

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος**

**Διπλωματική εργασία**

**Ολοκληρωμένο πλαίσιο εκτίμησης του πλημμυρικού  
κινδύνου υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων με σύζευξης  
μοντέλων πολλαπλών χρονικών κλιμάκων:  
από την υδρολογική προσομοίωση στην διαχείριση  
των θυροφραγμάτων**

**ΠΑΝΤΑΖΗ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΕΝΗ**

**Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης, Επίκουρος Καθηγητής, Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, 2023**

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>Πρόλογος</b>	<b>5</b>
<b>Περίληψη</b>	<b>7</b>
<b>Abstract</b>	<b>8</b>
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>9</b>
1.1 Αντικείμενο και στόχοι.....	9
1.2 Διάρθρωση εργασίας .....	10
<b>2 Βασικές έννοιες και τεχνικά μεγέθη</b>	<b>12</b>
2.1 Υδροηλεκτρικά έργα και βασικές κατασκευές που τα συνθέτουν .....	12
2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων .....	15
2.3 Πλημμυρικό επεισόδιο και η ανάγκη διόδευσης.....	17
<b>3 Περιοχή μελέτης</b>	<b>19</b>
3.1 Ποταμός Αραχθος και λεκάνη απορροής.....	19
3.2 Φράγμα Πουρναρίου I.....	20
3.3 Ταμιευτήρας .....	22
3.4 Ταμιευτήρας .....	22
3.5 Έργα υπερχείλισης.....	25
3.6 Φράγμα και ταμιευτήρας Πουρναρίου II.....	26
3.7 Ιστορικές πλημμύρες .....	27
3.8 Υδρολογικά δεδομένα περιοχής μελέτης.....	30
<b>4 Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο – σύζευξη μοντέλων</b>	<b>31</b>
4.1 Τοποθέτηση προβλήματος.....	31
4.2 Η περίπτωση των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων.....	32
4.3 Σύνοψη προτεινόμενου πιθανοτικού πλαισίου σχεδιασμού υπερχειλιστών.....	33
<b>5 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής</b>	<b>37</b>
5.1 Σκοπός .....	37
5.2 Περιγραφή μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης .....	37

5.3	Βαθμονόμηση μοντέλου .....	42
5.4	Στατιστική αξιολόγηση προγνωστικής ικανότητας μοντέλου .....	43
<b>6</b>	<b>Προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα</b> .....	<b>46</b>
6.1	Σκοπός .....	46
6.2	Συνοπτική περιγραφή υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα.....	46
6.3	Σχέση στάθμης-παροχής ταμιευτήρα .....	47
6.4	Προσομοίωση ταμιευτήρα Πουρναρίου .....	48
6.5	Αποτελέσματα προσομοίωσης ταμιευτήρα .....	50
6.6	Εντοπισμός επεισοδίων υπερχειλίσεως .....	53
6.7	Αναπαράσταση υπερχειλίσεων και χρονική κλίμακα προσομοίωσης.....	53
<b>7</b>	<b>Επιμερισμός μέσω ημερήσιων παροχών για την παραγωγή επεισοδίων ωριαίας χρονικής κλίμακας</b> .....	<b>55</b>
7.1	Σκοπός .....	55
7.2	Επιμερισμός με περιπτώσεις ανοδικού και καθοδικού κλάδου.....	56
7.3	Επιμερισμός με χρήση εκθετικής συνάρτησης.....	60
7.4	Επιμερισμός με χρήση δύο παραμέτρων .....	64
7.5	Τελικό μοντέλο επιμερισμού μέσω ημερήσιων παροχών σε ωριαίες.....	68
<b>8</b>	<b>Διαχείριση και διόδευση πλημμυρικού επεισοδίου</b> .....	<b>73</b>
8.1	Σκοπός .....	73
8.2	Διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων .....	73
8.3	Υπολογιστικό σχήμα διόδευσης Πουρναρίου .....	75
8.4	Κανόνας λειτουργίας θυροφραγμάτων Πουρναρίου .....	76
8.5	Παραδείγματα εφαρμογής μοντέλου διόδευσης.....	80
<b>9</b>	<b>Στοχαστικό πλαίσιο προσομοίωσης και πιθανοτική ανάλυση χαρακτηριστικών πλημμυρικών μεγεθών</b> .....	<b>87</b>
9.1	Σκοπός .....	87
9.2	Διαδικασία γέννησης συνθετικών χρονοσειρών – Μοντέλο anySim .....	87
9.3	Στατιστική ανάλυση ετήσιων μεγίστων.....	88
9.4	Παραγωγή συνθετικών κατακρημνίσεων .....	90
9.5	Σύγκριση μεγίστων .....	92
9.6	Στοχαστική προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα .....	97

<b>10 Συμπεράσματα-Προτάσεις</b>	<b>101</b>
10.1 Σύνοψη εργασιών .....	101
10.2 Συμπεράσματα.....	101
10.3 Μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι.....	104
<b>Αναφορές</b>	<b>106</b>

# Πρόλογος

---

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα ορόσημο για τη ζωή μου και ταυτόχρονα σηματοδοτεί την κατάκτηση ενός μεγαλεπήβολου στόχου. Το κεφάλαιο της φοίτησής μου κλείνει και ένα νέο με πολλές λευκές σελίδες αρχίζει έχοντας τον τίτλο της διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Με τον πρόλογο αυτό νιώθω την ειλικρινή ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά όλα τα πρόσωπα που συνέβαλαν, με τον δικό τους τρόπο, στην επιτυχή ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον κ. Ανδρέα Ευστρατιάδη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., που με ξεχώρισε από την πρώτη κιόλας μέρα. «Η οικογένεια του τομέα μας σε περιμένει», είπε τον Νοέμβριο του 2020 στο μάθημα της Υδραυλικής και Υδραυλικών Έργων και κάπως έτσι έγινε. Προσφέροντας απλόχερα και με αστείρευτη όρεξη τις γνώσεις του, μου μετέδωσε την αγάπη για την επιστήμη μας και υπήρξε πηγή έμπνευσης σε αυτό το συναρπαστικό ταξίδι των σπουδών μου. Με τίμησε βάζοντάς με στην δική του ομάδα και στάθηκε δίπλα μου στις ευκολίες και στις δυσκολίες. Η πίστη του στις δυνατότητές μου, τον οδήγησε να επιλέξει ένα τόσο απαιτητικό και καινοτόμο θέμα για την εργασία αυτή. Δεν μου επέτρεψε να χάσω ποτέ τις ελπίδες μου, θεωρώντας με ικανή να αντιμετωπίσω όλες τις δυσκολίες που θα προέκυπταν. Για μένα είναι ο ορισμός του δασκάλου και όσοι φοιτητές είχαν ή θα έχουν την ευκαιρία να διδαχτούν κοντά του είναι το λιγότερο τυχεροί. Δεν έχω λόγια να τον ευχαριστήσω ως διδασκων, ως επιβλέποντα και ως άνθρωπο.

Στην συνέχεια οφείλω να εκφράσω ολόκαρδα τις ευχαριστίες μου στην υποψήφια Δρ. Τζωρτζίνα Σακκή. Δεν διέθεσε μόνο τις γνώσεις της, τον χρόνο της και τον προσωπικό της κόπο για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αλλά ταυτόχρονα μου έμαθε όσα δεν θα τολμούσα ποτέ να μάθω μόνη μου, με βοήθησε όταν δεν πίστεψα ότι μπορώ και με καθοδήγησε για να προχωρήσω. Η προσωπικότητά της, το ήθος της και η συνεχής προσφορά της, την καθιστούν στα μάτια μου αναπόσπαστο κομμάτι της διδακτικής κοινότητας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Χριστίνα Ντεμίρογλου. Η διπλωματική της εργασία και η ερευνητική της προσπάθεια, στην ίδια περιοχή μελέτης με την δική μου, συνέβαλαν ουσιαστικά. Η ηθική της στήριξη, το συνεχές ενδιαφέρον της και οι συμβουλές της υπήρξαν κάτι παραπάνω από πολύτιμες.

Τέλος, το πιο μεγάλο ευχαριστώ το οφείλω στην οικογένεια μου και στους φίλους μου. «Σταθήκατε συνοδοιπόροι και μου επιτρέψατε να χαράξω τον δικό μου δρόμο, μου προσφέρατε την βοήθειά σας σε ό,τι χρειάστηκα και ήσασταν βράχοι που σκαρφάλωσα πάνω ώστε να φτάσω στην κορυφή. Χωρίς εσάς δεν θα μπορούσα να φανταστώ την μέχρι τώρα ζωή μου, αλλά ούτε και το μέλλον μου.»

«Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη,  
να εύχεται να 'ναι μακρύς ο δρόμος,  
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις.»

Κ.Π. Καβάφης

Γράφοντας αυτές τις τελευταίες γραμμές αναπολώ το μεγάλο ταξίδι μου στην γνώση. Μικρά βήματα, πολύς κόπος, ατέρμονες ώρες προσπάθειας για την κατάκτηση της. Γιατί εν τέλει η γνώση είναι δύναμη και η δύναμη αυτή πηγάζει από μέσα μας.

Και κάπως έτσι ήταν ο δικός μου δρόμος, για την κατάκτηση της δική μου Ιθάκης.

Πανταζή Μαρία-Ελένη,

Αθήνα, Ιούλιος 2023

## Περίληψη

---

Η αποτελεσματική αξιολόγηση και διαχείριση των κινδύνων πλημμύρας είναι υψίστης σημασίας για την διασφάλιση και την βιωσιμότητα του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου ερευνητικού πλαισίου για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, συνδυάζοντας μοντέλα διαφορετικών χρονικών κλιμάκων. Η προτεινόμενη μεθοδολογική διαδικασία περιλαμβάνει μια σύζευξη μοντέλων, που αποσκοπούν από την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής έως την τελική διαχείριση της πλημμύρας, μέσω κατάλληλων χειρισμών των θυροφραγμάτων και στροβίλων. Για την πιλοτική εφαρμογή της επιλέχθηκε το φράγμα Πουρναρίου I επί του ποταμού Αράχθου. Η μελέτη ξεκινά με την ανάπτυξη ενός ημερήσιου μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης απορροής του Αράχθου, το οποίο περιγράφει την αλληλουχία των υδατικών ισοζυγίων στις διάφορες εδαφικές ζώνες, για την μετατροπή των δεδομένων βροχής σε απορροή. Με αφετηρία αυτές τις παροχές εισροής, κατασκευάζεται το μοντέλο «συνεχούς» προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα σε ημερήσιο βήμα, αποσκοπώντας στην καταγραφή των μεταβολών του αποθέματος και στον εντοπισμό των επεισοδίων υπερχειλίσεως που προκύπτουν από μια στρατηγική διαχειριστική πολιτική. Στο μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών που ακολουθεί, τα δεδομένα εισροής των επιλεγμένων πλημμυρικών επεισοδίων ανάγονται σε λεπτότερη χρονική κλίμακα, ήτοι ωριαία, μέσω εμπειρικών κανόνων που εξασφαλίζουν μαθηματική αλλά και υδρολογική συνέπεια. Έπειτα, διερευνάται μια πρόσφορη και αποτελεσματική πολιτική χειρισμών των έργων ελέγχου των υπερχειλίσεων (στρόβιλοι, θυροφράγματα) για τη βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου αποθέματος, με σκοπό την μεγιστοποίηση της δυναμικής παραγωγής ενέργειας και την ταυτόχρονη προστασία του έργου από τα πλημμυρικά επεισόδια. Η πολιτική αυτή υλοποιείται σε ένα μοντέλο ωριαίας λειτουργίας του ταμιευτήρα, που τροφοδοτείται με τα επιμερισμένα υδρογραφήματα. Τέλος, η ανάγκη εξαγωγής αξιόπιστων στατιστικών αποτελεσμάτων οδηγεί στην παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών ημερήσιας κατακρήμνισης μήκους 1000 ετών, για την στοχαστική εφαρμογή του πλαισίου συνδυαστικής μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε. Η παρούσα έρευνα αναδεικνύει ότι μια τέτοια ολοκληρωμένη προσέγγιση, μέσω της σύζευξης των παραπάνω μοντέλων, μπορεί να συμβάλλει στο πεδίο της αξιολόγησης του πλημμυρικού κινδύνου υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα εφαρμογής του στη διαστασιολόγηση των έργων υπερχειλίσεως με στατιστικά συνεπή τρόπο, υπερβαίνοντας τις αδρομερείς και μάλλον υπερσυντηρητικές παραδοχές της συνήθους πρακτικής του υδρολογικού σχεδιασμού έργων ασφαλείας.

# Abstract

---

Effective assessment and management of flood risks is of great importance for the safeguarding and sustainability of the man-made environment. The aim of this thesis is to develop an innovative research framework for flood risk assessment of hydroelectric reservoirs, by combining models of different time scales. The proposed methodological procedure includes a coupling of modelling approaches, from the hydrological simulation of the river basin to the final flood management, through appropriate manipulations of gates and turbines. For its pilot implementation, the Pournari I dam at Arachthos river was chosen. The study begins with the development of a daily hydrological simulation model of the river basin, which describes the sequence of water balances across the different soil zones, in order to convert rainfall data into runoff. Starting from these inflows, a model of "continuous" simulation of reservoir operation in a daily step is constructed, aiming at representing the storage changes and identifying overflow episodes, resulting from a strategic management policy. In the disaggregation model of average daily flows, the inflow data of the selected flood events are converted to a finer time scale, i.e., hourly, through empirical rules that ensure both mathematical and hydrological consistency. Then, an appropriate and effective policy for handling the flood control works (turbines, gates) is investigated for the optimal utilization of the available storage, in order to maximize the potential energy production and at the same time protect the project from flooding events. This policy is implemented by means of a hourly operation model of the reservoir, driven by the disaggregated hourly hydrographs. Finally, the need to extract reliable statistical results leads to the production of synthetic time series of daily precipitation of 1000 years length, for the stochastic application of the developed modelling framework. The present research demonstrates that such an integrated approach, through the above model coupling, can contribute to the field of flood risk assessment of hydropower reservoirs. Moreover, it provides the possibility of applying it to spillway sizing through a statistically consistent manner, thus overcoming the rough and rather ultraconservative assumptions of the usual practice of hydrological design of safety works.



# 1 Εισαγωγή

---

## 1.1 Αντικείμενο και στόχοι

Η αναπαράσταση των πλημμυρικών επεισοδίων που διοδεύονται μέσω ταμιευτήρων, και ειδικότερα μέσω υδροηλεκτρικών έργων που είναι εξοπλισμένα με θυροφράγματα, συνιστά ένα σύνθετο πρόβλημα που απασχολεί τους μελετητές. Το ζήτημα αυτό απαντάται σε διάφορους τύπους μελετών, όπως ο σχεδιασμός των έργων υπερχειλίσης, η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, καθώς και η επιχειρησιακή διαχείριση των πλημμυρών (πρόβλημα πρόγνωσης). Ειδικότερα, κατά τον σχεδιασμό έργων μεγάλης κλίμακας απαιτείται η τήρηση γενικών κανόνων για την εύρεση των μεγθών σχεδιασμού, οι οποίοι βασίζονται σε πιθανοτικά μεγέθη που λειτουργούν υπέρ της ασφαλείας. Η συνθήκη αυτή είναι αναγκαστική και προκύπτει εξαιτίας πληθώρας αστάθμητων παραγόντων και συναφών αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την εμφάνιση του πλημμυρικού κύματος και όλες τις σχετικές διεργασίες, *από την υδρολογική προσομοίωση μέχρι και την διαχείριση των θυροφραγμάτων* (όπως υποδηλώνει ο τίτλος της εργασίας).

Στο πλαίσιο διαστασιολόγησης φραγμάτων και διαχείρισης πλημμυρικού κινδύνου, η αβεβαιότητα αρχικά εισάγεται από την κατακρήμνιση, που είναι το γενεσιουργό αίτιο της πλημμύρας και αποτελεί βεβαίως τυχαία μεταβλητή. Καθοριστικό παράγοντας προκειμένου να εμφανιστεί πλημμυρικός όγκος νερού στην ανάντη περιοχή του φράγματος, ο οποίος θα οδηγηθεί στην τεχνητή λίμνη, αποτελεί όχι μόνο η ίδια η κατακρήμνιση αλλά και οι αρχικές συνθήκες υγρασίας στη λεκάνη, που επίσης διέπονται από τυχειότητα. Είναι γνωστό ότι μια ισχυρή βροχόπτωση που προσπίπτει σε ξηρές συνθήκες εδάφους μπορεί να προκαλέσει μια σχετικά ήπια πλημμύρα, και αντίστροφα. Στην συνέχεια, κατά την άφιξη του πλημμυρικού κύματος, αβέβαιες είναι τόσο η στάθμη του ταμιευτήρα όσο και η διαχειριστική πολιτική που θα ακολουθηθεί, αν ο υπερχειλιστής του έργου διαθέτει θυροφράγματα (οπότε καλείται εκχειλιστής) και άλλα έργα ελέγχου των εκροών (στρόβιλοι και άλλες μορφές υδροληψίας). Συνεπώς, ο ταμιευτήρας ενδέχεται να αποθηκεύσει όλο το πλημμυρικό επεισόδιο, σε περίπτωση που το διαθέσιμο απόθεμα του είναι χαμηλό, να υπερχειλίσει μερικώς, ανάλογα με την πολιτική που θα ακολουθήσει ο διαχειριστής του έργου, ή να υπερχειλίσει πλήρως, αν ήδη βρίσκεται σε υψηλές στάθμες και αποφασιστεί η διοχέτευση όλης της πλημμύρας από τον εκχειλιστή, για λόγους ασφαλείας.

Διαπιστώνεται, λοιπόν, πως με την πάροδο των ετών και την αύξηση της εμπειρίας γύρω από την κατασκευή υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων δημιουργούνται προβληματισμοί για τον τρόπο υπολογισμού των μεγθών των έργων υπερχειλίσης. Τα κόστη υλοποίησης και συντήρησης των έργων αυτών οδηγούν σε πιέσεις προς την επιστημονική κοινότητα, για σχεδιασμό που θα διασφαλίζει ένα συγκεκριμένο (και βεβαίως πάρα πολύ υψηλό) επίπεδο ασφαλείας, βασισμένο ωστόσο σε μια πιο τεκμηριωμένη εκτίμηση των πιθανοτήτων εμφάνισης των πλημμυρικών επεισοδίων. Όπως θα αναδειχθεί αργότερα, οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται ο τυπικός σχεδιασμός των υπερχειλιστών είναι ιδιαίτερα συντηρητικός, και ενδεχομένως να οδηγεί σε υπερδιαστασιολόγηση των σχετικών έργων.

Η πολυπλοκότητα αυτή καθιστά αναγκαία την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου, με έμφαση στους υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες, μέσω ενός συνδυασμού μοντέλων προσομοίωσης, από την λειτουργία του ταμιευτήρα και της ανάντη λεκάνης απορροής του, έως τις διεργασίες της διόδευσης και της αναπαράστασης της πολιτικής διαχείρισης των έργων ελέγχου των εκροών (στρόβιλοι, θυροφράγματα). Στην μεθοδολογική προσέγγιση του προβλήματος κρίνεται απαραίτητη η εναλλαγή χρονικών κλιμάκων, η οποία επιβάλλεται από τα διαθέσιμα δεδομένα και την ανάγκη συμβιβασμού της λεπτομέρειας που απαιτεί η πολυπλοκότητα των διεργασιών και του αντίστοιχου υπολογιστικού φόρτου. Με τον τρόπο αυτό, καθίσταται εφικτή η εφαρμογή των μοντέλων για πληθώρα επεισοδίων, τα οποία παράγονται μέσω μιας μεγάλης διάρκειας προσομοίωσης. Τελικά, αντί μιας μονοσήμαντης (ντετερμινιστικής) λύσης, διατίθεται ένα ευρύ φάσμα αποτελεσμάτων των μεγεθών ενδιαφέροντος (π.χ., εκροές), που με την κατάλληλη στατιστική τους επεξεργασία παρέχουν την δυνατότητα εξαγωγής πιθανοτικών μεγεθών, ώστε να χρησιμοποιηθούν στον σχεδιασμό των έργων υπό ένα στοχαστικό πλαίσιο.

Το παραπάνω συνδυασμένο πλαίσιο εφαρμόζεται στο φράγμα Πουρναρίου Ι του ποταμού Αράχθου. Ένας από τους λόγους επιλογής της περιοχής μελέτης είναι πως για τη λεκάνη του Αράχθου και το συγκεκριμένο φράγμα υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από προηγούμενες ερευνητικές προσπάθειες, οι οποίες έδωσαν την βάση για την δημιουργία των εν λόγω μοντέλων. Επίσης, ως υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας, παρέχει την δυνατότητα διαχείρισης των πλημμυρών μέσω συστήματος θυροφραγμάτων, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του πλημμυρικού κινδύνου, τόσο του ίδιου του φράγματος όσο και των κατάντη αυτού περιοχών, ταυτόχρονα με την ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού λόγω υπερχειλίσεων, που συνεπάγονται σε απώλειες δυναμικής παραγωγής ενέργειας υψηλής αξίας (ενέργεια αιχμής).

## 1.2 Διάρθρωση εργασίας

Αρχικά, στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται το αντικείμενο μελέτης και τίθενται οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έπειτα, στο **Κεφάλαιο 2** καταγράφονται οι βασικές τεχνικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στα υδροηλεκτρικά έργα για το φράγμα, τον ταμιευτήρα, αλλά και την εμφάνιση και διαχείριση πλημμυρικών επεισοδίων. Στην συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η περιοχή μελέτης και τα χαρακτηριστικά του φράγματος, ενώ στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται η ανάλυση του γενικού μεθοδολογικού πλαισίου της εργασίας και η συνοπτική περιγραφή του τρόπου σύζευξης των επιμέρους μοντέλων. Στο **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφεται η μετατροπή της βροχής σε απορροή, μέσω μοντέλου που αναλύει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης και στο **6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** γίνεται η ημερήσια προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα, η οποία αποσκοπεί στην επιλογή των υπερχειλίσεων. Τα επεισόδια αυτά, στο **Κεφάλαιο 7**, επιμερίζονται και οι μέσες ημερήσιες τιμές των παροχών μετατρέπονται σε ωριαίες. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσονται και εξετάζονται διάφορες μεθοδολογικές προσεγγίσεις, προτού επιλεγεί η βέλτιστη. Ακολούθως στο **Κεφάλαιο 8** διοδεύονται τα ωριαία πλημμυρικά επεισόδια και προτείνεται ένας κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων σε πραγματικό χρόνο από τους χειριστές. Εν συνεχεία, στο **Κεφάλαιο 9** καταγράφονται τα αποτελέσματα στοχαστικής εφαρμογής του μοντέλου και γίνεται η

πιθανοτική τους ανάλυση. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 10** συνοψίζονται τα συμπεράσματα και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 2 Βασικές έννοιες και τεχνικά μεγέθη

---

### 2.1 Υδροηλεκτρικά έργα και βασικές κατασκευές που τα συνθέτουν

Τα υδροηλεκτρικά έργα είναι συνδυασμός έργων Πολιτικού Μηχανικού και ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Κατασκευάζονται σε μια συγκεκριμένη θέση ποταμού, με μεγάλο διαθέσιμο ύψος πτώσης και σκοπεύουν στην παραγωγή ενέργειας. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (ή υδροηλεκτρικοί ταμιευτήρες) που παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης νερού
- τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα, χωρίς ταμίευση

Τα πρώτα μπορούν να σχεδιαστούν είτε ως έργα αιχμής, δηλαδή για να καλύψουν την ζήτηση μόνο λίγων ωρών αιχμής, είτε ως έργα βάσης που λειτουργούν συστηματικά για μεγάλο ποσοστό του χρόνου.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων είναι η παραγωγή ενέργειας χωρίς διακυμάνσεις και η μεγάλη αξιοπιστία των υδροστροβίλων. Ουσιαστικά, όσο αυξάνεται η στάθμη του ταμιευτήρα, αποθηκεύεται δυναμική ενέργεια η οποία μπορεί να μετατραπεί σε κινητική και εν τέλει σε ηλεκτρική.

Εκτός από την προσφορά τους στο ενεργειακό μίγμα, συμβάλουν επίσης ως έργα πολλαπλής σκοπιμότητας, στη βέλτιστη διαχείριση και αντιμετώπιση των υδατικών αναγκών, όπως η ύδρευση και η άρδευση. Η βασική αυτή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας συντείνει σε θέματα διαχείρισης και αξιοποίησης υδατικών αποθεμάτων, αφού παρέχει την δυνατότητα αποθήκευσης. Πέρα από τις παραπάνω υδατικές ανάγκες που εξυπηρετεί ένας υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας, λειτουργεί και ως έργο αντιπλημμυρικής προστασίας.

Η ταυτόχρονη κάλυψη των αιχμών της ζήτησης μέσω της ηλεκτροπαραγωγής, η χρήση του νερού και κατανομή του χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας του και η ολική ή μερική ανάσχεση πλημμυρικών παροχών, καθιστούν τους υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες αναπόσπαστη υποδομή μιας χώρας και έναν οικονομοτεχνικά εκμεταλλεύσιμο πόρο της.

Είναι βασικό λοιπόν να γίνει μια σύντομη αναφορά στις κατασκευές Πολιτικού Μηχανικού που εξασφαλίζουν τις προϋποθέσεις για την αναρρόθμιση των εισροών του ποταμού και την δημιουργία του απαιτούμενου ενεργειακού ύψους για την παραγωγή ενέργειας. Ακολουθεί μια επιγραμματική περιγραφή των επί μέρους αυτών κατασκευών.

#### 1. Φράγμα:

Η χωρική τοποθέτησή του γίνεται εγκάρσια στην φυσική ροή του ποταμού. Το ύψος και ο τύπος του εξαρτάται από την γεωμορφολογία της περιοχής, αλλά και τα γενικότερα οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά του έργου. Με την κατασκευή του δημιουργείται ένας ταμιευτήρας, δηλαδή μια τεχνική λίμνη ανάντη αυτού. Ως κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του υδροηλεκτρικού έργου ορίζονται:

- ο όγκος του ταμιευτήρα
- η δυνατότητα αναρρύθμισης των εισροών του ποταμού
- το διατιθέμενο ύψος πτώσης προς ενεργειακή εκμετάλλευση

Οι τύποι φραγμάτων ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- στα γεωφράγματα (χωμάτινα, λιθόρριπτα με αργιλικό πυρήνα κλπ.)
- στα φράγματα από σκυρόδεμα (βαρύτητας, τοξωτά, RCC κλπ.)

Ο ταμιευτήρας που δημιουργείται από το φράγμα μπορεί να είναι ημερήσιας, ετήσιας ή υπερετήσιας αναρρύθμισης, ανάλογα με την σκοπιμότητα του υδροηλεκτρικού έργου πέραν της ενεργειακής παραγωγής.

Όπως αναφέρθηκε, τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα δεν παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης υδατικών πόρων. Η θέση τους συνήθως περιορίζεται σε επιλογές στενών τμημάτων ποταμών, με μεγάλα διαθέσιμα ύψη πτώσης και μικρές παροχές. Συνεπώς σπανίως εξυπηρετούν άλλες χρήσεις πλην της ενεργειακής.

## 2. Εκχειλιστής και υπερχειλιστής:

Οι κατασκευές αυτές αποσκοπούν στην παροχέτευση των πλημμυρικών παροχών του ποταμού, οι οποίες δεν μπορούν να αποθηκευτούν στον ταμιευτήρα, ούτε να εκρεύσουν μέσω των μονάδων που είναι εγκατεστημένες στον σταθμό παραγωγής. Ο υπερχειλιστής παρέχει μια ελεύθερη υπερχειλίση, δηλαδή όταν η αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα φτάσει σε μια ανώτατη στάθμη καταγράφεται αμέσως εκροή. Αντίθετα ο εκχειλιστής διαθέτει θυροφράγματα, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται ρυθμιζόμενη εκροή. Έτσι προσφέρουν την δυνατότητα διαχείρισης τους σε πλημμυρικά φαινόμενα, ώστε να υπερχειλίσει ο ελάχιστος δυνατός όγκος νερού. Παρόλα αυτά οι δύο αυτές έννοιες συγχέονται μεταξύ τους και χρησιμοποιούνται για πλημμυρικά επεισόδια, οπότε πρέπει να διευκρινίζεται αν το φράγμα διαθέτει ή όχι θυροφράγματα για ελεγχόμενη εκροή.

## 3. Εκκενωτής πυθμένα:

Η διάταξη αυτή επιτρέπει την ταχεία μείωση της στάθμης του ταμιευτήρα ή την πλήρη εκκένωση του σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Βρίσκεται στον πυθμένα και το στόμιο του διαθέτει εσχάρα και θυροφράγματα. Το νερό οδηγείται κατόντη μέσω χαλύβδινου αγωγού.

## 4. Υδροληψία:

Είναι η κατασκευή εκείνη η οποία διατάσσεται στο αντέρεισμα του φράγματος, βυθισμένη μέσα στον δημιουργούμενο ταμιευτήρα για να οδηγήσει το νερό στον στρόβιλο μέσω του αγωγού ή της σήραγγας προσαγωγής. Στην είσοδό της φράσσεται με εσχάρες προκειμένου να διαφυλάσσονται τα πτερύγια των στροβίλων από ξύλα και άλλα επικίνδυνα αντικείμενα.

## 5. Σήραγγες - αγωγοί προσαγωγής και φυγής:

Για την μεταφορά του νερού από την τεχνητή λίμνη μέχρι το στρόβιλο χρησιμοποιούνται χαλύβδινοι αγωγοί προσαγωγής ή σήραγγες. Οι κατασκευές αυτές είναι κατάλληλα

ενισχυμένες, για να αντέχουν τις υδραυλικές πιέσεις που αναπτύσσονται κατά την κανονική λειτουργία του έργου, αλλά και τα δυναμικά πλημμυρικά φαινόμενα.

Μετά την έξοδο από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας το νερό επαναδιοχετεύεται στο ποτάμι μέσω του αγωγού φυγής.

#### 6. Σταθμός παραγωγής:

Ανάλογα με την γεωμορφολογία της περιοχής και τον όλο σχεδιασμό της εγκατάστασης γίνεται και η επιλογή τοποθέτησης του κτηρίου του σταθμού παραγωγής. Μέσα στο κτήριο αυτό, εγκαθίσταται ο κύριος μηχανολογικός εξοπλισμός, όπως οι υδροστρόβιλοι, οι γεννήτριες, οι πίνακες ελέγχου, κλπ.

#### 7. Υποσταθμός:

Είναι η εγκατάσταση εκείνη η οποία διοχετεύει μέσω μετασχηματισμών την παραγόμενη ενέργεια στο διασυνδεδεμένο δίκτυο.

Τα βασικά τμήματα του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού σε ένα υδροηλεκτρικό έργο είναι τα εξής:

##### 1. Υδροστρόβιλοι:

Ο υδροστρόβιλος είναι η μηχανή που μετατρέπει την υδραυλική ενέργεια σε μηχανική. Υπάρχουν διάφοροι τύποι στροβίλων, με τους πιο γνωστούς να είναι:

- στρόβιλοι τύπου Francis (αντίδρασης), οι οποίοι είναι ευρέως διαδεδομένοι και χρησιμοποιούνται σε μέτρια ύψη πτώσης και μεγάλο εύρος παροχών
- στρόβιλοι τύπου Pelton (δράσης), οι οποίοι είναι για μεγάλα ύψη πτώσης, μικρές παροχές και μικρές διατομές
- στρόβιλοι τύπου Kaplan (αντίδρασης), οι οποίοι αναμένονται σε μικρά ύψη πτώσης, σε μεγάλες παροχές και σε χαμηλά φράγματα

Οι στρόβιλοι τύπου Pelton και Kaplan διατηρούν υψηλό βαθμό απόδοσης για μεγάλο εύρος παροχών, σε αντίθεση με τους Francis.

##### 2. Γεννήτριες:

Η γεννήτρια είναι η μηχανή που συνδέεται με τον υδροστρόβιλο και μετατρέπει την μηχανική ενέργεια του σε ηλεκτρική.

##### 3. Δικλείδες:

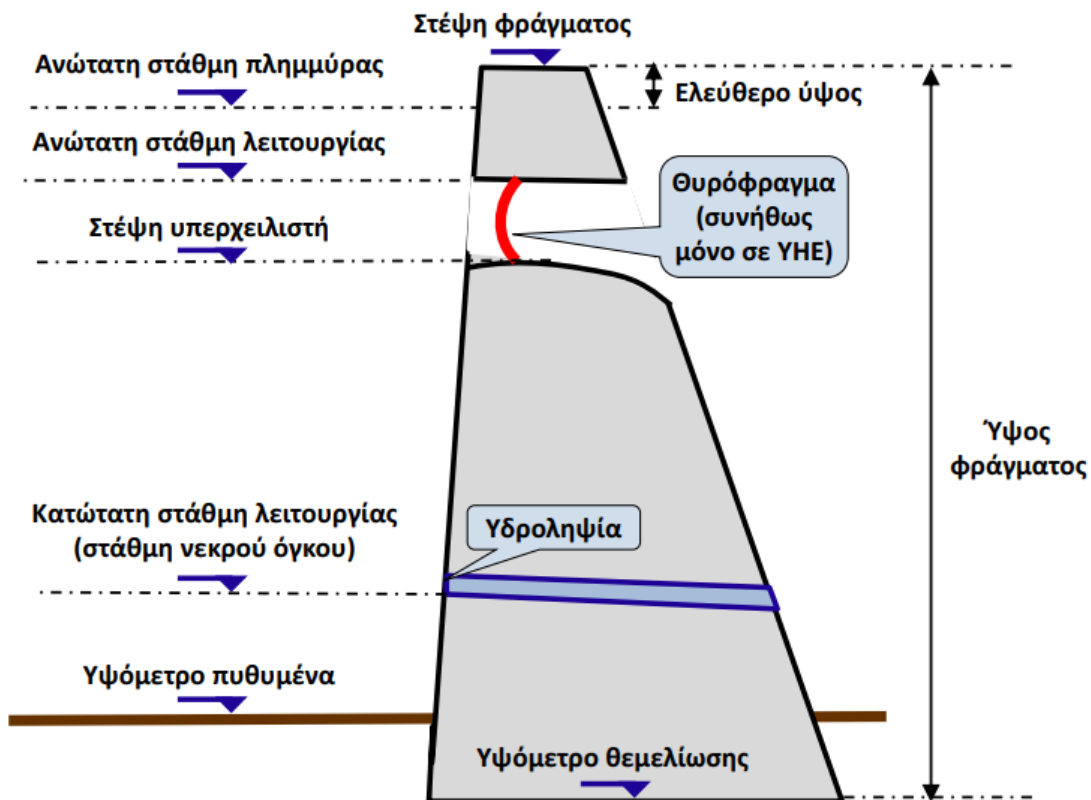
Η δικλείδα συνήθως τοποθετείται πριν από τον στρόβιλο ως πρόσθετη ασφάλεια από υδροστατικές πιέσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δικλείδων οι οποίοι εξυπηρετούν διαφορετικούς λειτουργικούς λόγους. Οι συνηθέστεροι τύποι δικλείδων είναι:

- οι σφαιρικές δικλείδες που χρησιμοποιούνται για μεγάλα ύψη πτώσης
- οι δικλείδες τύπου πεταλούδας που χρησιμοποιούνται για μικρότερα ύψη πτώσης

## 2.2 Χαρακτηριστικά μεγέθη ταμιευτήρων

Ως ταμιευτήρας ορίζεται η περιοχή κατάκλισης που δημιουργείται ανάντη του φράγματος, τα όρια της οποίας μεταβάλλονται ανάλογα με τον αποθηκευμένο όγκο νερού. Όπως αναφέρθηκε, εξυπηρετεί καταναλωτικές χρήσεις ύδατος (ύδρευση, άρδευση), αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας, αλλά και την ανάσχεση πλημμυρών.

Κάποια από τα πιο βασικά χαρακτηριστικά υψομετρικά μεγέθη ταμιευτήρων παρουσιάζονται στην **Εικόνα 2.1**:



**Εικόνα 2.1:** Χαρακτηριστικά υψομετρικά μεγέθη (Ευστρατιάδης, 2021)

Στον πόδα του φράγματος, το χαμηλότερο υψομετρικά σημείο του ταμιευτήρα ονομάζεται πυθμένας, ενώ το υψηλότερο στέψη. Αυτές οι δύο στάθμες οριοθετούν, στον κατακόρυφο άξονα, το κύριο σώμα της κατασκευής και κατά συνέπεια ορίζουν το ύψος του φράγματος.

Δύο βασικές στάθμες λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι:

- Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (Κ.Σ.Λ.) που αντιστοιχεί στην ελάχιστη στάθμη νερού του ταμιευτήρα, κάτω από την οποία δεν μπορεί να παραληφθεί νερό από τα έργα υδροληψίας
- Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (Α.Σ.Λ.) που θέτει το ανώτατο υψομετρικό όριο για την έναρξη της υπερχειλίσης, ελεύθερης ή ελεγχόμενης

Η μέγιστη στάθμη που εκτιμάται ότι μπορεί να ανέλθει το νερό στην διάρκεια του πλημμυρικού σχεδιασμού του υπερχειλιστή ονομάζεται Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (Α.Σ.Π.)

Μεταξύ των στάθμεων που περιγράφηκαν παραπάνω δημιουργούνται διάφοροι όγκοι που ορίζονται ως εξής:

- Νεκρός όγκος ονομάζεται η χωρητικότητα του ταμιευτήρα από τον πυθμένα μέχρι την ΚΣΛ. Είναι ο διατιθέμενος χώρος που προβλέπεται να καταληφθεί από φερτά μέχρι το πέρας της ζωής του έργου.
- Ωφέλιμη χωρητικότητα ονομάζεται το μέγιστο απόθεμα νερού που είναι απόλυτα εκμεταλλεύσιμο και ορίζεται μεταξύ των ΑΣΛ και ΚΣΛ.
- Πλημμυρικός όγκος ονομάζεται ο μέγιστος όγκος πλημμύρας που μπορεί να ανασχεθεί από τον ταμιευτήρα. Η μέτρησή του ξεκινάει από την ΑΣΛ.

Ως ωφέλιμο απόθεμα θεωρείται ο όγκος νερού που μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες χρήσεις. Υπολογίζεται αν από το συνολικό απόθεμα αφαιρεθεί ο νεκρός όγκος.

Δύο βασικές καμπύλες που μπορούν να παραχθούν από τις πληροφορίες του ταμιευτήρα είναι οι εξής:

- Καμπύλη στάθμης – επιφάνειας:

Κατασκευάζεται μια σχέση δύναμης που αντιστοιχίζει τις διάφορες στάθμες του ταμιευτήρα σε τιμές των επιφανειών, οι οποίες προκύπτουν από εμβαδομέτρησή του πάνω σε τοπογραφικό χάρτη.

- Καμπύλη στάθμης – αποθέματος:

Δημιουργείται άλλη μια σχέση δύναμης, η οποία αυτή την φορά θα αντιστοιχίζει στάθμες σε όγκους. Οι τιμές των όγκων μπορούν να υπολογιστούν μέσω των μετρημένων τιμών των επιφανειών ανά στάθμη.

Έστω,  $z_i$  η τιμή της στάθμης και  $A_i$  η αντίστοιχη τιμή της επιφάνειας, όπου  $i$  το υπολογιστικό βήμα. Για να παραχθεί η εξίσωση στάθμης – αποθέματος ορίζονται οι εξισώσεις:

Αυτές οι καμπύλες παρέχουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης του ταμιευτήρα, αλλά και στην διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων, μέσω των έργων υπερχειλίσης.

$$\Delta V = \frac{A_i + A_{i+1}}{2} (z_i + z_{i+1}) \quad (2.1)$$

$$V = V_{i-1} + \Delta V \quad (2.2)$$

Αυτές οι καμπύλες παρέχουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο προσομοίωσης του ταμιευτήρα, αλλά και στην διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων, μέσω των έργων υπερχειλίσης.



### 2.3 Πλημμυρικό επεισόδιο και η ανάγκη διόδευσης

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία για τις Πλημμύρες (2007/60/ΕΚ), ως πλημμύρα ορίζεται «η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο, υπό φυσιολογικές συνθήκες, δεν θα καλυπτόταν με νερό».

Στην ζωή όμως των υδραυλικών έργων ιδιαίτερη σημασία έχει η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων. Συγκεκριμένα στον τομέα των φραγμάτων, όταν στην λεκάνη κατάκλυσης εισρέει μια μεγάλη ποσότητα νερού σε μικρό χρονικό διάστημα απαιτείται σωστή διαχείριση και προστασία του έργου.

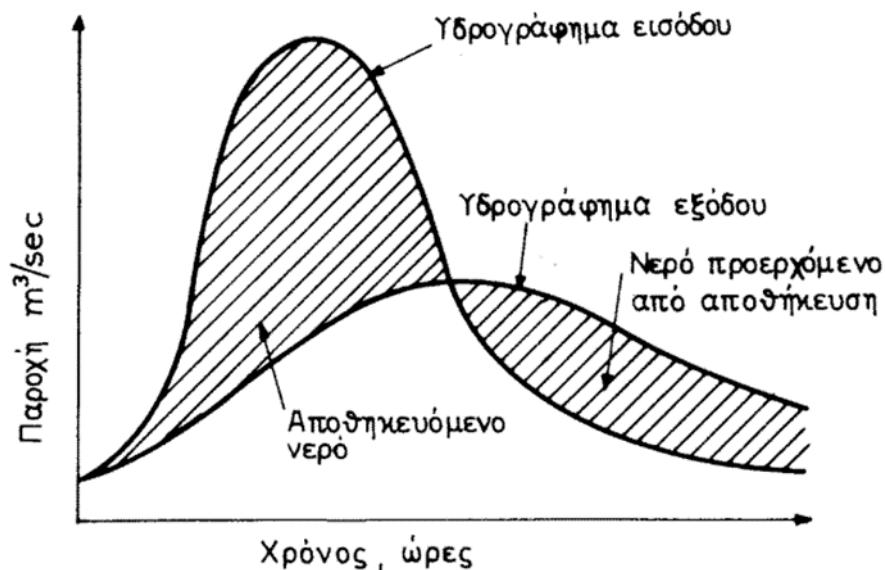
Με σκοπό τον περιορισμό των επιπτώσεων που μπορεί να επιφέρει μια τέτοια απότομη αύξηση του όγκου ορίζεται η έννοια της πλημμύρας σχεδιασμού. Αυτή χρησιμοποιείται στην μελέτη ενός φράγματος και αντιστοιχεί σε μία πλημμύρα κατάλληλης πιθανότητας και μεγέθους για να εξασφαλιστεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο υδρολογικής ασφάλειας.

