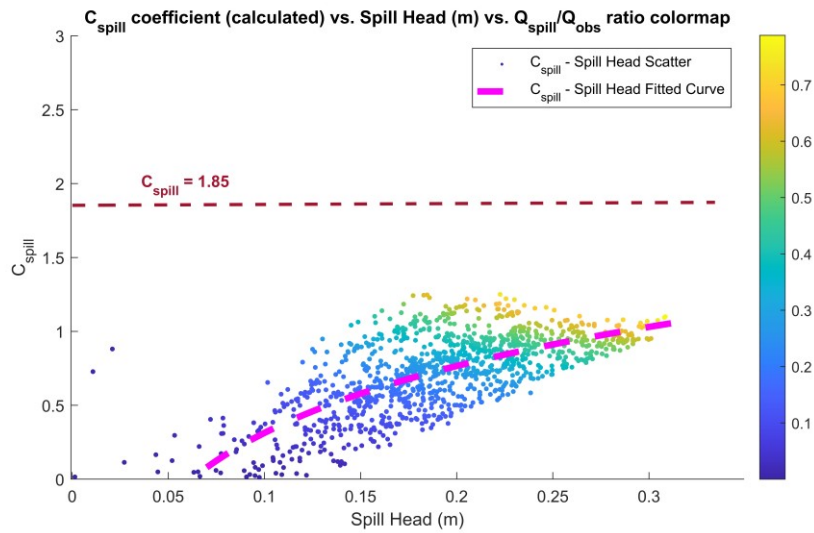
**Γράφημα 7.13:** Νέφος τιμών  $C_d$  συναρτήσεως του λόγου  $a/H_1$  και της τυπικής απόκλισης του ανοίγματος των θυροφραγμάτων σε κάθε επεισόδιο (%).

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα διαγράμματα παραπάνω είναι πως ενώ η τυπική απόκλιση των μετρούμενων μεγεθών κάθε επεισοδίου δεν παρουσιάζει κάποια συσχέτιση με το λόγο  $a/H1$ , μας βοηθούν να επαληθεύσουμε την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου εύρεσης επεισοδίων.

### 7.6 Αποτελέσματα υπολογισμού συντελεστή υπερχειλιστή $C_{spill}$

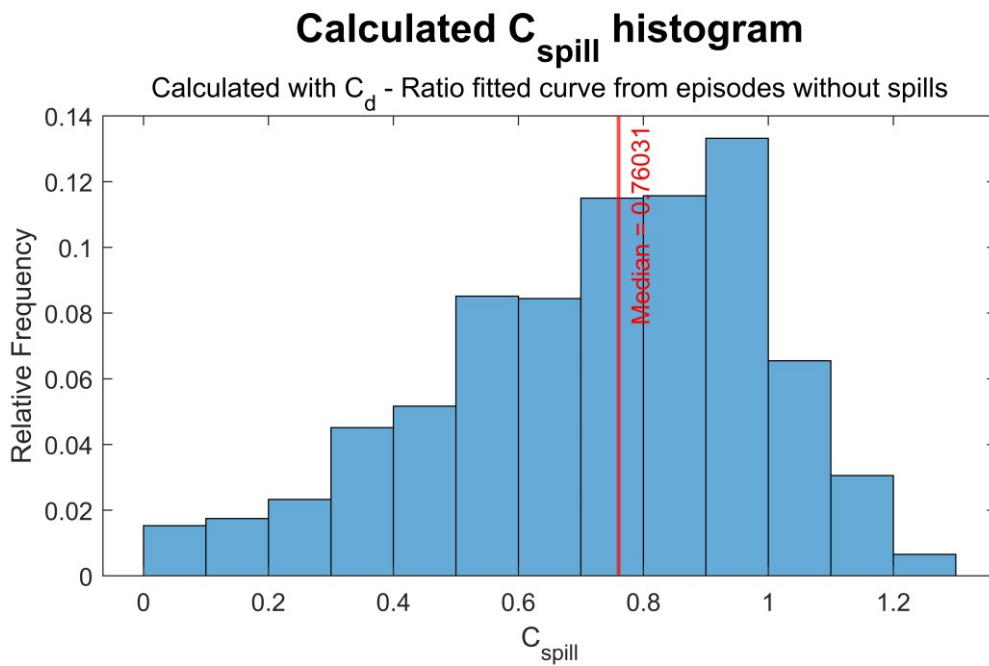
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω στο **Κεφάλαιο 7.4** που αναλύθηκε η υπερχειλίση, κρίνεται σκόπιμο να γίνει βαθμονόμηση του συντελεστή υπερχειλίσης, χρησιμοποιώντας ως συντελεστή παροχής των θυροφραγμάτων την σχέση που προέκυψε από τα επεισόδια στα οποία δεν συντελείται υπερχειλίση. Στο **Κεφάλαιο 6.4.2** παρουσιάστηκε ο αλγόριθμος υπολογισμού του  $C_{spill}$  που εφαρμόστηκε και στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής. Από το **Γράφημα 7.14** εξάγονται αρκετά συμπεράσματα. Αρχικά, αυξάνοντας τον βαθμό υπερχειλίσης που εκφράζεται από το λόγο της παροχής υπερχειλιστή προς την συνολική παροχή, αυξάνεται και η τιμή του  $C_{spill}$ . Εφόσον ο συντελεστής παροχής του υπερχειλιστή είχε μετρηθεί κατά την κατασκευή των ρυθμιστών ίσος με 1.85, γνωρίζουμε πως η φυσική μεταβολή αυτού του μεγέθους βαίνει μειούμενη με την πάροδο του χρόνου καθώς η φθορά των όποιων εξαρτημάτων (π.χ. στέψη υπερχειλιστή) οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας και επομένως μείωση του συντελεστή  $C_{spill}$ . Συνεπώς μπορούμε να θεωρήσουμε πως όσες τιμές είναι μεγαλύτερες του 1.85 (πολύ συντηρητικά) περιέχουν από μικρό έως και σημαντικό σφάλμα. Στη συνέχεια παρατηρούμε στο ίδιο γράφημα πως τα μεγαλύτερα «σφάλματα» εντοπίζονται στους μεγαλύτερους λόγους  $Q_{spill}/Q_{obs}$ . Άρα, σύμφωνα με τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα πως τα μεγαλύτερα σφάλματα εντοπίζονται σε επεισόδια μεγαλύτερης υπερχειλίσης. Σημειώνεται βέβαια, πως πρόκειται για σημαντικά μικρότερο αριθμό σημείων συγκριτικά με του μικρούς λόγους  $Q_{spill}/Q_{obs}$ . Για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να βαθμονομηθεί η τιμή του συντελεστή  $C_{spill}$  και να επανυπολογιστεί η τιμή του  $C_d$  ώστε να βρεθεί ένα ζεύγος τιμών ( $C_d$ ,  $C_{spill}$ ) με μικρότερα σφάλματα, καθώς όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι τιμές  $C_d$  και  $C_{spill}$  είναι μεταξύ τους εξαρτημένες. Αυτό, διότι μεγαλύτερη τιμή του  $C_d$  οδηγεί σε μεγαλύτερη παροχή  $Q_{sluice}$  επομένως μικρότερη παροχή  $Q_{spill}$  αρά και μικρότερη τιμή του  $C_{spill}$ .





