



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

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

Επιβλέπων: Ανδρέας Ευστρατιάδης
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΠΑΝΤΑΖΗ ΜΑΡΙΑ-ΕΛΕΝΗ

Αθήνα, 2023

Διπλωματική εργασία

Κίνητρα

Δημιουργία ολοκληρωμένου πλαισίου εκτίμησης πλημμυρικού κινδύνου υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων



Ανάγκη κάλυψης

Προβληματισμοί

Ανάγκη αλλαγής του τρόπου υπολογισμού των μεγεθών των έργου υπερχείλισης



Ορθολογικός σχεδιασμός συμβάλλει στην μείωση κόστους υλοποίησης και συντήρησης έργων υπερχείλισης

Αβεβαιότητα

Κατακρήμνιση

Συνθήκες εδαφικής υγρασίας στην λεκάνη

Στάθμη ταμιευτήρα και διαχειριστική πολιτική

Αντικείμενο και στόχοι

4 μοντέλα πολλαπλών χρονικών κλιμάκων

- ✓ Λεκάνη απορροής
- ✓ Ταμιευτήρας
- ✓ Αλλαγή κλίμακας
- ✓ Έργα υπερχείλισης

1. Στοχαστική προσομοίωση
2. Πιθανοτική ανάλυση
3. Εξαγωγή στατιστικών αποτελεσμάτων



Περιοχή μελέτης



Επιλέχθηκε το Φράγμα Πουρναρίου

- Κατασκευασμένο στον ποταμό Άραχθο
- Έναρξη λειτουργίας 1981

Χαρακτηριστικά φράγματος:

- Χωμάτινο
- Ύψος φράγματος: 87 m
- Μήκος στέψης: 580 m

Ταμιευτήρας:

- Μέγιστη αποθηκευτικότητα ταμιευτήρα: 865 hm³
- Ωφέλιμη χωρητικότητα ταμιευτήρα: 355 hm³
- Κατώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΚΣΛ): +100 m
- Ανώτατη Στάθμη Λειτουργίας (ΑΣΛ): +118 m
- Ανώτατη Στάθμη Πλημμύρας (ΑΣΠ): +126 m

Υδροηλεκτρικό φράγμα, Πουρναρίου I

Έργα υπερχείλισης:

- Παροχή σχεδιασμού: $6100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Μήκος υπερχειλιστή: 37,5 m
- 3 τοξωτά θυροφράγματα