Η ασφάλεια ενός υδροηλεκτρικού έργου από πλημμυρικά επεισόδια επιτυγχάνεται μέσω ενός συστήματος υδραυλικών έργων μεταφοράς και αποθήκευσης. Τα πιο σημαντικά έργα ασφαλείας είναι:

- η σήραγγα εκτροπής
- ο υπερχειλιστής

Σκοπός τους είναι η προστασία του φράγματος κατά την φάση κατασκευής του και κατά την λειτουργία του αντίστοιχα.

Όταν εξελίσσεται ένα πλημμυρικό επεισόδιο προκαλείται αύξηση του αποθηκευμένου στην κοίτη νερού, ενώ κατά την ύφεσή του το αποθηκευμένο νερό ελαττώνεται (Υδρογράφημα εισόδου **Εικόνα 2.2**).



**Εικόνα 2.2:** Διακύμανση αποθηκευμένου όγκου νερού και υδρογραφήματα εισόδου και εξόδου (Μπαλτάς, 2021)

Όμως η υπερπήδηση ενός φράγματος εξαιτίας μιας έντονης πλημμύρας είναι εντελώς ανεπιθύμητη καθώς ενέχει τον κίνδυνο ολικής καταστροφής του έργου (ειδικά αν πρόκειται για γεώφραγμα). Γι' αυτόν τον λόγο επιλέγεται η ελεγχόμενη διόδευση των πλημμυρικών επεισοδίων μέσω του υπερχειλιστή.

Η διαδικασία της διόδευσης επιτυγχάνει εξομάλυνση του υδρογραφήματος εισροής και μετατροπή του σε ένα υδρογράφημα εξόδου (Υδρογράφημα εξόδου **Εικόνα 2.2**) αρκετά πιο εξομαλυμένο.

Η χρονική απόσταση των δύο κορυφών των υδρογραφημάτων εισόδου και εξόδου (**Εικόνα 2.2**) ονομάζεται χρόνος υστέρησης και είναι καθοριστικής σημασίας για τα πλημμυρικά φαινόμενα. Ουσιαστικά προσφέρει ένα πολύτιμο χρονικό περιθώριο για ομαλή προσαγωγή της πλημμύρας προς τα κατάντη.

Σε επίπεδο σχεδιασμού η εξομαλυμένη παροχή αιχμής και το αντίστοιχο υδραυλικό φορτίο αποτελούν τα βασικά μεγέθη σχεδιασμού του όλου συστήματος υπερχείλισης (Ogge, έργα μεταφοράς και έργα καταστροφής ενέργειας).

Στην περίπτωση ύπαρξης εκχειλιστών και θυροφραγμάτων, παρέχεται και η δυνατότητα διαχείρισης των πλημμυρικών φαινομένων, με κριτήρια αφενός την συγκράτηση του νερού που θα υπερχείλιζε στον ταμιευτήρα και αφετέρου την διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου ασφαλείας. Ο ορθολογικός σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων συνιστά ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα, το οποίο αποτελεί και το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

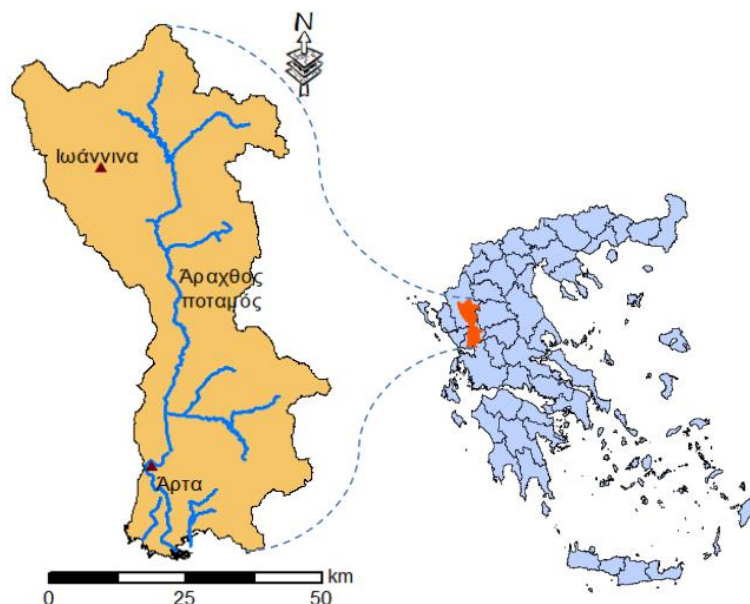
### 3 Περιοχή μελέτης

Το μεθοδολογικό πλαίσιο που αναπτύσσεται στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως πιλοτικό πεδίο εφαρμογής, την αξιολόγηση του πλημμυρικού κινδύνου στο υδροηλεκτρικό φράγμα Πουρναρίου. Επομένως για την ανάλυση και προσομοίωση των πλημμυρών και της διαχείρισής τους, κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή των επιμέρους στοιχείων του φράγματος, του ταμιευτήρα, του έργου υπερχείλισης και του υδροηλεκτρικού σταθμού.

#### 3.1 Ποταμός Άραχθος και λεκάνη απορροής

Το φράγμα Πουρναρίου είναι κατασκευασμένα πάνω στον ποταμό Άραχθο, έναν από τους κυριότερους ποταμούς της Ηπείρου.

Ο Άραχθος θεωρείται ο όγδοος μεγαλύτερος ποταμός της Ελλάδας, το μήκος του ανέρχεται στα 110 km και εκβάλλει στον Αμβρακικό κόλπο. Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος Πουρναρίου I είναι 1793,8 km<sup>2</sup> (**Εικόνα 3.1**).



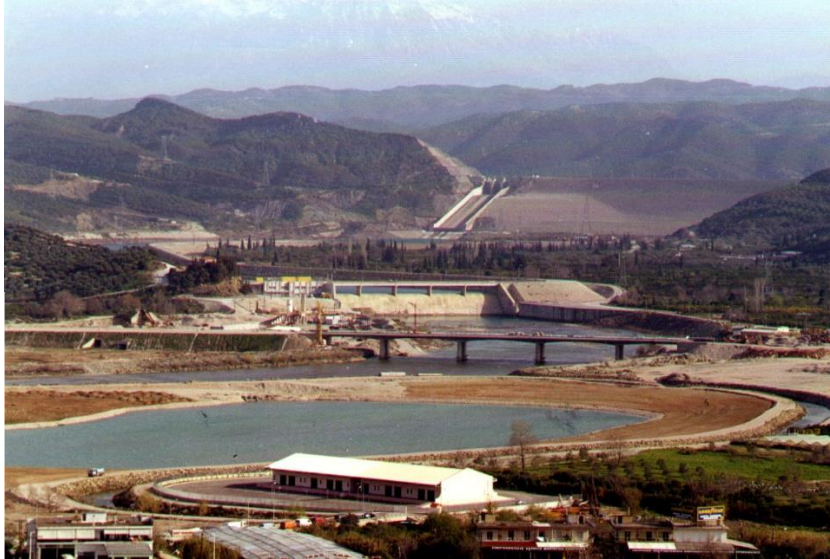
**Εικόνα 3.1:** Η λεκάνη απορροής του Αράχθου ποταμού

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης απορροής είναι 854 m, με το μέγιστο και ελάχιστο να ανέρχονται στα 2428 m και 38 m, αντίστοιχα. Επίσης η μέση κλίση της λεκάνης είναι 25%.

Γεωμορφολογικά ο βασικός τύπος πετρώματος που παρατηρείται στην περιοχή είναι ο φλύσχος μικρής υδατοπερατότητας. Ως προς τις χρήσεις γης, η λεκάνη απορροής καλύπτεται από φυσική βλάστηση, γεωργικά αξιοποιήσιμη, αλλά και θαμνώδεις εκτάσεις. Σε ορισμένα τμήματα παρατηρούνται φυσικοί βοσκότοποι και δάση κωνοφόρων δέντρων.

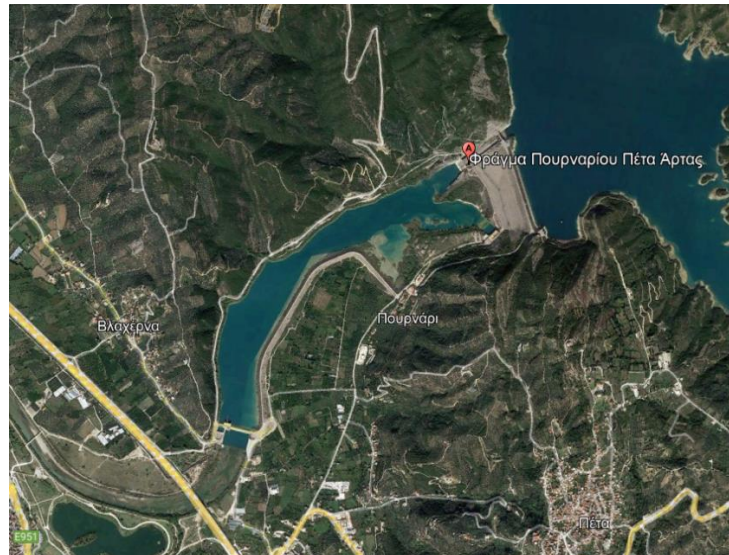
### 3.2 Φράγμα Πουρναρίου I

Το υδροηλεκτρικό φράγμα Πουρναρίου, καθώς και το μικρό αναρρυθμιστικό του έργο κατάντη (στην συνέχεια θα αναφέρονται ως Πουρνάρι I και II, αντίστοιχα) υπάγονται διοικητικά στους Δήμους Αρταίων και Νικόλαου Σκουφά της Περιφερειακής Ενότητας της Άρτας (**Εικόνα 3.2**).



**Εικόνα 3.2:** Φράγματα Πουρναρίου I και II (αρχεία ΔΕΗ)

Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.3**, το φράγμα Πουρναρίου I προηγείται και ανάντη του δημιουργείται μια μεγάλη λεκάνη κατάκλυσης. Αντίθετα το Πουρνάρι II κατασκευάστηκε μεταγενέστερα και λειτουργεί ως αναρρυθμιστικός ταμιευτήρας.



**Εικόνα 3.3:** Φράγματα Πουρναρίου I και II (Google Earth, 2023)

Οι έρευνες της ΔΕΗ για αξιοποίηση υδατικών πόρων στην ευρύτερη περιοχή του Αράχθου ξεκίνησαν γύρω στο 1970. Κατά την κατασκευή του φράγματος Πουρναρίου I (**Εικόνα 3.4**),

την περίοδο 1976-1980, δημιουργήθηκε σήραγγα εκτροπής του ποταμού, πεταλοειδούς διατομής. Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της σήραγγας είναι τα εξής:

- Διατομή σήραγγας: πεταλοειδής
- Εσωτερική διάμετρο: 10,5 m
- Συνολικό μήκος: 700 m
- Παροχή μελέτης: 1720 m<sup>3</sup>/s
- Υψόμετρο πυθμένα στην είσοδο: +39,5 m
- Υψόμετρο πυθμένα στην έξοδο: +38 m
- Τρόπος οριστικής έμφραξης: με πώμα σκυροδέματος

Η έμφραξη της σήραγγας πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1981, οπότε σηματοδοτήθηκε και η έναρξη λειτουργίας του έργου. Η κατασκευή του φράγματος αποσκοπούσε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του κάμπου, αλλά και στην προστασία της Άρτας, η οποία βρίσκεται ελάχιστα κατάντη του φράγματος, από πλημμυρικά φαινόμενα.



**Εικόνα 3.4:** Φράγμα Πουρναρίου I (Roilos, 2018)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του έργου είναι τα εξής:

- Ύψος φράγματος: 87 m
- Μήκος στέψης: 580 m
- Πλάτος στέψης: 10 m
- Όγκος φράγματος: 9 hm<sup>3</sup>
- Χωρητικότητα ταμιευτήρα: 730 hm<sup>3</sup>
- Επιφάνεια ταμιευτήρα: 20,6 hm<sup>3</sup>

Ο εκκενωτής πυθμένα περιγράφεται ως εξής:

- Συνολικό μήκος: 503 m
- Εσωτερική διάμετρος: 7,1 m
- Παροχευτικότητα: 300 m<sup>3</sup>/s



### 3.3 Ταμιευτήρας

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη της τεχνητής λίμνης (**Εικόνα 3.5**) είναι τα εξής (*ΕΕΜΦ 2013*):

- Μέγιστη αποθηκευτικότητα ταμιευτήρα: 865 hm<sup>3</sup>
- Ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα: 355 hm<sup>3</sup>
- Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ): +100 m
- Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ): +118 m
- Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ): +126 m



**Εικόνα 3.5:** Ταμιευτήρας φράγματος Πουρναρίου Ι

### 3.4 Ταμιευτήρας

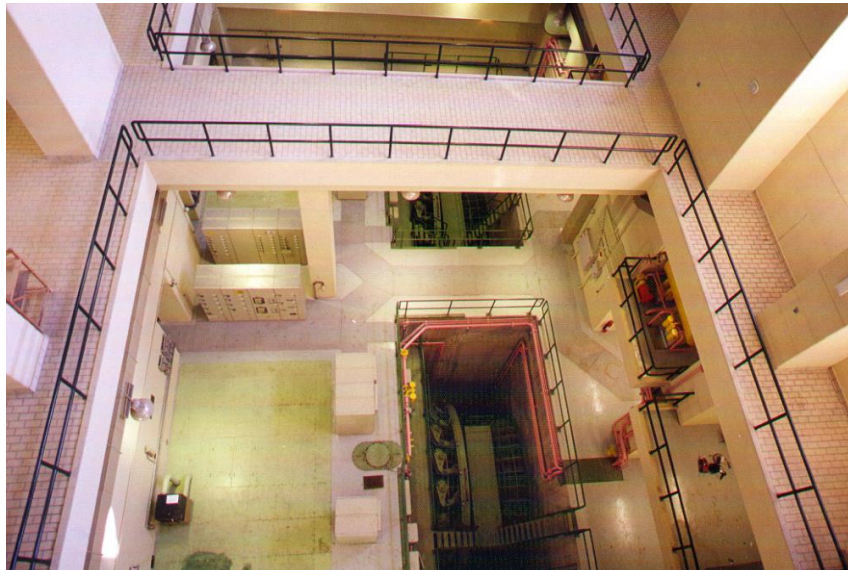
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται μέσα από ένα συγκρότημα έργων. Επιγραμματικά τα έργα αυτά είναι η σήραγγα προσαγωγής, ο σταθμός παραγωγής που φιλοξενεί τους στροβίλους και ο υποσταθμός ζεύξης:

1. Σήραγγα προσαγωγής
  - Διατομή: κυκλική σπλισμένου σκυροδέματος
  - Επένδυση: χαλύβδινη, με τοποθέτηση σκυροδέματος ανάντη του διαφράγματος στεγανοποίησης
  - Εσωτερική διάμετρος: 7 m και μειώνεται στα 6 m όταν μπαίνει στον σταθμό παραγωγής
2. Σταθμός παραγωγής

Ο σταθμός παραγωγής (**Εικόνα 3.6**) είναι τοποθετημένος σε απόσταση περίπου 250 m κατάντη του φράγματος.



**Εικόνα 3.6:** Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας (Ντεμίρογλου, 2020)



**Εικόνα 3.7:** Ο σταθμός παραγωγής ενέργειας εσωτερικά (αρχείο ΔΕΗ)

Αποτελείται από τρεις στροβίλους τύπου Francis με τα εξής χαρακτηριστικά:

- Παροχευετικότητα έκαστου στροβίλου:  $167 \text{ m}^3/\text{s}$  (συνολικά  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ )
- Αριθμοί στροφών: 150 rpm
- Συνολική ισχύς: 300 MW
- Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια: 235 GWh

Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως με βάση τον σχεδιασμό του έργου, η τιμή της εκτιμώμενης ετήσιας παραγωγής ενέργειας ήταν πολύ μεγαλύτερη, ήτοι 504 GWh. Ωστόσο, αυτή έχει επιτευχθεί μόνο μία φορά κατά την διάρκεια λειτουργίας του έργου. Αντίθετα, όπως αναφέρθηκε, η πραγματική παραγωγή ενέργειας, με βάση το ιστορικό του έργου, είναι σχεδόν η μισή.



**Εικόνα 3.8:** Όψη στροβίλου (Ντεμίρογλου, 2020)



**Εικόνα 3.9:** Άνω τμήμα στροβίλου (Ντεμίρογλου, 2020)

### 3. Υποσταθμός ζεύξεως

Σε κάθε γεννήτρια μεγάλης ισχύος αντιστοιχεί και ένας μετασχηματιστής τάσης. Έτσι στον υποσταθμό εισέρχονται τρεις γραμμές των 150 kV και εξέρχονται άλλες τρεις για την εξυπηρέτηση των δικτύων διανομής της περιοχής (ΚΥΤ Αράχθου).



### 3.5 Έργα υπερχειλίσης

Το φράγμα Πουρναρίου Ι διαθέτει στο δεξί αντέρεισμά του εκχειλιστή (Εικόνα 3.10) για προστασία του έργου από πλημμυρικά φαινόμενα. Τα βασικά χαρακτηριστικά του είναι τα εξής (ΕΕΜΦ 2013):

- Παροχή σχεδιασμού: 6100 m<sup>3</sup>/s (η μεγαλύτερη όλων των φραγμάτων της χώρας)
- Μήκος υπερχειλιστή: 37,5 m
- Έργο εισόδου: τρία τοξωτά θυροφράγματα
  - ✓ Διαστάσεις: 12,5 × 12,5 m
  - ✓ Υψόμετρο στέψης: +107,5 m
- Διώρυγα προσαγωγής:
  - ✓ Μήκος: 260 m
  - ✓ Πλάτος: 43,5 m
- Έργο καταστροφής ενέργειας: εκτοξευόμενη φλέβα (flip bucket)



Εικόνα 3.10: Έργο υπερχειλίσης Πουρναρίου Ι

Ένα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη των έργων υπερχειλίσης είναι η καμπύλη στάθμης-παροχής του εκχειλιστή. Σε αυτή βασίζεται και ο χειρισμός των θυροφραγμάτων σε περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου.

Σε πρόσφατη εργασία της Ντεμίρογλου (2020) αναπτύχθηκε η ακόλουθη αναλυτική σχέση, η οποία θα χρησιμοποιηθεί και στις επόμενες αναλύσεις:

$$Q = 60,491h^{1,616} \quad (3.1)$$

όπου Q η παροχή σε m<sup>3</sup>/s και h το βάθος ροής μετρούμενο από την στέψη του Ogge, η οποία βρίσκεται σε υψόμετρο +107,5 m.

Η εξίσωση (3.1) δημιουργήθηκε με προσαρμογή σχέσης παλινδρόμησης σε ζεύγη ( $h, Q$ ), τα οποία προέκυψαν λαμβάνοντας υπόψιν την θεωρητική σχέση στάθμης - παροχής, η οποία είναι συνάρτηση του υδραυλικού φορτίου. Στην σχέση αυτή το υδραυλικό φορτίο αντικαθίσταται από το βάθος ροής, προκειμένου να διευκολύνει τους υπολογισμούς, ενώ ο θεωρητικός εκθέτης που είναι ίσος με  $3/2$  προσαυξάνεται κατάλληλα ώστε να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση του όρου της κινητικής ενέργειας.

Τα θυροφράγματα λειτουργούν εμπειρικά σε τρέχοντα χρόνο από τους χειριστές του φράγματος (Εικόνα 3.11). Η γενική στρατηγική λειτουργίας τους που εφαρμόζει η ΔΕΗ τα τελευταία χρόνια βασίζεται στους εξής κανόνες:

- Όταν ο ταμιευτήρας λειτουργεί κανονικά τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά.
- Όταν η στάθμη ξεπερνάει τα +118 m και η εισροή είναι μεγαλύτερη από την παροχετευτικότητα των στροβίλων ( $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ), τότε τα θυροφράγματα ανοίγουν σταδιακά.



Εικόνα 3.11: Λυχνίες ελέγχου (αρχεία ΔΕΗ)

Ακόμη είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η στάθμη ασφαλείας για την λειτουργία των θυροφραγμάτων στο φράγμα Πουρναρίου I επιλέχθηκε να είναι στα +118 m, έναντι των +120 m που έχει αρχικά ορισθεί και αντιστοιχεί στο υψόμετρο στέψης των θυροφραγμάτων.

### 3.6 Φράγμα και ταμιευτήρας Πουρναρίου II

Το φράγμα Πουρναρίου II (Εικόνα 3.12) κατασκευάστηκε το 1998 με σκοπό την διασφάλιση μόνιμης ροής νερού στην κοίτη του ποταμού. Η ανάγκη αυτή δημιουργήθηκε λόγω της υποβάθμισης του υπόγειου υδροφορέα κατάντη του αρχικού έργου. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η διαμόρφωσή του ως αναρρυθμιστική διάταξη της διαλείπουσας ροής από τους στροβίλους (λειτουργία μόνο τις ώρες αιχμής), εξασφαλίζοντας μια συνεχή ροή στα κατάντη. Αυτό επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων του ταμιευτήρα, προς

όφελος της παροχής αρδευτικού νερού κατά την θερινή περίοδο, καθώς και της ομαλής τροφοδοσίας των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων.



**Εικόνα 3.12:** Φράγμα Πουρναρίου II (Roilos, 2018)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του έργου είναι τα εξής:

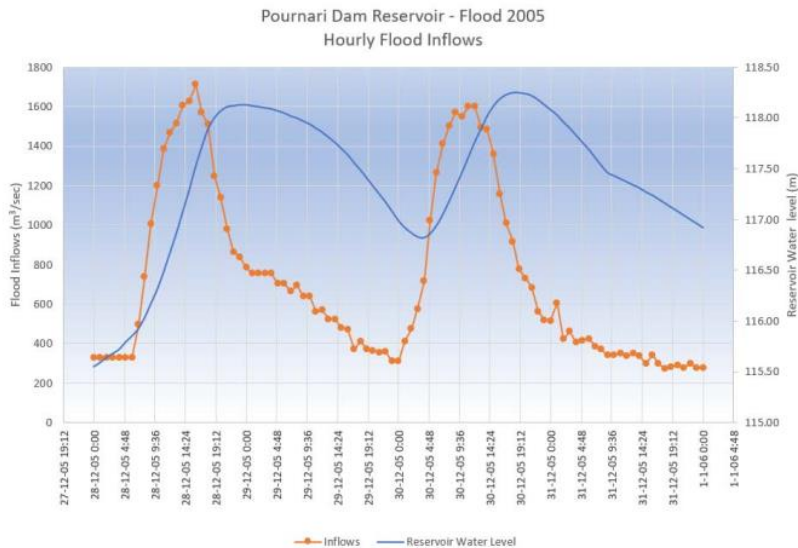
- Ύψος φράγματος: 15 m
- Μήκος στέψης: 2000 m
- Όγκος φράγματος: 0,7 hm<sup>3</sup>
- Χωρητικότητα ταμιευτήρα: 4,5 hm<sup>3</sup>
- Επιφάνεια ταμιευτήρα: 0,65 hm<sup>3</sup>
- Στάθμη στέψης φράγματος: +128 m

### 3.7 Ιστορικές πλημμύρες

Στην περιοχή μελέτης έχουν καταγραφεί δύο μεγάλες πλημμυρικές εισροές τα τελευταία είκοσι χρόνια.

#### ➤ Πλημμύρα 2005:

Η πρώτη σημαντική πλημμύρα που έπληξε τον Άραχθο έλαβε χώρα στην περιοχή κοντά στο φράγμα τον Δεκέμβριο του 2005. Το πλημμυρικό επεισόδιο εμφανίστηκε με δύο συνεχόμενες αιχμές. Τέτοια υδρογραφήματα εισροής ονομάζονται δίκورφα. Το πρώτο πλημμυρικό κύμα παρουσίασε παροχή αιχμής στα 1700 m<sup>3</sup>/s, ενώ το δεύτερο ήρθε περίπου δύο μέρες αργότερα με μια εξίσου σημαντική αιχμή της τάξης των 1600 m<sup>3</sup>/s (**Εικόνα 3.13**).



**Εικόνα 3.13:** Πλημμύρα Αράχθου 2005, εισροές και στάθμη ταμιευτήρα (Roilos, 2018)

Η στάθμη του ταμιευτήρα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.13**, ξεπέρασε τα +118 m, η οποία αντιστοιχεί, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο όριο που έχει πλέον θέσει η ΔΕΗ για το άνοιγμα των θυροφραγμάτων και κατά συνέπεια τέθηκαν σε λειτουργία τα έργα υπερχειλίσης. Σημαντικό είναι λοιπόν να αναλυθεί ο τρόπος που λειτούργησαν τα θυροφράγματα από τους χειριστές κατά την εξέλιξη του φαινομένου.

Πιο αναλυτικά, ενώ οι κανονισμοί προέβλεπαν τα θυροφράγματα να παραμείνουν κλειστά μέχρι η στάθμη να φτάσει στα +120 m, οι χειριστές επέλεξαν να τα ανοίγουν μερικώς όταν η στάθμη πλησίαζε τα +118 m. Ο χειρισμός αυτός που ακολουθήθηκε αποσκοπούσε στην ηπιότερη, αλλά και ασφαλέστερη διόδευση του επεισοδίου σε πραγματικό χρόνο. Έτσι εξηγείται πως η στάθμη παρέμεινε σε χαμηλά επίπεδα παρά την ένταση του φαινομένου.

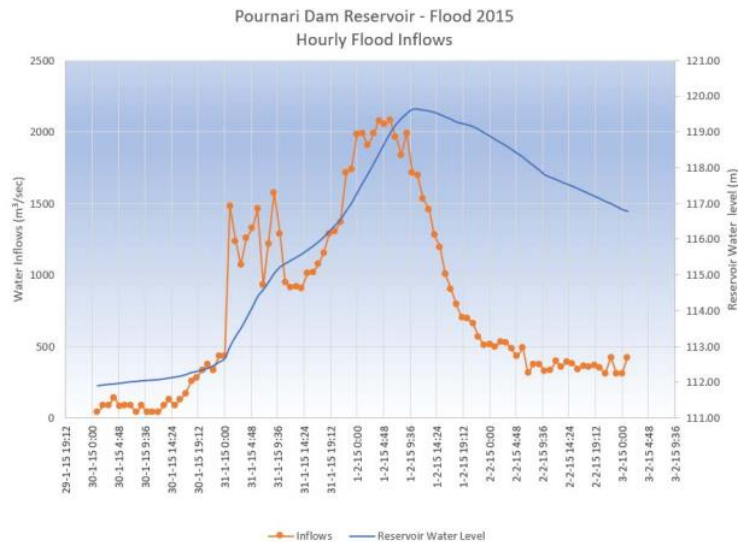
➤ Πλημμύρα 2015:

Το πλημμυρικό επεισόδιο του 2015 (**Εικόνα 3.14**) ξεκίνησε στις 31 Ιανουαρίου και διήρκησε δύο ημέρες. Η αιχμή του άγγιξε την παροχή των 2200 m<sup>3</sup>/s (**Εικόνα 3.15**). Συγκριτικά με την πλημμύρα του 2005 είναι μεγαλύτερη περίπου κατά 500 m<sup>3</sup>/s.



**Εικόνα 3.14:** Διόδευση από τον εκχειλιστή φράγματος Πουρναρίου Ι, Πλημμύρα 2015 (Roilos, 2018)





**Εικόνα 3.15:** Πλημμύρα Αράχθου 2015, εισροές και στάθμη ταμιευτήρα (Roilos, 2018)

Αυτή την φορά οι διαχειριστές προσέγγισαν διαφορετικά την λειτουργία των θυροφραγμάτων. Επέλεξαν να τα ανοίξουν για πρώτη φορά όταν η στάθμη έφτασε στα +120 m, δηλαδή ακολούθησαν όσα προέβλεπε ο κανονισμός σε αντίθεση με την συντηρητική πολιτική της πλημμύρας του 2005. Με αυτή την διαχείριση από τον υπερχειλιστή διήλθε παροχή της τάξης των 1200 m<sup>3</sup>/s. Αναλογιζόμενοι πως οι στρόβιλοι έχουν μέγιστη παροχετευτικότητα 500 m<sup>3</sup>/s συμπεραίνουμε πως στον ποταμό έφτασαν έως 1700 m<sup>3</sup>/s.

Η διαχείριση της πλημμύρας του 2005 κρίνεται βέλτιστη για την προστασία του έργου, όμως χάθηκε μεγάλος όγκος νερού και κατά συνέπεια ηλεκτρική ενέργεια. Οι χειρισμοί του 2015 έφεραν πολλές αντιδράσεις τόσο από τους κατοίκους της περιοχής, όσο και από το νομικό τμήμα της ΔΕΗ. Θεωρήθηκε πιο επικίνδυνος χειρισμός για τις κατάντη περιοχές παρόλο που οι απώλειες ενέργειας ήταν σχετικά μικρότερες. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως μία από τις καταστροφές που προκλήθηκαν, λόγω της έντασης του επεισοδίου, ήταν η κατάρρευση της ιστορικής γέφυρας της Πλάκας στο μέσο ρου του Αράχθου.

Όσον αφορά στην ιστορική γέφυρα της Άρτας, παρόλο που δέχτηκε μεγάλους όγκους νερού δεν υπέστη ζημιές (**Εικόνα 3.16**).



**Εικόνα 3.16:** Η γέφυρα της Άρτας κατά τη διέλευση της πλημμύρας της 1/2/2015 (Roilos, 2018)

Συμπερασματικά είναι απαραίτητη μια ορθότερη διαχειριστική πολιτική που θα εξασφαλίζει τόσο την ασφαλή διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων, όσο και την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

### **3.8 Υδρολογικά δεδομένα περιοχής μελέτης**

Στην περιοχή μελέτης είναι εγκατεστημένος ένας αρκετά μεγάλος αριθμός βροχομετρικών σταθμών της ΔΕΗ και του ΥΠΕΝ (τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί και τηλεμετρικοί σταθμοί του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών), που διαθέτουν ημερήσια δείγματα βροχόπτωσης και σε κάποιες περιπτώσεις, χιονόπτωσης. Στο πλαίσιο της 2ης Αναθεώρησης του Σχέδιου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου (Κ/Ξ Μελετών Διαχείρισης Υδάτων Ηπείρου, 2023), επικαιροποιήθηκαν και συμπληρώθηκαν τα δεδομένα όλων των σταθμών του ΥΔ Ηπείρου. Με βάση αυτά, παρήχθησαν χρονοσειρές ημερήσιας κατακρήμνισης, για την περίοδο 1980-2021, τόσο σε σημειακό επίπεδο όσο και σε επιφανειακό, καθώς το ΥΔ Ηπείρου διαχωρίστηκε σε ένα μεγάλο πλήθος λεκανών απορροής. Επιπρόσθετα, παρήχθησαν χρονοσειρές ημερήσιας δυνητικής εξατμοδιαπνοής, με αξιοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων της ευρύτερης περιοχής.

Από την παραπάνω μελέτη ελήφθησαν οι χρονοσειρές που αναφέρονται στη λεκάνη απορροής ανάντη του φράγματος Πουρναρίου, καθώς και οι ημερήσιες χρονοσειρές εισροών στο φράγμα, για την περίοδο 1980-2000, που δόθηκαν από τη ΔΕΗ. Τα υδρολογικά αυτά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις των επόμενων κεφαλαίων, και ειδικότερα στην κατάρτιση και βαθμονόμηση του εννοιολογικού μοντέλου αναπαράστασης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης (**Κεφάλαιο 5**), καθώς και ως βάση για την παραγωγή συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης, μήκους 1000 ετών, που αποτελεί το αρχικό στοιχείο εισόδου του όλου πλαισίου στοχαστικής προσομοίωσης (**Κεφάλαιο 9**).

## 4 Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο – σύζευξη μοντέλων

---

### 4.1 Τοποθέτηση προβλήματος

Ένα φράγμα κατασκευάζεται για να επιτελέσει κάποιους σκοπούς. Με αυτό σαν στόχο υπολογίζονται τα επιμέρους μεγέθη σχεδιασμού των τμημάτων που συνθέτουν το έργο. Οι περιορισμοί που τίθενται από τα μεγέθη σχεδιασμού οδηγούν στην ανάγκη διερεύνησης πιθανών λύσεων, για την μορφή και τα χαρακτηριστικά που θα έχει το υπό μελέτη φράγμα, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη.

Ένα από τα πιο πολύπλοκα στοιχεία ενός φράγματος είναι ο υπερχειλιστής, που αποτελεί και το βασικό έργο ασφαλείας του (στην πραγματικότητα πρόκειται για σύστημα έργων). Η τελική διαστασιολόγηση των έργων υπερχείλισης οφείλει να τηρεί κάποιες βασικές προϋποθέσεις υπέρ της ασφαλείας, λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που εισάγουν οι σχετικές υδρολογικές και υδραυλικές διεργασίες. Από πλευράς Υδραυλικού Μηχανικού απρόβλεπτα είναι τόσο τα ακραία φαινόμενα εισόδου, δηλαδή η βροχόπτωση και η παραγόμενη πλημμυρική απορροή, όσο και τα φαινόμενα εξόδου, όπως είναι η διόδευση του πλημμυρικού κύματος διαμέσου του υπερχειλιστή και των κατάντη έργων μεταφοράς (καταστροφής ενέργειας).

Είναι προφανές πως δεν υπάρχει εξ αρχής, δηλαδή από την φάση σχεδιασμού, η δυνατότητα πρόγνωσης των μεγάλων πλημμυρικών εισροών του ταμιευτήρα για τον χρόνο ζωής του. Με αυτό ως γνώμονα, η γενική πρακτική του υδρολογικού σχεδιασμού των υπερχειλιστών βασίζεται στις εξής θεμελιώδεις παραδοχές:

- κατασκευάζεται ένα υποθετικό πλημμυρογράφημα εισόδου εξαιρετικά χαμηλής πιθανότητας υπέρβασης, που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς τυπικής τάξης 5 000 έως 10 000 ετών·
- το πλημμυρογράφημα παράγεται από βροχόπτωση που ακολουθεί ένα τυπικό δυσμενές χρονικό προφίλ και θεωρείται ότι έχει την ίδια περίοδο επαναφοράς με την παραγόμενη πλημμύρα·
- κατά την έναρξη της βροχόπτωσης σχεδιασμού, θεωρούνται συγκεκριμένες συνθήκες υγρασίας στην λεκάνη (συνήθως μέσες)·
- κατά την έναρξη της πλημμύρας ο ταμιευτήρας θεωρείται ότι βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη λειτουργίας του, άρα στο όριο της υπερχείλισης.

Οι συνθήκες υγρασίας στην λεκάνη διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς η κατάσταση του εδάφους επηρεάζει δραστικά την παραγωγή της πλημμύρας. Ωστόσο, η υπόθεση των «μέσων» συνθηκών δεν αντιπροσωπεύει κατ' ανάγκη μια αντίστοιχη πιθανότητα της τάξης του 50%. Σε πρόσφατη εργασία του *Ποντικού (2014)*, έγινε πιθανοτική ανάλυση των καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελληνική επικράτεια, με εφαρμογή της μεθόδου SCS-CN. Από τη διερεύνηση προέκυψε ότι η συχνότητα εμφάνισης μέσων συνθηκών υγρασίας είναι ιδιαίτερα χαμηλή σε μεγάλο τμήμα της χώρας, με εξαίρεση τη Δυτική Ελλάδα.

Συνεπώς, σε μια ξηρή περιοχή, η αντιστοίχιση της περιόδου επαναφοράς της βροχόπτωσης με αυτή της πλημμύρας δεν είναι κατ' ανάγκη ρεαλιστική.

Ο τελευταίος παράγοντας που αφορά στη στάθμη των υδάτων του ταμιευτήρα κατά την έναρξη του πλημμυρικού επεισοδίου είναι επίσης μείζονος σημασίας, καθώς η συνήθης υπόθεση που γίνεται κατά τον σχεδιασμό είναι ιδιαίτερα δυσμενής. Πράγματι, υπάρχει ισχυρή πιθανότητα ο ταμιευτήρας να βρίσκεται σε χαμηλή στάθμη, είτε λόγω εκροής νερού για διάθεσή του σε διάφορες χρήσεις (ύδρευση, άρδευση), είτε λόγω εποχικότητας. Τότε ενδέχεται να αποθηκεύσει όλο τον όγκο της εισροής και να αποφευχθεί η εκροή. Σε άλλη περίπτωση, αν ο ταμιευτήρας βρεθεί γεμάτος εξαιτίας συνεχόμενων εισροών που δεν έχουν ακόμα κατανεμηθεί, θα παραχθεί εκροή υπό μορφή υπερχειλίσης.

Όλα τα παραπάνω συνηγορούν σε έναν εξαιρετικά συντηρητικό σχεδιασμό. Μάλιστα σε κάποιες περιπτώσεις, ο εν λόγω σχεδιασμός γίνεται ακόμα πιο συντηρητικός, καθώς εφαρμόζεται η λεγόμενη μέγιστη πιθανή κατακρήμνιση, η οποία εκτιμάται ότι αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς της τάξης των 60 000 ετών (Koutsoyiannis, 2007).

Στην πραγματικότητα μια πιθανοτικά συνεπής, και ταυτόχρονα πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση του προβλήματος σχεδιασμού υπερχειλιστών, θα όφειλε να χειριστεί όλες τις παραπάνω συνιστώσες (βροχόπτωση και χρονικό προφίλ της, μετασχηματισμός βροχόπτωσης σε πλημμυρική απορροή, υγρασία εδάφους καθώς και στάθμη ταμιευτήρα στην αρχή της πλημμύρας) υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας και να τις χειριστεί ως τυχαίες μεταβλητές. Μια τέτοια προσέγγιση επιχειρεί να υλοποιήσει η παρούσα έρευνα, με περιοχή πιλοτικής εφαρμογής τη λεκάνη του Αράχθου και το υδροηλεκτρικό φράγμα Πουρναρίου (**Κεφάλαιο 3**).

## **4.2 Η περίπτωση των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων**

Όπως έχει αναφερθεί στο **Κεφάλαιο 2** η διόδευση της πλημμύρας είναι ελεγχόμενη όταν ο υπερχειλιστής διαθέτει θυροφράγματα (αναφέρεται πλέον ως εκχειλιστής), που αποτελεί και την τυπική περίπτωση των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων. Η διαχείριση των θυροφραγμάτων, κατά την διέλευση μιας πλημμύρας, σχετίζεται με την πολλαπλή σκοπιμότητα των υδροηλεκτρικών συστημάτων. Εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς πως η κάλυψη μιας ανάγκης πιθανόν να λειτουργήσει εις βάρος μιας άλλης. Για παράδειγμα, σε περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου με την στάθμη του ταμιευτήρα στην περιοχή της υπερχειλίσης μπορούν να ακολουθηθούν δύο πιθανές γραμμές διαχείρισης. Η μία, θα διασφαλίσει την μέγιστη αντιπλημμυρική προστασία ανοίγοντας άμεσα τα θυροφράγματα ώστε να διοχετεύσει το σύνολο του εισερχόμενου πλημμυρικού όγκου από τον υπερχειλιστή, αλλά θα δημιουργήσει απώλειες ενέργειας από έναν όγκο νερού που θα μπορούσε να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί μεταγενέστερα.

Από την άλλη πλευρά, η δεύτερη πολιτική διαχείρισης θα επιχειρήσει να διατηρήσει κλειστά τα θυροφράγματα για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο διάστημα, για να αποθηκεύσει την πλημμυρική εισροή και να μεγιστοποιήσει την δυνητική παραγωγή ενέργειας, αλλά θα θέσει σε μεγαλύτερο κίνδυνο το ίδιο το έργο. Συνεπώς για την ορθή διαχείριση της διόδευσης



του πλημμυρικού κύματος, κρίνεται πως είναι απαραίτητος ένας κανόνας λειτουργίας για την χρήση των θυροφραγμάτων (**Κεφάλαιο 8**).

Σε κάθε περίπτωση, η διαχείριση των θυροφραγμάτων των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων εισάγει όχι μόνο πολυπλοκότητα στους υπολογισμούς, αλλά αποτελεί και άλλη μία σημαντική πηγή αβεβαιότητας στο πλαίσιο του πιθανοτικού σχεδιασμού των σχετικών έργων υπερχειλίσης.

#### **4.3 Σύνοψη προτεινόμενου πιθανοτικού πλαισίου σχεδιασμού υπερχειλιστών**

Η υιοθέτηση των συντηρητικών παραδοχών σχεδιασμού των υπερχειλιστών, που αναφέρθηκαν παραπάνω, προκύπτει από την ανάγκη εξασφάλισης ενός εξαιρετικά υψηλού επιπέδου ασφάλειας για όλη την διάρκεια ζωής του φράγματος, μέσα στο πλαίσιο μιας τόσο μεγάλης και πολυδιάστατης αβεβαιότητας. Ωστόσο, αυτό αναμένεται να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση των έργων. Στην πραγματικότητα, θεωρώντας πως όλες οι δυσμενείς συνθήκες συναληθεύουν (π.χ., η ακραία βροχόπτωση έχει και την δυσμενέστερη χρονική κατανομή και ταυτόχρονα βρίσκει τον ταμιευτήρα γεμάτο), τα έργα τελικά σχεδιάζονται για σημαντικά χαμηλότερη πιθανότητα υπέρβασης, άρα και περίοδο επαναφοράς πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη. Έτσι, αυξάνεται κατά πολύ το κόστος κατασκευής των έργων υπερχειλίσης, που συχνά είναι συγκρίσιμο με το κόστος του ίδιου του σώματος του φράγματος.

Με σκοπό την αντιμετώπιση όλων των απρόβλεπτων συνθηκών που αναλύθηκαν παραπάνω και ταυτόχρονα την εκτίμηση της πραγματικής πιθανότητας υπερχειλίσης, δημιουργήθηκε ένα ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που βασίζεται στην σύζευξη διαφορετικών μοντέλων, που αναπαριστούν διαφορετικές πτυχές του φαινομένου και σε διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Επιγραμματικά, αυτό περιλαμβάνει: (α) την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης απορροής ανάντη του φράγματος στην ημερήσια κλίμακα, για τον μετασχηματισμό της βροχόπτωσης σε απορροή, (β) την προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα για την αποτύπωση της διακύμανσης της στάθμης του, επίσης στην ημερήσια κλίμακα, (γ) τον επιμερισμό των ημερήσιων παροχών στην ωριαία κλίμακα, και (δ) τη διαδικασία διαχείρισης των θυροφραγμάτων εν ώρα πλημμύρας, για την εκτίμηση των μεταβλητών του υδατικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα στα οποία εστιάζει μια τέτοια ανάλυση (στάθμη, παροχή εκροής από τους στροβίλους, παροχή που διοδεύεται μέσω του υπερχειλιστή).