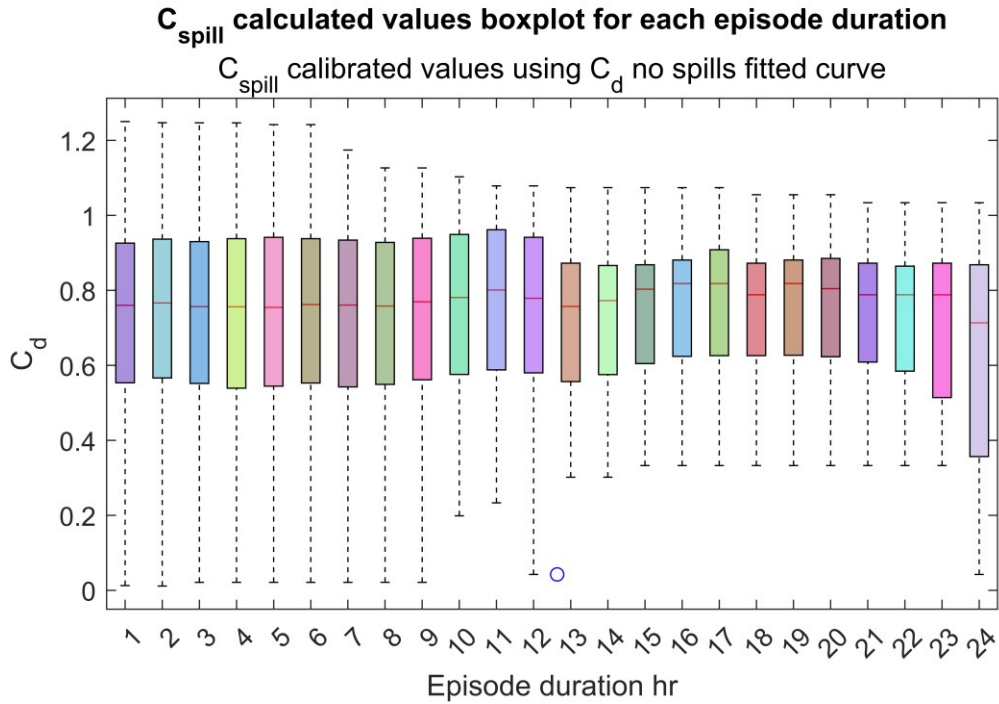
**Γράφημα 7.14:** Σχέση  $Q_{spill}$  – υπολογισμένων  $C_{spill}$  συγκριτικά με το βαθμό υπερχείλισης

Παρακάτω στα Γράφημα 7.15 –Γράφημα 7.16 παρουσιάζονται το ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων των υπολογισμένων συντελεστών  $C_{spill}$  καθώς και διάγραμμα τύπου boxplot για κάθε διάρκεια επεισοδίου. Παρατηρούμε πως σε κάθε διάρκεια επεισοδίου η συντελεστής  $C_{spill}$  παρουσιάζει παραπλήσια διάμεση τιμή και εύρος.