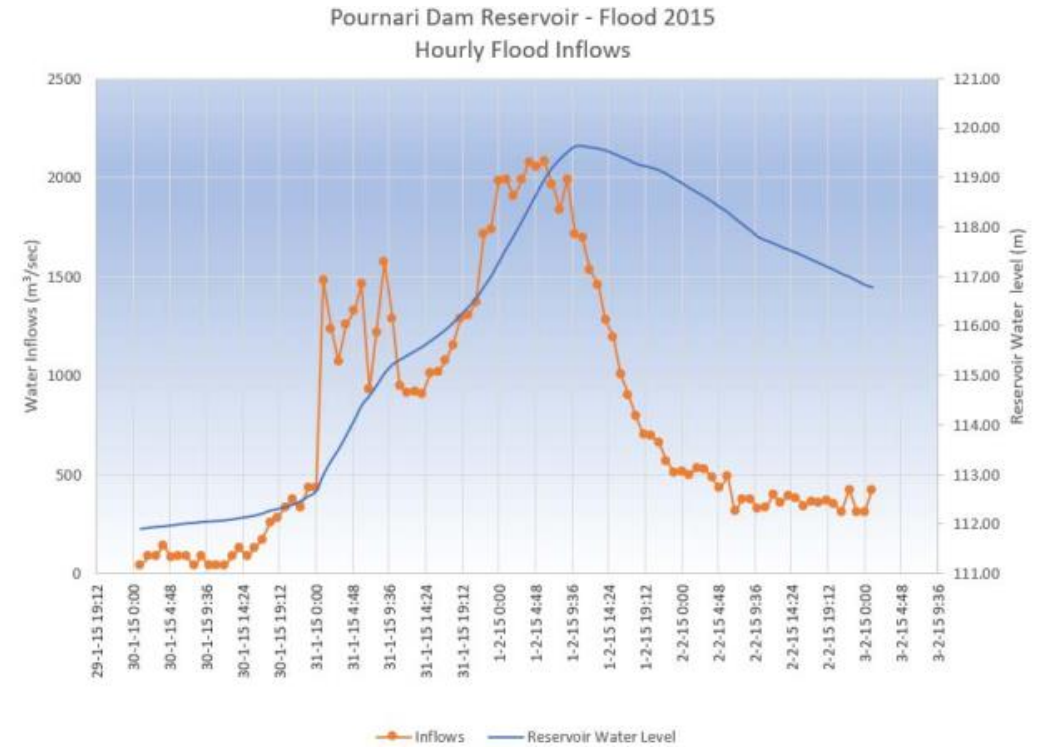
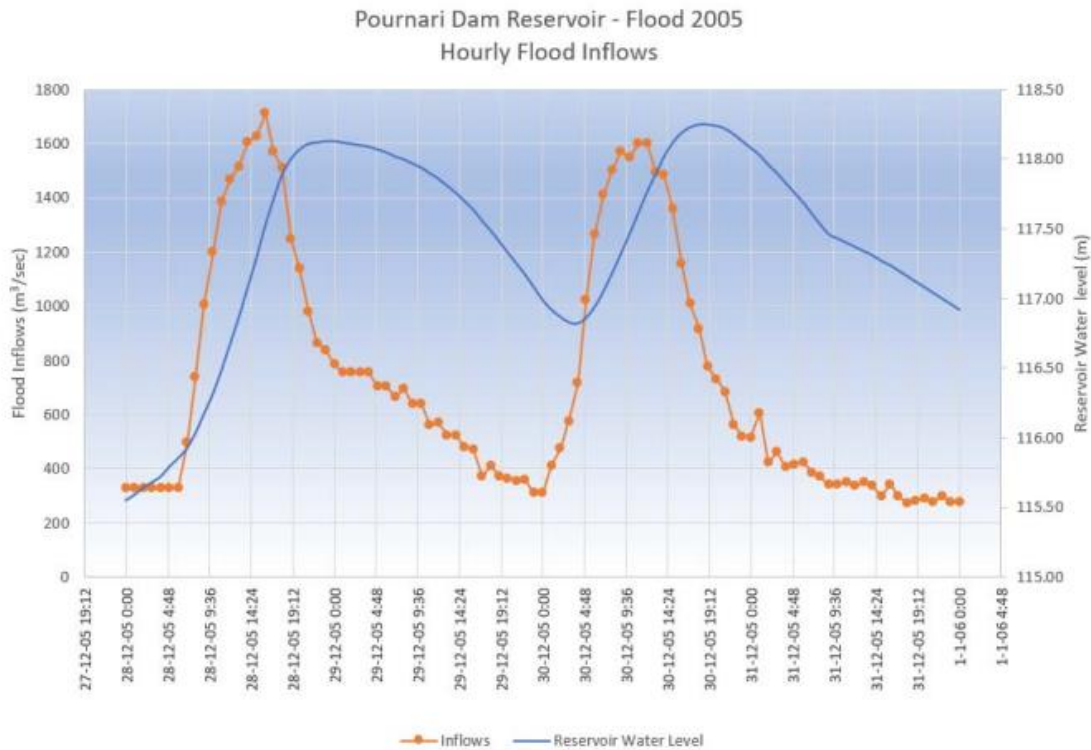
Σταθμός παραγωγής:

- 3 στρόβιλοι τύπου Francis
- ❑ Συνολική παροχетеυτικότητα στροβίλων: $500 \text{ m}^3/\text{s}$

- Συνολική ισχύς: 300 MW
- Μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια: 235 GWh



Ιστορικές πλημμύρες Αράχθου



$$Q_{peak1} = 1700 \text{ m}^3/\text{s} \text{ και } Q_{peak2} = 1600 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{peak} = 2200 \text{ m}^3/\text{s}$$



Γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο

Μοντέλα προσομοίωσης:

Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης Απορροής

Προσομοίωση Λειτουργίας Ταμιευτήρα

Επιμερισμός Μέσων Ημερήσιων Παροχών

Διαχείριση και Διόδευση Πλημμυρικών Επεισοδίων

Δεδομένα εισόδου, εξόδου:

Ημερήσια χρονοσειρά **βροχόπτωση**

Ημερήσια χρονοσειρά **παροχής**
εισοχής του ταμιευτήρα

Επιλογή επεισοδίων
υπερχείλισης (5 ημερών)

Ωριαίες χρονοσειρές **παροχών**
εισοχής ανά πενθήμερο επεισόδιο

Παροχή και όγκοι υπερχείλισης

Υδρολογική Προσομοίωση Λεκάνης Απορροής (1)