Απώτερος σκοπός των παραπάνω, είναι η ορθή εκτίμηση των πιθανοτικών μεγεθών που εισέρχονται σε μια μελέτη σχεδιασμού ή μια μελέτη εκτίμησης του πλημμυρικού κινδύνου υδροηλεκτρικών φραγμάτων. Δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε ακραίες πιθανότητες, το παραπάνω πλαίσιο διαμορφώνεται εξ ορισμού σε μια βάση προσομοίωσης Monte Carlo, οπότε η βασική διεργασία εισόδου, που είναι η ημερήσια βροχόπτωση, παράγεται συνθετικά, μέσω κατάλληλου στοχαστικού μοντέλου. Η σύζευξη μοντέλων σε διαφορετικές κλίμακες και αντίστοιχα επίπεδα λεπτομέρειας, αποσκοπεί στο να συγκεράσει την ανάγκη

επίτευξης ικανοποιητικής ακρίβειας με εύλογο υπολογιστικό φόρτο, υπό τον περιορισμό των διαθέσιμων δεδομένων.

Η βασική υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη του ανωτέρω πλαισίου στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται παρακάτω:

### 1. Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής:

Στο **5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** αναπαρίσταται το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής του Αράχθου ανάντη του φράγματος. Ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται, αρχικά, οι ιστορικές τιμές ημερήσιας βροχόπτωσης και παρατηρημένων εισροών στον ταμιευτήρα Πουρναρίου (που ταυτίζονται με την απορροή της λεκάνης) για την περίοδο 1980-2000, με σκοπό την βαθμονόμηση του μοντέλου. Σε μεταγενέστερο στάδιο, χρησιμοποιούνται συνθετικές χρονοσειρές βροχής πολύ μεγάλου μήκους (1000 έτη), για την εξαγωγή των αντίστοιχων εισροών (**Κεφάλαιο 9**). Το μοντέλο στοχεύει στην εκτίμηση της απορροής, μέσω κατάλληλης αναπαράστασης των ροϊκών διεργασιών και της αλληλουχίας των υδατικών ισοζυγίων στις διάφορες εδαφικές ζώνες. Οι τιμές που προκύπτουν από την εκτίμηση της παροχής εισροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο προσομοίωσης του ταμιευτήρα που περιγράφεται ακολούθως.

### 2. Προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα:

Στο **6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφεται, αναλυτικά, η προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα στην ημερήσια κλίμακα, με είσοδο τις χρονοσειρές εισροών που παράγονται από το υδρολογικό μοντέλο. Για τον σκοπό αυτό, ορίζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ταμιευτήρα, οι χρήσεις που εξυπηρετεί το υδροηλεκτρικό έργο και η πολιτική διαχείρισής του. Το μοντέλο αυτό αποσκοπεί στον εντοπισμό των επεισοδίων υπερχειλίσης, θεωρώντας μια συμβατική στάθμη πλήρους ανοίγματος των θυροφραγμάτων.

Επισημαίνεται ότι η ημερήσια κλίμακα θεωρείται ικανοποιητική για την επιλογή των επεισοδίων, όχι όμως για την περιγραφή της διαχείρισης της πλημμύρας. Για τον σκοπό αυτό, απαιτούνται δεδομένα πιο λεπτομερούς χρονικής διακριτότητας, όπως εξηγείται στη συνέχεια.

Για λόγους πληρότητας, το μοντέλο λειτουργίας του ταμιευτήρα διατυπώνεται και σε μηνιαίο βήμα, προκειμένου να αναδειχθούν τα μειονεκτήματα της χρήσης μεγάλων χρονικών κλιμάκων στην καταγραφή των φαινομένων υπερχειλίσης και τις σχετικές ποσοτικές εκτιμήσεις.

### 3. Επιμερισμός μέσων ημερήσιων παροχών:

Το πρόβλημα του επιμερισμού των ημερήσιων παροχών εισροής στον ταμιευτήρα, που παράγονται από το υδρολογικό μοντέλο, σε παροχές λεπτότερης κλίμακας προκύπτει από την ανάγκη μιας πολύ πιο εστιασμένης ανάλυσης των πλημμυρικών διεργασιών, σε συνδυασμό με τη διαχείριση των θυροφραγμάτων. Συνεπώς, για περαιτέρω επεξεργασία των επιλεγμένων πλημμυρικών επεισοδίων, θεωρήθηκε απαραίτητη η ανάλυση τους σε μικρότερη χρονική κλίμακα, συγκεκριμένα ωραία.

Στο **7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις του προβλήματος επιμερισμού ενός δείγματος ημερήσιων παροχών σε ωριαίες. Το βέλτιστο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε και εφαρμόστηκε στις επόμενες επεξεργασίες, είναι αυτό που εξασφαλίζει ικανοποιητική μαθηματική και υδρολογική συνέπεια (διατήρηση όγκων, χρονική συνέχεια, και εύλογη μορφή υδρογραφήματος).

Τονίζεται ότι η εφαρμογή του μοντέλου επιμερισμού, αφορά μόνο στα επεισόδια που εντοπίζονται από τη διαδικασία προσομοίωσης της λειτουργίας του ταμιευτήρα, για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικών πόρων. Συμβατικά, ο επιμερισμός εφαρμόζεται για παροχές πέντε συνεχόμενων ημερών. Με τον τρόπο αυτό, παράγονται ωριαία πλημμυρογραφήματα μήκους  $5 \times 24 = 120$  ωρών, που είναι και τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου διόδευσης, η περιγραφή του οποίου ακολουθεί.

#### 4. Διαχείριση και διόδευση πλημμυρικού επεισοδίου:

Στο **8<sup>ο</sup> Κεφάλαιο** περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης της λειτουργίας των έργων διαχείρισης των πλημμυρικών εισροών στον ταμιευτήρα (θυροφράγματα, στρόβιλοι) και διόδευσής τους διαμέσου του εκχειλιστή. Η προσομοίωση γίνεται σε ωριαίο βήμα, και αφορά μόνο στα επιλεγμένα πλημμυρικά επεισόδια. Όπως αναφέρθηκε, τα ωριαία υδρογραφήματα μήκους 120 ωρών που προέκυψαν ανά επεισόδιο από το βέλτιστο μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, χρησιμοποιούνται ως τιμές εισόδου στο μοντέλο της διόδευσης.

Μέσω του μοντέλου αυτού, διερευνάται επίσης μια πρόσφορη διαχειριστική πολιτική χρήσης των θυροφραγμάτων. Σήμερα, οι χειριστές του συγκεκριμένου φράγματος έχουν ως πρότυπο έναν πολύ απλό διαχειριστικό κανόνα, αν και στην πράξη γενικά βασίζονται στην εμπειρία τους για την ομαλή προσαγωγή των πλημμυρών κατάντη. Έτσι κρίθηκε απαραίτητο να δημιουργηθεί μια μεθοδολογία που να μπορεί να εφαρμοστεί στο υπό μελέτη φράγμα και να παρέχει μια πολύ πιο τεκμηριωμένη και αποτελεσματική πολιτική των χειρισμών των ακραίων πλημμυρικών γεγονότων, σε πραγματικό χρόνο.

#### 5. Στοχαστικό πλαίσιο και πιθανοτική ανάλυση:

Η επιτυχημένη ολοκλήρωση της παραπάνω μεθοδολογίας, έδωσε το έναυσμα για την δημιουργία μιας ακόμα πιο γενικής πρότασης που θα μπορούσε να εφαρμοστεί για τον σχεδιασμό των υπερχειλιστών και την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου των φραγμάτων, η οποία προφανώς δεν μπορεί να βασιστεί σε μικρού μήκους ιστορικά δείγματα. Συνεπώς, το προαναφερθέν πλέγμα μοντέλων πρέπει να διατυπωθεί σε στοχαστική μορφή, εξασφαλίζοντας πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία στις εκτιμήσεις των ακραίων πιθανοτικών μεγεθών.

Στην πιλοτική μας εφαρμογή, παρήχθησαν συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιων υψών βροχής μήκους 1000 ετών, με διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών των παρατηρημένων βροχοπτώσεων στη λεκάνη, που έχουν πολύ μικρότερο μήκος (1980-2020, ήτοι 40 έτη). Αυτές οι τιμές βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης, για την παραγωγή συνθετικών εισροών στην ημερήσια κλίμακα. Στη συνέχεια, ακολουθήθηκε το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο

(επιμερισμός παροχών, και εισαγωγή τους στο μοντέλο διόδευσης) για την εξαγωγή των ζητούμενων πιθανοτικών μεγεθών, και με απώτερο στόχο την κατάρτιση βελτιστοποιημένων πολιτικών διαχείρισης των θυροφραγμάτων και στροβίλων του φράγματος Πουρναρίου.

## 5 Υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής

---

### 5.1 Σκοπός

Η κατάρτιση ενός μοντέλου προσομοίωσης των υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης απορροής του Αράχθου, στην ημερήσια κλίμακα, είναι αναγκαία για δύο λόγους. Πρώτον, στην περιοχή μελέτης, η διαθέσιμη πληροφορία, όσον αφορά στην επιφανειακή βροχόπτωση (40 πλήρη υδρολογικά έτη, 1980-2021), είναι πιο εκτενής σε σχέση με την παροχή (20 έτη, 1980-2000). Συνεπώς, μέσω του υδρολογικού μοντέλου επιτυγχάνεται καλύτερη αξιοποίηση της στατιστικής γνώσης που παρέχουν τα ιστορικά δεδομένα. Ο δεύτερος λόγος είναι πιο γενικός, και έχει να κάνει με την τυπική πρακτική που ακολουθείται στις μελέτες πλημμυρών, που έχουν ως βάση την εφαρμογή μοντέλων επεισοδίου, με δεδομένες αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Ωστόσο, είναι γενικά αποδεκτό ότι η συνεχής υδρολογική προσομοίωση αποτελεί μια πολύ πιο συνεπή προσέγγιση, καθώς επιτρέπει τη συνδυαστική ανάλυση των επεισοδίων βροχής με τις εκάστοτε συνθήκες υγρασίας (π.χ., Boughton and Droop, 2003· Grimaldi *et al.*, 2012· Winter *et al.*, 2019· Efstratiadis *et al.*, 2022).

### 5.2 Περιγραφή μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης

Η περιγραφή του υδατικού ισοζυγίου της υδρολογικής λεκάνης του Αράχθου επιτυγχάνει μια εκτίμηση της απορροής με εφαρμογή διαδοχικών μετασχηματισμών της βροχόπτωσης, μέσω ενός συστήματος διασυνδεόμενων δεξαμενών.

Η κατακρήμνιση  $P$  χωρίζεται σε τρεις βασικές συνιστώσες:

- Την πραγματική εξατμοδιαπνοή  $ET$
- Την βαθιά κατείσδυση  $L$
- Την απορροή  $Q$

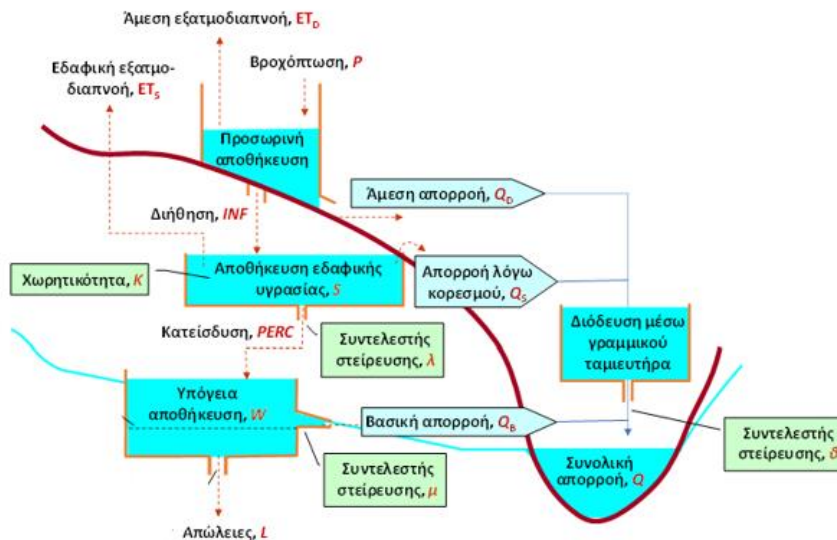
Η λεκάνη διακρίνεται σε τρεις δεξαμενές (**Εικόνα 5.1**):

- Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης νερού στο έδαφος
- Δεξαμενή αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας στην ανώτερη εδαφική στρώση
- Δεξαμενή αποθήκευσης υπόγειου νερού στον υδροφόρα

και κατά αντιστοιχία οι απορροές που προκύπτουν από αυτές είναι οι εξής:

- Άμεση απορροή,  $Q_D$
- Απορροή λόγω κορεσμού,  $Q_S$
- Βασική απορροή,  $Q_B$

Οι δεξαμενές συνδέονται μεταξύ τους και επιτρέπουν την περιγραφή ροϊκών διεργασιών στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου. Η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου επιλέχθηκε να είναι η ημερήσια. Έτσι το μοντέλο λειτουργεί με χρονικό βήμα  $t$ , σε ημέρες.



**Εικόνα 5.1:** Εννοιολογική απεικόνιση διεργασιών και παραμέτρων υδρολογικού μοντέλου (Ευστρατιάδης, 2021)

Ως δεδομένα εισόδου της προσομοίωσης του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής είναι η ωριαία κατακρήμνιση,  $P_t$  (mm) και η δυνητική εξατμοδιαπνοή,  $PET_t$  (mm/day). Επίσης για την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας είναι απαραίτητες οι τιμές:

- $S_0$  που είναι η αποθηκευμένη υγρασία της ακόρεστης ζώνης (μεσαία δεξαμενή)
- $W_0$  η οποία αντιστοιχεί στην αποθήκευση υπόγειου νερού (κατώτερη δεξαμενή).

Στο υπολογιστικό σχήμα εμφανίζονται πέντε παράμετροι που τίθενται προς βελτιστοποίηση, που είναι οι εξής:

- Η **χωρητικότητα** της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας, δηλαδή της ενδιάμεσης δεξαμενής,  $K$ , που εκφράζει την αποθηκευτική ικανότητα της ακόρεστης ζώνης.
- Ο **συντελεστής στείρευσης για παραγωγή κατείδυσης**,  $\lambda$ , που εκφράζει το ποσοστό του νερού που διακινείται από την μεσαία δεξαμενή προς τη δεξαμενή υπόγειου νερού, δηλαδή περιγράφει την ροή νερού από την ακόρεστη στην κορεσμένη ζώνη του εδάφους.
- Ο **συντελεστής στείρευσης για παραγωγή βασικής απορροής**,  $\mu$ , που εκφράζει το ποσοστό του υπόγειου νερού προς εκφόρτιση, μέσω του υπόγειου υδροφορέα, στο ποτάμι.
- Ο **συντελεστής στείρευσης**,  $\theta$ , που αντιστοιχεί στην εξομάλυνση της επιφανειακής απορροής κατά την διόδευση, μέσω γραμμικού ταμιευτήρα έως την έξοδο της λεκάνης.

Η παράμετρος  $K$  εκφράζεται σε μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού, ενώ οι υπόλοιπες σε μονάδες αντίστροφου χρόνου, δηλαδή είναι πρακτικά αδιάστατες.

Για την εύρεση των τιμών των παραπάνω παραμέτρων αρκεί να γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται μετά την καταγραφή της υπολογιστικής

διαδικασίας του σχήματος, το οποίο επιλέχθηκε για την προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής.

Για διευκόλυνση της περιγραφής του μοντέλου, θα αναλυθούν τα υδατικά ισοζύγια ανά δεξαμενή αποθήκευσης.

1. Δεξαμενή προσωρινής αποθήκευσης:

Αρχικά η άμεση εξατμοδιαπνοή  $ET_{D_t}$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$ET_{D_t} = \min (PET_t, P_t) \quad (5.1)$$

Στην συνέχεια υπολογίζεται η άμεση απορροή  $Q_{D_t}$ :

$$Q_{D_t} = v_t(P_t - ET_{D_t}) \quad (5.2)$$

$$v_t = \begin{cases} \frac{P_t - ET_{D_t}}{P_t - ET_{D_t} + K - S_0}, & t = 1 \\ \frac{P_t - ET_{D_t}}{P_t - ET_{D_t} + K - S_{4_{t-1}}}, & t > 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

$$S_0 = 0,1K \quad (5.4)$$

όπου το ποσοστό  $v_t$  δεν παραμένει σταθερό και προσδιορίζεται μέσω της Soil Conservation Service από την εξίσωση (5.3), ο όρος  $K - S_{4_{t-1}}$  εκφράζει την μέγιστη δυνητική κατακράτηση, δηλαδή την ποσότητα νερού που συγκρατείται στην ακόρεστη ζώνη, η τιμή  $S_0$  επιλέχθηκε να είναι ένα ποσοστό της χωρητικότητας  $K$  της ακόρεστης ζώνης (5.4) και το  $S_{4_{t-1}}$  υπολογίζεται παρακάτω από την (5.13).

Η ποσότητα νερού που απομένει διηθείται στο έδαφος και καταλήγει στην μεσαία δεξαμενή ως εξής:

$$INF_t = P_t - Q_{D_t} - ET_{D_t} \quad (5.5)$$

Συνεπώς για την ολοκλήρωση του ισοζυγίου της πρώτης δεξαμενής η νέα υγρασία που διατίθεται προς την δεύτερη είναι η  $S_{1_t}$ :

$$S_{1_t} = \begin{cases} S_0 + INF_t, & t = 1 \\ S_{4_{t-1}} + INF_t, & t > 1 \end{cases} \quad (5.6)$$

## 2. Δεξαμενή αποθήκευσης εδαφικής υγρασίας:

Αρχικά οι απώλειες λόγω εδαφικής εξατμοδιαπνοής προσδιορίζονται ως εξής:

$$ET_{S_t} = \frac{S_{1_t} \left(2 - \frac{S_{1_t}}{K}\right) \tanh\left(\frac{PET_t - ET_{D_t}}{K}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S_{1_t}}{K}\right) \tanh\left(\frac{PET_t - ET_{D_t}}{K}\right)} \quad (5.7)$$

όπου  $\frac{S_{1_t}}{K}$  είναι ο λόγος πλήρωσης της δεξαμενής.

Άρα οι συνολικές απώλειες λόγω εξατμοδιαπνοής προκύπτουν:

$$ET_t = ET_{D_t} + ET_{S_t} \quad (5.8)$$

Το νέο απόθεμα εδαφικής υγρασίας υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση:

$$S_{2_t} = S_{1_t} - ET_{S_t} \quad (5.9)$$

Συνεπώς η ποσότητα υγρασίας που κατεισδύει προς την κατώτερη δεξαμενή επιλέγεται ως ποσοστό του αποθέματος  $S_{2_t}$ :

$$PERC_t = \lambda S_{2_t} \quad (5.10)$$

όπου η τιμή  $\lambda$  αντιστοιχεί στον συντελεστή στέρησης για παραγωγή κατείσδυσης.

Έτσι, το καινούριο διαθέσιμο απόθεμα  $S_{3_t}$  που προκύπτει, είναι το εξής:

$$S_{3_t} = S_{2_t} - PERC_t \quad (5.11)$$

Η τελική ποσότητα ύδατος που υπερχειλίζει είναι:

$$Q_{S_t} = \max(0, S_{3_t} - K) \quad (5.12)$$

Το νέο διαθέσιμο απόθεμα εδαφικής υγρασίας για την κατώτερη δεξαμενή υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$S_{4_t} = S_{3_t} - Q_{S_t} \quad (5.13)$$



### 3. Δεξαμενή υπόγειας αποθήκευσης:

Η κατώτερη δεξαμενή αυξάνει το απόθεμα της, εξαιτίας της τροφοδότησής της από την ενδιάμεση. Έτσι υπολογίζεται η υπόγεια αποθήκευση:

$$W_{1t} = \begin{cases} W_0 + PERC_t, t = 1 \\ W_{2t-1} + PERC_t, t > 1 \end{cases} \quad (5.14)$$

όπου για την τιμή  $W_0$  της αποθήκευσης υπόγειου νερού, επιλέχθηκαν τα 10 mm/day και η αποθήκευση  $W_{2t-1}$  υπολογίζεται παρακάτω από της εξίσωση (5.16).

Η βασική απορροή προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$Q_{Bt} = \mu W_{1t} \quad (5.15)$$

όπου  $\mu$  ο συντελεστής στέρειυσης για παραγωγή βασικής απορροής.

Στην συνέχεια η αποθήκευση  $W_{2t}$  προσδιορίζεται από τον τύπο:

$$W_{2t} = W_{1t} - Q_{Bt} \quad (5.16)$$

Η προς διόδευση απορροή είναι:

$$X_{1t} = Q_{D_t} + Q_{S_t} \quad (5.17)$$

Για την εισαγωγή του συντελεστή στέρειυσης  $\theta$  στο μοντέλο δημιουργήθηκε μια εμπειρική σχέση δύναμης μορφής τέτοιας ώστε να λαμβάνονται υπόψιν οι τρέχουσες συνθήκες εδαφικής υγρασίας.

$$\theta' = \theta + (1 - \theta)v_t^{MP} \quad (5.18)$$

όπου  $\theta$  ο συντελεστής στέρειυσης,  $v_t$  το ποσοστό που υπολογίστηκε από την σχέση (5.3) και  $MP = 5$  ο εκθέτης της σχέσης δύναμης. Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει ότι όταν το έδαφος είναι πλήρως ξηρό ( $v_t = 0$ ), τότε η ανηγμένη παράμετρος,  $\theta'$ , λαμβάνει την ονομαστική της τιμή,  $\theta$ , ενώ όταν το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο ( $v_t = 1$ ), προκύπτει  $\theta' = 1$ , συνεπώς δεν πραγματοποιείται καμία εξομάλυνση της ροής.

Η αδιάστατη παράμετρος  $MP$  προσδιορίστηκε μετά από δοκιμές, προκειμένου να αναπαράγονται με όσο το δυνατό καλύτερη ακρίβεια οι παρατηρημένες αιχμές των παροχών στη λεκάνη.

Έπειτα ακολουθήθηκε η διαδικασία της διόδευσης, η οποία περιγράφεται ως εξής:

$$X_{2t} = \theta' X_{1t} \quad (5.19)$$

Τελικά υπολογίζεται η τελική προσομοιωμένη τιμή της συνολική απορροής από την εξίσωση:

$$Q_{final_t} = X_{2_t} + Q_{B_t} \quad (5.20)$$

### 5.3 Βαθμονόμηση μοντέλου

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να γίνει μέσω βαθμονόμησης, εφόσον διατίθενται παρατηρημένες τιμές απορροής την ίδια χρονική περίοδο με την ημερήσια κατακρήμνιση,  $P_t$ .

Σε αυτή την περίπτωση, ορίζεται ένα μέτρο που θα δηλώνει την καλή προσαρμογή των προσομοιωμένων τιμών της χρονοσειράς απορροής,  $Q_{sim_t}$  με την αντίστοιχη χρονοσειρά των παρατηρημένων,  $Q_{obs_t}$ .

Γι' αυτό τον σκοπό, χρησιμοποιήθηκε η αποτελεσματικότητα (efficiency), η οποία βιβλιογραφικά αναφέρεται και ως δείκτης NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency). Η τιμή της προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \mu_{obs})^2} \quad (5.21)$$

όπου  $n$  το μήκος του δείγματος των χρονοσειρών και  $\mu_{obs}$  η μέση τιμή των παρατηρημένων παροχών.

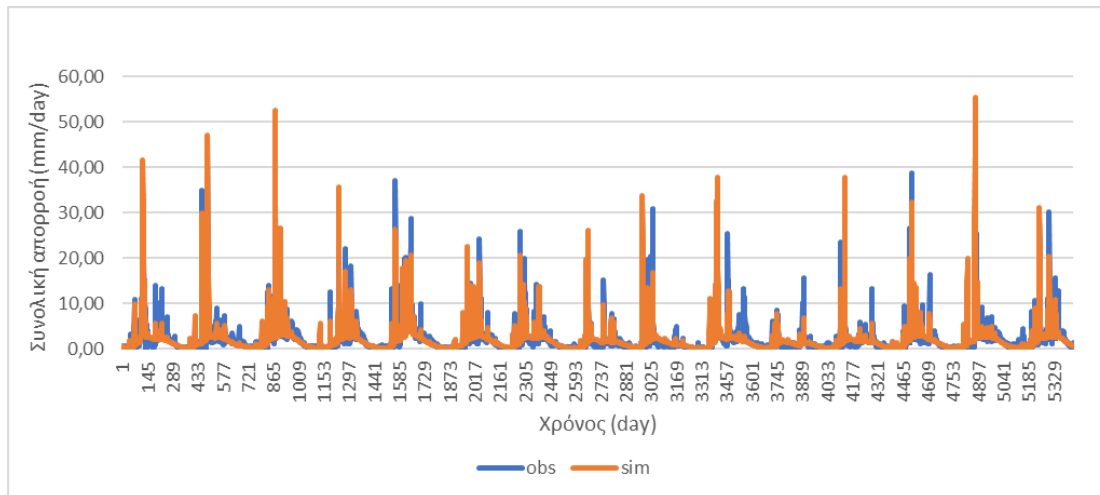
Η τιμή του δείκτη NSE κυμαίνεται από  $-\infty$  έως  $1$ , και ισχύουν οι εξής περιπτώσεις:

- Αν ο δείκτης  $NSE = 1$ , τότε υποδηλώνει την τέλεια προσαρμογή του μοντέλου στις τιμές των παρατηρήσεων
- Αν ο δείκτης  $NSE = 0$ , τότε υποδηλώνει ένα μοντέλο που η προγνωστική του ικανότητα είναι αντίστοιχη της μέσης τιμής των παρατηρήσεων
- Αν ο δείκτης  $NSE < 0$ , τότε υποδηλώνει ένα μοντέλο ακόμα χειρότερης προγνωστικής ικανότητας το οποίο σε καμία περίπτωση δεν θα μπορούσε να καταστεί αποδεκτό

Η βαθμονόμηση του μοντέλου μπορεί να επιτευχθεί είτε χειροκίνητα, με δοκιμή εναλλακτικών τιμών των παραμέτρων και επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τους, είτε αυτόματα, μέσω επίλυσης ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης. Στην δεύτερη περίπτωση ως στοχική συνάρτηση ορίζεται ο δείκτης NSE και ως μεταβλητές οι παράμετροι του μοντέλου. Σκοπός είναι η μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας για κατάλληλες τιμές των παραμέτρων.

Μετά από εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας για 20 χρόνια δεδομένων βροχής και αντίστοιχης παρατηρημένης απορροής της λεκάνης απορροής του Αράχθου, προέκυψε η τιμή  $NSE = 0,79$ . Η τιμή αυτή είναι ικανοποιητική, και μάλιστα, όπως φαίνεται και στην

**Εικόνα 5.2** οι προσομοιωμένες τιμές ακολουθούν με αρκετή ακρίβεια την παρατηρημένη χρονοσειρά απορροής. Σημαντικό είναι πως το μοντέλο μπορεί να αναπαράξει τις πιο μεγάλες τιμές των παροχών, οι οποίες σχετίζονται με πλημμυρικά επεισόδια. Η πτυχή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα μελέτη, η οποία εστιάζει σε μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα, και ειδικά στα πιο ακραία εξ αυτών.



**Εικόνα 5.2:** Σύγκριση παρατηρημένης και προσομοιωμένης χρονοσειράς ημερήσιων παροχών λεκάνης Αράχθου.

#### 5.4 Στατιστική αξιολόγηση προγνωστικής ικανότητας μοντέλου

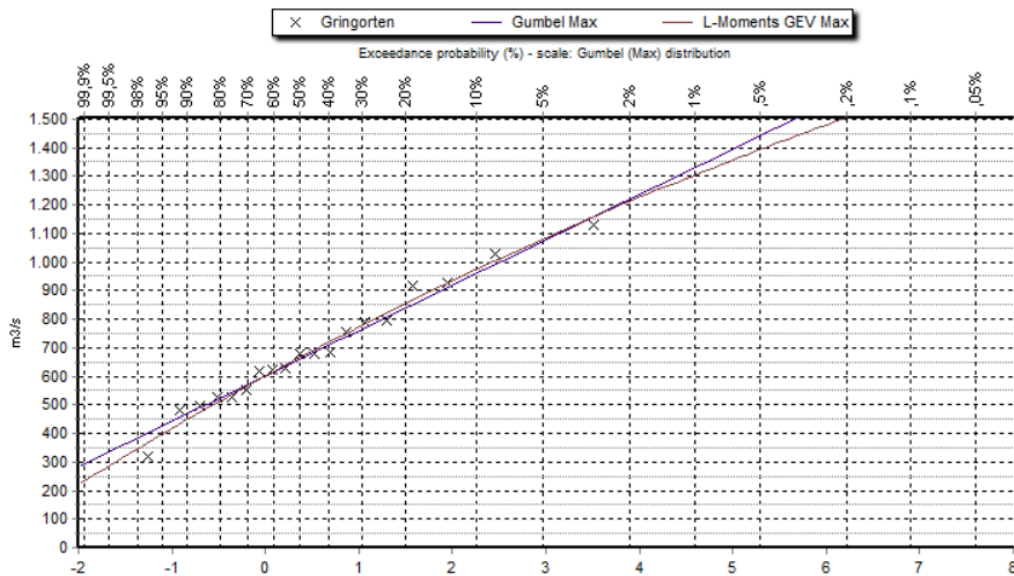
Η χρήση του δείκτη NSE επιτρέπει την αξιολόγηση της γενικής επίδοσης του μοντέλου, όσον αφορά στο πλήρες εύρος των παροχών. Δεδομένου, ωστόσο, ότι η παρούσα έρευνα εστιάζει στις πλημμύρες, η επίδοση του μοντέλου πρέπει να αξιολογηθεί περαιτέρω, εστιάζοντας στην αναπαραγωγή των υψηλών παροχών. Στο πλαίσιο αυτό, θεωρήθηκε χρήσιμη η αξιοποίηση και ενός στατιστικού τρόπου ελέγχου της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας βαθμονόμησης.

Αφού το κύριο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στις αιχμές των παροχών, έγινε στατιστική ανάλυση των ετήσιων μέγιστων τιμών τους, τόσο των παρατηρημένων όσο και των προσομοιωμένων, και συγκρίθηκε η προσαρμογή των αντίστοιχων κατανομών μεγίστων. Η αναλυτική μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των στατιστικών αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο **Κεφάλαιο 9**.

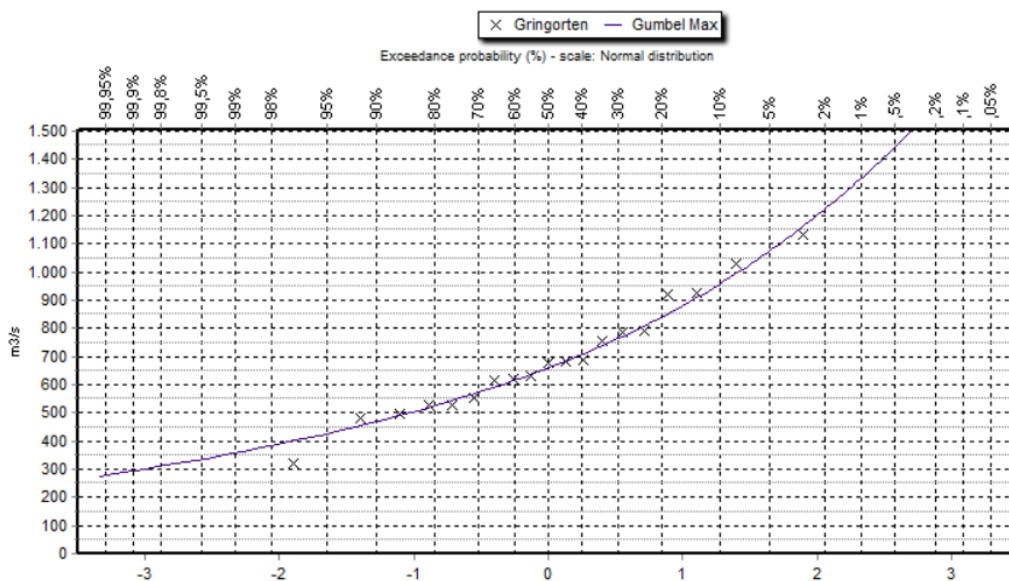
➤ Ιστορικό δείγμα αρχικών παροχών:

Στην **Εικόνα 5.3** αντιπαραβάλλεται η προσαρμογή της κατανομής GEV (Γενική Ακραίων Τιμών) στις ετήσιες μέγιστες τιμές του ιστορικού δείγματος παροχών, συγκρίνοντάς με τα εμπειρικά δεδομένα τα οποία οπτικοποιούνται σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max. Παρατηρείται ότι η κατανομή GEV στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, που σημαίνει ότι έχει αρνητικό συντελεστή σχήματος. Μια τέτοια συμπεριφορά δεν είναι στατιστικά συνεπής, και προφανώς οφείλεται σε σφάλματα των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, επιβάλλεται η εφαρμογή οριακά μηδενικού συντελεστή, οπότε η GEV μεταπίπτει στην κατανομή Gumbel

Μακ. Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 4**, η κατανομή Gumbel προσαρμόζεται πολύ ικανοποιητικά στο εμπειρικό δείγμα των ετήσιων μεγίστων.



**Εικόνα 5.3:** Προσαρμογή κατανομών Gumbel-Max και GEV στο ιστορικό δείγμα ετήσιων μεγίστων παροχών (απεικόνιση σε χαρτί Gumbel-Max)



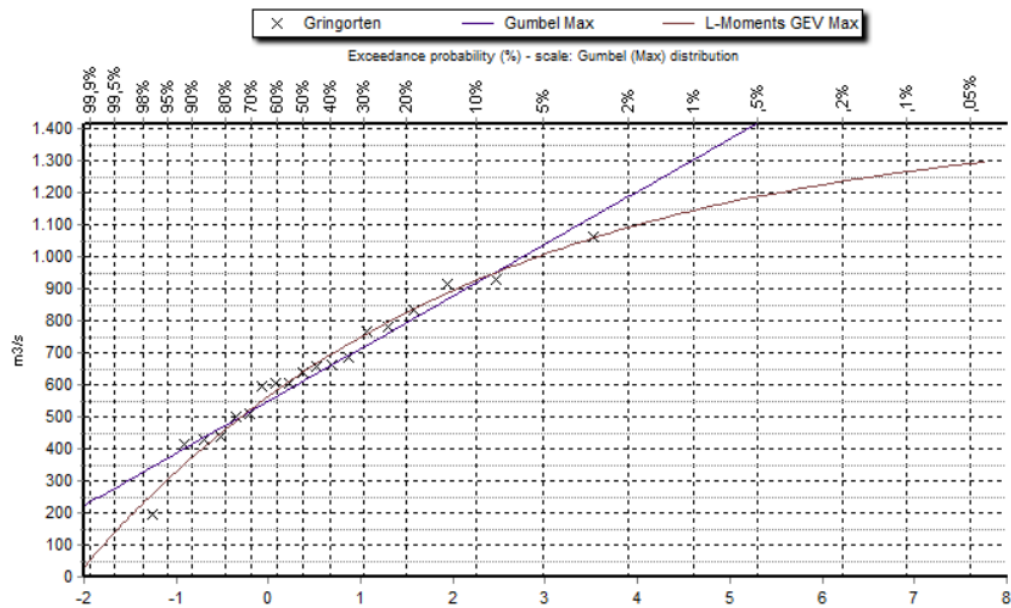
**Εικόνα 5.4:** Προσαρμογή κατανομής Gumbel-Max στο ιστορικό δείγμα ετήσιων μεγίστων παροχών (απεικόνιση σε χαρτί κανονικής κατανομής).

➤ Βαθμονομημένο δείγμα αρχικών παροχών:

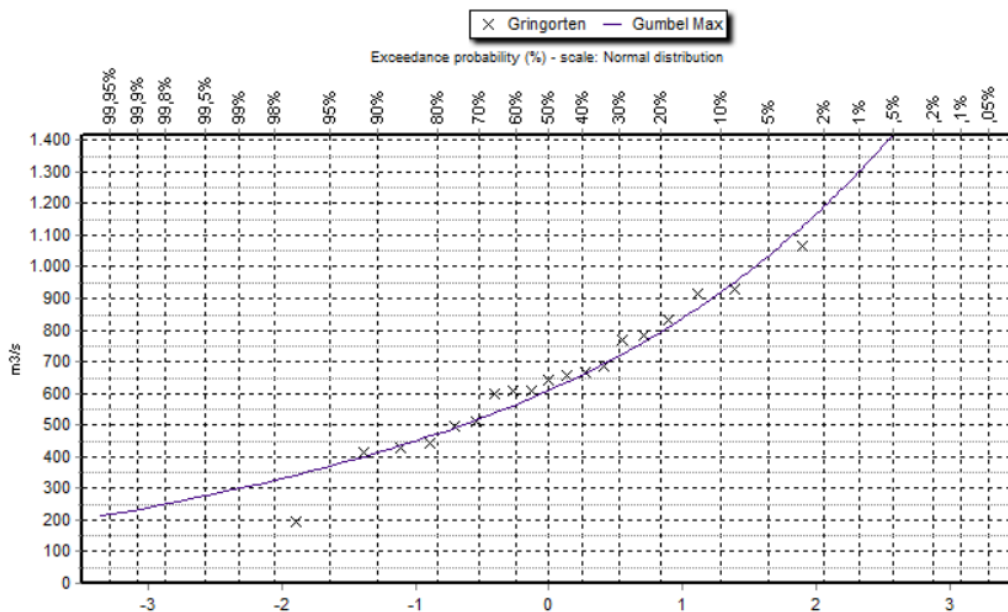
Κατ' αντιστοιχία με τα ιστορικά δεδομένα, ελέγχθηκε η προσαρμογή των κατανομών GEV και Gumbel στις ετήσιες μέγιστες τιμές των προσομοιωμένων παροχών (**Εικόνα 5.5**), και

προέκυψαν τα ίδια συμπεράσματα. Συνεπώς, ως βέλτιστη, αλλά και μαθηματικά συνεπής, θεωρήθηκε η θεωρητική κατανομή Gumbel-Max (Εικόνα 5.6).

Συνεπώς, ύστερα και από την παραπάνω στατιστική ανάλυση, η βαθμονόμηση του μοντέλου κρίνεται ιδιαίτερα επιτυχημένη, ώστε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στο μεταγενέστερο πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης, μέσω του οποίου επιδιώκεται η παραγωγή ενός πολύ μεγάλου μήκους ημερήσιων συνθετικών παροχών, μέσω μετατροπής συνθετικών τιμών βροχής σε απορροή (Κεφάλαιο 9).



Εικόνα 5.5: Κατανομές Gumbel-Max και GEV σε χαρτί Gumbel-Max, στο βαθμονομημένο δείγμα ετήσιων μέγιστων παροχών



Εικόνα 5.6: Προσαρμογή κατανομής Gumbel-Max, στο βαθμονομημένο δείγμα ετήσιων μέγιστων παροχών

## 6 Προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα

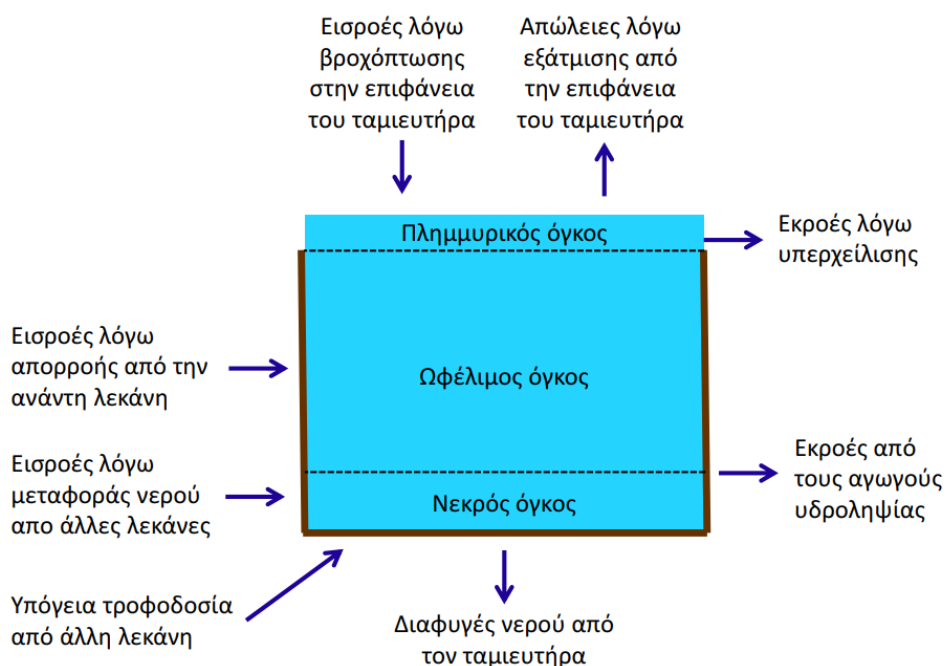
### 6.1 Σκοπός

Η προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι ο συνδυαστικός κρίκος μεταξύ των παροχών εισροής, από το μοντέλο υδατικού ισοζυγίου της λεκάνης και των παροχών εκροής, σε περίπτωση πλημμυρικού επεισοδίου, υπό την μορφή υπερχειλίσης, μέσω του μοντέλου διόδευσης των πλημμυρών. Το μοντέλο βασίζεται στην αποδοτική εφαρμογή μεθόδων διαχειριστικής πολιτικής για την βέλτιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ζήτησης.

Επιπροσθέτως, η ύπαρξη του κρίνεται απαραίτητη για την καταγραφή των μεταβολών του διαθέσιμου αποθέματος σε συνεχή χρόνο και συνεπώς την διακύμανση της στάθμης του ταμιευτήρα. Το γεγονός αυτό διευκολύνει στον εντοπισμό των επεισοδίων υπερχειλίσης, με σκοπό την απομόνωση των παροχών εισροής, που τα προκαλούν, και περαιτέρω ανάλυση τους, σε μεταγενέστερο στάδιο.