**Γράφημα 7.15:** Ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων υπολογισμένων συντελεστών  $C_{spill}$

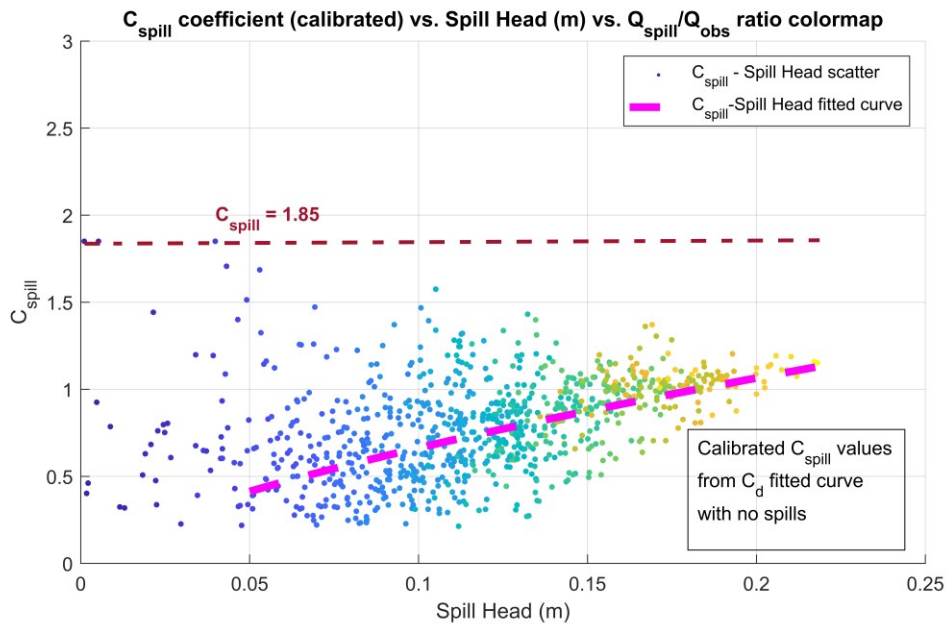




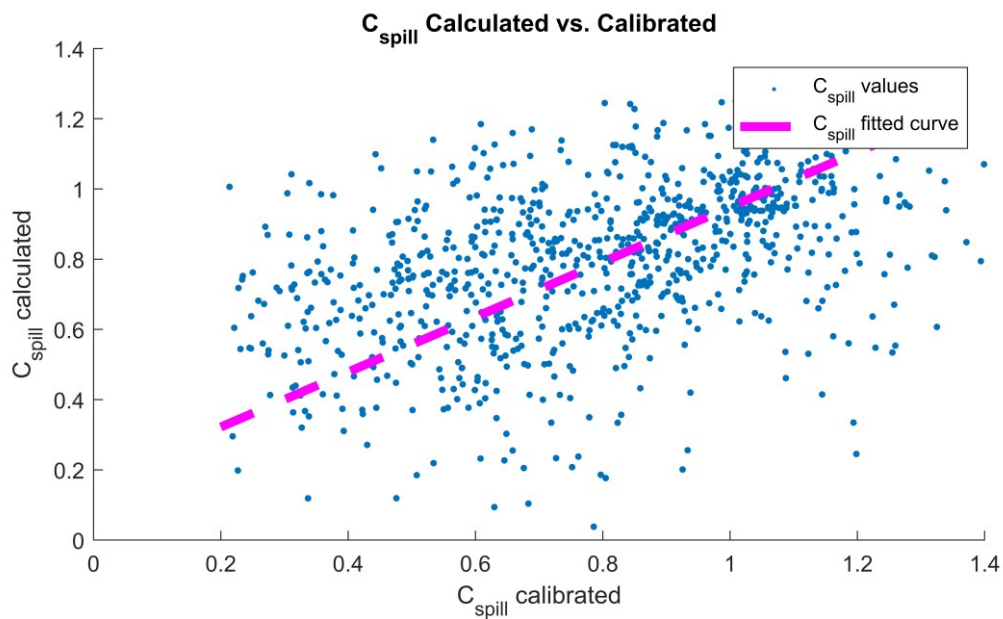
**Γράφημα 7.16:** Διάγραμμα τύπου boxplot κατανομής υπολογισμένων  $C_{spill}$  για κάθε διάρκεια επεισοδίου

### 7.7 Αποτελέσματα βαθμονόμησης συντελεστή υπερχείλισης

Σε συνέχεια του **Κεφαλαίου 7.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα βαθμονόμησης του συντελεστή παροχής του υπερχειλιστή  $C_{spill}$  παράλληλα με το συντελεστή τοπικών απωλειών  $k$ . Παρατηρούμε στο **Γράφημα 7.17:** Σχέση βαθμονομημένων  $C_{spill}$  – Spill Head (m) συγκριτικά με το βαθμό υπερχείλισης πως οι τιμές του συντελεστή  $C_{spill}$  έχουν αυξηθεί έπειτα από τη βαθμονόμηση.