Κατακρήμνιση:

- Την πραγματική εξατμοδιαπνοή ET
- Την βαθιά κατείδυση L
- Την απορροή Q

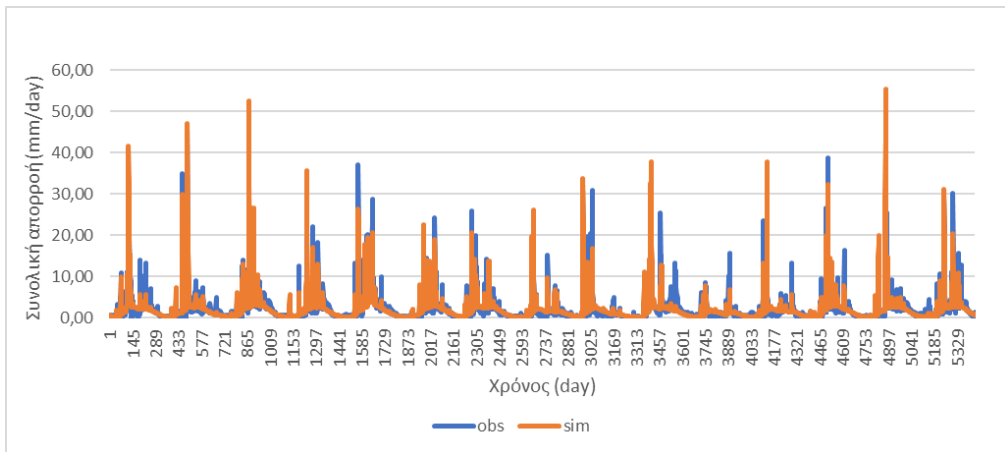
Παράμετροι μοντέλου:

- η χωρητικότητα K
- ο συντελεστής στείρευσης για παραγωγή κατείδυσης, λ
- ο συντελεστής στείρευσης για παραγωγή βασικής απορροής, μ
- ο συντελεστής στείρευσης, θ

Κλίμακα μοντέλου: Ημερήσια

Βαθμονόμηση μοντέλου (2)

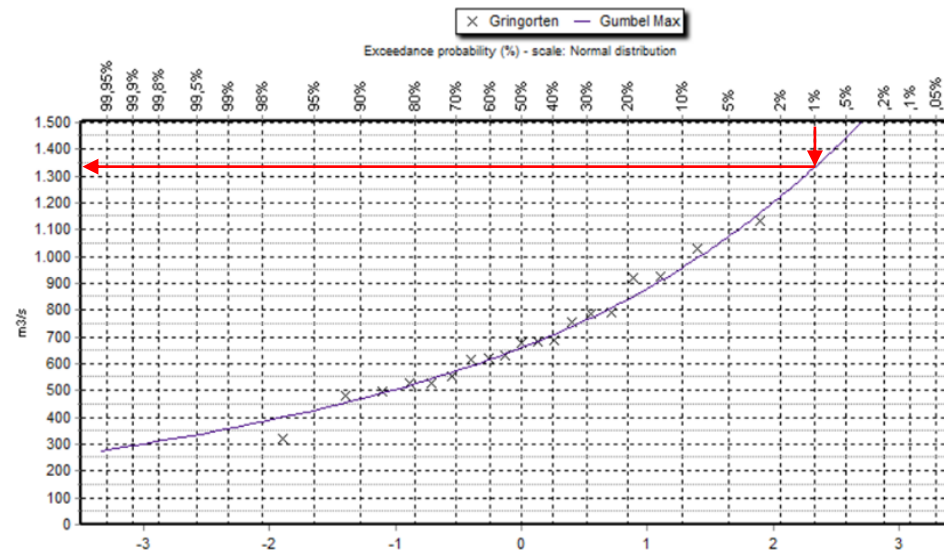
Αποτελεσματικότητα (Δείκτης N.S.E.)