### 6.2 Συνοπτική περιγραφή υδατικού ισοζυγίου ταμιευτήρα

Η λειτουργία ενός ταμιευτήρα βασίζεται σε αλληπάλληλες μεταβολές του διαθέσιμου αποθέματος. Η διακύμανση αυτή οφείλεται στις εισροές και στις εκροές που καταγράφονται σε αυτόν. Σχηματικά το υδατικό ισοζύγιο ενός ταμιευτήρα περιγράφεται στην **Εικόνα 6.1**:



**Εικόνα 6.1:** Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα (Ευστρατιάδης, 2021)

Η μαθηματική διατύπωση του υδατικού ισοζυγίου, σε ένα διακριτό χρονικό διάστημα  $(t, t + \Delta t)$  είναι η εξής:

$$S_{t+\Delta t} = S_t + I_t + q_t + g_t + p_t - e_t - i_t - r_t - w_t \quad (6.1)$$

όπου:

$S_t$ , ο αποθηκευμένος όγκος νερού στην αρχή του κάθε χρονικού βήματος

$I_t$ , οι εισροές από την ανάντη λεκάνη

$q_t$ , η μεταφορά (εκτροπή) νερού από άλλες λεκάνες

$g_t$ , η τροφοδοσία από τον υπόγειο υδροφόρο

$p_t$ , η βροχόπτωση στην επιφάνεια του ταμιευτήρα

$e_t$ , οι απώλειες λόγω επιφανειακής εξάτμισης

$i_t$ , οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών

$r_t$ , οι ρυθμιζόμενες απολήψεις

$w_t$ , οι απώλειες λόγω υπερχειλίσης

Στην εξίσωση (6.1), όσοι όροι της έχουν θετικό πρόσημο αντιστοιχούν στις εισροές του ταμιευτήρα, ενώ όσοι έχουν αρνητικό στις εκροές.

### 6.3 Σχέση στάθμης-παροχής ταμιευτήρα

Μια σημαντική εξίσωση που χρησιμοποιείται στο μοντέλο λειτουργίας του ταμιευτήρα και σχετίζεται με την λεκάνη απορροής ανάντη του, είναι εκείνη που συνδέει την μεταβολή της στάθμης με αυτή του αποθέματος. Η γενική μορφή αυτής της σχέσης είναι η εξής:

$$S = \alpha(z - z_0)^b, \text{ με } z \text{ σε } m \text{ και } S \text{ σε } hm^3 \quad (6.2)$$

όπου  $\alpha$  παράμετρος κλίμακας,  $z_0$  η στάθμη του πυθμένα στην θέση του φράγματος και  $b$  παράμετρος σχήματος.

Πιο συγκεκριμένα για τον ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι η καμπύλη στάθμης-αποθέματος περιγράφεται με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια από την σχέση (Κουτσογιάννης κ.ά., 2010):

$$S = 0,042(z - 40)^{2,23}, \text{ με } z \text{ σε } m \text{ και } S \text{ σε } hm^3 \quad (6.3)$$

## 6.4 Προσομοίωση ταμιευτήρα Πουρναρίου

Ο ταμιευτήρας ανάντη του φράγματος Πουρναρίου Ι, προσομοιώνεται μέσω ενός μοντέλου μαθηματικών εξισώσεων. Για την ορθή εφαρμογή του λαμβάνονται υπόψη όλες οι παράμετροι που διέπουν την λειτουργία του.

Ως χρονικό βήμα της εν λόγω προσομοίωσης επιλέχθηκε το ημερήσιο, δεδομένου πως η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε αποσκοπεί στην εύρεση και απομόνωση των επεισοδίων υπερχειλίσης, η λεπτομερής ανάλυση των οποίων γίνεται στα **Κεφάλαια 7 και 8**. Συνεπώς, η ημερήσια χρονική κλίμακα επαρκεί για την επιλογή των πλημμυρικών επεισοδίων παρέχοντας ένα αρκετά ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του μοντέλου.

Έστω,  $t$  το ημερήσιο χρονικό βήμα της προσομοίωσης και  $Q_{in_t}$  η ημερήσια παροχή εισροής του ταμιευτήρα σε  $m^3/s$  (είτε πρόκειται για αυτή που προκύπτει από το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής - **Κεφάλαιο 5**, είτε από τα ιστορικά δεδομένα).

Αρχικά η παροχή εισροής  $Q_{in_t}$  μετατρέπεται, σε όγκο:

$$V_{in_t} = Q_{in_t} \frac{86.4}{1000} \quad (6.4)$$

όπου η τιμή του ημερήσιου όγκου αναφέρεται σε  $hm^3$ . Η μετατροπή αυτή κρίνεται απαραίτητη, αφού το μοντέλο στηρίζεται σε ισοζύγια αποθεμάτων και όχι παροχών.

Στην συνέχεια υπολογίζεται το απόθεμα έναρξης του κάθε χρονικού βήματος:

$$stor_{1_t} = \begin{cases} V_{start}, t = 1 \\ stor_{5_{t-1}}, t > 1 \end{cases} \quad (6.5)$$

$$V_{start} = \frac{V_{dead} + V_{ogee}}{2} \quad (6.6)$$

$$V_{dead} = a(z_{K\Sigma\Lambda} - z_0)^{2,23} \quad (6.7)$$

$$V_{ogee} = a(z_{ogee} - z_0)^{2,23} \quad (6.8)$$

όπου για αρχική τιμή του αποθέματος  $V_{start}$ , στο πρώτο χρονικό βήμα ( $t = 1$ ), επιλέχθηκε να είναι η μέση τιμή του νεκρού όγκου  $V_{dead}$  και του όγκου που αντιστοιχεί στην στέψη του υπερχειλιστή  $V_{ogee}$ , ενώ για τα υπόλοιπα χρονικά βήματα ως αρχικό απόθεμα χρησιμοποιείται το διαθέσιμο απόθεμα στο τέλος του προηγούμενου χρονικού βήματος (**6.20**), με σκοπό την εξασφάλιση συνέχειας. Όπως φαίνεται στις σχέσεις (**6.5**) και (**6.6**) ο νεκρός όγκος και ο όγκος της στέψης του υπερχειλιστή, προσδιορίστηκαν από την σχέση στάθμη-αποθέματος που περιγράφηκε παραπάνω (εξ. **6.3**).



Το νέο απόθεμα που προκύπτει από την εισροή είναι:

$$stor_{2t} = stor_{1t} + V_{in_t} \quad (6.9)$$

Αφού είναι γνωστό το απόθεμα στην αρχή του χρονικού βήματος  $t$  (εξ. 6.5), μπορεί να βρεθεί η στάθμη του ταμιευτήρα χρησιμοποιώντας την σχέση στάθμης- αποθέματος (εξ. 6.3), αλλά αυτή την φορά με άγνωστο την στάθμη:

$$lev_t = z_0 + \left(\frac{stor_{1t}}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (6.10)$$

όπου  $z_0 = 40$  m,  $a = 0,042$  και  $b = 2,23$  όπως παραπάνω.

Έπειτα προσδιορίζεται το διαθέσιμο ύψος πτώσης:

$$z_t = lev_t - z_{ex_t} \quad (6.11)$$

όπου  $z_{ex_t} = 42,5$  m και αντιστοιχεί στην στάθμη του αγωγού φυγής.

Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή του στόχου απόληψης, εφόσον είναι γνωστή η τιμή του ημερήσιου στόχου παραγωγής ενέργειας:

$$E_{dem_t} = \frac{demand}{\psi z_t} \quad (6.12)$$

όπου  $\psi = 0,221$  GWh/hm<sup>4</sup> η ειδική ενέργεια (παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα ύψους πτώσης). Η ημερήσια ζήτηση ενέργειας τίθεται ίση με  $demand = 0,6$  GWh, καθώς είναι γνωστό ότι από τον συγκεκριμένο σταθμό ετησίως παράγονται 235 GWh.

Η εκροή των στροβίλων για την παραγωγή της ενέργειας-στόχου προκύπτει ως το ελάχιστο μεταξύ τριών ποσοτήτων:

$$outflow_{1t} = \min(E_{dem_t}, outflow_{max}, stor_{2t} - V_{dead}) \quad (6.13)$$

όπου  $outflow_{max} = 43,2$  hm<sup>3</sup>/day, αφού οι στρόβιλοι έχουν παροχετευτικότητα 500 m<sup>3</sup>/s.

Το απόθεμα υπολογίζεται εκ νέου ως εξής:

$$stor_{3t} = stor_{2t} - outflow_{1t} \quad (6.14)$$

Σε περίπτωση που το απόθεμα ξεπερνάει την μέγιστη αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα, υπάρχουν δύο σενάρια για την εκροή του:

$$surp_t = \max(0, stor_{3t} - V_{max}) \quad (6.15)$$

$$V_{\max} = a(z_{A\sigma\lambda} - z_0)^{2,23} \quad (6.16)$$

όπου ο μέγιστος όγκος  $V_{\max}$  του ταμιευτήρα προσδιορίζεται από την σχέση στάθμης-αποθέματος (6.3) και η  $z_{A\sigma\lambda} = 116 \text{ m}$  που είναι το όριο της ΔΕΗ.

Περίπτωση 1: Θα περάσει από τους στροβίλους παράγοντας δευτερεύουσα ενέργεια, αν δεν έχει ήδη καλυφθεί η μέγιστη παροχетеυτικότητα των στροβίλων

$$outflow_{2t} = \min (surp_t, permeability - outflow_{1t}) \quad (6.17)$$

Και θα υπολογιστεί το διατιθέμενο απόθεμα ξανά:

$$stor_{4t} = stor_{3t} - outflow_{2t} \quad (6.18)$$

Περίπτωση 2: Θα καταγραφεί εκροή μέσω του υπερχειλιστή

$$overflow_t = \max (0, stor_{4t} - V_{\max}) \quad (6.19)$$

Συνεπώς το τελικό απόθεμα του χρονικού βήματος  $t$  υπολογίζεται ως εξής:

$$stor_{5t} = stor_{4t} - overflow_t \quad (6.20)$$

Η συνολική ενέργεια που παράγεται από την προσομοίωση λειτουργίας του ταμιευτήρα, προκύπτει από την σχέση:

$$Energy_t = \psi \frac{z_t + z_{t+1}}{2} (outflow_{1t} + outflow_{2t}) \quad (6.21)$$

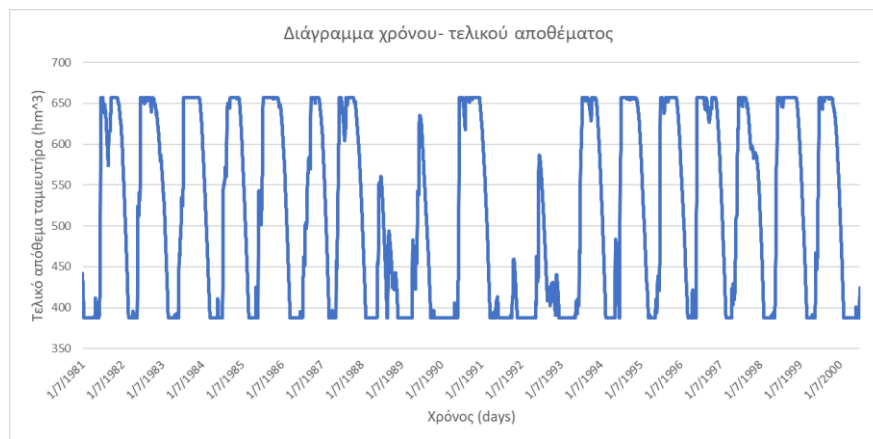
όπου το ύψος πτώσης θεωρείται η μέση τιμή του τρέχοντος και του επόμενου χρονικού βήματος για μεγαλύτερη ακρίβεια στην τιμή της παραγόμενης ενέργειας.

## 6.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης ταμιευτήρα

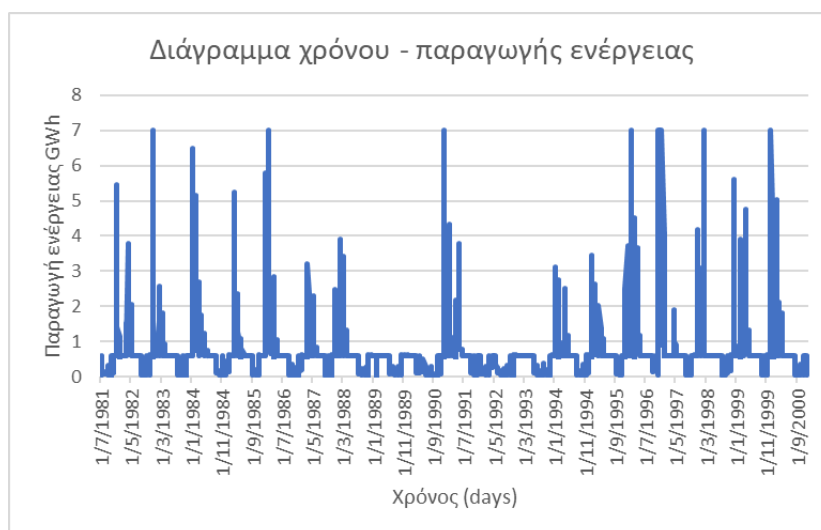
Στην προσομοίωση του ταμιευτήρα χρησιμοποιήθηκαν ως παροχές εισόδου, οι εισροές καταγεγραμμένων ιστορικών δεδομένων εικοσαετίας, από το 1980-2000. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρατίθενται ακολούθως.



**Εικόνα 6.2:** Προσομοιωμένη χρονοσειράς στάθμης ταμιευτήρα Πουρναρίου



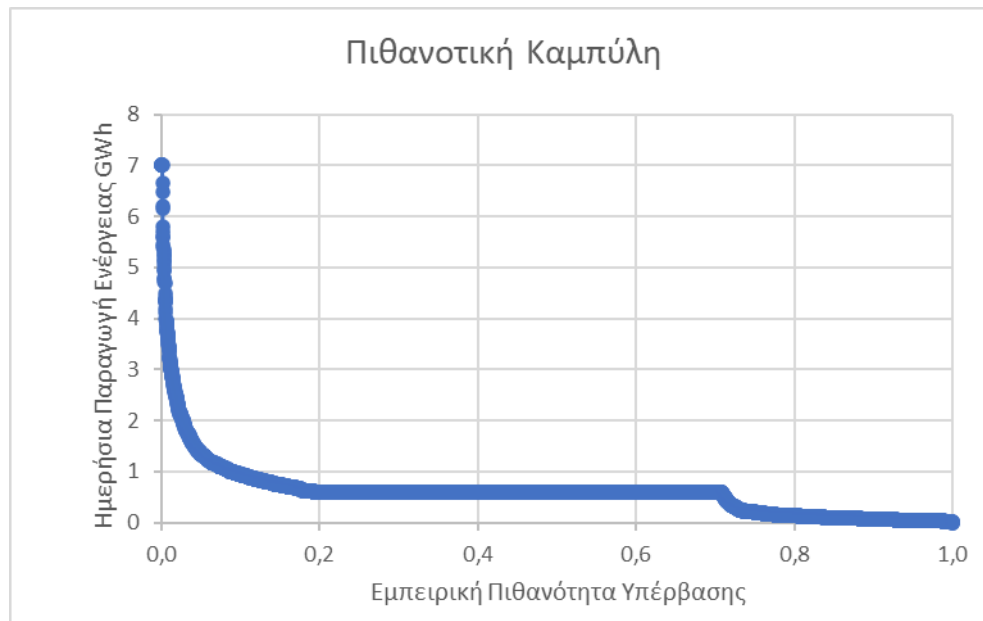
**Εικόνα 6.3:** Προσομοιωμένη χρονοσειράς αποθέματος ταμιευτήρα Πουρναρίου



**Εικόνα 6.4:** Προσομοιωμένη χρονοσειράς παραγωγής ενέργειας από τον υδροηλεκτρικό σταθμό Πουρναρίου

Στην **Εικόνα 6.2** παρατηρείται πως η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ των ορίων που έχουν τεθεί από τον κανόνα λειτουργίας, δηλαδή μεταξύ της ΚΣΛ= +100 m και της ΑΣΛ= +116 m που ορίζει η ΔΕΗ. Οι τιμές του αποθέματος (**Εικόνα 6.3**) κυμαίνονται μεταξύ του νεκρού όγκου  $V_{dead} = 387,7 \text{ hm}^3$  και της μέγιστης αποθηκευτικότητας του ταμιευτήρα  $V_{max} = 656,8 \text{ hm}^3$ .

Η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια πιάνει την τιμή του στόχου στις 0,6 GWh, διαφορετικά είτε παράγεται περισσότερη ενέργεια, είτε δεν καλύπτει την βασική ζήτηση ενέργειας. Για καλύτερη εποπτεία στην **Εικόνα 6.5** παρουσιάζεται η πιθανοτική καμπύλη.



**Εικόνα 6.5:** Πιθανοτική καμπύλη παραγωγής ενέργειας

Η πιθανοτική καμπύλη συνιστά την ταυτότητα λειτουργίας του έργου. Κατασκευάζεται αντιστοιχίζοντας τις τιμές της εμπειρικής πιθανότητας υπέρβασης με αυτές της προσομοιωμένης παραγωγής ενέργειας, τοποθετημένες σε φθίνουσα σειρά. Κατά την γραφική αναπαράσταση παρατηρούνται τέσσερις περιοχές (Efstratiadis *et al.*, 2021):

- **Περιοχή υπερχειλίσης:** Θεωρείται η μέγιστη δυνατή ενέργεια που παράγεται, επειδή όμως ο αριθμός των υπερχειλίσεων είναι μικρός ο κλάδος δεν διακρίνεται.
- **Περιοχή δευτερεύουσας ενέργειας:** Θεωρείται η παραγωγή ενέργειας από την τιμή του στόχου μέχρι την μέγιστη δυνατή ενέργεια.
- **Περιοχή πρωτεύουσας ενέργειας:** Θεωρείται η παραγωγή ενέργειας στον στόχο.
- **Περιοχή ελλειμμάτων:** Θεωρούνται οι φορές αδυναμίας κάλυψης των ενεργειακών αναγκών, είτε λόγω μικρού ύψους πτώσης, είτε λόγω έλλειψης υδατικών αποθεμάτων.

## 6.6 Εντοπισμός επεισοδίων υπερχειλίσης

Βασικός στόχος της προσομοίωσης λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι η εύρεση των επεισοδίων υπερχειλίσης, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Στην **Εικόνα 6.6** παρουσιάζεται το διάγραμμα των υπερχειλίσεων του ταμιευτήρα.

Συγκεκριμένα, καταγράφονται δώδεκα υπερχειλίσεις στην διάρκεια των ιστορικών δεδομένων (20 έτη). Για περαιτέρω ανάλυση των επεισοδίων αυτών, επιλέχθηκαν οι τιμές των παροχών για δύο ημέρες πριν και δύο ημέρες μετά (συνολικά πέντε ημέρες ανά επεισόδιο), καθώς και η στάθμη του ταμιευτήρα δύο ημέρες πριν την τιμή υπερχειλίσης. Η διαδικασία αυτή κρίθηκε απαραίτητη για την ορθή καταγραφή της εξέλιξης των πλημμυρικών επεισοδίων, με σκοπό τον επιμερισμό τους σε ωριαία δεδομένα (**Κεφάλαιο 7**) και εν τέλη την διόδευση τους από τον υπερχειλιστή (**Κεφάλαιο 8**).



**Εικόνα 6.6:** Προσομοιωμένη χρονοσειράς υπερχειλίσεων ταμιευτήρα Πουρναρίου

## 6.7 Αναπαράσταση υπερχειλίσεων και χρονική κλίμακα προσομοίωσης

Για λόγους πληρότητας ακολουθήθηκε η ίδια μεθοδολογική διαδικασία σε μηνιαίο χρονικό βήμα, για το οποίο καταγράφηκαν μηδενικές υπερχειλίσεις. Έτσι επιβεβαιώθηκε η επιλογή της ημερήσιας χρονικής κλίμακας για την προσομοίωση του ταμιευτήρα και η αδυναμία μεγαλύτερων χρονικών κλιμάκων να καταγράψουν πλημμυρικά επεισόδια.

Πράγματι, σε κλίμακες όπως η μηνιαία, που είναι βεβαίως η τυπική που εφαρμόζεται σε πλείστες των διαχειριστικών μελετών, εξαιτίας της πολύ μεγάλης παροχетеυτικότητας των στροβίλων, προκύπτει για μια «λογιστική» δυνατότητα διοχέτευσης ακόμα και πολύ μεγάλων μηνιαίων εισροών από αυτούς, με αποτέλεσμα την παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων δευτερεύουσας ενέργειας. Ωστόσο, ούτε και η ημερήσια κλίμακα δεν μπορεί να αποτυπώσει με επαρκή ακρίβεια τη λειτουργία του συστήματος εν ώρα πλημμύρας, αφού παρέχεται

διαχειριστική ευελιξία εξαιτίας των θυροφραγμάτων. Για τον λόγο αυτό, η ύπαρξη 12 περιστατικών υπερχειλίσης κατά την εικοσαετία 1980-2000, όπως προκύπτει από την προσομοίωση, δεν είναι συνεπής με την ιστορία του έργου, καθώς τα πραγματικά επεισόδια είναι αρκετά λιγότερα.

Συνεπώς, το ημερήσιο μοντέλο, το οποίο υλοποιεί συνεχή προσομοίωση, χρησιμοποιείται μόνο ως οδηγός για τον εντοπισμό των μεγάλων πλημμυρικών επεισοδίων που λαμβάνουν χώρα ενώ η στάθμη είναι ψηλά. Από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται μοντέλα μορφής επεισοδίου, για την λεπτομερή (ωριαία) ανάλυση των εισροών και της λειτουργίας του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια μεμονωμένων χρονικών διαστημάτων, ήτοι πέντε ημερών.

## 7 Επιμερισμός μέσων ημερήσιων παροχών για την παραγωγή επεισοδίων ωριαίας χρονικής κλίμακας

---

### 7.1 Σκοπός

Όπως αναφέρθηκε στο **Κεφάλαιο 1**, για την πλήρη και λεπτομερή ανάλυση ενός πλημμυρικού φαινομένου σε έναν ταμιευτήρα, κρίνεται απαραίτητη η χρήση δεδομένων παροχών μικρών χρονικών κλιμάκων. Σημειώνεται ότι η συνηθέστερη κλίμακα στην οποία διατίθενται δείγματα παροχών στην Ελλάδα είναι η ημερήσια. Δεδομένα χαμηλότερων χρονικών κλιμάκων είναι δύσκολο να βρεθούν, ενώ ταυτόχρονα απαιτητική έως οριακά αδύνατη είναι η μέτρησή τους σε συνθήκες πεδίου.

Μια πρόχειρη επίλυση του προβλήματος καταβιβασμού των ημερήσιων τιμών παροχής σε μικρότερη χρονική κλίμακα (π.χ., ωριαία) θα ήταν η χρήση ενός γραμμικού μοντέλου, που θα συνδέει τα ημερήσια δεδομένα. Με μία τέτοια αδρομερής παραδοχή, δημιουργούνται πολλές αβεβαιότητες, αφού μέσα στην διάρκεια της ημέρας μπορεί να υπάρξουν αιχμές της πλημμύρας που θα αγνοηθούν, αλλά και πολλές φορές να είναι ελλιπής η πληροφόρηση του τρόπου καταγραφής των ημερήσιων παροχών. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορεί να έχουν μετρηθεί κάθε μέρα μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (συνήθως κάποια πρωινή ώρα) ή να αποτελούν έναν μέσο όρο της ημερήσιας εισροής.

Υπό αυτό το πλαίσιο της αδυναμίας εύρεσης δεδομένων, επιχειρήθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου όπου θα επιτρέπει την μετατροπή δεδομένων ημερήσιας κλίμακας σε ωριαία, κάνοντας επιμερισμό των παροχών. Για τον σκοπό αυτό έπρεπε να ληφθούν υπόψη όλες οι πιθανές περιπτώσεις εμφάνισης του φαινομένου, για να προσομοιωθεί όσο το δυνατόν πιο αναλυτικά η περιγραφή τους, τόσο σε μορφή όσο και σε στατιστικά χαρακτηριστικά.

Στην παρούσα έρευνα αναπτύχθηκαν, και περιγράφονται στη συνέχεια, τέσσερις διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις επιμερισμού μιας σειράς ημερήσιων παροχών σε ωριαίες, από το πρώτο μοντέλο σύλληψης της ιδέας έως την τελική λύση του προβλήματος.

Για καλύτερη εποπτεία της αποτελεσματικότητας των μεθόδων, για κάθε μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών αναλύονται δύο χαρακτηριστικά πλημμυρικά επεισόδια. Το 1<sup>ο</sup> παρουσιάζει μία μεγάλη αιχμή και είναι ένα επεισόδιο εισροής της ιστορικής χρονοσειράς για το οποίο παρατηρείται υπερχειλίση του ταμιευτήρα. Το 2<sup>ο</sup> εμφανίζει δύο αιχμές και επιλέχθηκε για να οπτικοποιηθεί η απόδοση των μοντέλων σε δίκροφα επεισόδια, αφού η πλημμύρα του 2005 εμφάνισε αντίστοιχη μορφή (**Κεφάλαιο 3**).

Και στα δύο επεισόδια παρουσιάζονται δύο διαγράμματα. Το 1<sup>ο</sup> αντιστοιχεί στην ωριαία παροχή που παράγεται από το μοντέλο επιμερισμού των παροχών, ενώ το 2<sup>ο</sup> συγκρίνει τα δεδομένα εισόδου, δηλαδή της ημερήσιας κλίμακας, με αυτά των μέσων τιμών που προκύπτουν ανά ημέρα στον ωριαίο μοντέλο.

## 7.2 Επιμερισμός με περιπτώσεις ανοδικού και καθοδικού κλάδου

Πρωταρχικό στάδιο για την υλοποίηση μιας μεθοδολογίας εκτίμησης των ημερήσιων παροχών συνιστά η σωστή οριοθέτηση του προβλήματος. Οι αρχικές συνθήκες εισόδου του μοντέλου, καθώς και ο τρόπος προσέγγισης του στόχου είναι η βάση για την δημιουργία μιας ρεαλιστικής αποτύπωσης του ζητουμένου. Ως επεισόδια εισόδου θεωρούνται αυτά που έχουν εξαχθεί από την ημερήσια προσομοίωση του ταμειευτήρα (Κεφάλαιο 6).

Έστω  $t$  η ημέρα του επεισοδίου,  $q_t$  η εισροή της ημέρας και  $V_t$  ο όγκος εισροής της ημέρας για κάθε χρονικό βήμα του επεισοδίου υπερχειλίσης.

Αν  $n$  η διάρκεια της ημέρας (με  $n = 86400$  s), στο διάστημα  $[0, n]$  πρέπει να διαμορφωθεί μια συνεχής συνάρτηση παροχής  $q_t(\tau)$ , τέτοια ώστε:

$$\int_{\tau=0}^n q_t(\tau) d\tau = V_t \quad (7.1)$$

Επίσης για να επιτευχθεί η συνέχεια της συνάρτησης αυτής πρέπει να ικανοποιείται η εξής σχέση:

$$q_t(0) = q_{t-1}(n) \quad (7.2)$$

Μέσω της 1<sup>ης</sup> εξίσωσης εξασφαλίζεται ότι σε κάθε διάστημα  $[0, n]$ , η συνολική επιμεριζόμενη ημερήσια παροχή θα αποδίδει όγκο, ο οποίος θα ισούται με τον όγκο της ημερήσιας εισροής του επεισοδίου (διατήρηση ημερήσιου όγκου). Αντίθετα με την 2<sup>η</sup> εξίσωση επιτυγχάνεται η συνέχεια της παροχής από την μία ημέρα  $t$  στην επόμενη.

Άρα για κάθε ημέρα  $t$  του κάθε επεισοδίου υπερχειλίσης θα πρέπει να παραχθούν 24 τιμές για την ωριαία παροχή  $q_t(\tau)$  με  $\tau = 3600, 7200, \dots, 86400$  s.

Αρχικά για την εύρεση της συνάρτησης παροχής χρειάζεται η εκτίμηση της αρχικής και τελικής παροχής κάθε ημέρας  $t$ , ως μέσος όρος παροχών με βάση τους παρακάτω τύπους:

$$q_t(0) = \frac{V_{t-1} + V_t}{2n} \quad (7.3)$$

$$q_t(n) = \frac{V_t + V_{t+1}}{2n} \quad (7.4)$$

Μέσω αυτών των εξισώσεων θεωρείται ότι η αρχική παροχή της ημέρας (για  $\tau = 0$  s) προκύπτει απ' το ημίθροισμα της τρέχουσας παροχής με αυτή της προηγούμενης ημέρας, ενώ η τελική παροχή της ημέρας (για  $\tau = 86400$  s) προκύπτει από το ημίθροισμα της τρέχουσας παροχής, με αυτή της επόμενης ημέρας.

Για την έναρξη της υπολογιστικής διαδικασίας χρειάζεται η διευκρίνιση του τρόπου υπολογισμού της ωριαίας παροχής σε κάθε βήμα  $t$  του μοντέλου συγκρίνοντας της τιμές  $q_t(0)$ ,  $q_t(n)$  και  $Q_t$ . Έτσι οδηγούμαστε στις παρακάτω τρεις περιπτώσεις:



### Περίπτωση 1:

Αν  $q_t(0) = q_t(n)$ , δηλαδή οι χρονικά ακραίες τιμές του ημερήσιου βήματος είναι ίσες, τότε η παροχή στην διάρκεια της ημέρας θεωρείται σταθερή, οπότε ισχύει ότι:

$$q_t(0) = q_t(\tau) \quad (7.5)$$

### Περίπτωση 2:

Αν  $q_t(0) < Q_t < q_t(n)$ , δηλαδή η μέση ημερήσια παροχή βρίσκεται ανάμεσα στις χρονικά ακραίες τιμές του ημερήσιου βήματος, τότε διαμορφώνεται μια συνάρτηση υπολογισμού της ημερήσιας παροχής που περιγράφει τον ανοδικό κλάδο (Ευστρατιάδης κ.ά., 2014) :

$$q_t(\tau) = q_t(0) + ak^b \quad (7.6)$$

όπου  $a, b$  παράμετροι που υπολογίζονται από την αρχή διατήρησης ημερήσιου όγκου και την γνωστή τιμή παροχής στο πέρας του κάθε χρονικού βήματος  $t$ ,  $q_t(\tau)$ :

$$b = \frac{q_t(n) - q_t(0)}{Q_t - q_t(0)} - 1 \quad (7.7)$$

$$a = \frac{q_t(n) - q_t(0)}{n^b} \quad (7.8)$$

Για μεγάλες τιμές του  $b$  ( $> 10$ ), ο συντελεστής  $a$  γίνεται πολύ μικρός, οπότε για λόγους ευστάθειας του μοντέλου χρησιμοποιείται η προσέγγιση της προηγούμενης περίπτωσης.

$$q_t(0) = q_t(\tau) \quad (7.9)$$

### Περίπτωση 3:

Σε κάθε άλλη περίπτωση, δηλαδή όταν εμφανίζεται πτωτικός κλάδος, επιλέχθηκε δημιουργία μοντέλου εκθετικής συνάρτησης της μορφής:


$$q_t(\tau) = q_1 e^{-k\tau} \quad (7.10)$$

Αν  $t = 1$  επιλέγεται η  $q_t(0)$ , διαφορετικά θεωρείται η τιμή της ωριαίας παροχής που θα προέκυπτε στο προηγούμενο βήμα για την 1<sup>η</sup> ώρα της επόμενης ημέρας, ώστε να εγγυάται η συνέχεια του μοντέλου.

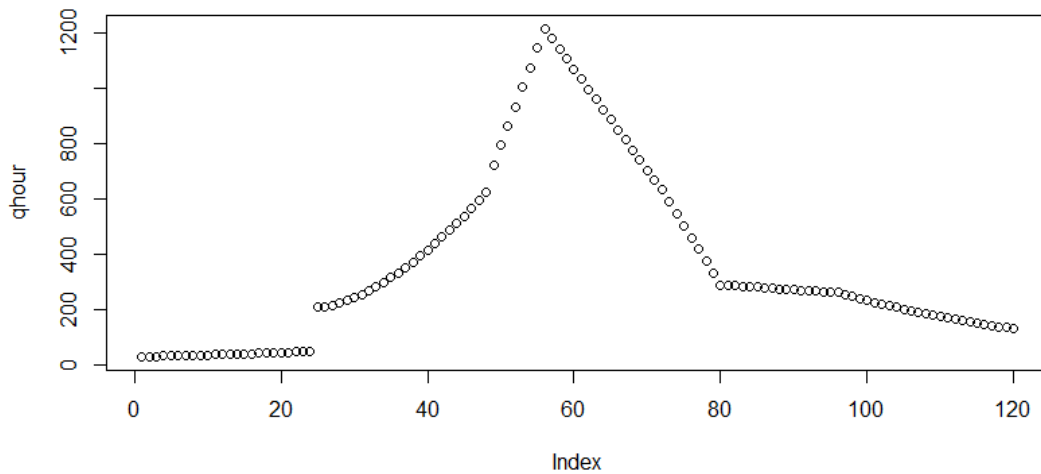
Για να υπολογιστεί η τιμή της παραμέτρου  $k$  πρέπει η μέση ημερήσια τιμή των παροχών (από  $\tau = 0$  s έως  $\tau = 86400$  s) να ισούται με την  $Q_t$ , δηλαδή:

$$\text{mean}(q_t(\tau)) = Q_t \quad (7.11)$$

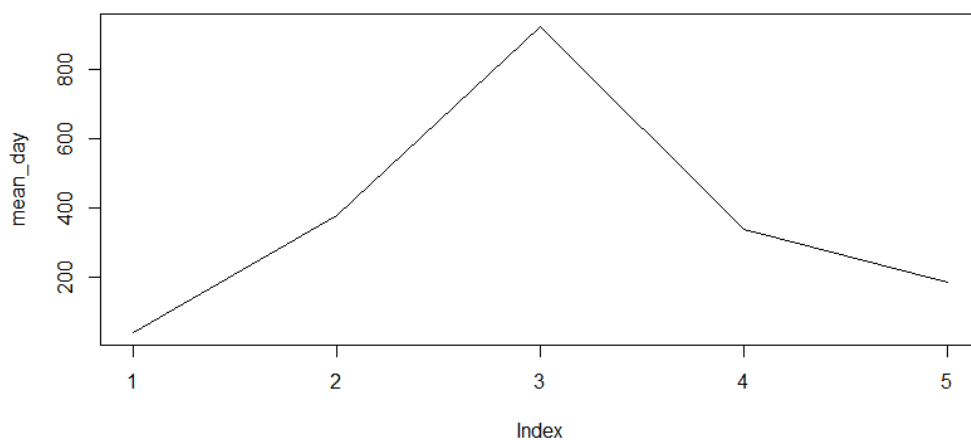
Εφαρμόζοντας την παραπάνω μεθοδολογία επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών στον υπό εξέταση ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 3**) προκύπτουν οι παρακάτω καμπύλες ωριαίων παροχών για δύο τυχαία επεισόδια εισροών:

 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
39	377	926	337	186




**Εικόνα 7.1:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

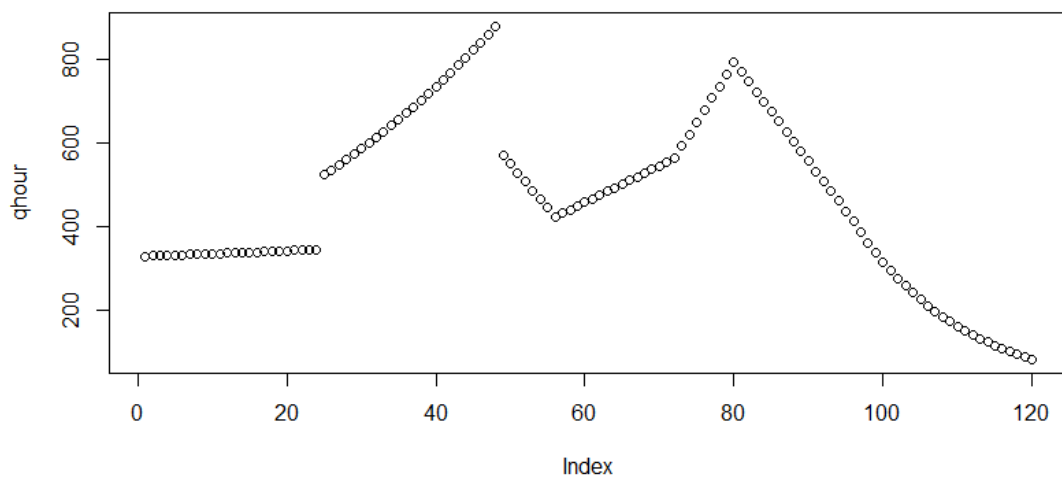


**Εικόνα 7.2:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

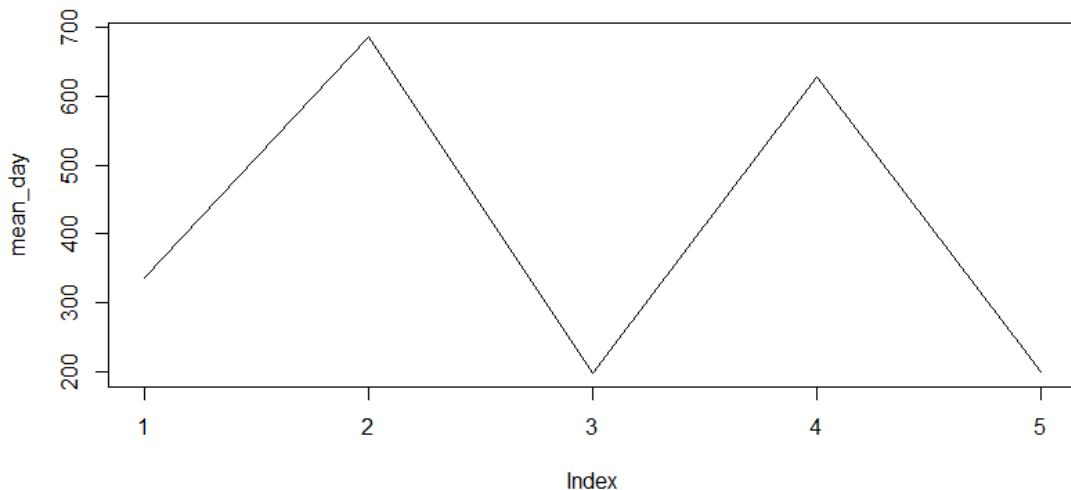
Για παροχή αιχμής ημερήσιου επεισοδίου  $Q_{peak\_daily} = 926 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.2), εφαρμόζοντας την μεθοδολογία επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών που περιγράφηκε παρατηρείται μέγιστη ωριαία αιχμή  $Q_{peak\_daily} = 1210 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.1).

 2° Επεισόδιο:

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
337	686	498	628	199



**Εικόνα 7.3:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (2° επεισόδιο)



**Εικόνα 7.4:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (2° επεισόδιο)

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου ένα επεισόδιο με δύο κορυφές αιχμής  $Q_{peak\_daily1} = 686 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_daily2} = 628 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.4), διαπιστώνονται ωριαίες αιχμές  $Q_{peak\_hourly1} = 890 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_hourly2} = 800 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.3).

Παρατηρήθηκε ότι με την χρήση του εν λόγω μοντέλου, υπολογίζονται με απόλυτη ακρίβεια οι παράμετροι λειτουργίας του και καλύπτεται πλήρως το κομμάτι της μαθηματικής ακρίβειας των εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Παράλληλα είναι φανερό από τα διαγράμματα, ότι μέσα στις πέντε μέρες του επεισοδίου, δημιουργείται παροχή ωριαίας αιχμής μεγαλύτερη από την μέση, γεγονός που θα είχαμε αγνοήσει σε περίπτωση μεγαλύτερη χρονικής κλίμακας.

Παρ' όλα αυτά η μορφή του ωριαίου μοντέλου παροχών, δεν πλησιάζει ικανοποιητικά την μορφή ενός υδρογραφήματος, γι' αυτό και συνεχίστηκε η προσπάθεια για την δημιουργία ενός μαθηματικά πιστού και ταυτόχρονα υδρολογικά συνεπούς μοντέλου ωριαίων παροχών.

### 7.3 Επιμερισμός με χρήση εκθετικής συνάρτησης

Θέτοντας ως εναρκτήριο λίθο το προηγούμενο μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, με τις 3 περιπτώσεις των κλάδων, κρίθηκε πως η εκθετική μορφή που παρουσίαζε ο καθοδικός κλάδος μπορεί να πλησιάσει αρκετά την πραγματική μορφή ενός υδρογραφήματος. Γι' αυτό διατηρήθηκε η εκθετική μορφή και ταυτόχρονα συνέχισαν να υφίστανται όλες οι αρχικές παραδοχές των μεγεθών εισόδου, καθώς και οι εξισώσεις διατήρησης του ημερήσιου όγκου και συνέχειας των παροχών.