**Γράφημα 7.17:** Σχέση βαθμονομημένων  $C_{spill}$  – Spill Head (m) συγκριτικά με το βαθμό υπερχειλίσης



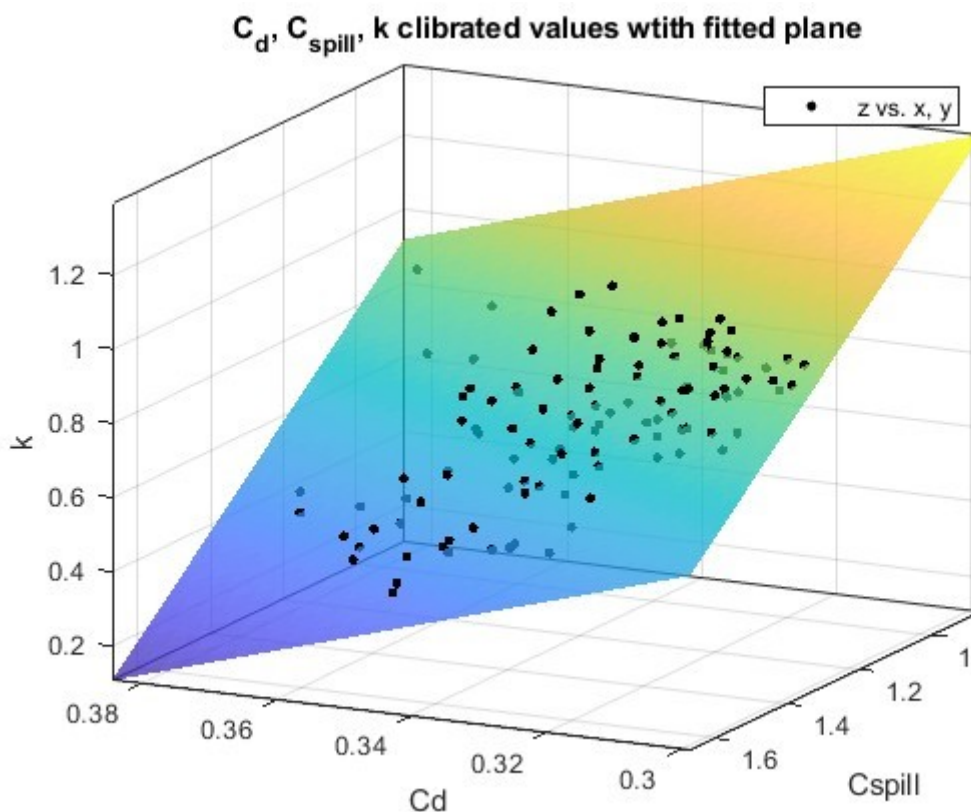
**Γράφημα 7.18:** Σχέση βαθμονομημένων και υπολογισμένων συντελεστών υπερχειλίσης

Σύμφωνα με τα Γράφημα 7.17 Γράφημα 7.18 εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα. Παρατηρούμε αρχικά όπως ήταν αναμενόμενο πως η μείωση του συντελεστή  $C_{spill}$  οδήγησε σε σχετική αύξηση του συντελεστή  $C_d$ . Τονίζεται πως λόγω του κώδικα επικύρωσης δεδομένων αρκετά σημεία έχουν απορριφθεί ως λύσεις λόγω υπολογισμού αρνητικής διακρίνουσας. Συνεπώς φαίνεται πως το πλήθος των διαθέσιμων σημείων

είναι εμφανώς μειωμένο συγκριτικά με το πλήθος σημείων που προέκυψε από τον υπολογισμό των συντελεστών  $C_{spill}$ . Φαίνεται επίσης πως τα διαθέσιμα σημεία αφορούν περιορισμένο εύρος των παροχών υπερχείλισης και συνεπώς δεν μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αντιπροσωπευτικές οι προκύπτουσες τιμές.

### 7.8 Αποτελέσματα καθολικού μοντέλου βαθμονόμησης παραμέτρων

Σύμφωνα με το Γράφημα 7.19 το οποίο παρουσιάζει τα αποτελέσματα της Monte Carlo βαθμονόμησης των τριών σταθερών διαπιστώνεται πως υπάρχει μία σαφής συσχέτιση των τριών μεγεθών υπό βαθμονόμηση. Πιο συγκεκριμένα φαίνεται πως από τα σημεία  $C_d$ ,  $C_{spill}$ ,  $k$  διέρχεται επίπεδο με  $R^2 = 0.9481$  με εξίσωση  $f(x,y) = -1.004*y - 5.496*x + 3.898$  όπου  $(x,y,z) = (C_d, C_{spill}, k)$ . Αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχει μοναδικό σημείο σύγκλισης της βαθμονόμησης, αλλά ότι αυτή κινείται πάνω στο παραπάνω επίπεδο. Από τη γεωμετρία της επίλυσης φαίνεται πως για σταθερό συντελεστή  $k$ , αύξηση του  $C_d$  οδηγεί σε μείωση του  $C_{spill}$  (μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα).



**Γράφημα 7.19:** Βαθμονομημένα σημεία  $(C_d, C_{spill}, k)$  με το αντίστοιχο προσαρμοσμένο επίπεδο

## 8. Συμπεράσματα

### 8.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων - Συνολικά συμπεράσματα

Συνοπτικά αναφέρεται πως οι παράγοντες που εξετάστηκαν δεν παρουσιάζουν σημαντική επιρροή στις τιμές των παραμέτρων. Επιτελούν όμως ένα σημαντικό ρόλο στην όλη ανάλυση, τον ρόλο της επαλήθευσης της ορθής εκτέλεσης όλων των διαδικασιών. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή διακύμανση της παροχής κάθε επεισοδίου ενώ δεν φαίνεται να επηρεάζει την μορφή των αποτελεσμάτων, επιβεβαιώνει την εξασφάλιση της ομοιόμορφης ροής σε όλα τα επιλεχθέντα επεισόδια. Η χαμηλή διακύμανση της ανάντη στάθμης εξασφαλίζει την μη διάδοση κυματισμών από το ανάντη θυρόφραγμα, ενώ η σχεδόν αμελητέα διακύμανση του ανοίγματος των θυροφραγμάτων σε κάθε επεισόδιο επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία του αλγορίθμου εύρεσης των επεισοδίων. Σημαντική επιρροή παρουσιάζει η διάρκεια του κάθε επεισοδίου καθώς όπως αποτυπώνεται και στο Γράφημα 6.8 το πλήθος των διαθέσιμων επεισοδίων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του επεισοδίου. Συνεπώς μέσω της ανάλυσης αυτής προέκυψε η βέλτιστη διάρκεια επεισοδίου ώστε να εξασφαλίζεται αφενός επαρκές πλήθος επεισοδίων και αφετέρου επαρκή διάρκεια ώστε να εξασφαλίζεται η εξομάλυνση της ροής.