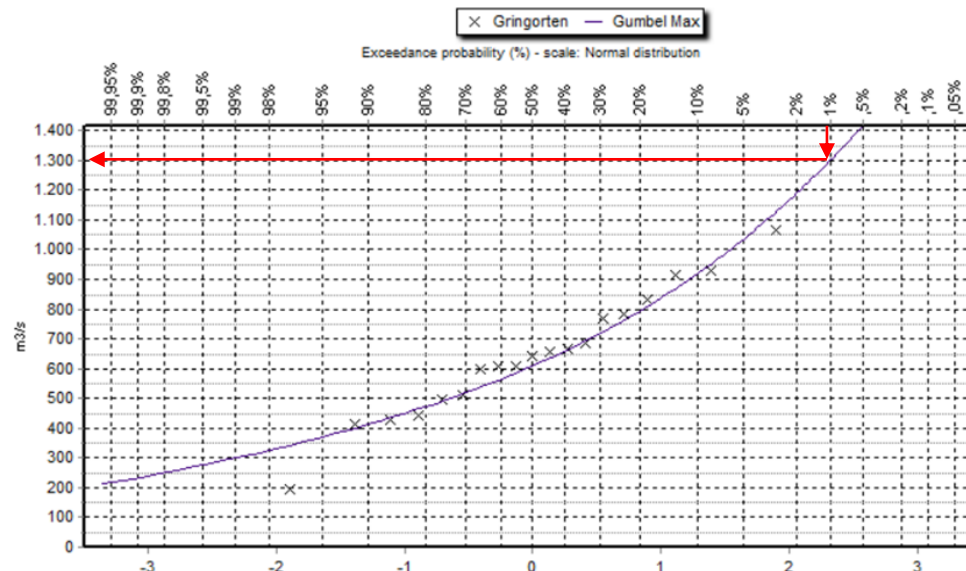
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \mu_{obs})^2}$$

N.S.E.=0,79

Ιστορικό δείγμα μέγιστων ετήσιων παροχών



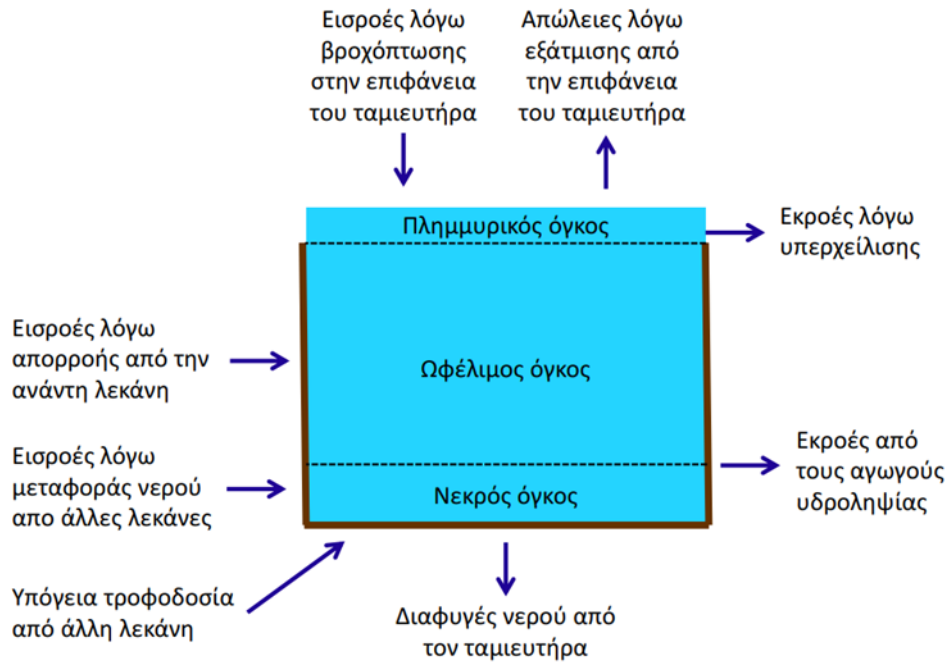
Βαθμονομημένο δείγμα μέγιστων ετήσιων παροχών



Αξιολόγηση
Βαθμονόμησης

Προσομοίωση Λειτουργίας Ταμιευτήρα (1)