Κατ' αυτόν τον τρόπο σχεδιάστηκε ένα νέο βελτιωμένο μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών με χρήση αποκλειστικά της εκθετικής συνάρτησης:

$$q_t(\tau) = q_1 e^{-k\tau} \quad (7.12)$$

όπου  $q_1$ , αν  $t = 1$  επιλέγεται η  $q_t(0)$  όπως αυτή υπολογίστηκε στο προηγούμενο μοντέλο, διαφορετικά θεωρείται η τιμή της ωριαίας παροχής που θα προέκυπτε στο προηγούμενο βήμα για την 25<sup>η</sup> ώρα της ημέρας (δηλαδή την  $q_{t-1}(90000)$ ), αν υπήρχε, ώστε να εγγυάται η συνέχεια του μοντέλου:

$$q_1 = \begin{cases} q_t(0), & t = 1 \\ q_{t-1}(90000), & t > 1 \end{cases} \quad (7.13)$$


Για να υπολογιστεί η τιμή της παραμέτρου  $k$  πρέπει η μέση ημερήσια τιμή των παροχών (από  $\tau = 0 \text{ s}$  έως  $\tau = 86400 \text{ s}$ ) να ισούται με την  $Q_t$  σε κάθε χρονικό βήμα.

$$\text{mean}(q_t(\tau)) = Q_t \quad (7.14)$$

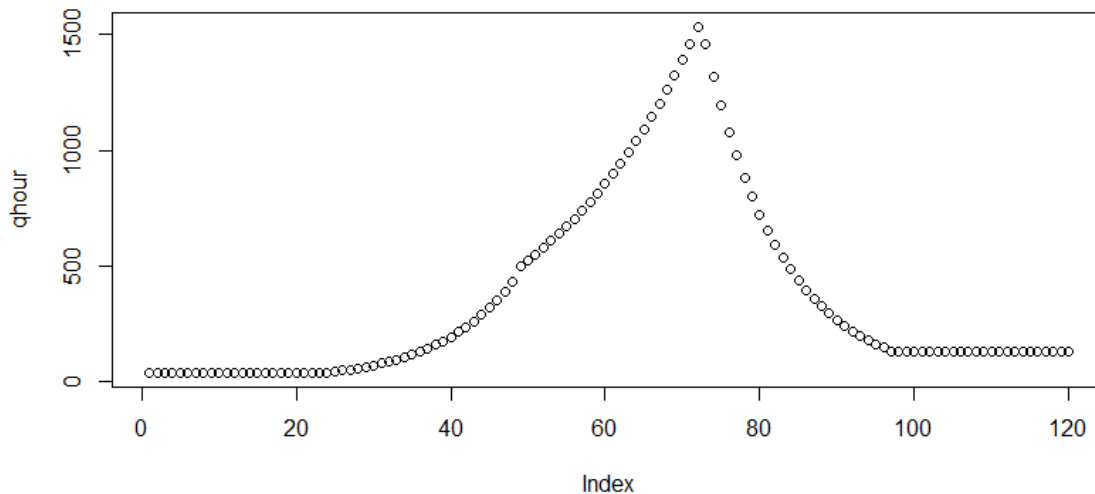
Σε αυτό το μοντέλο για να υπάρχει διαχωρισμός των κλάδων σε ανοδικό και καθοδικό χρειάζεται μόνο ένας έλεγχος της μορφής:

$$\text{Αν } Q_t < Q_{t+1} \text{ τότε: } k > 0 \text{ αλλιώς } k < 0 \quad (7.15)$$

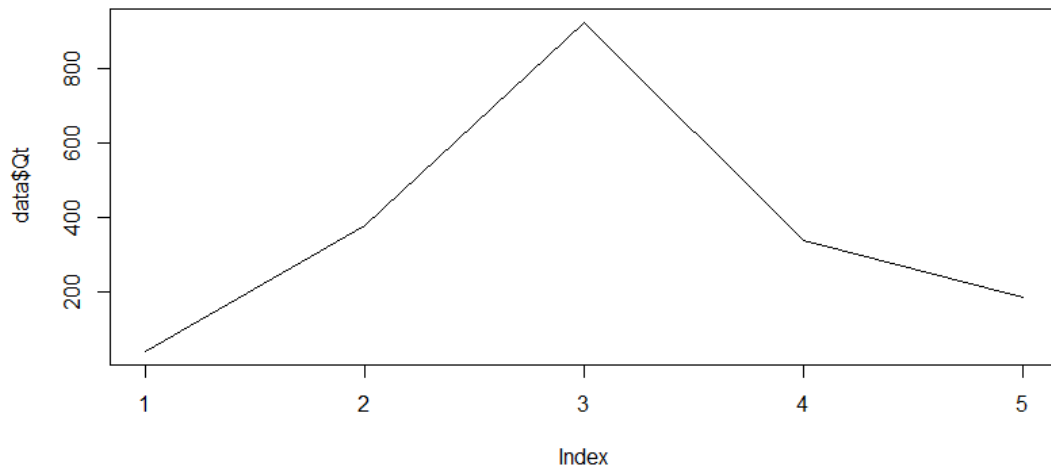
Εφαρμόζοντας την νέα μεθοδολογία επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών στον υπό εξέταση ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 3**) προκύπτουν οι παρακάτω καμπύλες ωριαίων παροχών για δύο τυχαία επεισόδια εισροών:

 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
39	377	926	337	186



**Εικόνα 7.5:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

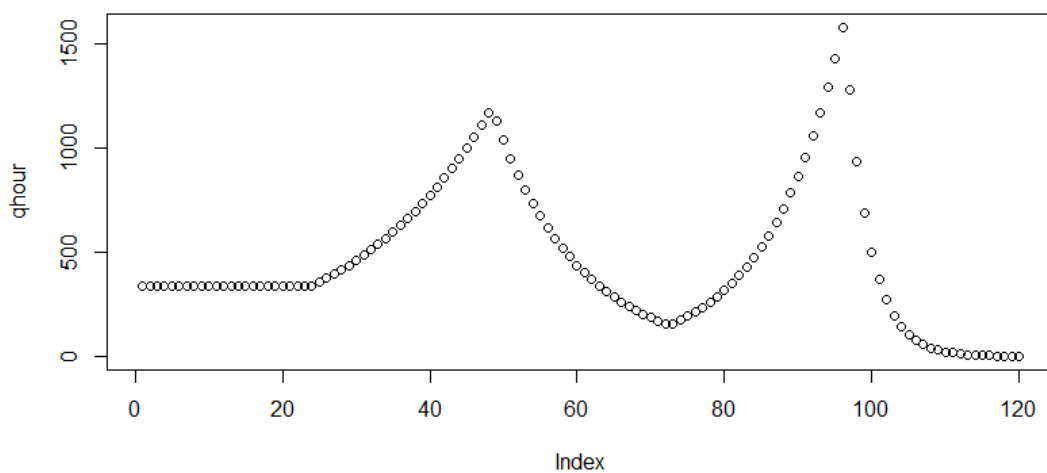


**Εικόνα 7.6:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

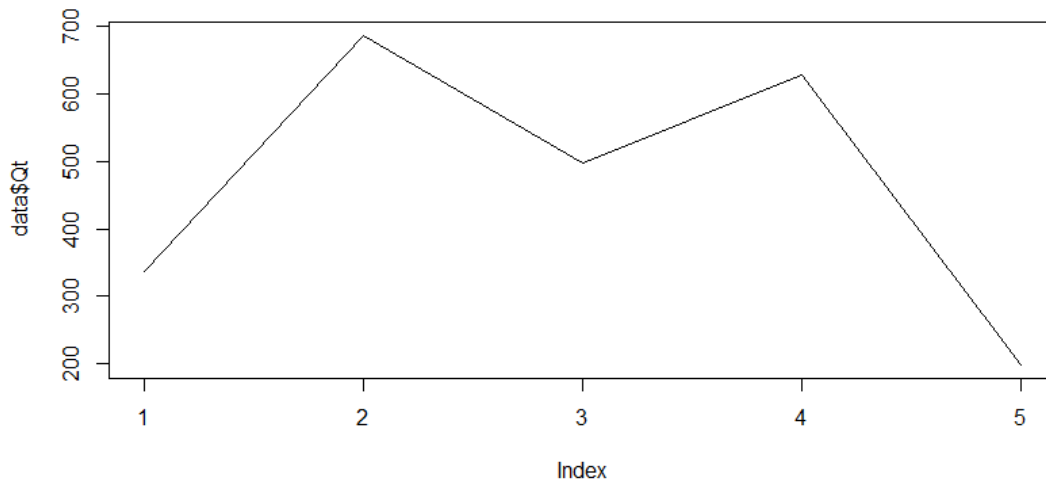
Για το συγκεκριμένο επεισόδιο διαπιστώνεται η δημιουργία μιας μέγιστης ωριαίας παροχής  $Q_{peak\_hourly} = 1530 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.5), με μέγιστη ημερήσια παροχή δεδομένων εισαγωγής  $Q_{peak\_hourly} = 925 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.6).

**2<sup>ο</sup> Επεισόδιο:**

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
337	686	498	628	199



**Εικόνα 7.7:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)



**Εικόνα 7.8:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου το επεισόδιο με τις δύο κορυφές αιχμής  $Q_{peak\_daily1} = 686 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_daily2} = 628 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.8), παρατηρείται συνέπεια του μοντέλου για την κάλυψη των δύο αυτών ακραίων τιμών των παροχών, με μέγιστες τιμές ωριαίου μοντέλου  $Q_{peak\_hourly1} = 1200 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_hourly2} = 1570 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.7).

Συνεπώς, η μορφή της ωριαίας καμπύλης επιβεβαιώνει την επιλογή της εκθετικής συνάρτησης ως προσεγγιστική λύση του προβλήματος. Φαίνεται πως με την χρήση του νέου μοντέλου επαληθεύονται οι αρχικές παραδοχές και οι εξισώσεις που οριοθετούν το υφιστάμενο πρόβλημα. Ταυτόχρονα επιτεύχθηκε η δημιουργία ενός υδρογραφήματος πιο ικανοποιητικής μορφής.

Μέσω της μεθοδολογίας που περιγράφηκε, το μοντέλο αυτό προσφέρει την δυνατότητα βελτιστοποίησης ανά ημερήσιο βήμα  $t$ , μειώνοντας την υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος. Με αυτή την θεώρηση εύκολα μπορούν να μετατραπούν περισσότερες τιμές δεδομένων ημερήσιας παροχής σε ωριαία.

Σε μια τέτοια προσπάθεια παρατηρήθηκε μια ευαισθησία του μοντέλου που αρχικά δεν είχε καταστεί αντιληπτή σε επίπεδο επεισοδίου, το οποίο αντιστοιχεί σε πέντε τιμές ημερήσιων παροχών. Πιο αναλυτικά, με σκοπό να καλυφθούν οι περιορισμοί που θέτουν οι αρχικές εξισώσεις διατήρησης όγκου και συνέχειας (7.1 και 7.2), δημιουργείται μια πολύ μεγάλη αιχμή. Ύστερα παρατηρείται μια πολύ απότομη πτώση, για να επιτευχθεί ο όγκος στόχου της ημέρας, χωρίς αυτό να επαληθεύει το φυσικό νόημα εμφάνισης του φαινομένου. Επίσης, σε περιπτώσεις χαμηλών επαναλαμβανόμενων εισροών η τιμή των παροχών μηδενίζει για μεγάλα χρονικά διαστήματα και πολλές φορές το μοντέλο αδυνατεί να συνεχίσει τους υπολογισμούς.

Συμπερασματικά, για να ξεπεραστούν οι δυσκολίες που προέκυψαν από το μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, με χρήση αποκλειστικά της εκθετικής συνάρτησης διαμορφώθηκε ένα νέο μοντέλο που περιγράφεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

## 7.4 Επιμερισμός με χρήση δύο παραμέτρων

Το μοντέλο υπολογισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, με χρήση δύο παραμέτρων δημιουργήθηκε για να περιορίσει τις αδυναμίες του προηγούμενου μοντέλου, το οποίο έκανε αποκλειστική χρήση της εκθετικής συνάρτησης. Η νέα ιδέα βασίστηκε στο γεγονός ότι δεν είναι γνωστό πότε χρονικά μέσα στην διάρκεια την ημέρας εμφανίζεται ο μεγάλος πλημμυρικός όγκος και αν υπάρχει ύφεση πριν ή μετά από αυτόν.

Μέχρι τώρα, αφού χρησιμοποιούταν μόνο μία παράμετρος προς βελτιστοποίηση, η  $k$ , δεν υπήρχε τρόπος να δημιουργούνται αιχμές σε κάποια ώρα της ημέρας. Σαν προεπιλογή θεωρούταν ότι η αιχμή εμφανίζεται πάντα στο τέλος ή στην αρχή της ημέρας, αν εμφανίζεται ανοδικός ή καθοδικός κλάδος αντίστοιχα, χωρίς να δίνεται η επιλογή διακύμανσης.

Έτσι, το νέο μοντέλο επιμερισμού των ημερήσιων παροχών διατηρεί όλες τις βασικές αρχές για την δημιουργία των εξισώσεων, με την διαφορά ότι πλέον σε κάθε ημέρα  $t$  χρειάζεται βελτιστοποίηση για τον υπολογισμό δύο παραμέτρων:  $Q_p$  και  $k_2$ .

Ακόμη, μία νέα μεταβλητή που εμφανίζεται, είναι ο χρόνος πραγματοποίησης της αιχμής ή αλλιώς χρόνος ανόδου,  $t_p$ , μέσω της οποίας εισάγεται η τυχαιότητα της εμφάνισης της παροχής αιχμής σε επίπεδο ημέρας:

- Βρισκόμενοι σε ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος, δηλαδή όταν  $Q_t < Q_{t-1}$ , τότε το  $t_p$  μπορεί να πάρει τιμές:

$$t_p = 54000 \text{ s (15η ώρα της ημέρας) έως } 72000 \text{ s (20η ώρα της ημέρας)}$$

- Αντίθετα, σε καθοδικό κλάδο, όταν δηλαδή  $Q_t < Q_{t+1}$ , το  $t_p$  μπορεί να πάρει τιμές:

$$t_p = 10800 \text{ s (3η ώρα της ημέρας) έως } 28800 \text{ s (8η ώρα της ημέρας)}$$

Οι περιορισμοί αυτοί για τα  $t_p$  επιλέχθηκαν με βάση το κριτήριο ανόδου ή καθόδου αντίστοιχα, με σκοπό να επιτρέπουν στις τιμές των παραμέτρων να κινούνται σε ένα λογικό πλαίσιο που θα ταιριάζει με την εξέλιξη του φυσικού προβλήματος. Η τιμή του  $t_p$  σε επίπεδο ημέρας παράγεται τυχαία, οπότε η όλη διαδικασία καθίσταται στοχαστική, έστω και όχι με την πλήρως αυστηρή έννοια του όρου.

Τηρώντας τις αλλαγές που μόλις αναφέρθηκαν, διαμορφώνεται μια νέα συνάρτηση υπολογισμού της ημερήσιας παροχής που περιγράφεται ως εξής:

- Αν  $\tau \leq t_p$ , τότε επιλέχθηκε η χρήση γραμμικού μοντέλου:

$$q_t(\tau) = q_1 + \frac{Q_p - q_1}{t_p} \tau \quad (7.16)$$

$$q_1 = \begin{cases} Q_t - 10, & t = 1 \\ Q_{t-1}, & t \neq 1 \end{cases} \quad (7.17)$$

όπου  $Q_p$  η παράμετρος που αντιστοιχεί στην παροχή αιχμής της ημέρας  $t$ , και  $t_p$  η ώρα που εμφανίζεται αυτή η αιχμή.



- Η τιμή της  $Q_p$  περιορίστηκε μέσα σε ένα λογικό εύρος τιμών για διευκόλυνση της υπολογιστικής διαδικασίας, της μορφής:

$$Q_t \leq Q_p \leq 5Q_t \quad (7.18)$$

Οι περιορισμοί αυτοί επιλέχθηκαν με την λογική πως δεν πρόκειται η αιχμή της ημέρας να βρίσκεται ποτέ κάτω από την μέση ημερήσια παροχή, αλλά ούτε να είναι πενταπλάσια της μέσης, αφού σε εκείνη την περίπτωση θα ήταν υπερβολικά μεγάλη για το επεισόδιο εισόδου.

- Αν  $\tau > t_p$ , τότε επιλέχθηκε η χρήση εκθετικού μοντέλου:

$$q_t(\tau) = q_t(t_p)e^{-k_2(\tau-t_p)} \quad (7.19)$$

όπου  $k_2$  η παράμετρος της εκθετικής πτώσης.

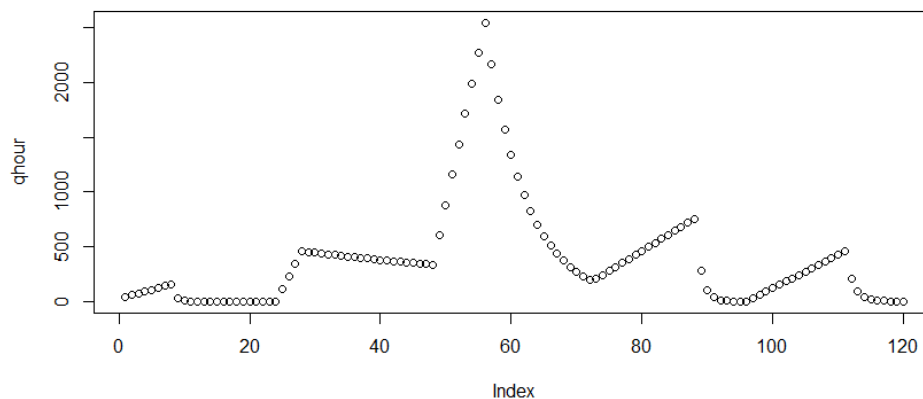
Για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου  $Q_p$  και  $k_2$ , πρέπει η μέση ημερήσια τιμή των παροχών (από  $\tau = 0$  s έως  $\tau = 86400$  s) να ισούται με την  $Q_t$  σε κάθε χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω ενός συνδυασμένου μοντέλου βελτιστοποίησης σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

$$mean(q_t(\tau)) = Q_t \quad (7.20)$$

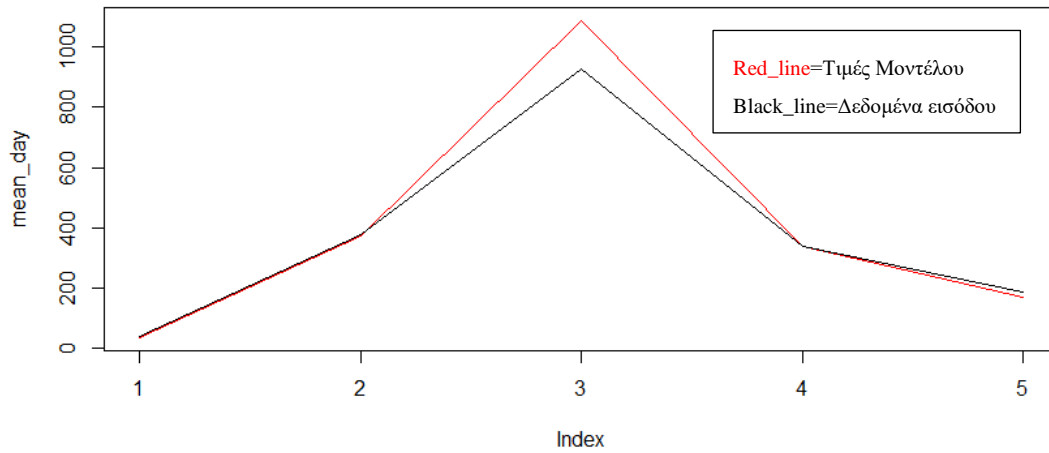
Με εφαρμογή της νέας μεθοδολογίας επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών στον υπό εξέταση ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 4**), προκύπτουν οι παρακάτω καμπύλες ωριαίων παροχών για δύο τυχαία επεισόδια εισροών:

 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
39	377	926	337	186




**Εικόνα 7.9:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

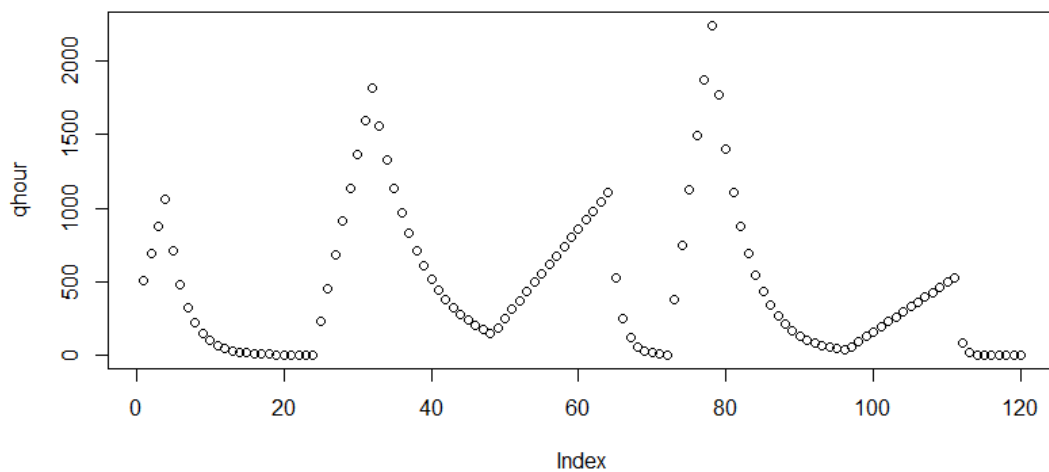


**Εικόνα 7.10:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

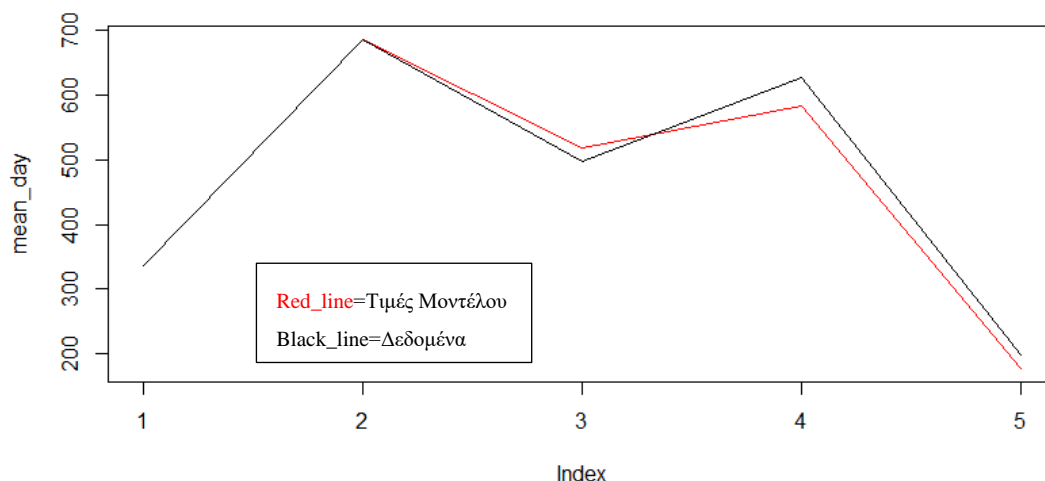
Για το παραπάνω επεισόδιο, καταγράφηκε η δημιουργία μιας μέγιστης ωριαίας παροχής  $Q_{peak\_hourly} = 2560 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.9), με μέγιστη ημερήσια παροχή δεδομένων εισαγωγής  $Q_{peak\_daily} = 926 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.10).

 2<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
337	686	498	628	199



**Εικόνα 7.11:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)



**Εικόνα 7.12:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)

Τα δεδομένα εισροής εμφανίζουν τις αιχμές  $Q_{peak\_daily1} = 686 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_daily2} = 628 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.12), ενώ οι αιχμές που προκύπτουν από το μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών είναι  $Q_{peak\_hourly1} = 1790 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_hourly2} = 2230 \text{ m}^3/\text{s}$  (Εικόνα 7.11).

Παρατηρήθηκε ότι με την χρήση του μοντέλου δύο παραμέτρων, τις περισσότερες φορές εμφανίζονται κάποιες αποκλείσεις στην διατήρηση του ημερήσιου όγκου. Όπως φαίνεται στα διαγράμματα των μέσων ημερήσιων παροχών (Εικόνα 7.10 και Εικόνα 7.12), το μοντέλο βελτιστοποίησης δεν μπορεί να προσεγγίσει τιμές των παραμέτρων για να επαληθεύσει την στοχική συνάρτηση με απόλυτη ακρίβεια, γεγονός που αποδίδεται στην ύπαρξη τυχαιότητας μέσα από την εισαγωγή του  $t_p$ .

Συγκρίνοντας τα δύο τελευταία μοντέλα, ήτοι αυτό της εξ ολοκλήρου εκθετικής συνάρτησης και αυτό που κάνει χρήση δύο παραμέτρων, οι μέγιστες ωριαίες τιμές ( $Q_{peak\_hourly}$ ) που παρατηρήθηκαν στο τρέχον μοντέλο, είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του προηγούμενου, για τα ίδια δεδομένα εισόδου. Επίσης, παρόλο που περιορίστηκε η ημερήσια αιχμή σε ένα λογικό εύρος τιμών, για να μην δημιουργούνται έντονες αυξομειώσεις παροχών στην διάρκεια της ημέρας, φαίνεται ακόμα πιο έντονα η απότομη μεταβολή τους.

Είναι γεγονός πως, συγκρίνοντας με τις προηγούμενες μεθόδους, επιτεύχθηκε μια μορφή υδρογραφήματος πιο ρεαλιστική. Παράλληλα, αξίζει να σημειωθεί πως η ίδια η φύση του φαινομένου εισάγει μεγάλες αβεβαιότητες και δυσκολίες στον επιμερισμό των παροχών. Με άλλα λόγια μια αυστηρή μαθηματική προσέγγιση δεν θα ήταν δόκιμη ως λύση για την περιγραφή του προβλήματος.

Θεωρήθηκε, λοιπόν, πως με ορισμένες τροποποιήσεις υπάρχει δυνατότητα προσομοίωσης των ημερήσιων παροχών ακόμα πιο πιστά, όχι τόσο σε μαθηματική ακρίβεια, αλλά ως προς τη μορφή του φυσικού φαινομένου. Κατά συνέπεια συνεχίστηκε η προσπάθεια

δημιουργίας ενός ακόμα πιο αληθοφανούς μοντέλου επιμερισμού των παροχών, όπως περιγράφεται στο προσεχές υποκεφάλαιο.

## 7.5 Τελικό μοντέλο επιμερισμού μέσω ημερήσιων παροχών σε ωριαίες

Στοχεύοντας σε μια μεθοδολογία επιμερισμού των μέσω ημερήσιων παροχών, η οποία θα προσφέρει μια ρεαλιστική απεικόνιση της πραγματικότητας, δημιουργήθηκε ένα βελτιωμένο μοντέλο επιμερισμού των παροχών. Σε αυτό, τα μειονεκτήματα των προηγούμενων μεθόδων εξαλείφονται και προσεγγίζεται μια λύση, μέσω της οποίας επιτυγχάνεται ικανοποιητική μαθηματική συνέπεια και πιο συνετή οριοθέτηση των περιπτώσεων εμφάνισης των εισροών.

Το νέο μοντέλο επιτρέπει τον επιμερισμό ακριβώς πέντε ημερήσιων δεδομένων παροχής, τα οποία κρίθηκε ότι επαρκούν για την καταγραφή του πλημμυρικού επεισοδίου. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει πλέον την ευελιξία ταυτόχρονης βελτιστοποίησης όλων των όγκων εισροής και όχι ανά ημερήσιο βήμα. Σίγουρα αυξάνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα, όμως ορίζεται μια καλύτερη στοχική συνάρτηση.

Έστω  $t$  η ημέρα του επεισοδίου,  $Q_t$  η εισροή της ημέρας,  $V_t$  ο όγκος εισροής της ημέρας και δέκα παράμετροι προς βελτιστοποίηση που ορίζονται ως εξής:

- Οι πρώτες 5 παράμετροι είναι οι  $k_t$ , με  $t$  από 1 έως 5 και δηλώνουν την σταθερά της εκθετικής πτώσης.
- Οι άλλες 5 παράμετροι είναι οι  $Q_{p_t}$ , με  $t$  από 1 έως 5 και δηλώνουν την παροχή αιχμής της κάθε ημέρας του επεισοδίου.

Οι ώρες εμφάνισης των αιχμών ανά ημέρα, δηλαδή τα  $t_{p_t}$ , επιλέγονται και σε αυτό το μοντέλο τυχαματικά, με την διαφορά ότι πλέον οι τιμές περιορίζονται σύμφωνα με την μορφή των δεδομένων εισροής, ως εξής:

- Αν την ημέρα  $t$  η παροχή έχει την τιμή  $Q_t$  και την επόμενη ημέρα  $t + 1$  έρθει μικρότερη παροχή τότε βρισκόμαστε σε καθοδικό κλάδο του υδρογραφήματος και το  $t_{p_t}$  ορίζεται:

$$t_{p_t} = 4 \text{ έως } 6, \text{ αν } Q_t > Q_{t+1}$$

- Αν την ημέρα  $t$  η παροχή έχει την τιμή  $Q_t$  και την επόμενη ημέρα  $t + 1$  έρθει μεγαλύτερη παροχή κατά  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , τότε βρισκόμαστε στο ανοδικό κλάδο του υδρογραφήματος με πολύ απότομη αύξηση της παροχής, οπότε το  $t_{p_t}$  ορίζεται:

$$t_{p_t} = 22 \text{ έως } 24, \text{ αν } (Q_t + 500) < Q_{t+1}$$

- Σε κάθε άλλη περίπτωση το  $t_{p_t}$  ορίζεται:

$$t_{p_t} = 15 \text{ έως } 20$$

Ο παραπάνω διαχωρισμός κρίθηκε απαραίτητος για την ομαλή εξέλιξη του υδρογραφήματος, συγκρίνοντας την τιμή παροχής της ημέρας με αυτή της επόμενης με

σκοπό το μοντέλο να επιτρέπει την φυσιολογική εξέλιξη του φαινομένου και να μην επιλέγει τιμές εξ ολοκλήρου τυχαία, που δεν θα είχαν φυσικό νόημα.

Το βελτιωμένο μοντέλο επιμερισμού των ημερήσιων παροχών έχει ως εξής:

$$q_t(\tau) = \begin{cases} q_1 + \frac{Q_{pt} - q_1}{t_{pt}} \tau, \tau \leq t_{pt} \\ q_t(t_{pt}) e^{-k_t(\tau - t_{pt})}, \tau > t_{pt} \end{cases} \quad (7.21)$$

όπου η  $q_1$  υπολογίζεται όπως στο **υποκεφάλαιο 4.2**

$$q_1 = \begin{cases} q_t(0), t = 1 \\ q_{t-1}(90000), t > 1 \end{cases} \quad (7.22)$$

Ακόμη ορίζεται μια συνάρτηση σφάλματος για κάθε ημέρα  $t$  της μορφής:

$$pen_t(\tau) = \begin{cases} (q_t(\tau) - \frac{Q_{t+1}}{2})^2, \tau \leq t_{pt} \\ 0, \tau > t_{pt} \end{cases} \quad (7.23)$$

$$penalty_t = \sum_{\tau=3600}^{86400} pen_t(\tau) \quad (7.24)$$


Το υδρογράφημα δεν πρέπει να παρουσιάζει απότομες πτώσεις στους ανοδικούς κλάδους, ανεξάρτητα της ύπαρξης αιχμής μέσα στην ημέρα. Έτσι, ορίζοντας την συνάρτηση σφάλματος το μοντέλο αναγκάζεται, σε λογικό βαθμό, να περιορίσει τις λύσεις του σε τιμές παροχών που δεν θα πέφτουν κάτω από το μισό της παροχής της επόμενης ημέρας. Προφανώς στον καθοδικό κλάδο ένα τέτοιο σφάλμα δεν θα είχε νόημα ύπαρξης αφού χρειάζεται η εμφάνιση της πτώσης, γι' αυτό και μηδενίζεται.

Για τον υπολογισμό των δέκα παραμέτρων του μοντέλου  $Q_{pt}$  και  $k_t$ , πρέπει η μέση ημερήσια τιμή των παροχών (από  $\tau = 0$  s έως  $\tau = 86400$  s) να ισούται με την  $Q_t$  σε κάθε χρονικό βήμα ταυτόχρονα και για τις 5 ημέρες του επεισοδίου. Ο υπολογισμός αυτός επιτυγχάνεται μέσω ενός κατάλληλου αλγορίθμου μη γραμμικής βελτιστοποίησης, ήτοι του εξελικτικού αλγορίθμου ανόπτησης-απλόκου (Efstratiadis and Koutsoyiannis, 2002), που είναι διαθέσιμος και σε προγραμματιστικό περιβάλλον R:

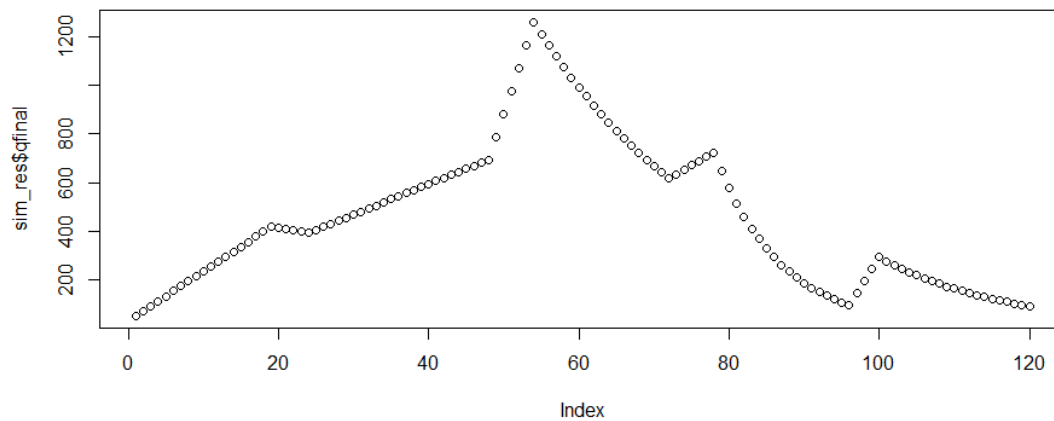
$$error_t = (mean(q_t(\tau) - Q_t))^2 \quad (7.25)$$

$$f = \sum_{t=1}^5 (error_t + penalty_t) = 0 \quad (7.26)$$

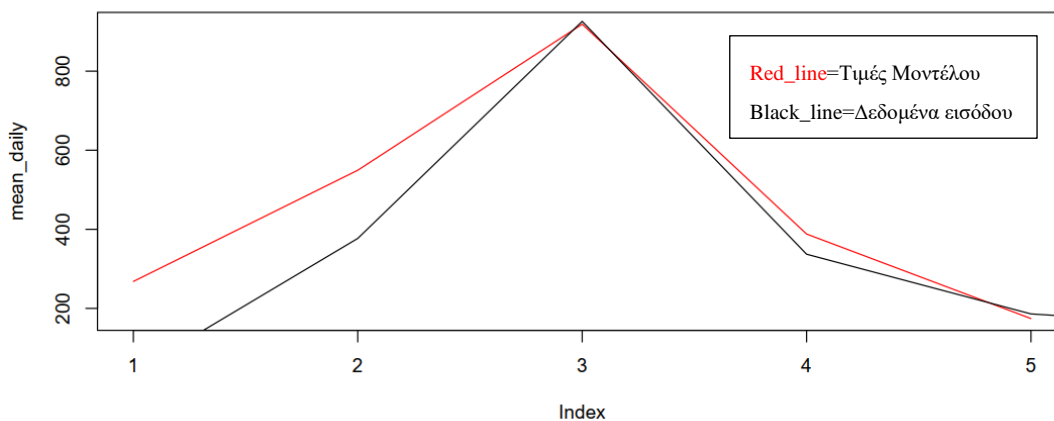
Με εφαρμογή της βελτιωμένης μεθοδολογίας επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών στον υπό εξέταση ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 3**) προκύπτουν οι παρακάτω καμπύλες ωριαίων παροχών για δύο τυχαία επεισόδια εισροών:

 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
39	377	926	337	186



**Εικόνα 7.13:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)



**Εικόνα 7.14:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (1<sup>ο</sup> επεισόδιο)

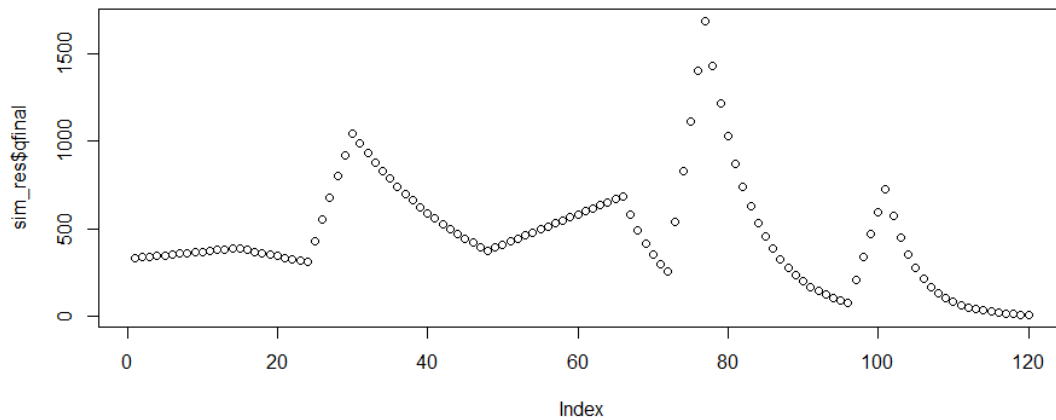
Για το παραπάνω επεισόδιο, καταγράφηκε η δημιουργία μιας μέγιστης ωριαίας παροχής  $Q_{peak\_hourly} = 1260 \text{ m}^3/\text{s}$  (**Εικόνα 7.13**), με μέγιστη ημερήσια παροχή δεδομένων εισαγωγής  $Q_{peak\_daily} = 926 \text{ m}^3/\text{s}$  (**Εικόνα 7.14**).

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 7.14** φαίνεται μια διαφοροποίηση της μέσης τιμής στην 1<sup>η</sup> μέρα λειτουργίας του μοντέλου από την πραγματική. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μεγάλη αύξηση της παροχής (από  $Q_1 = 39 \text{ m}^3/\text{s}$  σε  $Q_2 = 377 \text{ m}^3/\text{s}$ ) και την δημιουργία μιας συνάρτησης ποινής (penalty), αφού αναγκαστικά ο επιμερισμός των παροχών ξεκινάει κάτω από την μέση τιμή της επόμενης ημέρας. Όμως η παροχή αιχμής της 3<sup>ης</sup> ημέρας και όλος ο

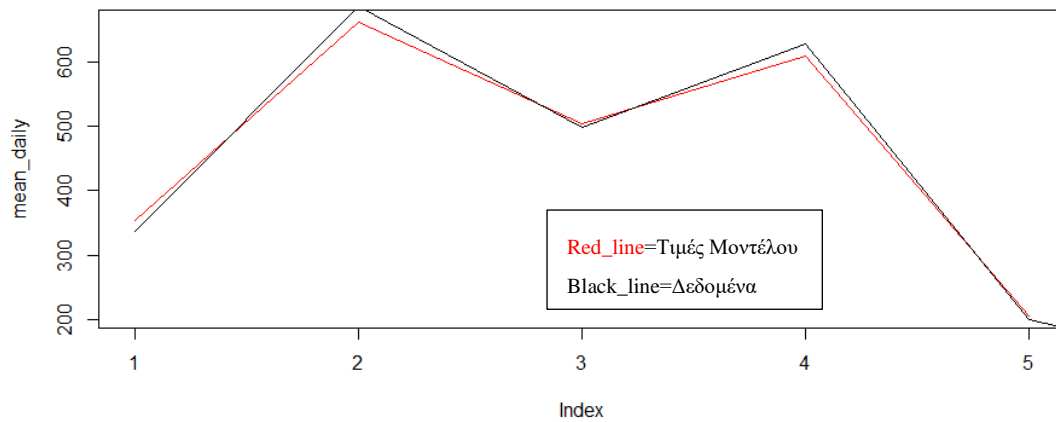
πτωτικός κλάδος ακολουθεί πιστά την μέση ημερήσια τιμή, που αυτό αποτελεί και το ζητούμενο μας.

**2<sup>ο</sup> Επεισόδιο:**

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
337	686	498	628	199



**Εικόνα 7.15:** Διάγραμμα ωριαίας παροχής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)



**Εικόνα 7.16:** Διάγραμμα μέσων ημερήσιων παροχών - δεδομένα εισροής (2<sup>ο</sup> επεισόδιο)

Τα δεδομένα εισροής εμφανίζουν τις αιχμές  $Q_{peak\_daily1} = 686 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_daily2} = 628 \text{ m}^3/\text{s}$  (**Εικόνα 7.16**), ενώ οι αιχμές που προκύπτουν από το μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών είναι  $Q_{peak\_hourly1} = 1050 \text{ m}^3/\text{s}$  και  $Q_{peak\_hourly} = 1630 \text{ m}^3/\text{s}$  (**Εικόνα 7.15**).

Σε αυτό το επεισόδιο παρατηρείται ακόμα πιο πιστή διατήρηση των χαρακτηριστικών της ημερήσιας εισροής (**Εικόνα 7.15**), επειδή οι τιμές των εισροών ανά ημέρα έχουν μικρότερο εύρος διακύμανσης μεταξύ τους.

Συμπερασματικά, με την χρήση του τελικού μοντέλου επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών, επιτυγχάνεται η βέλτιστη δυνατή μορφή των ωριαίων υδρογραφημάτων. Ταυτόχρονα, η μαθηματική ακρίβεια είναι απολύτως ικανοποιητική για την περιγραφή ενός τόσο αβέβαιου ζητουμένου και οι εξισώσεις διατήρησης όγκου και συνέχειας μέσα από τις δεσμεύσεις που τέθηκαν, πλέον πληρούνται. Συνεπώς, το μοντέλο που παρουσιάστηκε είναι κατάλληλο για την μετατροπή των παροχών ημερήσιας κλίμακας σε ωριαία (ιστορικών και συνθηκών), που με τη σειρά τους αποτελούν τα αναγκαία δεδομένα εισόδου της διαδικασίας διόδευσης των πλημμυρικών επεισοδίων, το χρονικό βήμα της οποίας είναι ωριαίο. Η εν λόγω διαδικασία περιγράφεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί.



## 8 Διαχείριση και διόδευση πλημμυρικού επεισοδίου

---

### 8.1 Σκοπός

Το φράγμα συνιστά ένα εμπόδιο της φυσικής ροής του ποταμού και ως επακόλουθο της ανέγερσής του, είναι η δημιουργία ενός ταμιευτήρα στα ανάντη αυτού. Η κατασκευή ενός φράγματος έχει πολλαπλή σκοπιμότητα: ύδρευσης, άρδευσης, παραγωγής ενέργειας, αλλά και αντιπλημμυρικής προστασίας. Συνεπώς το φράγμα συμβάλλει στην ανάσχεση της πλημμύρας. Όμως σε περίπτωση μεγάλου όγκου εισροών, των οποίων ο ταμιευτήρας δεν παρέχει πλέον την δυνατότητα αποθήκευσης, οφείλεται να υπάρχει μία δικλείδα ασφαλείας για προστασία του έργου και ομαλή προσαγωγή του πλημμυρικού φαινομένου στο κατάντη υδατόρευμα.

Η διόδευση των πλημμυρών γίνεται μέσω του υπερχειλιστή. Τα περισσότερα υδροηλεκτρικά φράγματα έχουν υπερχειλιστές με θυροφράγματα. Το βασικό πλεονέκτημα χρήσης των θυροφραγμάτων, σε σχέση με μια ελεύθερη υπερχειλίση, σχετίζεται με την αύξηση του αποθηκευτικού όγκου, η οποία έχει ως συνέπεια την αύξηση του υδραυλικού φορτίου και τελικά την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας.