### 8.2 Γενικά συμπεράσματα – Αποτελέσματα μεθοδολογιών

Από τις διαδικασίες βαθμονόμησης προκύπτει πως παρουσιάζεται συστηματική υποεκτίμηση των συντελεστών παροχής θυροφραγμάτων και υπερχειλιστών. Αυτό όπως αναφέρθηκε αιτιολογείται επιστημονικά βάσει της υφιστάμενης κατάστασης στο υδραγωγείο καθώς και λόγω της γήρανσης και φθοράς των υλικών. Η μείωση των συντελεστών παροχής προκαλείται από την αύξηση της τραχύτητας των υδραυλικών κατασκευών είτε λόγω υδραυλικής φθοράς του σκυροδέματος, είτε λόγω ανάπτυξης αλγών επί των επιφανειών, είτε λόγω συγκράτησης φερτών και άλλων υλικών όπως κλαδιά, κορμούς δέντρων κλπ. Η μειωμένες τιμές των συντελεστών παροχής σημαίνει μεγαλύτερο εμπόδιο της ροής κατά την διέλευσή της μέσω των ρυθμιστών. Τέλος αναφέρεται πως η βαθμονόμηση του συντελεστή τοπικών απωλειών υποστηρίζει πως

δεν είναι απαραίτητη η εισαγωγή της επιπλέον παραμέτρου στο μοντέλο καθώς προκύπτει υψηλή συσχέτιση της παραμέτρου με τους συντελεστές παροχής θυροφραγμάτων και υπερχειλιστών ενώ αντίθετα δεν παρατηρείται συσχέτιση των συντελεστών θυροφράγματος και υπερχειλιστή.

### 8.3 Παρατηρήσεις

Σε αυτήν την ενότητα αναφέρονται ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν ή ενδέχεται να επηρεάζουν τα αποτελέσματα στο σύνολό τους. Αρχικά, η μέθοδος των Wu και Rajaratnam έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου μελετάται μόνο θυρόφραγμα χωρίς παράλληλες διατάξεις. Το ίδιο ισχύει και για όλες τις συναφείς μεθοδολογίες όπως η μεθοδολογία των Swamee και Prabhata. Συνεπώς υπεισέρχονται δύο επιπλέον συνιστώσες τις οποίες δεν προβλέπει η μεθοδολογία των Wu και Rajaratnam. Η πρώτη είναι πως εξαιτίας της παροχής των πλευρικών υπερχειλιστών επηρεάζεται η κατάντη στάθμη των θυροφραγμάτων από ροή που δεν διέρχεται μέσω του υπερχειλιστή. Δεύτερον, κατάντη του θυροφράγματος η ροή γίνεται σε κανάλι με μεγαλύτερο πλάτος από το άνοιγμα του θυροφράγματος. Αυτό αποτελεί πρόβλημα διότι η μέθοδος Wu και Rajaratnam απαιτεί το βάθος ροής  $y_t$  όπως αυτό θα μετριόταν σε κανάλι πλάτους ίσο με ο άνοιγμα του θυροφράγματος. Συνεπώς η μέτρηση του βάθους  $y_t$  θα έπρεπε να διεξάγεται σε κανάλι ιδίου πλάτους με το άνοιγμα του θυροφράγματος χωρίς να γίνεται ανάμειξη της ροής υπερχειλιστή τουλάχιστον μέχρι και το σημείο μέτρησης του βάθους  $y_t$ . Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε η μεθοδολογία διόρθωσης του βάθους  $y_t$  σύμφωνα με μεθοδολογίες της υδραυλικής ανοικτών αγωγών. Η επιρροή της διόρθωσης αυτής αποδείχτηκε καθοριστική για την εκτέλεση της βαθμονόμησης. Παρόλα αυτά θα μπορούσε να επιτευχθεί πιο λεπτομερής ανάλυση αν η διάταξη επέτρεπε την μέτρηση ενός επιπλέον κατάντη βάθους προτού γίνει ανάμειξη της ροής με αυτήν του υπερχειλιστή.

Έπειτα αναφέρεται πως για την διαδικασία της βαθμονόμησης έχει θεωρηθεί πως το μέγιστο άνοιγμα των θυροφραγμάτων ισούται με το ύψος στέψης του υπερχειλιστή. Δεδομένου οι το υδραυλικό φορτίο κυμαίνεται στο εύρος 0-30cm, ακόμη και μία διαφοροποίηση της τάξης των 2cm μεταξύ του μέγιστου ανοίγματος και της στέψης του υπερχειλιστή μπορεί να αλλάξει τα αποτελέσματα. Αν υφίσταται τέτοια διαφορά,

αναλόγως του προσήμου της ( $H_{\max\_sluice} - H_{spill}$ ) μπορεί είτε να αυξήσει τον συντελεστή Cd μειώνοντας παράλληλα τον  $C_{spill}$  ή το αντίστροφο.