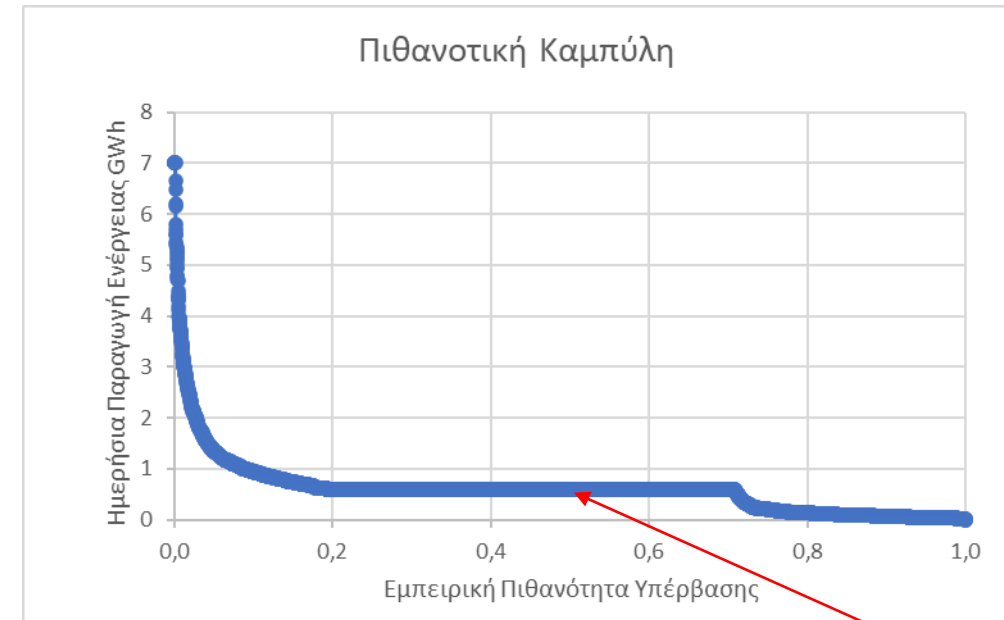
Υδατικό ισοζύγιο ταμιευτήρα:



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

Κλίμακα μοντέλου: Ημερήσια

Πιθανοτική καμπύλη:



- Στόχος ημερήσιας παραγωγής ενέργειας: 0,6 GWh

Επιλογή επεισοδίων υπερχείλισης (2)



Καταγράφονται 12 υπερχειλίσεις
(ιστορικά δεδομένα)



- Παροχή εισροής της ημέρας υπερχείλισης
- Παροχές των 2 ημερών πριν
- Παροχές των 2 ημερών μετά



Δημιουργούνται πενθήμερα επεισόδια
που προκαλούν υπερχείλιση

Επιμερισμός Μέσων Ημερήσιων Παροχών (1)

Ημερήσια κλίμακα  Ωριαία κλίμακα

Προϋποθέσεις:

✓ Διατήρηση ημερήσιου όγκου

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



✓ Διασφάλιση συνέχειας

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

✓ Μορφή υδρογραφήματος

- 4 διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις

Βέλτιστο μοντέλο επιμερισμού:

- 5 παράμετροι μορφής: Q_{pt}  την παροχή αιχμής της κάθε ημέρας του επεισοδίου
- 5 παράμετροι μορφής: k_t  σταθερά της εκθετικής πτώσης

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

Βελτιστοποίηση σε
προγραμματιστικό περιβάλλον R

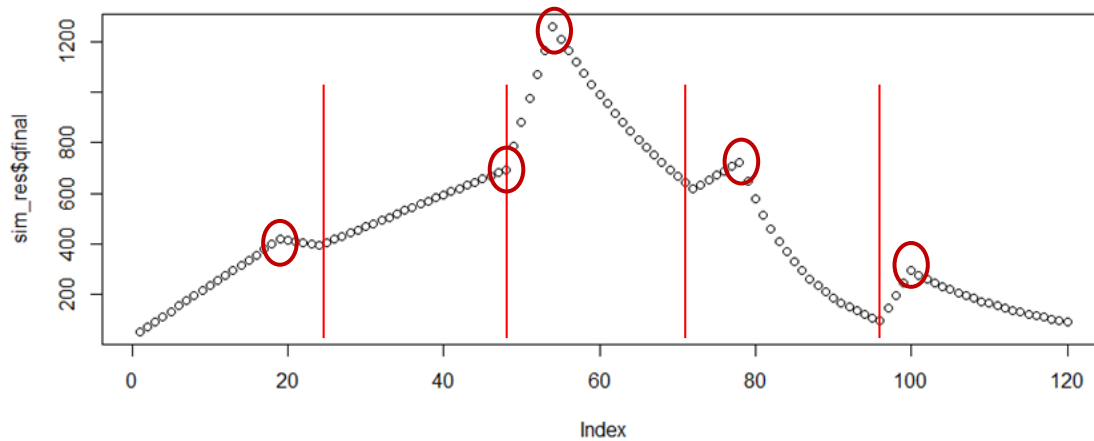
Παραδείγματα Επιμερισμού Μέσων Ημερήσιων Παροχών (2)