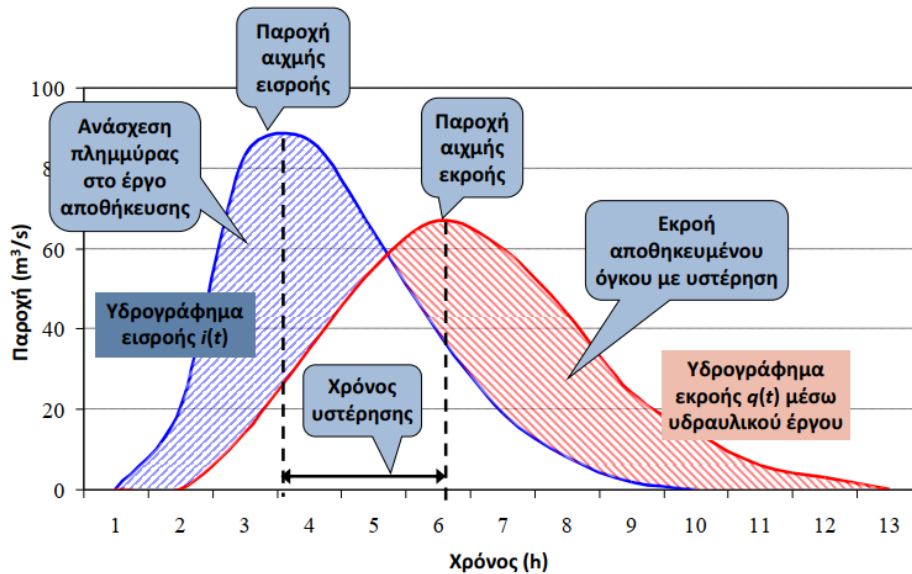
Μεγάλη σημασία για την μεγιστοποίηση της υδροηλεκτρικής παραγωγής ενέργειας, έχει η σωστή διαχείριση των θυροφραγμάτων, ώστε να απορρέει ο ελάχιστος δυνατός όγκος νερού από αυτά. Οι κανόνες λειτουργίας που τίθενται με σκοπό την ορθή χρήση των θυροφραγμάτων, επηρεάζουν την παροχή εξόδου και το ποσό ενέργειας που χάνεται εξαιτίας της υπερχειλίσης.

Συμπερασματικά, απώτερος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι η περιγραφή της διεργασίας της διόδευσης ενός πλημμυρικού επεισοδίου, αλλά και η ανάδειξη μιας σωστής διαχείρισης θυροφραγμάτων στον υπό μελέτη ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (Κεφάλαιο 3).

### 8.2 Διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων

Ένα βασικό πρόβλημα Υδραυλικού Μηχανικού, το οποίο απαντάται σε διάφορες εφαρμογές, συνιστά η διόδευση πλημμυρών. Στόχος αυτής της διεργασίας είναι η ανάσχεση του υδρογραφήματος εισροής και ο μετασχηματισμός της σε ένα νέο διοδευμένο υδρογράφημα. Έτσι, το υδρογράφημα εκροής, θα παρουσιάζει μια χαμηλότερη αιχμή από αυτό της εισροής, η οποία είναι χρονικά μετατοπισμένη προς τα δεξιά, γεγονός που επαληθεύει την εξομάλυνση που πλημμυρικού επεισοδίου (Εικόνα 8.1).

Σε έναν ταμιευτήρα που επιτρέπει ελεύθερη υπερχειλίση, το φαινόμενο οφείλεται στο γεγονός ότι η παροχή που μπορεί να διέλθει από τον υπερχειλιστή, είναι συνάρτηση του υδραυλικού φορτίου, που με τη σειρά του εξαρτάται από τη στάθμη του ταμιευτήρα. Στην αρχή του φαινομένου που η στάθμη είναι χαμηλά, η εκροή υπολείπεται της εισροής, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται προσωρινή ανάσχεση της πλημμύρας και άνοδος της στάθμης πάνω από τη στέψη του υπερχειλιστή.



**Εικόνα 8.1:** Διόδευση-ανάσχεση πλημμύρας μέσω συστήματος υδραυλικών έργων μεταφοράς και αποθήκευσης. (Ευστρατιάδης και Παπανικολάου, 2021)

Ως δεδομένα εισόδου της διεργασίας διόδευσης των πλημμυρών διαμέσου ενός ελεύθερου υπερχειλιστή ορίζονται:

- Το πλημμυρογράφημα εισροής  $I_t$
- Η στάθμη εισροής του πλημμυρικού φαινομένου  $z_0$
- Η εξίσωση στάθμης-αποθέματος του ταμιευτήρα  $S = S(z)$
- Η εξίσωση στάθμης-παροχής του υπερχειλιστή  $Q = Q(z)$
- Η παροχεταιυτικότητα των στροβίλων

Το μοντέλο διόδευσης παράγει τα εξής αποτελέσματα:

- Το πλημμυρογράφημα εκροής του υπερχειλιστή
- Τις στάθμες  $z$  του ταμιευτήρα, για κάθε χρονικό βήμα  $t$  του μοντέλου

Μια από τις βασικές εξισώσεις που διέπουν το πρόβλημα είναι η εξίσωση συνέχειας του υδατικού ισοζυγίου:

$$\frac{dS}{dt} + Q_t = I_t \quad (8.1)$$

όπου  $I_t$  η παροχή εισροής από την ανάντη λεκάνη απορροής,  $\frac{dS}{dt}$  ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος (ανάγκη χρονικής διακριτοποίησης) και  $Q_t$  η παροχή εκροής που προκύπτει από τον ταμιευτήρα.

Η εξίσωση συνέχειας (8.1) περιγράφεται υπό την μορφή διαφορών για το διάστημα  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  ως εξής:

$$S_{z_i} - S_{z_{i-1}} = \left[ \frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{Q_{z_{i-1}} + Q_{z_i}}{2} \right] \Delta t \quad (8.2)$$

Η υπολογιστική διαδικασία της διόδευσης στοχεύει στον υπολογισμό των τιμών  $S_i$  και  $Q_i$  της παραπάνω εξίσωσης (8.2).

- Υπολογίζεται μια τιμή του  $S_i$  από την σχέση 8.2
- Υπολογίζεται μια τιμή της στάθμης  $z_i$  από την σχέση στάθμης-αποθέματος
- Υπολογίζεται μια τιμή της παροχής  $Q_i$  από την σχέση στάθμης-παροχής
- Επαναλαμβάνονται τα τρία προηγούμενα βήματα μέχρι η αριθμητική μέθοδος να συγκλίνει

### 8.3 Υπολογιστικό σχήμα διόδευσης Πουρναρίου

Για την διόδευση πλημμυρικών επεισοδίων στο φράγμα Πουρναρίου I (Κεφάλαιο 3) ακολουθήθηκε η ακόλουθη υπολογιστική διαδικασία.

Έστω,  $t$  το ωριαίο χρονικό βήμα της διόδευσης,  $I_t$  οι τιμές των ημερήσιων παροχών που προέκυψαν από το βελτιωμένο μοντέλο επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών (Κεφάλαιο 7) και  $D_t$  ένας βασικός κανόνας λειτουργίας των στροβίλων. Σύμφωνα με αυτόν οι στροβίλοι ανοίγουν στην μέγιστη παροχευτικότητα τους,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , για 8 ώρες ημερησίως. Τα διαστήματα που ορίστηκαν, με βάση την τρέχουσα διαχειριστική πολιτική του ταμιευτήρα, είναι οι ώρες αιχμής 9: 00 – 12: 00 και 19: 00 – 22: 00.

Ως παράμετρος προς βελτιστοποίηση του μοντέλου ορίστηκε η  $z_t$ , δηλαδή η στάθμη του ταμιευτήρα σε κάθε χρονικό βήμα  $t$ .

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6 η καμπύλη στάθμης- αποθέματος για τον εν λόγω ταμιευτήρα περιγράφεται από την σχέση (Κουτσογιάννης, 2010):

$$S_t = 0,042(z_t - 40)^{2,23}, \text{ με } z \text{ σε } m \text{ και } S \text{ σε } hm^3 \quad (8.3)$$

Ως παροχή υπερχειλίσης χρησιμοποιήθηκε η σχέση που παρήχθη από την Ντεμίρογλου (2020), και βασίζεται σε αναλυτικούς υδραυλικούς υπολογισμούς:

$$Q_{sp_t} = 60,491h_t^{1,616} \quad (8.4)$$

$$\text{με } h_t = z_t - z_{c_t} \quad (8.5)$$

όπου  $h_t$  είναι το ύψος του νερού πάνω από την στέψη του υπερχειλιστή, το υψόμετρο της οποίας είναι  $z_{c_t} = 107,5 \text{ m}$ .

Ακόμη χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω βοηθητικές εξισώσεις:

$$I_{s_t} = \begin{cases} I_t - I_0, t = 1 \\ I_{t-1}, t > 1 \end{cases} \quad (8.6)$$

$$z_{s_t} = \begin{cases} z_0, t = 1 \\ z_{t-1}, t > 1 \end{cases} \quad (8.7)$$

$$S_{s_t} = 0,042(z_{s_t} - 40)^{2.23} \quad (8.8)$$

$$Q_{s_t} = \begin{cases} 0, t = 1 \\ Q_{t-1}, t > 1 \end{cases} \quad (8.9)$$

όπου η τιμή της παροχής  $Q_t$  περιγράφεται παρακάτω μέσω των σχέσεων (8.17), (8.19), (8.20), (8.21) ή (8.22), από τον κανόνα διαχείρισης των θυροφραγμάτων και συνεπώς από εκεί υπολογίζεται και η τιμή  $Q_{t-1}$ . Επίσης στις σχέσεις (8.6) και (8.7) ως  $I_0$  χρησιμοποιήθηκε η τιμή  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , η οποία επιλέχθηκε με σκοπό την εύρεση μιας τιμής εκκίνησης για τις παροχές και ως  $z_0$  θεωρήθηκε η στάθμη που αντιστοιχεί στην 1<sup>η</sup> τιμή της εισροής, όπως αυτή προκύπτει από την προσομοίωση λειτουργίας του ταμιευτήρα (Κεφάλαιο 6) για το εκάστοτε επεισόδιο.

Ως στοιχική συνάρτηση βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η (8.1), η οποία αντιστοιχεί στην εξίσωση συνέχειας. Για την επίτευξη αυτής έγινε ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος:

$$error = (DS_t - I_{n_t} + Q_{n_t})^2 \quad (8.10)$$

$$DS_t = S_t - S_{s_t} \quad (8.11)$$

$$I_{n_t} = \frac{I_t + I_{s_t}}{2} \frac{3600}{10^6} \quad (8.12)$$

$$Q_{n_t} = \frac{Q_t + Q_{s_t}}{2} \frac{3600}{10^6} \quad (8.13)$$

όπου το κλάσμα  $\frac{3600}{10^6}$  χρησιμοποιήθηκε με σκοπό την συνέπεια των μονάδων για να προκύπτει η παροχή σε  $\text{m}^3/\text{s}$ .

#### 8.4 Κανόνες λειτουργίας θυροφραγμάτων Πουρναρίου

Σε μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα απαιτείται ένας κατάλληλος χειρισμός των θυροφραγμάτων. Αυτός σχετίζεται με τις στάθμες του ταμιευτήρα, στις οποίες θα ανέρχεται το πλημμυρικό φαινόμενο κατά της φάση λειτουργίας του έργου.

Ως αρχική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε η λύση που προτάθηκε σε πρόσφατη ερευνητική εργασία των Ntemiroglou *et al.* (2023). Η μεθοδολογική πρότασή της βασίζεται στην βελτιστοποίηση και πολυκριτηριακή ανάλυση της λειτουργίας των θυροφραγμάτων

λαμβάνοντας υπόψιν κάποια μέτρα επίδοσης, της στάθμης και της δυναμικής ενέργειας που χάνεται κατά την υπερχειλίση. Ο κανόνας αυτός περιγράφεται παρακάτω:

- Αν  $z > 117,84$  m τότε:  
*οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχτευτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 3,3% της παροχής εκροής τους*
- Αν  $z > 118,45$  m τότε:  
*οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχτευτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 17,7% της παροχής εκροής τους*
- Αν  $z > 119,2$  m τότε:  
*οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχτευτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 100% της παροχής εκροής τους*
- Αν  $z < 117,65$  m τότε:  
*οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχτευτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα κλείνουν*
- Αν  $z < 116,65$  m τότε:  
*οι στρόβιλοι κλείνουν  
τα θυροφράγματα κλείνουν*

Ύστερα όμως από εφαρμογή πολλών πραγματικών επεισοδίων διόδευσης παρατηρήθηκαν κάποια προβλήματα ασυνέπειας του μοντέλου. Αυτά βασίζονταν κυρίως στις περιπτώσεις όπου η στάθμη αυξανόταν σε ένα χρονικό βήμα και στο αμέσως επόμενο μειωνόταν. Τότε καταγράφηκαν απότομες εναλλαγές των εκροών, με αρχική υπερχειλίση στο 100% και μηδενική στο αμέσως επόμενο βήμα, γεγονός που δεν ταιριάζει στην πραγματική διαχείριση των θυροφραγμάτων. Δεν υπήρχε δηλαδή τρόπος το μοντέλο να αναγνωρίζει πότε βρίσκεται στην φάση ανόδου ή καθόδου του πλημμυρικού επεισοδίου, γι' αυτό και έγιναν κάποιες τροποποιήσεις, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω.

Έστω  $t$  το ωριαίο χρονικό βήμα του μοντέλου διόδευσης. Ορίζονται δύο εξισώσεις που περιγράφουν διαφορές στάθμης ως εξής:

$$\Delta z_{1t} = z_t - z_{t-1} \quad (8.14)$$

$$\Delta z_{2t} = z_t - z_{t-2} \quad (8.15)$$

όπου  $z_t$  είναι η τρέχουσα στάθμη του ταμιευτήρα,  $z_{t-1}$  η στάθμη του προηγούμενου χρονικού βήματος (1 ώρα πριν) και  $z_{t-2}$  η στάθμη των δύο προηγούμενων χρονικών βημάτων (2 ώρες πριν).

Αν έχουμε άνοδο της στάθμης, δηλαδή  $\Delta z_{1t} > 0$  (εξ. 8.14), τότε:

- Αν  $z < 117,84 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν σύμφωνα με τον βασικό κανόνα τους  $D$   
τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά

$$Q_{turb} = D_t \quad (8.16)$$

$$Q_t = Q_{turb} \quad (8.17)$$

- Αν  $z > 117,84 \text{ m}$  και  $z < 118,45 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 3,3% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.18)$$

$$Q_t = Q_{turb} + 3,3\% Q_{sp_t} \quad (8.19)$$

- Αν  $z > 118,45 \text{ m}$  και  $z < 119,2 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 17,7% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.20)$$

$$Q_t = Q_{turb} + 17,7\% Q_{sp_t} \quad (8.21)$$

- Αν  $z > 119,2 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 100% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.22)$$

$$Q_t = Q_{turb} + Q_{sp_t} \quad (8.23)$$

Αν  $\Delta z_{1t} < 0$  (8.14) τότε ορίζονται δύο περιπτώσεις:

1) Αν  $\Delta z_{2t} > 0$  (8.15) τότε θεωρείται πως η πτώσης στάθμης είναι μικρή, άρα το πλημμυρικό φαινόμενο εξελίσσεται. Οπότε ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

- Αν  $z > 119,2 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτικότητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 100% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.24)$$

$$Q_t = Q_{turb} + Q_{sp_t} \quad (8.25)$$

- Αν  $z < 119,2 \text{ m}$  και  $z > 118,45 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτηκότητα ,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 17,7% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.26)$$

$$Q_t = Q_{turb} + 17,7\%Q_{sp_t} \quad (8.27)$$

- Αν  $z < 118,45\text{m}$  και  $z > 117,84 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτηκότητα ,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 3,3% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.28)$$

$$Q_t = Q_{turb} + 3,3\%Q_{sp_t} \quad (8.29)$$

- Αν  $z < 117,84 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν σύμφωνα με τον βασικό κανόνα τους  $D$   
τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά

$$Q_{turb} = D_t \quad (8.30)$$

$$Q_t = Q_{turb} \quad (8.31)$$

2) Αν  $\Delta z_{2t} < 0$  (8.15) τότε θεωρείται ότι υπάρχει μια ύφεση του φαινομένου και ακολουθείται η εξής μεθοδολογία:

- Αν  $z > 118,45 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτηκότητα ,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 100% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.32)$$

$$Q_t = Q_{turb} + Q_{sp_t} \quad (8.33)$$

- Αν  $z < 118,45 \text{ m}$  και  $z > 117,65 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτηκότητα ,  $500 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$   
τα θυροφράγματα απελευθερώνουν 10% της παροχής εκροής τους

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.34)$$

$$Q_t = Q_{turb} + 10\% Q_{sp_t} \quad (8.35)$$

- Αν  $z < 117,65 \text{ m}$  και  $z > 116,65 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν στην μέγιστη παροχетеυτικήτητα,  $500 \text{ m}^3/\text{s}$   
τα θυροφράγματα κλείνουν

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s} \quad (8.36)$$

$$Q_t = Q_{turb} \quad (8.37)$$

- Αν  $z < 116,65 \text{ m}$  τότε:  
οι στρόβιλοι λειτουργούν σύμφωνα με τον βασικό κανόνα τους  $D$   
τα θυροφράγματα παραμένουν κλειστά

$$Q_{turb} = D_t \quad (8.38)$$

$$Q_t = Q_{turb} \quad (8.39)$$


Εφαρμόζοντας την μεθοδολογία που περιγράφηκε, προσομοιώνεται με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια μια εύλογη διαχείριση του πλημμυρικού επεισοδίου, επιδιώκοντας την διόδευση της πλημμύρας κατά προτεραιότητα μέσω των στροβίλων, και εν συνεχεία μέσω του υπερχειλιστή (γενικά με μικρές παροχές και μόνο όταν η στάθμη έχει ανέβει στο τελευταίο επίπεδο συναγερμού, με πλήρη παροχетеυτικήτητα).

## 8.5 Παραδείγματα εφαρμογής μοντέλου διόδευσης

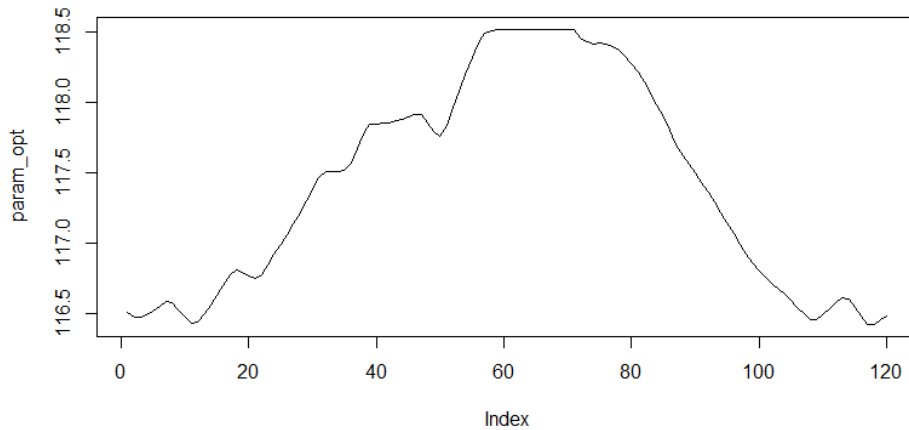
Σε συνέχεια της μεθοδολογίας επιμερισμού των μέσων ημερήσιων παροχών (**Κεφάλαιο 7**) στον υπό εξέταση ταμιευτήρα του φράγματος Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 4**), ακολουθήθηκε η διαδικασία διόδευσης.

Παρακάτω εξετάζονται τρία διαφορετικά επεισόδια. Τα δύο πρώτα έχουν ίδια δεδομένα εισροής με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ως αριθμητική εφαρμογή στο **Κεφάλαιο 7**, ενώ παρουσιάζεται ένα ακόμη.



 1ο Επεισόδιο:

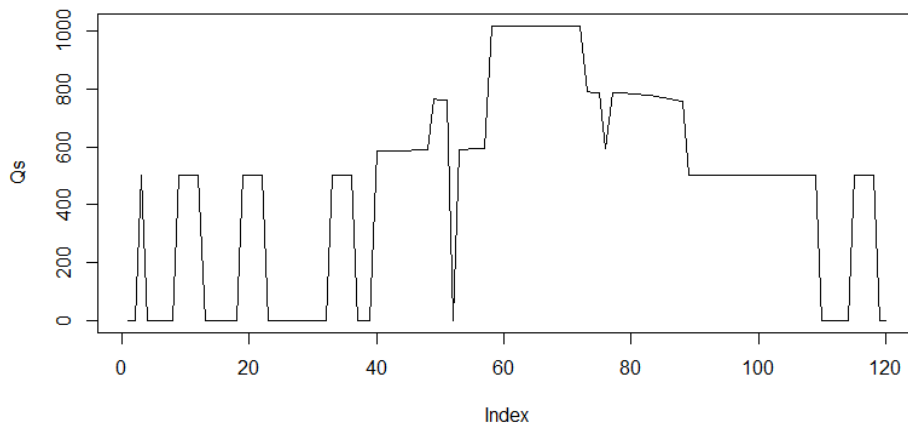
Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
39	377	926	337	186



**Εικόνα 8.2:** Διάγραμμα στάθμης ταμιευτήρα – 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Όπως είναι λογικό, στην **Εικόνα 8.2** παρατηρείται ένας ανοδικός κλάδος της στάθμης στην αρχή του επεισοδίου, ο οποίος αντιστοιχεί στην έναρξη του πλημμυρικού φαινομένου και στην συνέχεια, ένας πτωτικός κατά την εκτόνωσή του. Είναι ορατές κάποιες μικρές αυξομειώσεις της στάθμης στον ανοδικό κλάδο που οφείλονται στα σενάρια λειτουργίας των θυροφραγμάτων. Αντίθετα, στον καθοδικό κλάδο δεν παρατηρούνται αυτές οι διακυμάνσεις, αφού έχει επέλθει η πλημμυρική αιχμή και εμφανίζεται συνεχής πτώση. Αυτό συμβαίνει επειδή χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες εξισώσεις της ίδιας υποπερίπτωσης και έτσι προκύπτει η συνέχεια του διαγράμματος.

Η μέγιστη τιμή της στάθμης ανέρχεται στα  $z_{max} = 118,51 \text{ m}$ . Σύμφωνα με τους κανόνες λειτουργίας για την χρήση των θυροφραγμάτων δεν αναμένεται μεγάλη τιμή παροχής εκροής από τον υπερχειλιστή.

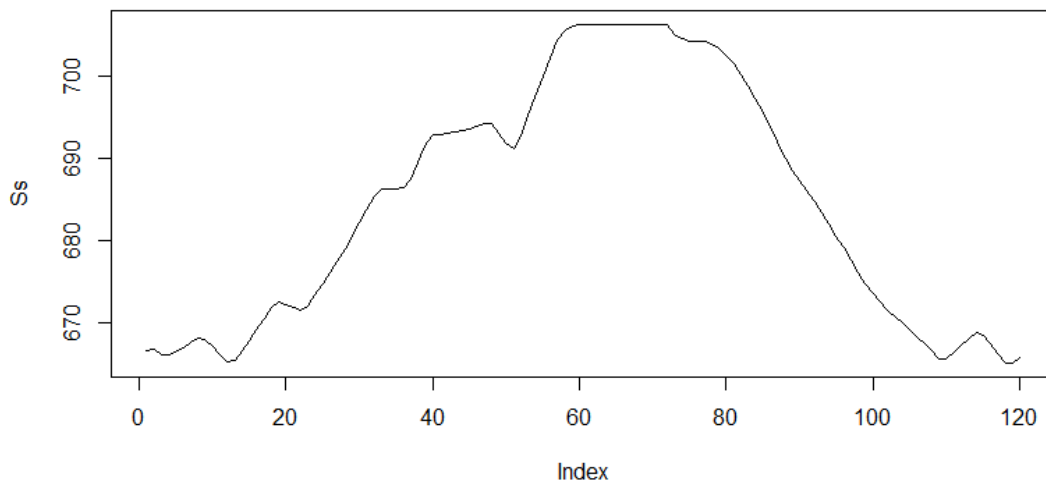


**Εικόνα 8.3:** Διάγραμμα παροχής εκροής – 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Στο διάγραμμα εκροής της **Εικόνας 8.3**, στην αρχή και στο τέλος του επεισοδίου καταγράφεται ο βασικός κανόνας λειτουργίας των στροβίλων, οι οποίοι ανοίγουν για οκτώ ώρες ημερησίως στο μέγιστο της παροχетеυτικότητας τους. Η εκροή αυτή δεν καθίσταται επαρκής για την διόδευση της πλημμύρας, με συνέπεια στο κεντρικό τμήμα του διαγράμματος όπου εμφανίζεται και η αιχμή του φαινομένου, να παρατηρείται χρήση του υπερχειλιστή. Ακόμη, η καμπύλη της παροχής εκροής είναι σχετικά ομαλή, άρα ο κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων μπορεί να θεωρηθεί εφαρμόσιμος για πραγματική διαχείριση από τους χειριστές.

Η μέγιστη παροχή εκροής ανέρχεται στην τιμή  $Q_{S_{max}} = 1017 \text{ m}^3/\text{s}$ , η οποία σαν τάξη μεγέθους επαληθεύεται από την μέγιστη στάθμη που καταγράφηκε (**Εικόνα 8.2**).

Οι συνολικοί όγκοι νερού που διήλθαν από τους στροβίλους και τα θυροφράγματα κατά την διάρκεια του πενθήμερου επεισοδίου είναι:  $Q_{turb} = 68,4 \text{ hm}^3$  και  $Q_{sp} = 50,6 \text{ hm}^3$  αντίστοιχα.



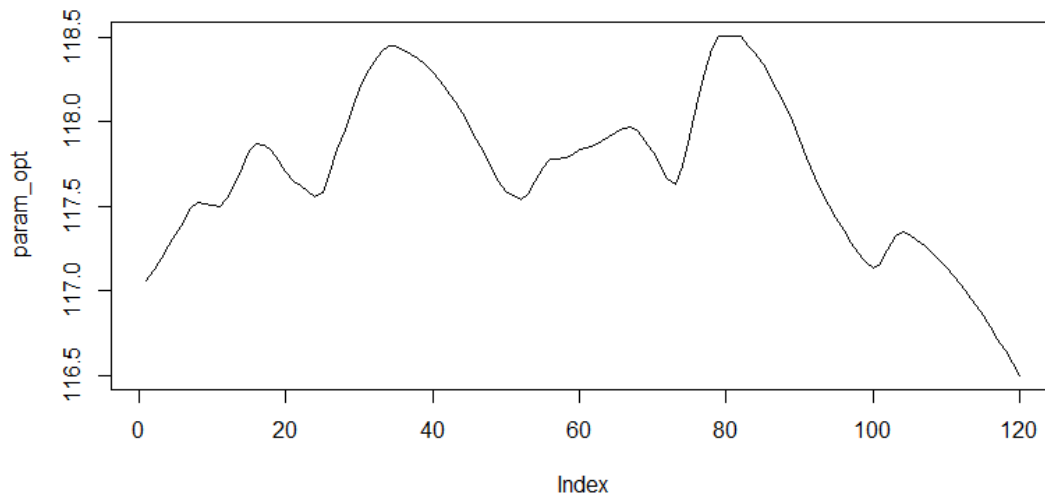
**Εικόνα 8.4:** Διάγραμμα αποθέματος ταμιευτήρα – 1<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Η καμπύλη αποθέματος του ταμιευτήρα (**Εικόνα 8.4**) παρουσιάζει φυσιολογικές μεταβολές, οι οποίες έρχονται σε συμφωνία με την εμφάνιση του πλημμυρικού κύματος.

Η μέγιστη τιμή του αποθέματος είναι  $S_{S_{max}} = 706 \text{ hm}^3$ .

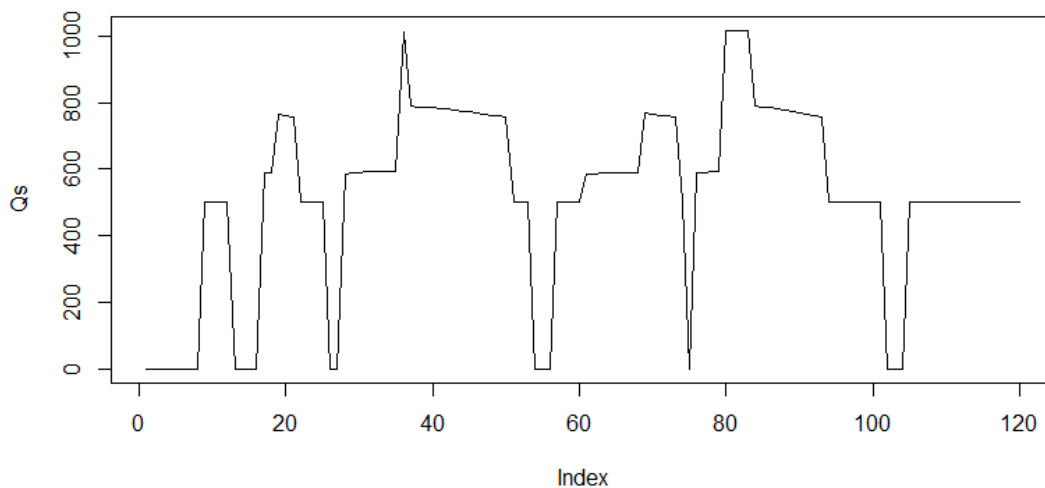
2<sup>ο</sup> Επεισόδιο:

Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>
337	686	498	628	199



**Εικόνα 8.5:** Διάγραμμα στάθμης ταμιευτήρα – 2<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Στην **Εικόνα 8.5** παρατηρείται διακύμανση της στάθμης, που συνάδει με αυτή της παροχής εισροής. Σε αυτό το επεισόδιο εμφανίζονται δύο αιχμές, γι' αυτό και καταγράφονται δύο μέγιστες στάθμες  $z_{max1} = 118,4 \text{ m}$  και  $z_{max2} = 118,5 \text{ m}$ . Η καμπύλη της στάθμης είναι ακόμα πιο ομαλή, λόγω μη απότομων εναλλαγών των εισροών.



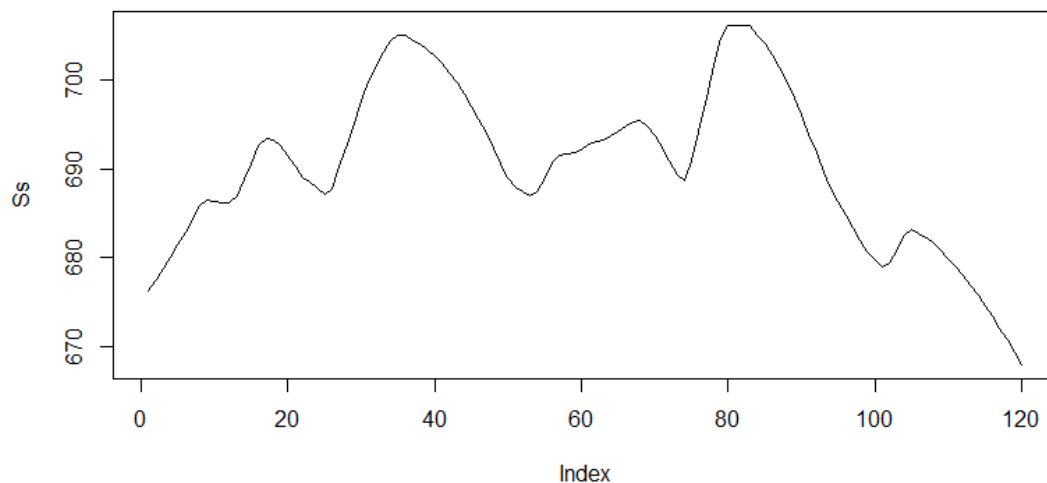
**Εικόνα 8.6:** Διάγραμμα παροχής εκροής – 2<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Στο διάγραμμα εκροής της **Εικόνας 8.6**, σε διάφορες φάσεις του 2<sup>ου</sup> επεισοδίου είναι εμφανής ο οκτάωρος κανόνας λειτουργίας των στροβίλων, ο οποίος έχει τεθεί ως αρχική συνθήκη του μοντέλου. Έτσι στην αρχή, στο τέλος και για λίγες ώρες στην μέση του

επεισοδίου, όπου υπάρχει μικρή ύφεση της πλημμύρας, ο ταμιευτήρας βρίσκεται σε χαμηλότερες στάθμες και ακολουθείται ο οκτάωρος κανόνας. Αντίθετα, καταγράφεται υπερχειλίση μέσω των θυροφραγμάτων στις δύο αιχμές όπου η στάθμη ανεβαίνει. Επιπρόσθετα, διαπιστώνεται πως ο κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων και σε αυτό το επεισόδιο, παρουσιάζει μορφή προσιτή. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο.

Η μέγιστη παροχή εκροής ανέρχεται στην τιμή  $Q_{smax} = 1016 \text{ m}^3/\text{s}$ , η οποία σαν τάξη μεγέθους επαληθεύεται από την μέγιστη στάθμη που καταγράφηκε (**Εικόνα 8.6**).

Οι συνολικοί όγκοι νερού που διήλθαν από τους στροβίλους και τα θυροφράγματα κατά την διάρκεια του πενθήμερου επεισοδίου είναι:  $Q_{turb} = 81 \text{ hm}^3$  και  $Q_{sp} = 36,7 \text{ hm}^3$  αντίστοιχα. Σε αυτό το επεισόδιο, είναι φανερό πως η διαχείριση απέδωσε ακόμα καλύτερα, αφού καταγράφεται μικρότερη εκροή από τον υπερχειλιστή σε σχέση με το προηγούμενο (**Εικόνα 8.3**).



**Εικόνα 8.7:** Διάγραμμα αποθέματος ταμιευτήρα – 2<sup>ο</sup> Επεισόδιο

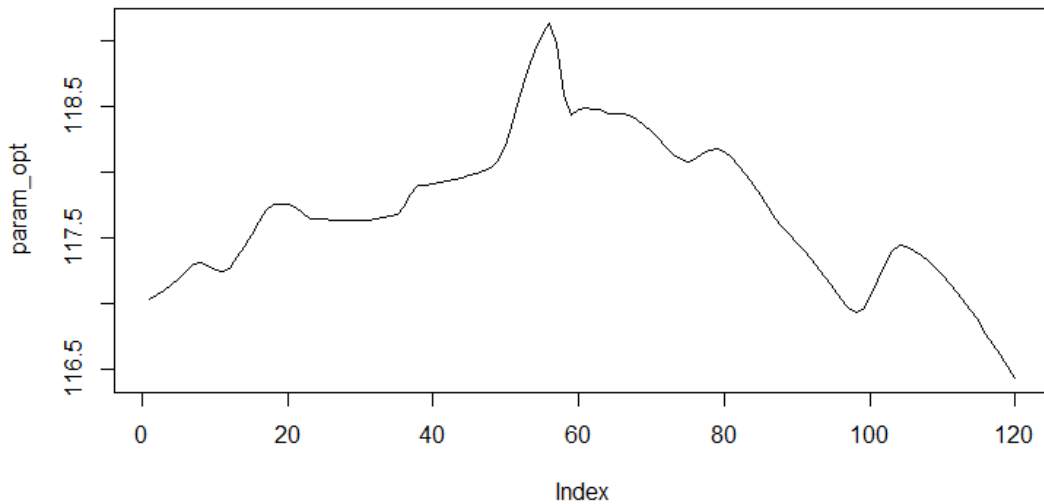
Η καμπύλη αποθέματος του ταμιευτήρα για το 2<sup>ο</sup> επεισόδιο (**Εικόνα 8.7**) είναι η αναμενόμενη και έρχεται σε απόλυτη συνέπεια με την μορφή του πλημμυρικού επεισοδίου.

Η μέγιστη τιμή του αποθέματος είναι  $S_{smax} = 708 \text{ hm}^3$ .

**3<sup>ο</sup> Επεισόδιο:**

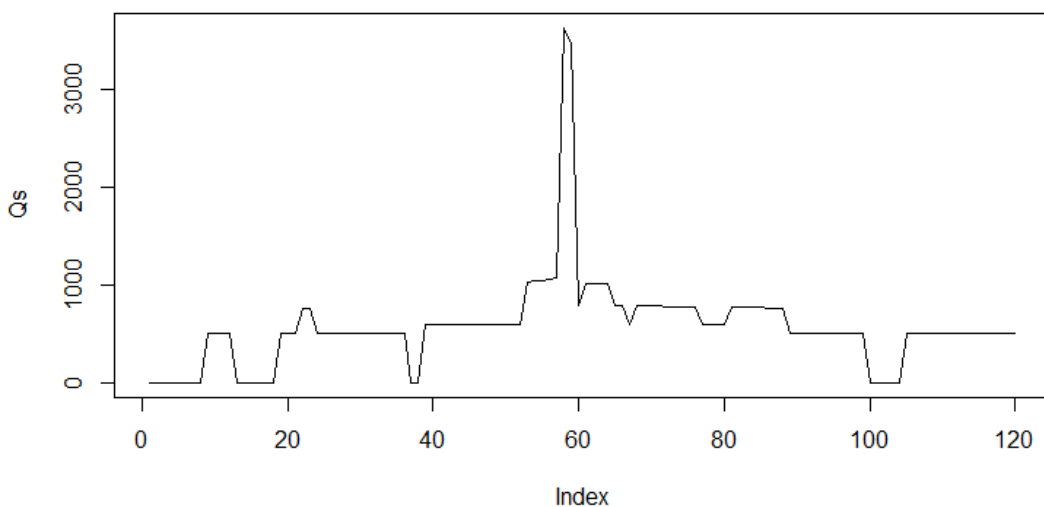
Ως 3<sup>η</sup> εφαρμογή της διόδευσης, επιλέχθηκε ένα επεισόδιο της ιστορικής χρονοσειράς με μια αρκετά μεγάλη αιχμή ( $Q_3 = 1131 \text{ m}^3/\text{s}$ ) με σκοπό να καταγραφούν υψηλές στάθμες και 100% εκροή από τον υπερχειλιστή.

$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$
155	443	1131	399	212



**Εικόνα 8.8:** Διάγραμμα στάθμης ταμιευτήρα – 3<sup>ο</sup> Επεισόδιο

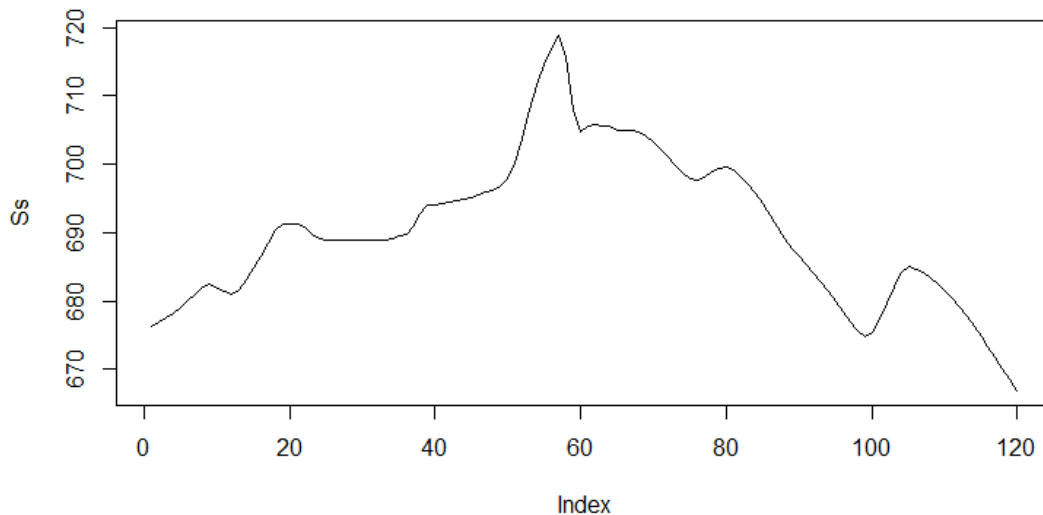
Πράγματι κατά την διόδευση του 3<sup>ου</sup> επεισοδίου (**Εικόνα 8.8**), παρατηρείται μια ανώτατη στάθμη  $z_{max} = 119,22 \text{ m}$ . Έτσι αναμένεται 100% υπερχείλιση σύμφωνα με τους κανόνες λειτουργίας των θυροφραγμάτων.



**Εικόνα 8.9:** Διάγραμμα παροχής εκροής – 3<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Η παροχή εκροής κατά κύριο λόγο ακολουθεί τον βασικό κανόνα λειτουργίας των στροβίλων, όμως στην μεγάλη αιχμή του επεισοδίου απαιτείται εκροή μέσω των θυροφραγμάτων θεωρώντας τα πλήρως ανοιχτά για εξομάλυνση του φαινομένου. Γι' αυτό το λόγο καταγράφεται και μια τόσο μεγάλη παροχή εκροής  $Q_{smax} = 3624 m^3/s$ .

Από τους στροβίλους διέρχεται ποσότητα νερού  $Q_{turb} = 84,6 hm^3$ , ενώ από τα θυροφράγματα  $Q_{sp} = 67,7 hm^3$ . Η εκροή μέσω υπερχείλισης, αν και καταγράφεται λιγότερες φορές από τα προηγούμενα επεισόδια, είναι μεγαλύτερη συγκριτικά, αφού από αυτά εκρέει το 100% της παροχής.



**Εικόνα 8.10:** Διάγραμμα αποθέματος ταμιευτήρα – 3<sup>ο</sup> Επεισόδιο

Η μέγιστη τιμή του αποθέματος παρατηρείται στο μέσον του διαγράμματος (**Εικόνα 8.10**) και είναι της τάξης των  $S_{Smax} = 718 hm^3$ , ενώ διατηρείται σε χαμηλότερες τιμές κατά την διάρκεια του υπόλοιπου επεισοδίου.

Συμπερασματικά, η υπολογιστική διαδικασία της διόδευσης που ακολουθήθηκε, περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τα πλημμυρικά επεισόδια στο φράγμα Πουρναρίου Ι (**Κεφάλαιο 4**). Ταυτόχρονα η ομαλή εναλλαγή των παροχών εκροής επαληθεύει την αρχική θεώρηση, πως η διαχείριση των θυροφραγμάτων μπορεί να βασιστεί στον κανόνα λειτουργίας που προτάθηκε για το έργο και να εφαρμοστεί σε μελλοντικά πλημμυρικά επεισόδια.