Τέλος αναφέρεται πως προκειμένου να υπάρξει μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη του υδραγωγείου θα πρέπει να μελετηθεί μεγαλύτερο μήκος του υδραγωγείου με παράλληλη ολοκλήρωση των συνθηκών ροής ανάντη και κατόντη. Αυτό θα αυξήσει σημαντικά τον διαθέσιμο όγκο δεδομένων καθώς η μελέτη επιπλέον ρυθμιστών και η μεταξύ τους σύγκριση των αποτελεσμάτων θα αποτυπώσει καλύτερα την λειτουργία των ρυθμιστών Λ.

#### 8.4 Περαιτέρω έρευνα

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια ανάλυσης ενός πολύπλοκου και εκτεταμένου θέματος. Συνεπώς υπάρχουν ένα σύνολο παραγόντων που παραμένουν ανεξερεύνητοι.

Αρχικά σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα κατάρτισης ενός εργαστηριακού μοντέλου που θα βοηθήσει στην περαιτέρω κατανόηση των διαφόρων συνιστωσών μέσω της διεξαγωγής κατάλληλων πειραμάτων. Σημειώνεται βέβαια πως εργαστηριακές μελέτες με κατασκευή ενός υπό κλίμακα ρυθμιστή αποτελεί ενδεχομένως δαπανηρή λύση. Αντίθετα όμως παρουσιάζει τα πιο ακριβή αποτελέσματα καθώς το όποιο σφάλμα υπόκειται στην ακρίβεια του μοντέλου και μπορεί κατά περίπτωση να αντιμετωπίζεται. Συνεπώς επισημαίνεται πως η μελέτη ενός ρυθμιστή με εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις είναι ίσως η κοντινότερη προσέγγιση στην πραγματικότητα.

Στην συνέχεια σημαντικό ενδιαφέρον θα είχε η κατάρτιση και η εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου τύπου *sequence2sequence* που να εκπαιδευτεί με στόχο την πρόβλεψη κατόντη μεγεθών ροής όπως το βάθος ροής ή την παροχή με δεδομένα εισόδου ανάντη μεγέθη ροής, ανοίγματα θυροφραγμάτων κ.ο.κ.. Επισημαίνεται βέβαια πως ένα *physics unaware* μοντέλο δύσκολα μπορεί να επιτύχει την ακρίβεια που απαιτείται σε τέτοιου τύπου κατασκευές. Συνεπώς για την αύξηση της ακρίβειας του μοντέλου αυτού θα πρέπει να εισαχθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν την ροή στην συνάρτηση στόχου που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του μοντέλου. Έτσι, ένα

καθαρά data driven μοντέλο είναι πιθανό να μην μπορεί να αποτυπώσει την πολυπλοκότητα του εν λόγω προβλήματος.

Μία από της πιο ενδιαφέρουσες προοπτικές ανάλυσης είναι η μελέτη των ρυθμιστών  $\Lambda$  με μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD). Τα μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής έχουν τη δυνατότητα ανάλυσης παραμέτρων και παραγόντων που ενδεχομένως ένα μοντέλο να μην μπορεί να αποτυπώσει στον επιθυμητό βαθμό. Συνεπώς σημαντικό ενδιαφέρον θα είχε η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας με ένα μοντέλο CFD. Βέβαια μία πρόκληση κατά τη χρήση προγραμμάτων CFD είναι η επιτυχημένη αποτύπωση της πραγματικής κατάστασης της κατασκευής στο υπολογιστικό μοντέλο.

Τέλος σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζεται από τη δυνατότητα κατάρτισης εμπειρικών σχέσεων που να συσχετίζουν τον συντελεστή παροχής των θυροφραγμάτων  $C_d$  με την υδραυλική ακτίνα της διατομής του ανοίγματος του θυροφράγματος. Επίσης αντίστοιχο ενδιαφέρον παρουσιάζει η δυνατότητα κατάρτισης και βαθμονόμησης εμπειρικών σχέσεων μεταξύ των μετρούμενων μεγεθών της ροής του υδραγωγείου. Αναφέρεται βέβαια πως έχει εξεταστεί η κατάρτιση εμπειρικών σχέσεων χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία.

## 9. Βιβλιογραφία

- ❖ Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου, ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΝΙΜΗΣ ΡΟΗΣ ΣΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ, ΔΙΔΑΚΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ: Έκδοση 5 Ακαδημαϊκό Έτος 2017 - 2018
- ❖ Ευστρατιάδης, Α., και Π. Παπανικολάου, Υδρολογικός σχεδιασμός συστημάτων υπερχείλισης και εκτροπής, Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος «Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.
- ❖ Παπανικολάου, Π, Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές Σημειώσεις: Έκδοση 5, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Δεκέμβριος 2017.
- ❖ Μαμάσης, Ν., Μετρητικό σύστημα, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 16, 88 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιανουάριος 2004.
- ❖ Μαμάσης, Ν., Δ. Κωνσταντινίδης, και Ι. Γαβριηλίδης, Τεχνικά χαρακτηριστικά υδρομετεωρολογικών σταθμών και τηλεπικοινωνιακού συστήματος, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της