## 9 Στοχαστικό πλαίσιο προσομοίωσης και πιθανοτική ανάλυση χαρακτηριστικών πλημμυρικών μεγεθών

---

### 9.1 Σκοπός

Τα μοντέλα που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, αναπτύχθηκαν και ελέγχθηκαν έχοντας ως αρχικά δεδομένα εισόδου, ιστορικές χρονοσειρές βροχών (**Κεφάλαιο 5**) και παροχών (**Κεφάλαιο 6**), μήκους 40 και 20 ετών, αντίστοιχα (αφορούν στην περίοδο 1980-2020). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν όμως, δεν επαρκούν για την εύρεση των πιθανοτικών μεγεθών που θα απαιτούσε μια μελέτη εκτίμησης και διαχείρισης του πλημμυρικού κινδύνου του φράγματος Πουρναρίου, λόγω του εντελώς ανεπαρκούς μήκους των χρονοσειρών αυτών για σωστή στατιστική επεξεργασία. Υπενθυμίζεται ότι ο σχεδιασμός των έργων υπερχείλισης έχει γίνει για περίοδο επαναφοράς της τάξης των 10 000 ετών, οπότε για να εξαχθούν ορθά στατιστικά συμπεράσματα μέσω ενός ολοκληρωμένου στοχαστικού πλαισίου θα έπρεπε να υπήρχαν δεδομένα εισόδου πολλαπλάσιου μήκους, με τα οποία θα τροφοδοτηθούν τα σχετικά μοντέλα για να παράξουν αντίστοιχα μεγάλα δείγματα προσομοιωμένων τιμών στάθμης στον ταμιευτήρα και των εκροών από τους στροβίλους και τον εκχειλιστή, επιτρέποντας έτσι την εξαγωγή αξιόπιστων πιθανοτικών μεγεθών, μέσω στατιστικής ανάλυσής τους.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να αναδείξει τις δυνατότητες μιας τέτοιας ολοκληρωμένης πιθανοτικής-στοχαστικής προσέγγισης, έχοντας ως βάση ένα δείγμα συνθετικών χρονοσειρών ημερήσιας κατακρήμνισης στη λεκάνη ανάντη του φράγματος, μήκους 1000 ετών. Αυτές χρησιμοποιήθηκαν ως τιμές εισόδου στο μοντέλο βροχής-απορροής (**Κεφάλαιο 5**) και στην συνέχεια το προσομοιωμένο δείγμα εισροών στον ταμιευτήρα, τροφοδότησε το μοντέλο ημερήσιας προσομοίωσης της λειτουργίας του (**Κεφάλαιο 6**). Έπειτα οι τιμές των παροχών εισροής, που αντιστοιχούν στα επιλεγμένα ημερήσια επεισόδια υπερχείλισης του μοντέλου προσομοίωσης, επιμερίστηκαν σε ωριαίες (**Κεφάλαιο 7**) και τελικά διοδεύτηκαν, μέσω του μοντέλου διαχείρισης των πλημμυρών, που λειτουργεί σε ωριαία κλίμακα (**Κεφάλαιο 8**). Έτσι παρέχεται πλέον η δυνατότητα να καταγραφεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την στοχαστική εφαρμογή της μεθοδολογικής διαδικασίας και εν συνεχεία να αναλυθούν πιθανοτικά.

Πριν την εφαρμογή του πλαισίου, δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των βασικών στοχαστικών και στατιστικών εργαλείων που χρησιμοποιούνται στις επόμενες αναλύσεις.

### 9.2 Διαδικασία γέννησης συνθετικών χρονοσειρών – Μοντέλο anySim

Το πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης που εφαρμόζεται για τη γέννηση συνθετικών χρονοσειρών βασίζεται στο αρθρωτό πλαίσιο στοχαστικού επιμερισμού που έχει υλοποιηθεί μέσω του λογισμικού anySim (Tsoukalas *et al.* 2018a, 2018b, 2019, 2020), αποτελώντας σύνθεση και εξέλιξη σειράς μεθοδολογιών που είχαν αναπτυχθεί παλαιότερα (Koutsoyiannis and Manetas, 1996· Koutsoyiannis, 2000, 2001· Efstratiadis *et al.*, 2014). Η γενική ιδέα είναι η σύζευξη πολλαπλών σχημάτων στοχαστικής προσομοίωσης τυχαίων διεργασιών, που

ακολουθούν οποιαδήποτε δεδομένη στατιστική κατανομή και στοχαστική δομή στον χώρο και τον χρόνο, σε διάφορες χρονικές κλίμακες ενδιαφέροντος, και μπορεί επίσης να αλλάζουν εποχιακά. Ακρογωνιαίος λίθος της όλης προσέγγισης είναι το από κοινού μοντέλο πιθανότητας Nataf, που σχετίζεται με τη γκαουσιανή συνάρτηση σύζευξης (corula).

Στην παρούσα έρευνα, στόχος είναι η παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών βροχόπτωσης μήκους 1000 ετών, που αναφέρεται στην επιφάνεια της λεκάνης του Αράχθου ανάντη του φράγματος. Η διαδικασία γίνεται σε τρεις χρονικές κλίμακες. Αρχικά, παράγονται οι ετήσιες τιμές μέσω του σχήματος γέννησης SMARTA (Symmetric Moving Average To Anything). Βασικό ζητούμενο είναι η αναπαραγωγή του φαινομένου της εμμονής (*δυναμική Hurst-Kolmogorov*, Koutsoyiannis, 2011), που σχετίζεται με το διαχρονικά μεταβαλλόμενο κλίμα και τις εν γένει μακροχρόνιες διακυμάνσεις όλων των γεωφυσικών διεργασιών. Για την μηνιαία κλίμακα, κυρίαρχο χαρακτηριστικό της οποίας είναι η περιοδικότητα, εφαρμόζεται το σχήμα γέννησης SPARTA (Stochastic Periodic Autoregressive To Anything) των Tsoukalas *et al.* (2018a). Τέλος, για την ημερήσια κλίμακα, εφαρμόζεται το ίδιο μοντέλο, δίνοντας επιπλέον έμφαση στην αναπαραγωγή της διαλείπουσας συμπεριφοράς της βροχόπτωσης, με τη χρήση μικτών κατανομών.

Η αποκατάσταση της συνέπειας μεταξύ των τριών χρονικών κλιμάκων (γέννηση μηνιαίων τιμών που επαληθεύουν την αντίστοιχη ετήσια, και εν συνεχεία γέννηση ημερήσιων τιμών που επαληθεύουν την αντίστοιχη μηνιαία) γίνεται μέσω μιας διαδικασίας επιμερισμού.

Τα δεδομένα εισόδου της όλης διαδικασίας είναι:

- οι περιθώριες κατανομές της ημερήσιας και μηνιαίας βροχόπτωσης, οι οποίες διαφοροποιούνται για κάθε μήνα του έτους, καθώς και η κατανομή της βροχόπτωσης στην ετήσια κλίμακα.
- η θεωρητική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης στην ετήσια κλίμακα, που εισάγεται στο μοντέλο SMARTA, και επιλέγεται ώστε να αναπαράγει τη δυναμική Hurst-Kolmogorov (Koutsoyiannis, 2011).
- οι σχέσεις εξάρτησης στον χρόνο (οι τιμές των μεταβλητών σε σχέση με τις τιμές μετατοπισμένες κατά ένα χρονικό βήμα).

Τα παραπάνω στοιχεία, και οι παράμετροι των αντίστοιχων μοντέλων, εκτιμώνται με βάση τα αντίστοιχα ιστορικά δείγματα, ενώ ο χρήστης μπορεί να επέμβει σε διάφορες πτυχές της διαδικασίας, ορίζοντας κατάλληλες κατανομές (καθώς και τη διαδικασία εκτίμησης των παραμέτρων τους), και ορίζοντας επίσης κατάλληλο μοντέλο αυτοσυσχέτισης, προκειμένου να περιγράψει τη δυναμική Hurst-Kolmogorov και τις μακροχρόνιες κλιματικές μεταβολές.

### 9.3 Στατιστική ανάλυση ετήσιων μεγίστων

Η στατιστική ανάλυση μιας μεταβλητής ενδιαφέροντος βασίζεται στην προσαρμογή θεωρητικών κατανομών στο δείγμα που προκύπτει αν από την πλήρη χρονοσειρά ληφθούν οι μέγιστες τιμές κάθε υδρολογικού έτους. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η πρόγνωση της τιμής της μεταβλητής,  $x$ , που αντιστοιχεί σε δεδομένη πιθανότητα μη υπέρβασης,  $p$ , ή, αντίστροφα, η εκτίμηση της πιθανότητας υπερβάσης που αντιστοιχεί σε δεδομένη τιμή.



Αφού στην προσέγγιση των ετήσιων μεγίστων, το δείγμα διαμορφώνεται λαμβάνοντας την υψηλότερη τιμή κάθε έτους, η πιθανότητα μη υπέρβασης εκφράζεται σε όρους περιόδου επαναφοράς, με τα δύο μεγέθη να συνδέονται μέσω της σχέσης:

$$T = \frac{1}{1 - p} \quad (9.1)$$

Οι στατιστικές αναλύσεις της παρούσας εργασίας γίνονται μέσω του εργαλείου Pyθία, που είναι ενσωματωμένο στο περιβάλλον του λογισμικού Υδρογνώμων.

Αρχικά, διαμορφώνονται οι εμπειρικές κατανομές των μεταβλητών, εφαρμόζοντας την σχέση του Gringorten (1963). Σύμφωνα με αυτή, η εμπειρική πιθανότητα υπέρβασης, η οποία αναφέρεται και ως θέση σχεδίασης (plotting position), του διατεταγμένου δείγματος εκτιμάται από τη σχέση (Κουτσογιάννης, 1997):

$$q_i = \frac{i + 0.12}{n + 0.36 - i} \quad (9.2)$$

όπου  $n$  το μέγεθος του δείγματος και  $i$  η θέση στο διατεταγμένο κατά φθίνουσα σειρά δείγμα. Η επιλογή της μεθόδου Gringorten, αντί της πιο διαδεδομένης θέσης σχεδίασης Weibull βασίζεται σε θεωρητικούς λόγους, που τεκμηριώνονται στη βιβλιογραφία (Koutsoyiannis, 2022).

Με βάση τη διεθνή εμπειρία, ως καταλληλότερη θεωρητική κατανομή επιλέγεται η λεγόμενη Γενικευμένη Ακραίων Τιμών (Generalized Extreme Value, GEV). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η εν λόγω κατανομή αναφέρεται ως η πλέον πρόσφορη για την αναπαράσταση ακραίων υδρολογικών μεγεθών (Koutsoyiannis, 2004a, 2004b, 2007· Papalexiou and Koutsoyiannis, 2013).

Η συνάρτηση κατανομής της GEV δίνεται από τη σχέση:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 + \lambda \left( \frac{x}{\kappa} - \psi \right) \right]^{-1/\kappa} \right\} \quad (9.3)$$

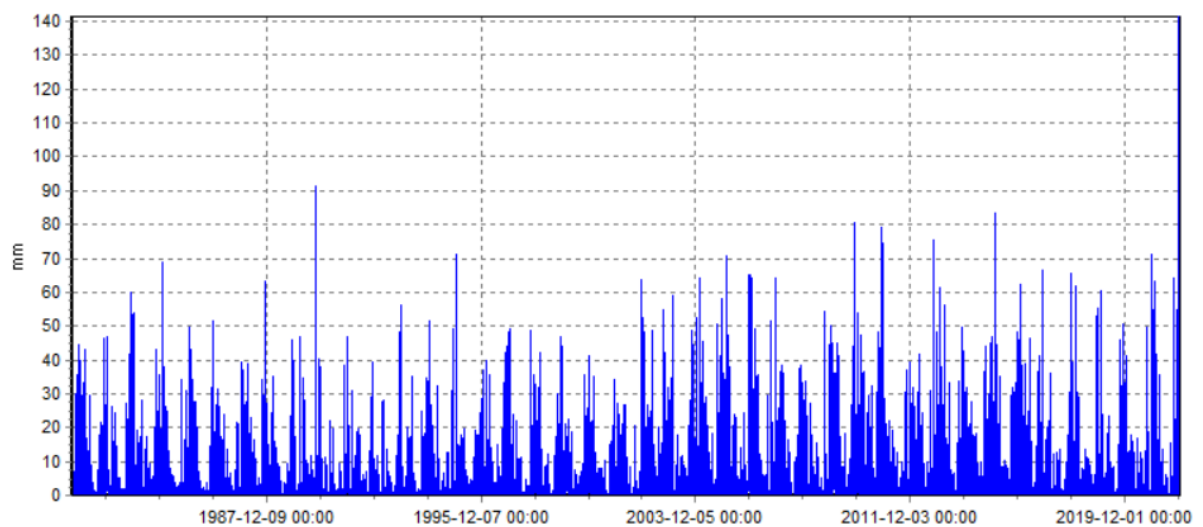
όπου  $\kappa > 0$ ,  $\lambda > 0$  και  $\psi$  οι παράμετροι σχήματος, κλίμακας και θέσης, αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι σε αναλύσεις μικρών δειγμάτων, καθώς και εξαιτίας σφαλμάτων στα δεδομένα, ενδέχεται να προκύψουν αρνητικές τιμές της παραμέτρου σχήματος. Στην περίπτωση αυτή, κρίνεται αναγκαία η χρήση της κατανομής Gumbel μεγίστων, η οποία αποτελεί υποπερίπτωση της GEV, με  $\kappa = 0$ .

Για την εκτίμηση των παραμέτρων εφαρμόζεται η μέθοδος των L-ροπών (Hosking, 1990). Οι L-ροπές έχουν οριστεί ως γραμμικός συνδυασμός των αναμενόμενων τιμών των διατεταγμένων στατιστικών χαρακτηριστικών, και έκτοτε έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην υδρολογία τόσο ως μέθοδος προσαρμογής κατανομών, αλλά και ως περιγραφικά στατιστικά

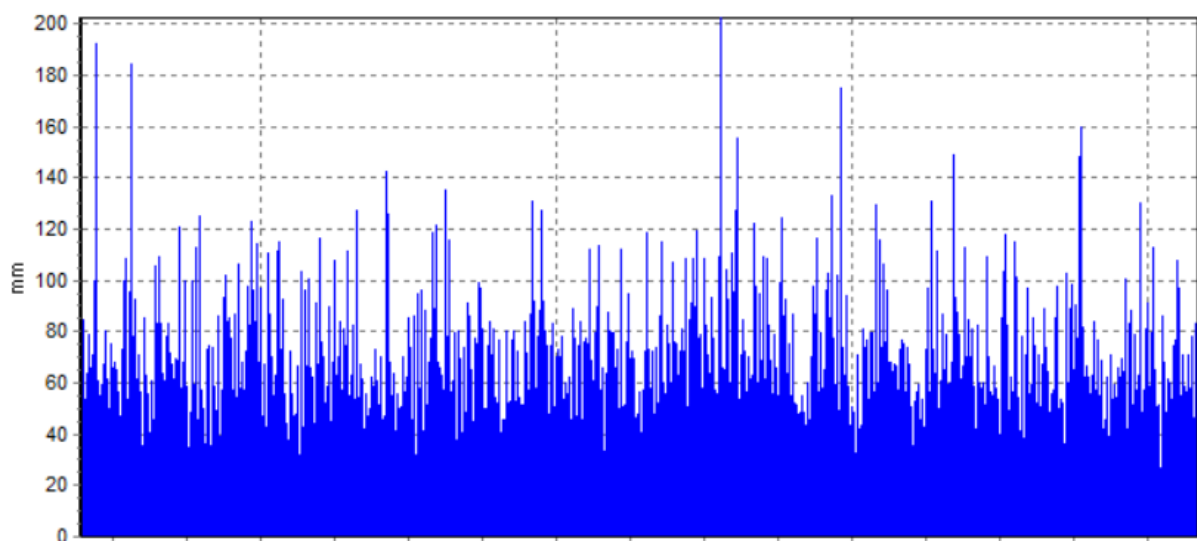
μέτρα (Sankarasubramanian and Srinivasan, 1999· Vogel and Fennessey, 1993). Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως οι δειγματικές εκτιμήσεις τους, ως γραμμικοί συνδυασμοί του διατεταγμένου δείγματος, δεν υψώνουν τις τιμές τους σε τετραγωνικές ή κυβικές δυνάμεις, όπως με την κλασική μέθοδο των ροπών. Λεπτομέρειες σχετικά με το υπολογιστικό πλαίσιο εφαρμογής της GEV με τη μέθοδο των L-ροπών δίνεται στις ως άνω δημοσιεύσεις, καθώς και στο τεύχος θεωρητικής τεκμηρίωσης του λογισμικού Υδρογνώμων (Κοζάνης κ.ά., 2010).

#### 9.4 Παραγωγή συνθετικών κατακρημνίσεων

Μέσω του λογισμικού angsim, παρήχθησαν συνθετικές ημερήσιες τιμές βροχόπτωσης για 1000 χρόνια, εκτιμώντας τα χαρακτηριστικά μεγέθη εισόδου των επιμέρους υπολογιστικών διαδικασιών με βάση το ιστορικό δείγμα της περιόδου 1980-2020 (Εικόνες 9.1 και 9.2).



**Εικόνα 9.1:** Ιστορική χρονοσειρά επιφανειακής βροχόπτωσης στη λεκάνη απορροής του Αράχθου (1980-2020).



**Εικόνα 9.2:** Συνθετική χρονοσειρά επιφανειακής βροχόπτωσης μήκους 1000 ετών.

Για τον λόγο αυτό, τα συνθετικά δεδομένα οφείλουν να διατηρούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των παρατηρημένων 40 χρόνων. Έτσι παρακάτω γίνεται σύγκριση των χαρακτηριστικών αυτών.

**Πίνακας 1:** Στατιστικά χαρακτηριστικά ιστορικών βροχοπτώσεων, 40 χρόνων

	mean	st.dev.	skewness	autocorrelation
January	5,79	10,27	2,99	0,61
February	5,86	9,39	2,66	0,58
March	4,34	7,40	2,75	0,58
April	3,17	5,63	3,22	0,51
May	2,66	4,29	3,68	0,51
June	1,74	2,73	3,70	0,49
July	1,06	2,11	3,80	0,57
August	0,96	2,11	5,03	0,41
September	2,65	6,06	4,12	0,56
October	4,63	9,48	3,35	0,56
November	7,14	12,05	2,43	0,58
December	7,85	12,83	3,06	0,59

**Πίνακας 2:** Στατιστικά χαρακτηριστικά συνθετικών βροχοπτώσεων, 1000 χρόνων

	mean	st.dev.	skewness	autocorrelation
January	6,43	10,26	2,71	0,55
February	6,93	10,81	2,70	0,58
March	4,54	7,81	3,37	0,60
April	3,38	5,87	3,43	0,54
May	2,71	4,41	3,81	0,53
June	1,77	2,93	3,72	0,54
July	1,07	2,27	4,95	0,61
August	0,92	2,27	5,29	0,49
September	2,70	6,61	5,12	0,60
October	5,02	9,96	3,44	0,58
November	7,28	11,85	3,16	0,57
December	8,69	14,39	4,31	0,60

Από τους **Πίνακες 1 και 2** παρατηρείται συνέπεια όλων των στατιστικών χαρακτηριστικών (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, ασυμμετρία, αυτοσυσχέτιση 1<sup>ης</sup> τάξης) μεταξύ των ιστορικών και συνθετικών τιμών βροχόπτωσης ανά μήνα.

Συνεπώς οι συνθετικές βροχές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα για την εξαγωγή πιθανοτικών μεγεθών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω.

## 9.5 Σύγκριση μεγίστων

Εκτός από την αντιπαράβολή των γενικών στατιστικών χαρακτηριστικών των υδρολογικών μεταβλητών της περιοχής μελέτης, ιστορικών και προσομοιωμένων, πολύ μεγάλη σημασία έχει η ορθή αναπαραγωγή της συμπεριφοράς των ακραίων τιμών. Στην προκειμένη περίπτωση, τα μεγέθη που ενδιαφέρουν αφορούν στις χρονοσειρές βροχής (40 χρόνια ιστορικά και 1000 χρόνια συνθετικά) και αρχικής απορροής (20 χρόνια ιστορικά και 1000 χρόνια βαθμονομημένα).

Όπως αναφέρθηκε, για την προσαρμογή της βέλτιστης κατανομής στις τιμές των δειγμάτων ως πρώτη επιλογή είναι η GEV, όμως κάποιες φορές είναι αναγκαία η χρήση της Gumbel-Max, που συνιστά υποπερίπτωση της.

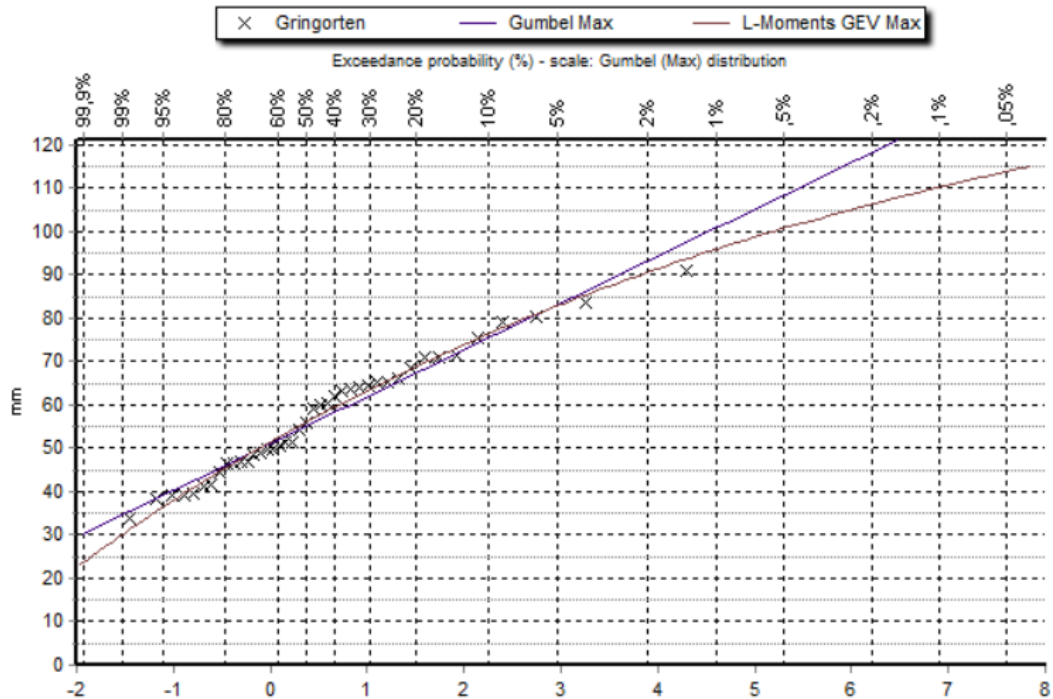
Αρχικά, με σκοπό την σωστή επιλογή ανάμεσα στις δύο αυτές θεωρητικές κατανομές προσαρμογής, τα δείγματα τοποθετούνται σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max. Εκεί η κατανομή Gumbel-Max αναπαρίσταται με ευθεία γραμμή, όπως είναι λογικό, ενώ η GEV με μια καμπύλη. Αν η καμπύλη της GEV στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, δηλαδή έχει  $\kappa < 0$ , τότε η μεταβλητή που περιγράφεται δεν έχει φυσικό νόημα, γιατί είναι σαν το μέγεθος να τείνει σε κάποιο άνω όριο. Το γεγονός αυτό είναι άτοπο, αφού οι φυσικές μεταβλητές δεν είναι άνω φραγμένες.

Συνεπώς αν η καμπύλη της GEV στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω,  $\kappa > 0$ , τότε επιλέγεται εκείνη ως βέλτιστη κατανομή προσαρμογής, διαφορετικά χρησιμοποιείται η Gumbel-Max.

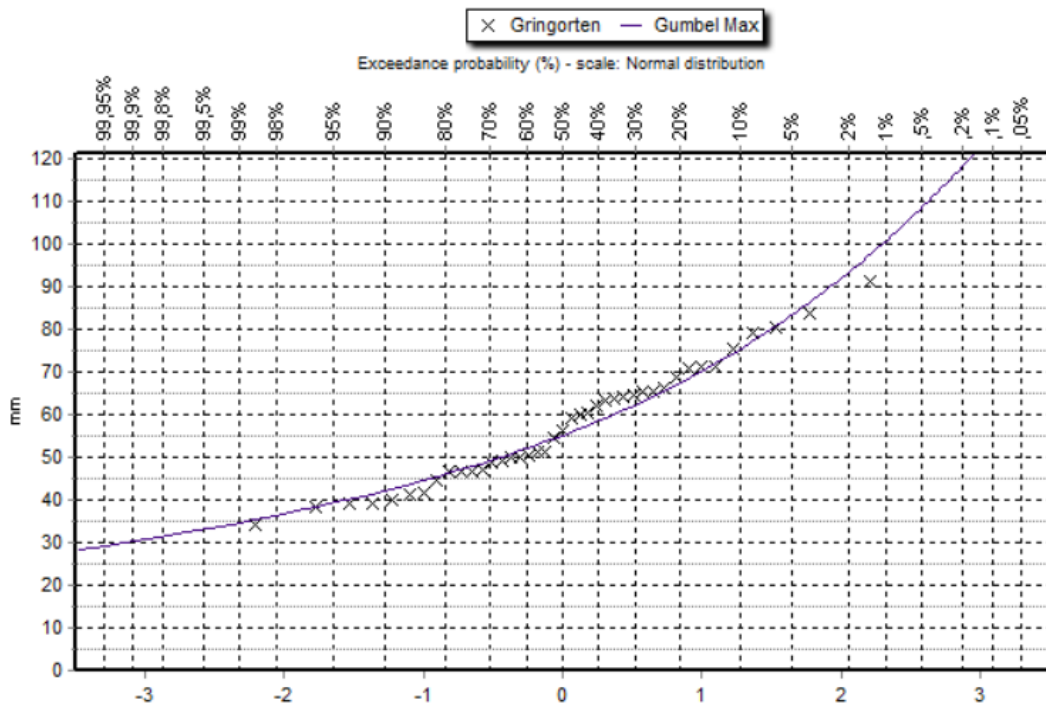
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα προσαρμογής των δειγμάτων βροχής και αρχικής παροχής στις θεωρητικές κατανομές για ιστορικά και συνθετικά δεδομένα.

### 1. Βροχόπτωση:

Για τα ιστορικά δεδομένα μέγιστης κατακρήμνισης επιλέγεται η κατανομή Gumbel-Max (**Εικόνα 9.2**), αφού στην **Εικόνα 9.1** η GEV έχει  $\kappa < 0$  (κόκκινη καμπύλη).

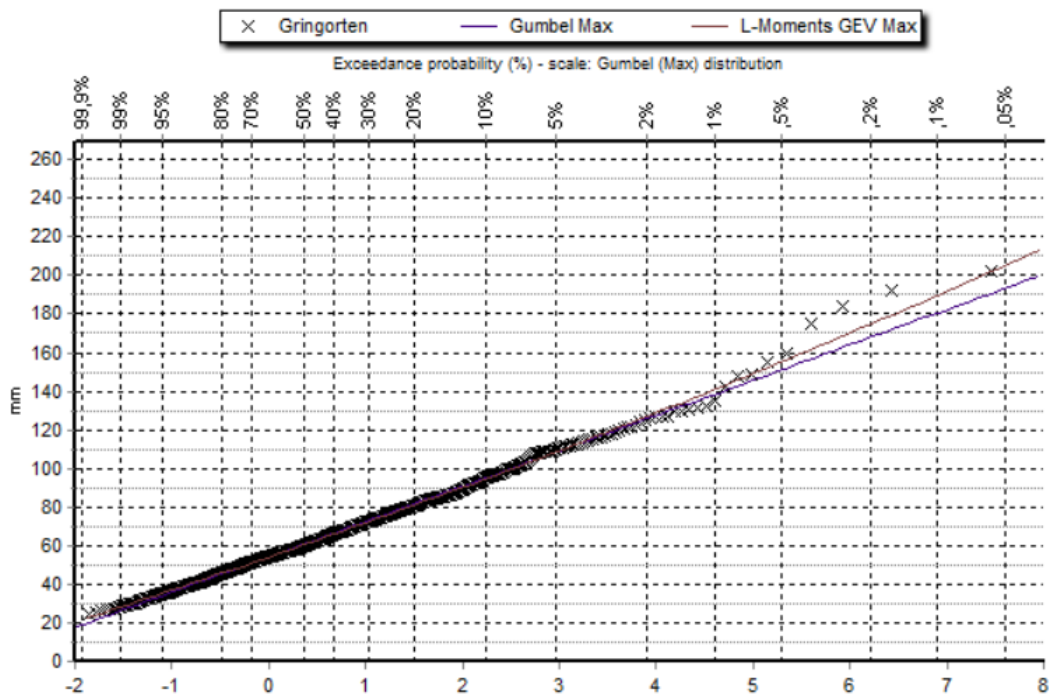


**Εικόνα 9.3:** Κατανομές προσαρμογής Gumbel-Max και GEV σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max, στο ιστορικό δείγμα βροχοπτώσεων

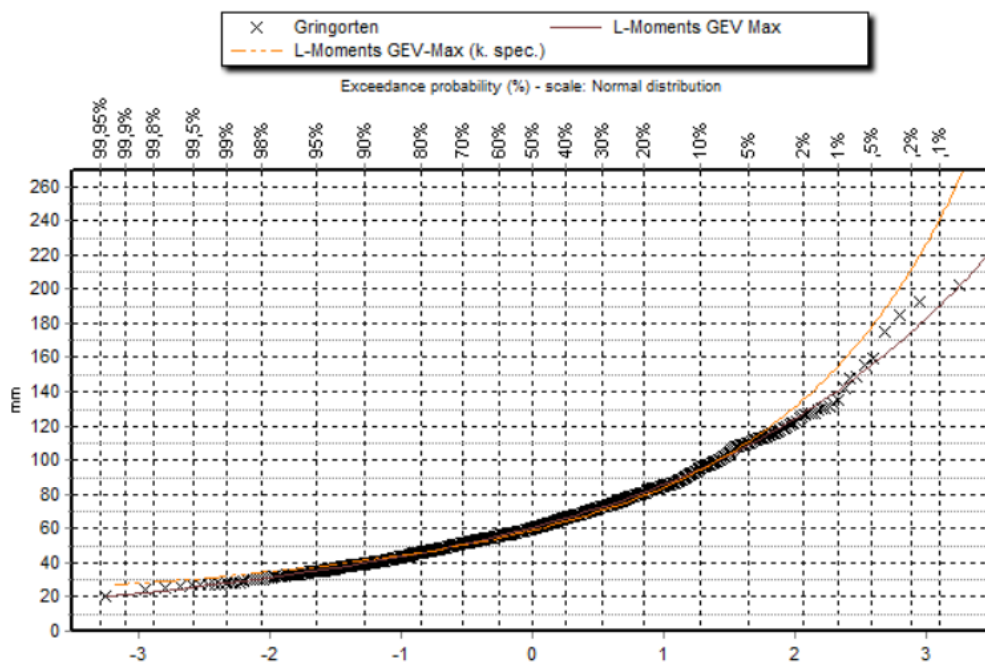


**Εικόνα 9.4:** Προσαρμογή κατανομής Gumbel-Max, στο ιστορικό δείγμα βροχοπτώσεων

Για τις συνθετικές τιμές μέγιστης κατακρήμνισης επιλέγεται η κατανομή GEV (Εικόνα 9.4), αφού στην Εικόνα 9.3 η GEV έχει  $\kappa > 0$  (κόκκινη καμπύλη).



**Εικόνα 9.5:** Κατανομές Gumbel-Max και GEV σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max, στο συνθετικό δείγμα βροχοπτώσεων

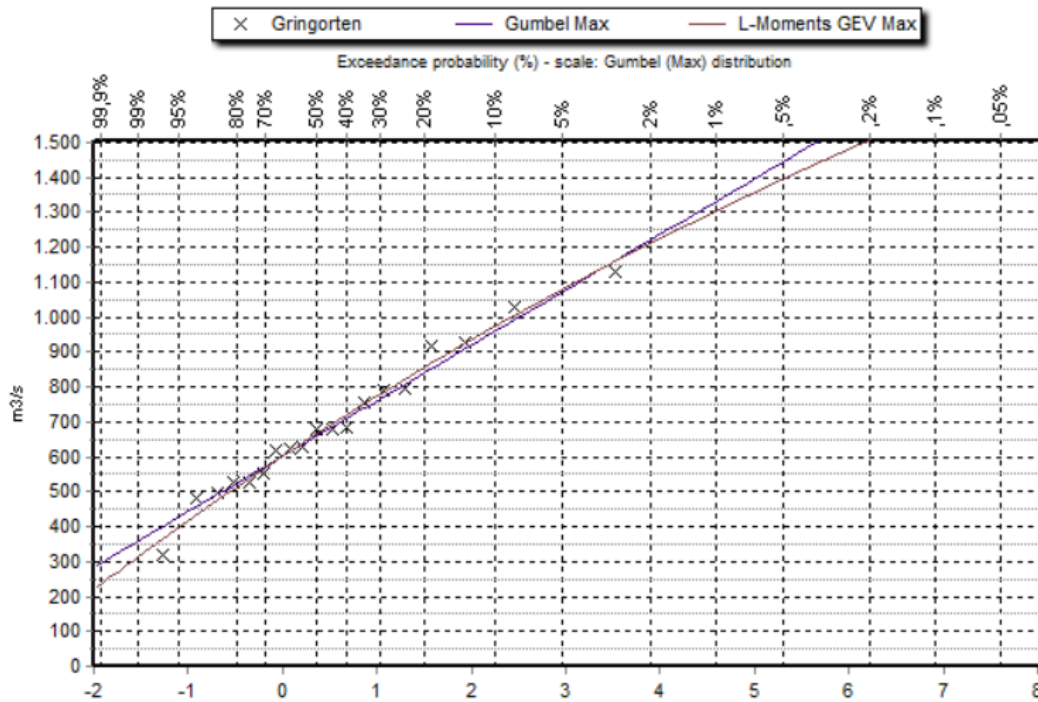


**Εικόνα 9.6:** Προσαρμογή κατανομής GEV, στο συνθετικό δείγμα βροχοπτώσεων

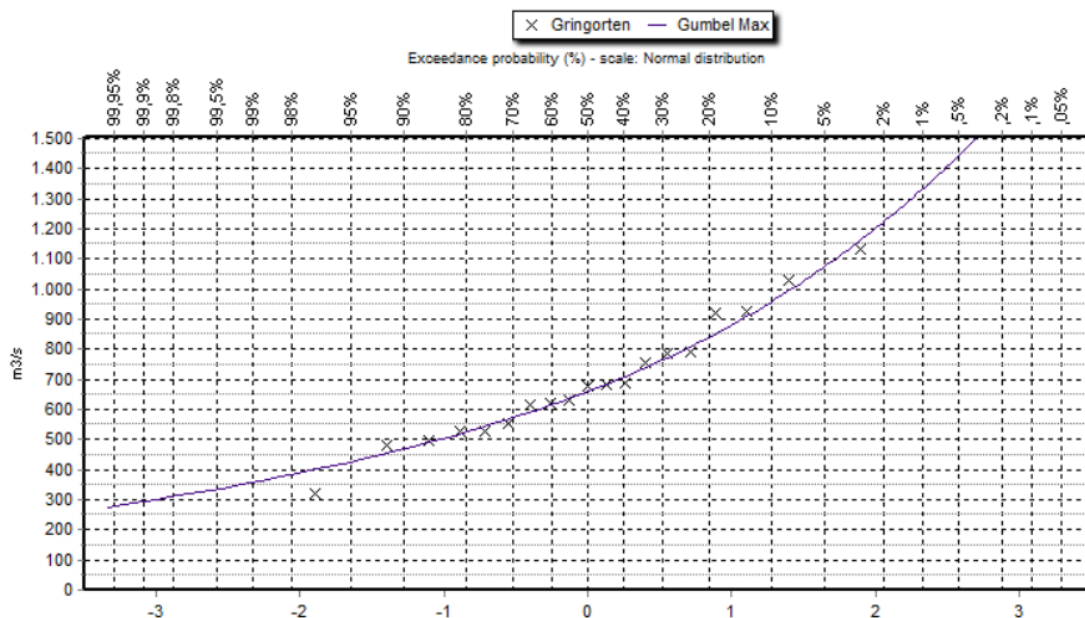
Από προσαρμογές δεδομένων παγκόσμιας κλίμακας βροχών αναμένεται η τιμή του  $k$  να είναι περίπου στο 0,15 (Εικόνα 9.4 κίτρινη καμπύλη). Στο τρέχον δείγμα το  $k$  είναι 0,035. Η απόκλιση αυτή ευθύνεται στην ευαισθησία των κατανομών στα ακραία.

## 2. Παροχή:

Για τα ιστορικά δεδομένα μέγιστης αρχικής απορροής επιλέγεται η κατανομή Gumbel-Max (Εικόνα 9.6), αφού στην Εικόνα 9.5 η GEV έχει  $\kappa < 0$  (κόκκινη καμπύλη).



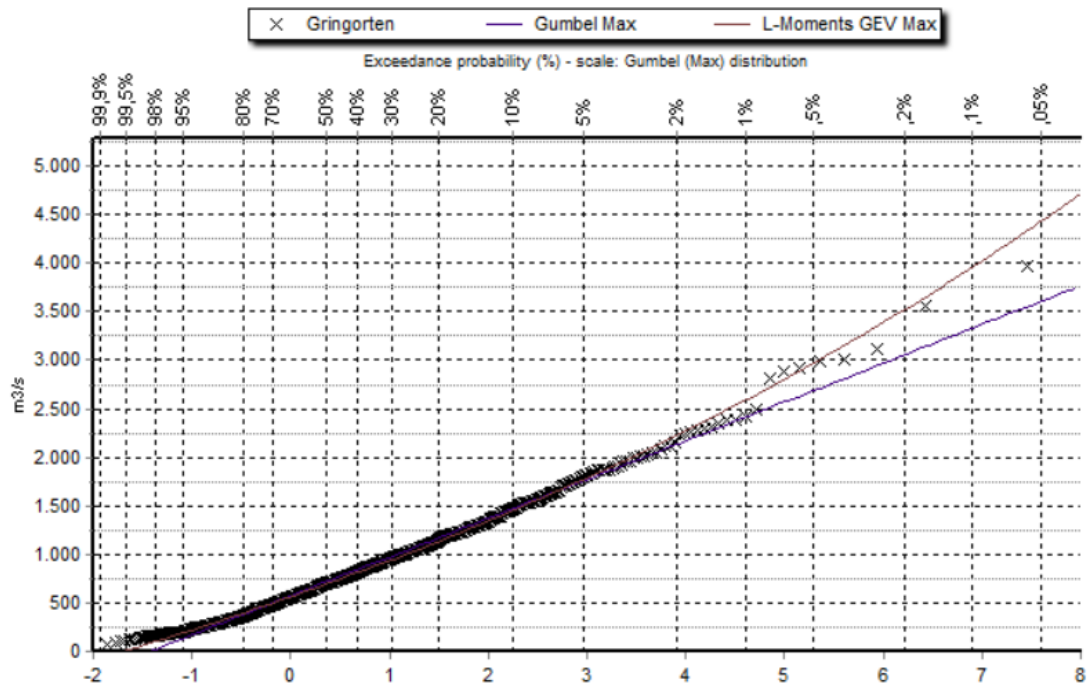
Εικόνα 9.7: Κατανομές Gumbel-Max και GEV σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max, στο ιστορικό δείγμα παροχών



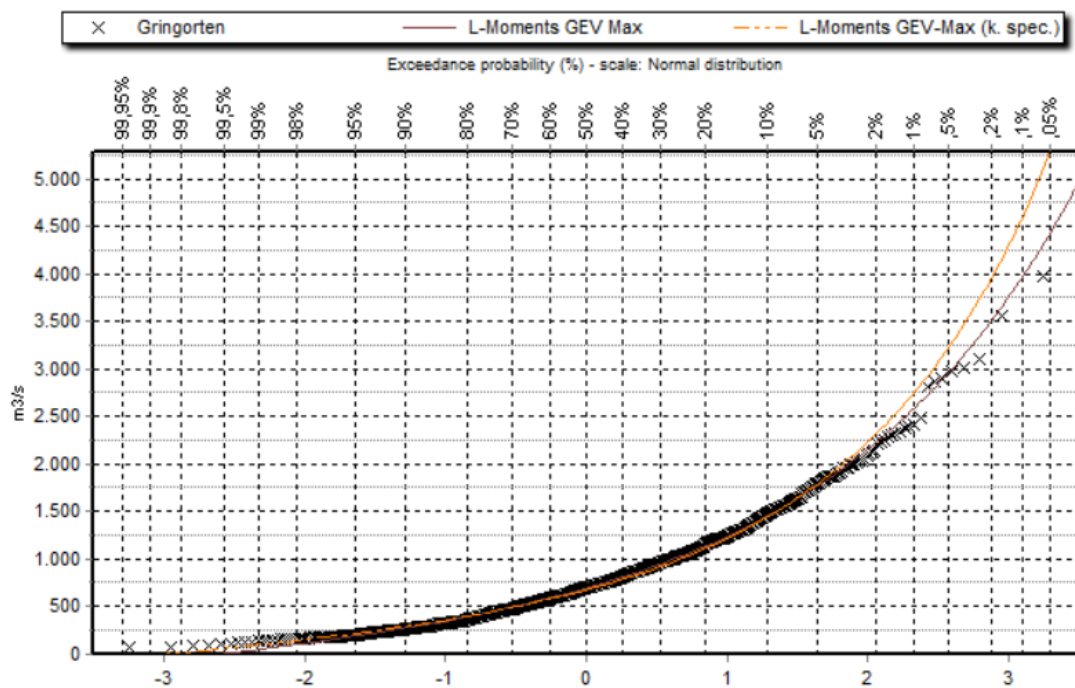
Εικόνα 9.8: Προσαρμογή κατανομής GEV, στο ιστορικό δείγμα παροχών

Για τις συνθετικές τιμές μέγιστης αρχικής παροχής επιλέγεται η κατανομή GEV (Εικόνα 9.8), αφού στην Εικόνα 9.7 η GEV έχει  $\kappa > 0$  (κόκκινη καμπύλη).





**Εικόνα 9.9:** Κατανομές Gumbel-Max και GEV σε χαρτί κατανομής Gumbel-Max, στο συνθετικό δείγμα παροχών



**Εικόνα 9.10:** Προσαρμογή κατανομής GEV, στο συνθετικό δείγμα παροχών

Στο δείγμα των παροχών η παράμετρος σχήματος που σχετίζεται με την ασυμμετρία,  $\kappa$ , αυξάνεται στην τιμή  $\kappa = 0,09$  γεγονός που είναι πιο συνεπές με την γενική υδρολογική



εμπειρία. Επίσης, είναι απολύτως λογικό το συνθετικό δείγμα αρχικών παροχών να είναι πιο ασύμμετρο σε σχέση με το αντίστοιχο της βροχόπτωσης.

## 9.6 Στοχαστική προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα

Με σκοπό την εξαγωγή στατιστικών αποτελεσμάτων έγινε στοχαστική προσομοίωση όλων των διεργασιών που έχουν περιγραφεί στα επιμέρους μοντέλα που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία. Συγκεκριμένα: α) υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής, β) προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα, γ) επιμερισμός μέσων ημερήσιων παροχών, δ) διαχείριση και διόδευση πλημμυρικού επεισοδίου.

Ειδικότερα, το δείγμα ημερήσιων συνθετικών βροχοπτώσεων μήκους 1000 ετών, που παράχθηκε από το μοντέλο *anySim*, μετατράπηκε σε αντίστοιχη παροχή εισροής στον ταμιευτήρα, μέσω του μοντέλου υδρολογικής προσομοίωσης της λεκάνης. Στην συνέχεια, με βάση αυτήν τη χρονοσειρά ημερήσιων παροχών, εφαρμόστηκε σε συνεχή χρόνο το μοντέλο ημερήσιας λειτουργίας του ταμιευτήρα και απομονώθηκαν 1408 επεισόδια υπερχειλίσης και οι αντίστοιχες στάθμες του ταμιευτήρα στην αρχή κάθε επεισοδίου. Για να προσομοιωθεί πλήρως και σε πιο λεπτομερή χρονική κλίμακα, κάθε ένα από αυτά τα 1408 επεισόδια, δημιουργήθηκαν ωριαία υδρογραφήματα εισροών διάρκειας πέντε ημερών. Συγκεκριμένα, κάθε πενθήμερο επεισόδιο περιλαμβάνει την ημέρα που παρατηρήθηκε υπερχειλίση (με βάση το μοντέλο συνεχούς λειτουργίας του ταμιευτήρα), τις δύο προηγούμενες ημέρες, αλλά και τις δύο επόμενες. Έπειτα, στις τιμές των ημερήσιων παροχών, εφαρμόστηκε η διαδικασία ωριαίου επιμερισμού. Τέλος, τα πενθήμερα ωριαία υδρογραφήματα εισήχθησαν στο μοντέλο ωριαίας διόδευσης και διαχείρισης των θυροφραγμάτων, και για κάθε ένα από αυτά καταγράφηκαν οι χρονοσειρές στάθμης, εκροής από τον υπερχειλιστή και τους στροβίλους, καθώς και οι αντίστοιχοι όγκοι αποθήκευσης και εκροής.

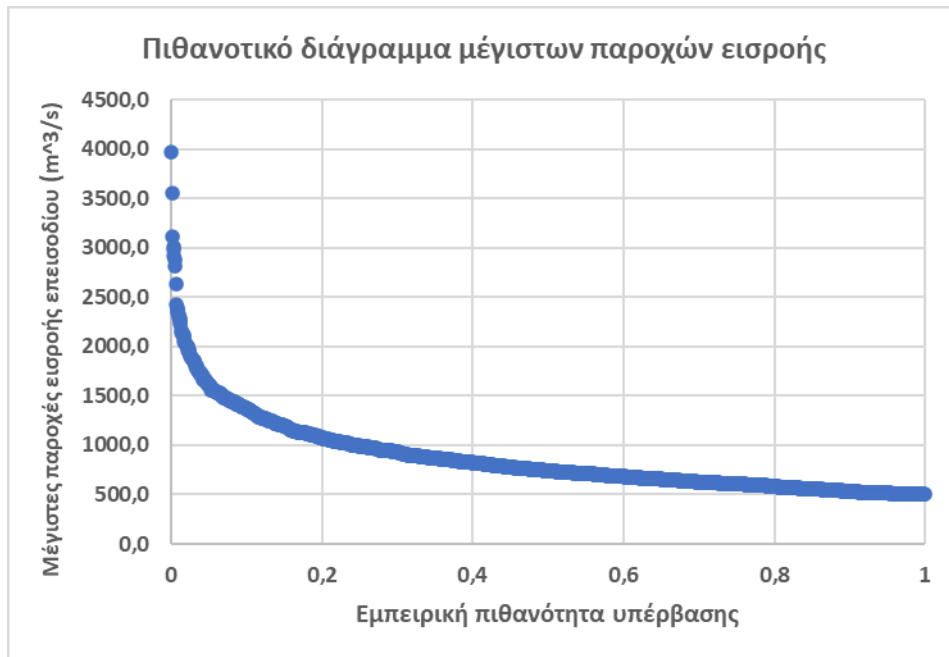
Τα μεγέθη, τα οποία εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι:

- η μέγιστη παροχή εισροής
- η παροχή αιχμής κατά την εκροή διαμέσου του υπερχειλιστή
- η μέγιστη στάθμη στον ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια διέλευσης του πλημμυρικού επεισοδίου, και
- οι όγκοι εκροής από τους στροβίλους και τον εκχειλιστή (εφόσον απαιτήθηκε άνοιγμα των θυροφραγμάτων).

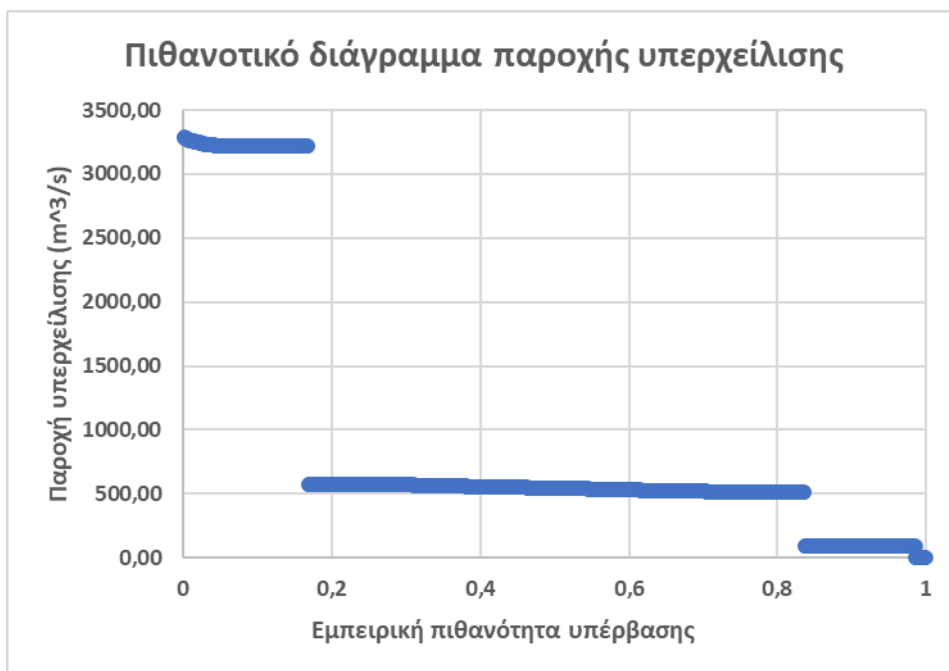
Η ανάλυση των μεγεθών αυτών γίνεται με χρήση εμπειρικών πιθανοτικών διαγραμμάτων, μορφής καμπύλης διάρκειας, που περιγράφονται παρακάτω. Για την αντιστοίχιση των εμπειρικών πιθανοτήτων υπέρβασης στο εκάστοτε διατεταγμένο (κατά φθίνουσα σειρά) δείγμα, εφαρμόστηκαν οι θέσεις σχεδίασης Weibull, ήτοι:

$$q_i = \frac{i}{n+1} \quad (9.4)$$

όπου  $i$  η θέση του δείγματος και  $n$  το μήκος του.



**Εικόνα 9.11:** Πιθανοτικό διάγραμμα μέγιστων ημερήσιων παροχών εισροής



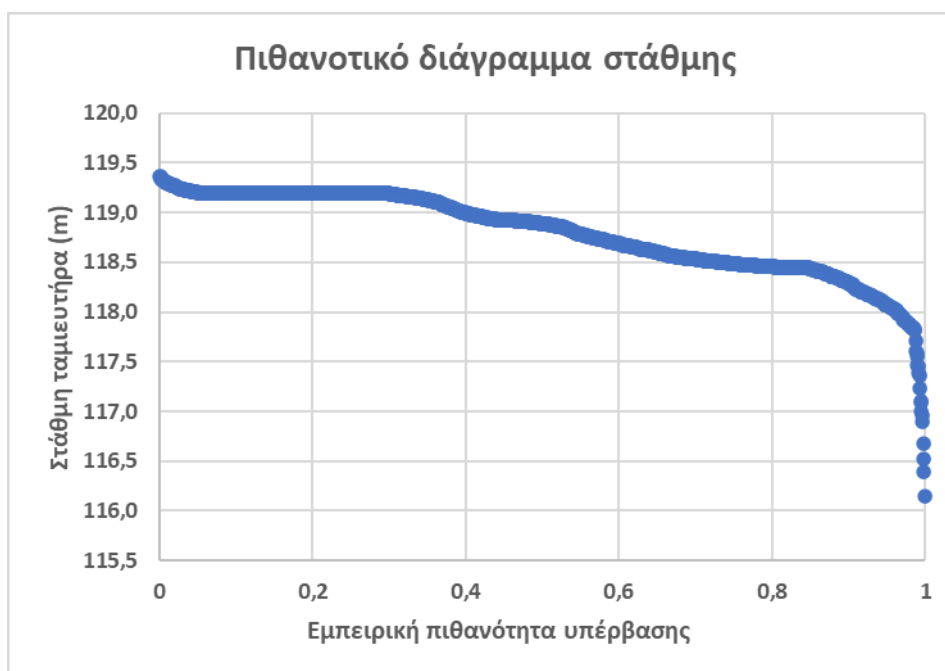
**Εικόνα 9.12:** Πιθανοτικό διάγραμμα μέγιστων ωριαίων παροχών υπερχειλίσσης

Από την πιθανοτική αυτή ανάλυση προκύπτει ότι η πιθανοτική καμπύλη των μέγιστων παροχών εισροής των πενθήμερων επεισοδίων υπερχειλίσσης είναι ομαλή (**Εικόνα 9.11**), καθώς περιγράφει μια φυσική διεργασία, η οποία είναι συνεχής, ενώ η αντίστοιχη καμπύλη των παροχών εκροής είναι κλιμακωτή (**Εικόνα 9.12**), καθώς το φυσικό φαινόμενο «διαταράσσεται» λόγω της λειτουργίας των θυροφραγμάτων. Ειδικότερα, στο διάγραμμα πιθανοτικής εκροής υπάρχουν τέσσερις ζώνες, οι οποίες προκύπτουν με βάση την πολιτική λειτουργίας των θυροφραγμάτων που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη:

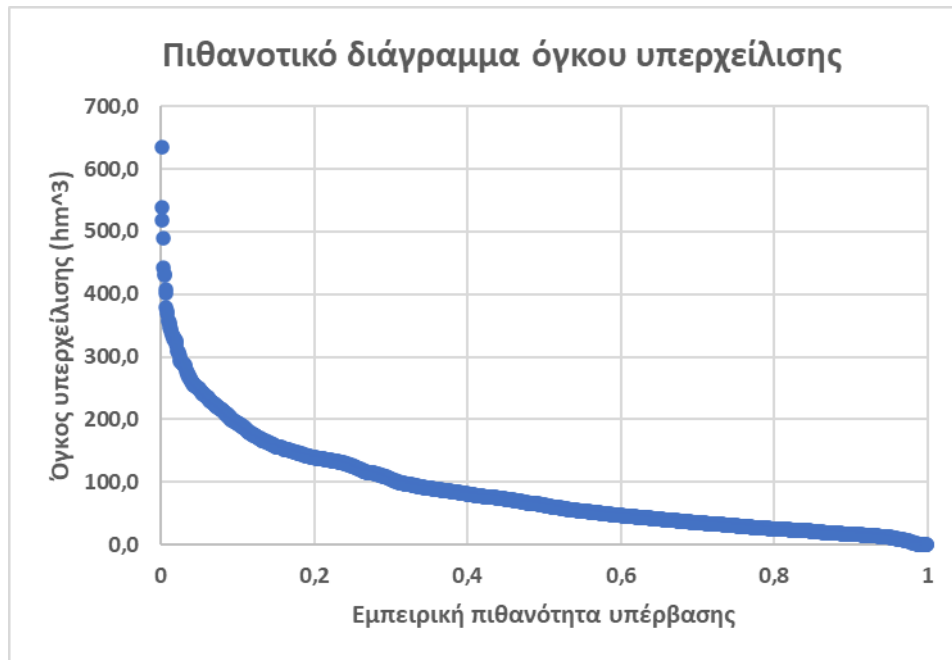
- Σε πολύ μικρό ποσοστό του χρόνου διέρχεται νερό μόνο από τους στροβίλους και κατά συνέπεια το μοντέλο δεν καταγραφεί παροχή εκροής από τον υπερχειλιστή.
- Σε ποσοστό της τάξης του 16% των περιστατικών υπερχείλισης, τα θυροφράγματα ανοίγουν στο 3,3% του μέγιστου ανοίγματός τους, οπότε διέρχεται μια πολύ μικρή εκροή (50 m<sup>3</sup>/s), συμπληρωματικά των 500 m<sup>3</sup>/s που ήδη διέρχονται από τους στροβίλους.
- Στο μεγαλύτερο εύρος του χρόνου (65%), όπου τα θυροφράγματα είναι ανοιχτά στο 17,7% του μέγιστου ανοίγματός τους, εκρέει νερό με παροχή περίπου 500 m<sup>3</sup>/s, οπότε η συνολική εκροή στο ποτάμι είναι της τάξης των 1000 m<sup>3</sup>/s.
- Τέλος, σε ποσοστό 17% των προσομοιωμένων πλημμυρικών επεισοδίων, τα θυροφράγματα ανοίγουν πλήρως, οπότε ο εκχειλιστής λειτουργεί με την μέγιστη παροχетеυτικότητα του για την εκάστοτε στάθμη, η οποία φτάνει μέχρι τα επίπεδα των 3200 m<sup>3</sup>/s (περίπου η μισή της παροχής σχεδιασμού του, ήτοι 6100 m<sup>3</sup>/s).

Έτσι, τα «σκαλοπάτια» που παρατηρούνται αντιστοιχούν στις διαχειριστικές πολιτικές που ακολουθήθηκαν.

Τα υπόλοιπα μεγέθη, στάθμη και όγκος υπερχείλισης, έχουν πιο ομαλή μορφή. Ειδικότερα για την στάθμη παρατηρείται ότι στα 1000 έτη της προσομοίωσης, η μέγιστη τιμή της είναι +119,4 m (**Εικόνα 9.13**). Συνεπώς η υψηλότερη καταγεγραμμένη τιμή της στάθμης είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την Α.Σ.Π. του ταμιευτήρα (+126 m, σύμφωνα με τη σχετική μελέτη), γεγονός που οφείλεται στην πολιτική διαχείρισης των θυροφραγμάτων που προσομοιώνεται στο μοντέλο. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί πως η αξιολόγηση της πραγματικής περιόδου επαναφοράς που αντιστοιχεί η Α.Σ.Π., κατά τον σχεδιασμό, θα έπρεπε να γίνει σε μεγαλύτερο μήκος προσομοίωσης. Επίσης η μελέτη σχεδιασμού έγινε με πλήρως ανοιχτά τα θυροφράγματα, οπότε πάλι δεν είναι απολύτως συγκρίσιμα ως μεγέθη.



**Εικόνα 9.13:** Πιθανοτικό διάγραμμα μέγιστης πλημμυρικής στάθμης ταμιευτήρα



**Εικόνα 9.14:** Πιθανοτικό διάγραμμα όγκων υπερχειλίσης

Τέλος στην **Εικόνα 9.14**, παρουσιάζεται το πιθανοτικό διάγραμμα των όγκων νερού που υπερχειλίζουν διαμέσου του εκχειλιστή. Δεδομένου πως οι στρόβιλοι, με παροχετευτικότητα  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , διοχετεύουν ανά πενθήμερο επεισόδιο περίπου  $200 \text{ hm}^3$ , διαπιστώνεται πως η τάξη μεγέθους των συνολικών όγκων υπερχειλίσης πενθήμερου επεισοδίου είναι λογική.

## 10 Συμπεράσματα-Προτάσεις

---

### 10.1 Σύνοψη εργασιών

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων, συνδυάζοντας μοντέλα διαφορετικών χρονικών κλιμάκων. Η υπολογιστική διαδικασία υλοποιείται ως μια σύζευξη μοντέλων, που ξεκινούν από την υδρολογική προσομοίωση της λεκάνης απορροής, και καταλήγουν στη διαχείριση της εισερχόμενης πλημμύρας, μέσω κατάλληλων χειρισμών των θυροφραγμάτων και στροβίλων. Το πλαίσιο αυτό αξιολογήθηκε με βάση το φράγμα Πουρναρίου I επί του ποταμού Αράχθου, που είναι από τα σημαντικότερα υδροηλεκτρικά έργα της χώρας, και ταυτόχρονα αυτό που διέπεται από τον υψηλότερο πλημμυρικό κίνδυνο, λόγω της γειτνιάσής του με την πόλη της Άρτας. Μάλιστα, έχει τη μεγαλύτερη παροχή σχεδιασμού υπερχειλιστή στη χώρα, και τη μεγαλύτερη παροχετευτικότητα στροβίλων.

### 10.2 Συμπεράσματα

Στη συνέχεια γίνεται μια σύνοψη των συμπερασμάτων της έρευνας, διαχωρισμένα ανά μοντέλο, στην αντίστοιχη χρονική κλίμακα:

#### Ημερήσια υδρολογική προσομοίωση λεκάνης απορροής:

Η βαθμονόμηση του μοντέλου, με δεδομένα της περιόδου 1980-2000, κρίνεται ιδιαίτερα επιτυχημένη, ώστε να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στο μεταγενέστερο πλαίσιο στοχαστικής προσομοίωσης, στο οποίο τροφοδοτείται με συνθετικές βροχές πολύ μεγάλου μήκους. Από την στατιστική ανάλυση των ετήσιων μεγίστων παροχών, ιστορικών και προσομοιωμένων, προκύπτει πως οι κατανομές πιθανοτήτων των δύο δειγμάτων είναι πρακτικά ταυτόσημες. Είναι λοιπόν σημαντικό πως το μοντέλο, αν και περιέχει μικρό αριθμό παραμέτρων (τέσσερις), μπορεί να αναπαράξει όχι μόνο το γενικό ισοζύγιο της λεκάνης αλλά και τις αιχμές των ημερήσιων παροχών. Η πτυχή αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στην παρούσα μελέτη, η οποία εστιάζει σε μεγάλα πλημμυρικά γεγονότα.

#### Συνεχής προσομοίωση ημερήσιας λειτουργίας ταμιευτήρα:

Η αναπαράσταση της λειτουργίας του ταμιευτήρα σε ημερήσια χρονική κλίμακα συμβιβάζει ικανοποιητικά την απαίτηση μιας συνεχούς προσομοίωσης, προκειμένου να αποτυπωθούν όσο το δυνατόν περισσότεροι συνδυασμοί αρχικής στάθμης και παροχής εισροής, χωρίς να επιβαρύνεται δραματικά ο υπολογιστικός φόρτος. Η χρήση του μοντέλου σε αυτή την κλίμακα είναι βοηθητική, ώστε να επιτρέψει την εύρεση των επεισοδίων υπερχείλισης στο πλήρες μήκος της προσομοίωσης.

Ένα χρήσιμο συμπέρασμα των αναλύσεων με το συγκεκριμένο μοντέλο είναι πως όταν εφαρμόστηκε με μηνιαίο βήμα προσομοίωσης κατά την περίοδο 1980-2000, δεν προέκυψε καμία υπερχείλιση, ενώ στην ημερήσια κλίμακα καταγράφηκαν 12 τέτοια επεισόδια. Αυτό συνέβη λόγω της πολύ μεγάλης παροχετευτικότητας των στροβίλων (500 m/s), καθώς αν γίνει αναγωγή τους στο μήνα, προκύπτει η δυνατότητα εκροής περίπου 1315 hm<sup>3</sup>. Συνεπώς,

το μηναίο βήμα σε υδροηλεκτρικούς ταμιευτήρες που κατά κανόνα έχουν στροβίλους με πολύ μεγάλη παροχή εκροής, είναι εντελώς ακατάλληλο για τέτοιου τύπου αναλύσεις.

#### Επιμερισμός μέσων ημερήσιων παροχών για την παραγωγή επεισοδίων ωριαίας χρονικής κλίμακας:

Το μοντέλο επιμερισμού των παροχών ήταν βασικός ερευνητικός στόχος αλλά και το πλέον σημαντικό στοιχείο πρωτοτυπίας, καθώς το πρόβλημα αναγωγής μιας χρονοσειράς ημερήσιων παροχών σε ωριαία, διέπεται από υψηλή πολυπλοκότητα, απαιτώντας έτσι ενδελεχή διερεύνηση. Το προταθέν σχήμα (από τα τέσσερα που εξετάστηκαν), το οποίο υλοποιεί μια γραμμική σχέση για τον ανοδικό κλάδο και μια εκθετική σχέση για τον καθοδικό (κλάδος στείρευσης), επιτυγχάνει επαρκή μαθηματική ακρίβεια (διατήρηση εξισώσεων όγκου και συνέχειας), και ταυτόχρονα παράγει μια υδρολογικά συνεπή μορφή ωριαίων υδρογραφημάτων. Μάλιστα, εισάγοντας τυχαιότητα στην ώρα εμφάνισης της αιχμής, γίνεται επί της ουσίας στοχαστικό και όχι ντετερμινιστικό.

Τελικά, οι παραγόμενες χρονοσειρές ωριαίων παροχών προσομοιάζουν με καταγεγραμμένα πλημμυρικά επεισόδια στη λεκάνη, που εμφανίζουν πολλαπλές αιχμές, αντίθετα από τα συνήθη πλημμυρογραφήματα που χρησιμοποιούνται στον υδρολογικό σχεδιασμό. Τα τελευταία χαρακτηρίζονται από ένα αρκετά απλό σχήμα, που δεν είναι ρεαλιστικό, και μάλιστα κατασκευάζεται με τρόπο ώστε να έχει όσο το δυνατό πιο δυσμενή χρονική διάταξη.

Η βασική δυσκολία της διαδικασίας επιμερισμού αφορά στον υπολογιστικό φόρτο. Ειδικότερα, για κάθε πενήνήμερο επεισόδιο, απαιτείται η επίλυση ενός προβλήματος μη γραμμικής βελτιστοποίησης για την εύρεση δέκα παραμέτρων (πέντε παροχές αιχμής και πέντε συντελεστές στείρευσης των αντίστοιχων καθοδικών κλάδων). Συνεπώς, για ένα πλήθος 1408 επεισοδίων που εξετάστηκαν στο σύνολο των 1000 ετών της προσομοίωσης, απαιτήθηκε η επίλυση 1408 προβλημάτων βαθμονόμησης.

#### Διαχείριση και διόδευση πλημμυρικού επεισοδίου σε ωριαία κλίμακα:

Μέχρι τώρα η λειτουργία των θυροφραγμάτων στο φράγμα Πουρναρίου ελέγχεται από τους χειριστές με ημιεμπειρικά μέσα, έχοντας ως πρότυπο ένα πολύ απλό κανόνα λειτουργίας που βασίζεται στο άνοιγμα των θυροφραγμάτων όταν το διατιθέμενο απόθεμα ξεπεράσει μια συγκεκριμένη στάθμη. Στην παρούσα εργασία αξιολογήθηκε και βελτιώθηκε μια πιο ολοκληρωμένη πολιτική λειτουργίας των έργων ελέγχου του ταμιευτήρα, η οποία αναπτύχθηκε πρόσφατα, σε ερευνητικό επίπεδο, και αποσκοπεί στο σταδιακό άνοιγμα των στροβίλων και θυροφραγμάτων, για την καλύτερη διαχείριση των πλημμυρών. Η προτεινόμενη πολιτική στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ανάσχεσης που πραγματοποιεί ο ταμιευτήρας με σκοπό την μεγιστοποίηση της δυναμικής παραγωγής ενέργειας, διατηρώντας ταυτόχρονα ένα πολύ υψηλό επίπεδο ασφαλείας (για το ίδιο το έργο και τις κατάντη περιοχές).

Οι προτεινόμενοι κανόνες διαχείρισης των στροβίλων και των θυροφραγμάτων ενσωματώθηκαν σε μοντέλο ωριαίας προσομοίωσης, που υλοποιεί τις διεργασίες ανάσχεσης της πλημμύρας και διόδυσής της διαμέσου του εκχειλιστή και των στροβίλων. Το μοντέλο

τροφοδοτείται με ωριαία υδρογραφήματα, διάρκειας πέντε ημερών, παράγοντας όλα τα μεγέθη ενδιαφέροντος μιας μελέτης πλημμυρών (εκροές, στάθμες, όγκοι ανάσχεσης).

#### Δημιουργία συνθετικών χρονοσειρών ημερήσιας βροχόπτωσης:

Η λειτουργία του όλου υπολογιστικού πλαισίου σε στοχαστικό πλαίσιο είχε ως βασική υποδομή συνθετικές χρονοσειρές ημερήσιας βροχόπτωσης, μήκους 1000 ετών. Η κατασκευή τους έγινε με το μοντέλο angsim, έχοντας ως βάση το ιστορικό δείγμα της περιόδου 1980-2020.

Συγκρίνοντας τα ιστορικά δείγματα με τα συνθετικά παρατηρήθηκε πολύ καλή αναπαραγωγή όλων των βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών τους, όχι μόνο στην ημερήσια κλίμακα αλλά και στις υψηλότερες (μηνιαία, ετήσια).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβλητότητα της συνθετικής βροχόπτωσης σε ακόμα μεγαλύτερες κλίμακες, η οποία ελέγχεται μέσω παραμέτρων που σχετίζονται με τον συντελεστή Hurst. Κατά την παραγωγή των συνθετικών χρονοσειρών, εφαρμόστηκαν κατάλληλες τιμές των παραμέτρων αυτών ώστε να προσομοιώνονται οι κλιματικές μεταβολές. Μάλιστα, αυτό συνέβαλε στην παραγωγή μέγιστων βροχοπτώσεων που είναι συμβατές με την γενική υδρολογική εμπειρία.

Γενικά, τα ετήσια μέγιστα των βροχών περιγράφονται από την κατανομή GEV, με συντελεστή σχήματος,  $\kappa$ , της τάξης του 0,15 (παγκόσμιος μέσος όρος). Ωστόσο, οι μέγιστες βροχές του ιστορικού δείγματος φαίνεται να ακολουθούν την κατανομή Gumbel, που είναι υποπερίπτωση της GEV, με  $\kappa=0$ . Αυτό δεν συνάδει με τη γενική υδρολογική εμπειρία, και μάλλον οφείλεται σε σφάλματα των δεδομένων ή/και στο μικρό μήκος των διαθέσιμων ιστορικών δειγμάτων. Οπότε, με την διαδικασία αυτή, εκτός του ότι παράγεται ένα δείγμα πολύ μεγάλου μήκους, το οποίο είναι απαραίτητο για την στατιστική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, αποκαθίσταται και μια γενικότερη υδρολογική συνέπεια στη στοχαστική προσομοίωση της διεργασίας της βροχόπτωσης.

#### Πιθανοτική ανάλυση αποτελεσμάτων στοχαστικής προσομοίωσης:

Η πιθανοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης των πλημμυρικών επεισοδίων έγινε με τη μορφή πιθανοτικών καμπυλών, οι οποίες αναπαριστούν το διατεταγμένο δείγμα συναρτήσει της εμπειρικής πιθανότητας υπέρβασης (καμπύλες διάρκειας). Ειδικότερα:

Η πιθανοτική καμπύλη των *μέγιστων παροχών εισροής* των πενήμερων επεισοδίων υπερχειλίσης είναι ομαλή, καθώς περιγράφει μια φυσική διεργασία. Αντίθετα, η καμπύλη των *μέγιστων παροχών εκροής* εμφανίζει μια ιδιαίτερη κλιμακωτή μορφή, καθώς διακρίνονται τέσσερις ζώνες, ως αποτέλεσμα της πολιτικής λειτουργίας των θυροφραγμάτων που εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη, και επιβάλλει άνοιγμα των θυροφραγμάτων σε συγκεκριμένες στάθμες, προκειμένου να διοχετεύεται συγκεκριμένο ποσοστό της παροχεταιυτικότητας του υπερχειλιστή.

Ως αποτέλεσμα, ενώ η εκροή εμφανίζει σχεδόν διακριτές τιμές (με πολύ μικρή μεταβλητότητα), η μέγιστη στάθμη παρουσιάζει ένα μεγάλο εύρος διακύμανσης, με μέγιστη

τιμή στο συνολικό προσομοιωμένο δείγμα, μήκους 1000 ετών, ίση με +119,4 m. Είναι αναμενόμενο ότι η τιμή αυτή είναι κατά πολύ χαμηλότερη από την ανώτατη στάθμη πλημμύρας (Α.Σ.Π.) με την οποία έχει μελετηθεί το έργο (+126,0 m), η οποία αντιστοιχεί σε πολύ μεγάλη περίοδο επαναφοράς (της τάξης των 10 000 ετών). Συνεπώς, η αξιολόγηση της πραγματικής περιόδου επαναφοράς που αντιστοιχεί η Α.Σ.Π., με την προτεινόμενη μεθοδολογία, θα έπρεπε να γίνει για πολύ μεγαλύτερο μήκος προσομοίωσης από τα 1 000 έτη (κάτι το οποίο ωστόσο δεν ήταν εφικτό, λόγω των περιορισμένων υπολογιστικών πόρων). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η μελέτη σχεδιασμού έγινε θεωρώντας ότι τα θυροφράγματα ανοίγουν πλήρως όταν η στάθμη ανέλθει στη στέψη τους (+120 m), ενώ εδώ λαμβάνεται υπόψη και η πολιτική διαχείρισής τους. Το σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μελέτη είναι υπερσυντηρητική, και αναφέρεται σε συνθήκες που δεν αναμένεται να συμβούν στην πράξη (καθώς στην υποθετική περίπτωση που θα πραγματοποιηθεί μια τόσο ακραία πλημμύρα, εύλογα οι χειριστές θα ανοίξουν τα θυροφράγματα πολύ νωρίτερα).

Τέλος, όσον αφορά στο πιθανοτικό διάγραμμα του συνολικού όγκου νερού που υπερχειλίζει διαμέσου του εκχειλιστή σε κάθε προσομοιωμένο επεισόδιο, αυτό έχει ομαλή μορφή. Σημειώνεται ότι η τάξη μεγέθους των συνολικών όγκων υπερχείλισης των πενθήμερων επεισοδίων είναι λογική, καθώς είναι παρεμφερής με τη λειτουργία των στροβίλων σε πλήρη παροχευτικότητα για το αντίστοιχο διάστημα.

### 10.3 Μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι

Όσον αφορά την περιοχή μελέτης και το φράγμα Πουρναρίου, ένας προφανής στόχος είναι η εφαρμογή του πλαισίου σύζευξης μοντέλων διαφορετικών κλιμάκων που αναπτύχθηκε για αρκετά πιο μεγάλο μήκος προσομοίωσης, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για περιόδους επαναφοράς αντίστοιχες της μελέτης σχεδιασμού των έργων υπερχείλισης του φράγματος.

Όπως αναφέρθηκε, η σημαντικότερη καινοτομία της παρούσας έρευνας ήταν το μοντέλο επιμερισμού των ημερήσιων παροχών σε ωριαίες. Η διαδικασία αυτή έχει επίσης εξαιρετικά μεγάλο εύρος εφαρμογών. Δεδομένου ότι είναι σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, έχει πολλά περιθώρια βελτίωσης, όσον αφορά στην ίδια τη σύλληψη του μοντέλου, τη διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων του, την μείωση του υπολογιστικού φόρτου, αλλά και τον συνδυασμό του με καθαρά στοχαστικές προσεγγίσεις, που βασίζονται στην έννοια του κλιμακογράμματος. Επίσης, μπορεί να γενικευτεί ώστε να μπορεί να παράγει συνεχείς χρονοσειρές ωριαίων παροχών και όχι μεμονωμένα τμήματα, διάρκειας λίγων ημερών.

Το στοχαστικό πλαίσιο που αναπτύχθηκε είναι αρκετά γενικό, και μπορεί να αξιοποιηθεί για διάφορες εφαρμογές που αφορούν στην εκτίμηση και διαχείριση του πλημμυρικού κινδύνου, όχι μόνο των υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων αλλά και άλλων μορφών αντιπλημμυρικών έργων. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο αυτό μπορεί:

- να υποστηρίξει έναν πιο ρεαλιστικό σχεδιασμό υπερχειλιστών, που θα λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση όλων των σημαντικών διεργασιών που αφορούν στην παραγωγή, διόδευση και διαχείριση της πλημμύρας·



- να αξιοποιηθεί για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση των κανόνων διαχείρισης θυροφραγμάτων, για ένα πολύ μεγάλο εύρος πλημμυρικών επεισοδίων·
- να ενταχθεί σε συστήματα υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης, στο οποίο θα λαμβάνει προγνώσεις ημερήσιας βροχόπτωσης από μοντέλα καιρού και θα υλοποιεί το πλήρες πλέγμα από την υδρολογική προσομοίωση έως τη διαχείριση των θυροφραγμάτων.

## Αναφορές

---

- Boughton, W., and O. Droop, Continuous simulation for design flood estimation—A review. *Environmental Modelling & Software*, 18, 309-318, doi:10.1016/S1364-8152(03)00004-5, 2003.
- Efstratiadis, A., I. Tsoukalas, and D. Koutsoyiannis, Generalized storage-reliability-yield framework for hydroelectric reservoirs, *Hydrological Sciences Journal*, 66(4), 580–599, doi:10.1080/02626667.2021.1886299, 2021.
- Efstratiadis, A., P. Dimas, G. Pouliasis, I. Tsoukalas, P. Kossieris, V. Bellos, G.-K. Sakki, C. Makropoulos, and S. Michas, Revisiting flood hazard assessment practices under a hybrid stochastic simulation framework, *Water*, 14(3), 457, doi:10.3390/w14030457, 2022.
- Efstratiadis, A., Y. Dialynas, S. Kozanis, and D. Koutsoyiannis, A multivariate stochastic model for the generation of synthetic time series at multiple time scales reproducing long-term persistence, *Environmental Modelling & Software*, 62, 139-152, doi:10.1016/j.envsoft.2014.08.017, 2014.
- Grimaldi, S., A. Petroselli, and F. Serinaldi, A continuous simulation model for design-hydrograph estimation in small and ungauged watersheds, *Hydrological Sciences Journal*, 57, 1035-1051, doi:10.1080/02626667.2012.702214, 2012.
- Gringorten, I. I., A plotting rule for extreme probability paper, *Journal of Geophysical Research*, 68(3), 813-814, 1963.
- Hosking, J. R. M., L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Methodological)*, 105–124, 1990.
- Koutsoyiannis, D., A critical review of probability of extreme rainfall: principles and models, *Advances in Urban Flood Management*, edited by R. Ashley, S. Garvin, E. Pasche, A. Vassilopoulos, and C. Zevenbergen, 139–166, Taylor and Francis, London, 2007.
- Koutsoyiannis, D., A generalized mathematical framework for stochastic simulation and forecast of hydrologic time series, *Water Resources Research*, 36(6), 1519-1533, doi:10.1029/2000WR900044, 2000.
- Koutsoyiannis, D., A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation, *Water Resources Research*, 35(4), 1313–1322, doi:10.1029/1999WR900002, 1999.
- Koutsoyiannis, D., and A. Manetas, Simple disaggregation by accurate adjusting procedures, *Water Resources Research*, 32(7), 2105-2117, doi:10.1029/96WR00488, 1996.
- Koutsoyiannis, D., Coupling stochastic models of different time scales, *Water Resources Research*, 37(2), 379-391, doi:10.1029/2000WR900200, 2001.
- Koutsoyiannis, D., Hurst-Kolmogorov dynamics and uncertainty, *Journal of the American Water Resources Association*, 47(3), 481–495, doi:10.1111/j.1752-1688.2011.00543.x, 2011.

- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 1, Theoretical investigation, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 575–590, 2004a.
- Koutsoyiannis, D., Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall, 2, Empirical investigation of long rainfall records, *Hydrological Sciences Journal*, 49(4), 591–610, 2004b.
- Koutsoyiannis, D., *Stochastics of Hydroclimatic Extremes – A Cool Look at Risk*, Edition 2, ISBN: 978-618-85370-0-2, 346 p., Kallipos Open Academic Editions, Athens, 2022.
- Ntemiroglou, Ch., G. K. Sakki, and A. Efstratiadis, Flood control across hydropower dams: The value of safety, *Proceedings of 12th ICOLD European Club Symposium 2023 “Role of dams and reservoirs in a successful energy transition”*, 2023.
- Papalexioy, S. M., and D. Koutsoyiannis, Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall, *Water Resources Research*, 49(1), 187–201, doi:10.1029/2012WR012557, 2013.
- Roilos, Ch., *Dealing with Flood Events at Hydroelectric Plants Areas in Western Greece*, Dam Safety Sector, Hydroelectric Generation Department, Public Power Corporation, Dec 2018.
- Sankarasubramanian, A., and K. Srinivasan, Investigation and comparison of sampling properties of L-moments and conventional moments, *Journal of Hydrology*, 218(1-2), 13–34, 1999.
- Tsoukalas, I., A. Efstratiadis, and C. Makropoulos, Building a puzzle to solve a riddle: A multi-scale disaggregation approach for multivariate stochastic processes with any marginal distribution and correlation structure, *Journal of Hydrology*, 575, 354–380, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.05.017, 2019.
- Tsoukalas, I., A. Efstratiadis, and C. Makropoulos, Stochastic periodic autoregressive to anything (SPARTA): Modelling and simulation of cyclostationary processes with arbitrary marginal distributions, *Water Resources Research*, 54(1), 161–185, WRCR23047, doi:10.1002/2017WR021394, 2018a.
- Tsoukalas, I., C. Makropoulos, and D. Koutsoyiannis, Simulation of stochastic processes exhibiting any-range dependence and arbitrary marginal distributions, *Water Resources Research*, 54(11), 9484–9513, doi:10.1029/2017WR022462, 2018b.
- Tsoukalas, I., P. Kossieris, and C. Makropoulos, Simulation of non-Gaussian correlated random variables, stochastic processes and random fields: Introducing the anySim R-Package for environmental applications and beyond, *Water*, 12(6), 1645, doi:10.3390/w12061645, 2020.
- Vogel, R. M., and N. M. Fennessey, L-moment diagrams should replace product moment diagrams, *Water Resources Research*, 29(6), 1745–1752, 1993.
- Winter, B., K. Schneeberger, N. V. Dung, M. Huttenlau, S. Achleitner, J. Stötter, B. Merz, and S. Vorogushyn, A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale, *Hydrological Sciences Journal*, 64, 539–554, doi:10.1080/02626667.2019.1593419, 2019.
- Ευστρατιάδης, Α., Α. Κουκουβίνος, Π. Δημητριάδης, Ε. Ρόζος, και Α. Δ. Κούσης, Τεχνική έκθεση θεωρητικής τεκμηρίωσης μοντέλου υδρολογικής-υδραυλικής προσομοίωσης,

*ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ – Εκτίμηση πλημμυρικών ροών στην Ελλάδα σε συνθήκες υδροκλιματικής μεταβλητότητας: Ανάπτυξη φυσικά εδραιωμένου εννοιολογικού-πιθανοτικού πλαισίου και υπολογιστικών εργαλείων, Ανάδοχοι: ΕΤΜΕ: Πέππας & Συν/τες Ε.Ε., Γραφείο Μαχαίρα, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, 108 σ., Σεπτέμβριος 2014.*

Ευστρατιάδης, Α., και Π. Παπανικολάου, Σημειώσεις μαθήματος "Υδραυλικές Κατασκευές - Φράγματα", Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2018.

Ευστρατιάδης, Α., Π. Παπανικολάου, και Σ. Μίχας, Διόδευση πλημμυρών από έργα εκτροπής και υπερχείλισης, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ακαδημαϊκό έτος 2020-21.

Κ/Ξ Μελετών Διαχείρισης Υδάτων Ηπείρου: Γ. Καραβοκύρης & Συνεργάτες Σύμβουλοι Μηχανικοί Α.Ε. - ENVECO Α.Ε. - ΕΜΒΗΣ Α.Ε. - Περγλέρος Βασίλειος, 2η Αναθεώρηση Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Ηπείρου (ΕΛ05), Ρύθμιση Μοντέλων – Φυσικά Υδατικά Ισοζύγια, Τεύχος Α: Επιφανειακά Υδατικά Συστήματα, Ιανουάριος 2023.

Κοζάνης, Σ., Α. Χριστοφίδης, και Α. Ευστρατιάδης, Θεωρητική τεκμηρίωση για το λογισμικό Υδρογνώμων (έκδοση 4), Ανάπτυξη βάσης δεδομένων και εφαρμογών λογισμικού σε διαδικτυακό περιβάλλον για την «Εθνική Τράπεζα Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 173 σ., Αθήνα, Ιούνιος 2010.

Κουτσογιάννης, Δ., Ι. Μαρκόνης, Α. Κουκουβίνος, και Ν. Μαμάσης, Υδρολογική μελέτη πλημμυρών Αράχθου, Οριστική Οριοθέτηση Τμήματος Κοίτης Ποταμού Αράχθου που Διέρχεται στα Όρια του Δήμου Αρταίων, Ανάθεση: Δήμος Αρταίων, Ανάδοχοι: ΑΔΚ - Αρώνης – Δρέττας – Καρλαύτης Σύμβουλοι Μηχανικοί ΑΕ, ΥΔΡΟΤΕΚ - Υδραυλικές Μελέτες ΑΕ, Β. Μούζος, 272 σ., 2010.

Κουτσογιάννης, Δ., Στατιστική Υδρολογία, Έκδοση 4, 312 σελίδες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1997.

Μπαλτάς, Ε., Υδρολογία πλημμυρών και υδρολογική διόδευση, Σημειώσεις μαθήματος «Διαχείριση πλημμυρικού κινδύνου», Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2021.

Ντεμίρογλου, Χ., Βελτιστοποίηση διαχείρισης θυροφραγμάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο φράγμα Αράχθου, Διπλωματική εργασία, 164 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2020.

Ποντικός, Σ., Πιθανοτική διερεύνηση καταστάσεων εδαφικής υγρασίας στην Ελληνική επικράτεια για χρήση τους στον υδρολογικό σχεδιασμό, Διπλωματική εργασία, 83 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Νοέμβριος 2014.