- Αθήνας, Τεύχος 4, 34 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
- ❖ Μαμάσης, Ν., και Ι. Ναλμπάντης, Μελέτη υδρολογικών ισοζυγίων, Εκτίμηση και Διαχείριση των Υδατικών Πόρων της Στερεάς Ελλάδας – Φάση 2, Τεύχος 20, 118 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Σεπτέμβριος 1995.
  - ❖ Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Ε. Ρόζος, Χ. Καρόπουλος, Α. Νασίκας, Ε. Νεστορίδου, και Δ. Νικολόπουλος, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας — Έτος 2002–2003, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 14, 215 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2002.
  - ❖ Κουτσογιάννης, Δ., Α. Ευστρατιάδης, Γ. Καραβοκυρός, Α. Κουκουβίνος, Ν. Μαμάσης, Ι. Ναλμπάντης, Δ. Γκριτζιά, Ν. Δαμιανόγλου, Α. Ξανθάκης, Σ. Πολιτάκη, Β. Τσουκαλά, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας — Έτος 2000–2001, Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, Τεύχος 5, 165 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Δεκέμβριος 2000.
  - ❖ Ευστρατιάδης, Α., και Π. Παπανικολάου, Υδρολογικός σχεδιασμός έργων εκτροπής και υπερχειλίσης, Σημειώσεις μαθήματος "Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα", 93 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.
  - ❖ ΕΥΔΑΠ, Διαχειριστικό Σχέδιο Ύδρευσης (μετάφραση από το αγγλικό πρωτότυπο), Τεχνική υποστήριξη: Knight Riésold, Αθήνα, 1996.
  - ❖ Ευστρατιάδης, Α., Γ. Καραβοκυρός, και Ν. Μαμάσης, Σχέδιο διαχείρισης του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας – Έτος 2009, Συντήρηση, αναβάθμιση και επέκταση του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων για την διαχείριση του υδροδοτικού συστήματος της ΕΥΔΑΠ, Τεύχος 1, 116 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2009.
  - ❖ Δ. Κουτσογιάννης, Το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, Διαμόρφωση θεσμικού πλαισίου ποιότητας πόσιμου νερού της πρωτεύουσας, 11 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων, Υδραυλικών και Θαλάσσιων Έργων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.
  - ❖ Δ. Κουτσογιάννης, Το περίπλοκο υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας, *Economist*-Καθημερινή, 26 September 2004.
  - ❖ Α. Νάνου, Σημειώσεις Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων: Ροή με Ελεύθερη Επιφάνεια, 101 pages, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2018.
  - ❖ Bellos, V., P. Kossieris, A. Efstratiadis, I. Papakonstantis, P. Papanicolaou, P. Dimas, and C. Makropoulos, Fiware-enabled tool for real-time control of the raw-water conveyance system of Athens, *Proceedings of the 39th IAHR World Congress*, Granada, 2859-2865, doi:10.3850/IAHR-39WC2521716X20221468, 2022.
  - ❖ Bellos, V., I. Nalbantis, and G. Tsakiris, Friction modeling of flood flow simulations, *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018073, 2018.



- ❖ Kossieris, P., C. Pantazis, V. Bellos, and C. Makropoulos, FIWARE-enabled smart solution for the optimal management and operation of raw-water supply hydraulic works, *Proceedings of 7th European IAHR Congress “Innovating Water Management in a Changing Climate”*, Athens, 396-397, 2022.
- ❖ Lagarias, J. C., J. A. Reeds, M. H. Wright, and P. E. Wright, Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions, *SIAM Journal of Optimization*, 9(1), 112-147, 1998.
- ❖ Rajaratnam, N., and K. Subramanya, Practical problems of sluiceway flow, *Water Power*, 21, 112–115, 1969.
- ❖ Swamee, P. K., Sluice-gate discharge equations, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(1), 56-60, doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:1(56), 1992.
- ❖ Triki, A., Further investigation on the resonance of free-surface waves provoked by floodgate maneuvers: Negative surge waves, *Ocean Engineering*, 133, 133–141, doi:10.1016/j.oceaneng. 2017.02.003, 2017.
- ❖ Wu, S., and N. Rajaratnam, Solutions to rectangular sluice gate flow problems, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(12), 06015003, doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000922, 2015.

# Παραρτήματα

## Παράρτημα 1: Κατάλογος σχεδίων και γραφημάτων

### Γραφήματα

Γράφημα 2.1: Ετήσια διακύμανση .....	24
Γράφημα 3.1: Συντελεστής παροχής ελεύθερου υπερχειλιστή .....	27
Γράφημα 3.2: Διορθωτικός συντελεστής $C_0$ λόγω αποκόλλησης της ροής σε παροχές μεγαλύτερες της $Q_d$ .....	28
Γράφημα 3.3: Διορθωτικός συντελεστής λόγω λοξότητας της ανάντη παρειάς υπερχειλιστή ....	28
Γράφημα 6.1: Γραφική παράσταση αρχικής χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με τις εκτός εύρους τιμές.....	40
Γράφημα 6.2: Γραφική παράσταση αρχικής χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με τις εκτός εύρους τιμές.....	40
Γράφημα 6.3: Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος χωρίς συμπλήρωση κενών. ....	41
Γράφημα 6.4: Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος χωρίς συμπλήρωση κενών. ....	41
Γράφημα 6.5: Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση με και χωρίς εξομάλυνση. ....	42
Γράφημα 6.6: Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση εξομαλυμένων δεδομένων και των δεδομένων κατόπιν στρογγυλοποίησης και διακριτοποίησης.....	42
Γράφημα 6.7: Γραφική παράσταση χρονοσειράς ανοίγματος δεξιού θυροφράγματος με ταυτόχρονη αναπαράσταση αποτελέσματος πρώτου και δεύτερου σταδίου καθαρίσματος δεδομένων. Το δεύτερο στάδιο δεν περιλαμβάνει τμήματα με ισοπέδωση σήματος.....	43
Γράφημα 6.8: Πλήθος χρονικών παραθύρων για κάθε διάρκεια αναζητούμενων διαστημάτων	45
Γράφημα 6.9: Γραφική αποτύπωση λειτουργίας αλγορίθμου ανίχνευσης και εξαγωγής επεισοδίων. Ο αλγόριθμος «σαρώνει» την χρονοσειρά και καταχωρεί τα σημεία αρχής και τέλους των επεισοδίων. ....	46
Γράφημα 7.1: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H1$ με προσαρμοσμένη σχέση στο νέφος τιμών.....	74
Γράφημα 7.2: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H1$ με χρωματισμό βάσει διαφοράς ανοίγματος δεξιού – αριστερού θυροφράγματος.....	75
Γράφημα 7.3: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H1$ με χρωματισμό βάσει ιξώδους νερού (υπολογισμός μέσω της θερμοκρασίας νερού). ....	75
Γράφημα 7.4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων διαφοράς ανοίγματος δεξιού – αριστερού.....	76
Γράφημα 7.6: Διάγραμμα τύπου boxplot υδραυλικού φορτίου υπερχειλιστών για κάθε διάρκεια επεισοδίων .....	79
Γράφημα 7.7: Ιστόγραμμα συχνοτήτων συνολικής παροχής υδραγωγείου .....	79
Γράφημα 7.8: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H1$ για επεισόδια χωρίς υπερχειλίση ..	81
Γράφημα 7.9: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H1$ και της παροχής υπερχειλίσης ( $m^3/s$ ) .....	82
Γράφημα 7.10: Συσχέτιση παροχής υπερχειλίσης συγκριτικά με το λόγο $a/H1$ .....	83

Γράφημα 7.11: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H_1$ και της τυπικής απόκλισης της παροχής σε κάθε επεισόδιο ( $m^3/s$ ).....	85
Γράφημα 7.12: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H_1$ και της τυπικής απόκλισης της κατάντη στάθμης σε κάθε επεισόδιο (m).....	85
Γράφημα 7.13: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H_1$ και της τυπικής απόκλισης της ανάντη στάθμης σε κάθε επεισόδιο (m).....	86
Γράφημα 7.14: Νέφος τιμών $C_d$ συναρτήσει του λόγου $a/H_1$ και της τυπικής απόκλισης του ανοίγματος των θυροφραγμάτων σε κάθε επεισόδιο (%). .....	86
Γράφημα 7.15: Σχέση $Q_{spill}$ – υπολογισμένων $C_{spill}$ συγκριτικά με το βαθμό υπερχείλισης.....	88
Γράφημα 7.16: Ιστόγραμμα σχετικών συχνοτήτων υπολογισμένων συντελεστών $C_{spill}$ .....	88
Γράφημα 7.17: Διάγραμμα τύπου boxplot κατανομής υπολογισμένων $C_{spill}$ για κάθε διάρκεια επεισοδίου .....	89
Γράφημα 7.18: Σχέση βαθμονομημένων $C_{spill}$ – Spill Head (m) συγκριτικά με το βαθμό υπερχείλισης .....	90
Γράφημα 7.19: Σχέση βαθμονομημένων και υπολογισμένων συντελεστών υπερχείλισης .....	90
Γράφημα 7.20: Βαθμονομημένα σημεία ( $C_d, C_{spill}, k$ ) με το αντίστοιχο προσαρμοσμένο επίπεδο. 91	

### Διαγράμματα

Διάγραμμα 6.1: Διάγραμμα διεργασιών προγραμματισμού. ....	39
Διάγραμμα 6.2: Δομή αλγορίθμου ταυτόχρονης βαθμονόμησης συντελεστών .....	50
Διάγραμμα 6.3: Αλγόριθμος βαθμονόμησης $C_d$ .....	52
Διάγραμμα 6.4: Αλγόριθμος υπολογισμού $C_{spill}$ .....	54
Διάγραμμα 6.5: Διάγραμμα ροής βαθμονόμησης του συντελεστή $C_{spill}$ .....	55
Διάγραμμα 6.6: Αλγόριθμος βαθμονόμησης συντελεστή τοπικών απωλειών .....	57
Διάγραμμα 6.7: Συνοπτική παρουσίαση διαδικασιών προγραμματισμού .....	58

### Εικόνες

Εικόνα 2.1: Όψη υδραγωγείου. ....	17
Εικόνα 2.2: Όψη υδραγωγείου. ....	17
Εικόνα 2.3: Όψη ρυθμιστή Λ9Α.....	19
Εικόνα 2.4: Όψη ρυθμιστή Λ10.....	19
Εικόνα 2.5: Όψη ρυθμιστή Λ8.....	20
Εικόνα 2.6: Όψη ρυθμιστή Λ9, με πλευρική υπερχείλιση. ....	20
Εικόνα 2.7: Διάταξη ρυθμιστή Λ. ....	22
Εικόνα 6.1: Άποψη υπερχειλιστών ρυθμιστή Λ8 και Λ9.....	53