1^ο Επεισόδιο:

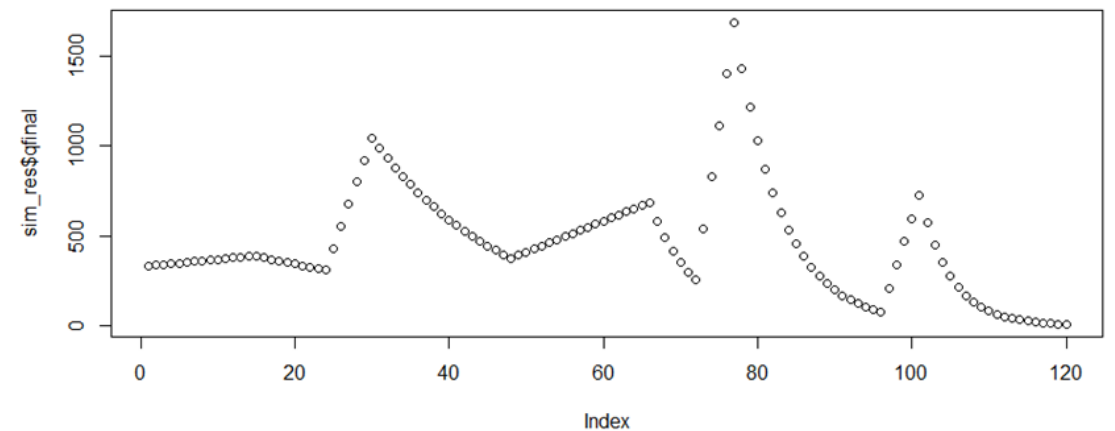
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
39	377	926	337	186

Ημερήσιες
παροχές

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
337	686	498	628	199



$$Q_{peak_hourly} = 1260 \text{ m}^3/\text{s}$$



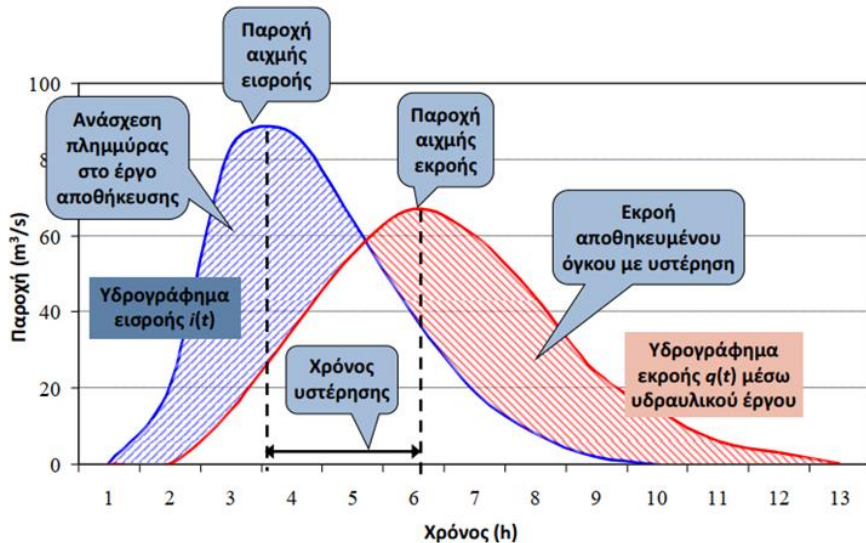
$$Q_{peak_hourly1} = 1050 \text{ m}^3/\text{s} \text{ και}$$

$$Q_{peak_hourly2} = 1630 \text{ m}^3/\text{s}$$



Διαχείριση και Διόδευση Πλημμυρικών Επεισοδίων (1)

Διόδευση:



Στόχος: Ανάσχεση πλημμύρας

✓ Εξίσωση συνέχειας υδατικού ισοζυγίου:

$$\frac{dS}{dt} + Q_t = I_t$$

Διαχείριση θυροφραγμάτων:

• Αν $z < 117,84 \text{ m}$

$$Q_{turb} = D_t$$

$$Q_t = Q_{turb}$$

• Αν $z > 117,84 \text{ m}$ και $z < 118,45 \text{ m}$

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_t = Q_{turb} + 3,3\% Q_{spt}$$

• Αν $z > 118,45 \text{ m}$ και $z < 119,2 \text{ m}$

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_t = Q_{turb} + 17,7\% Q_{spt}$$

• Αν $z > 119,2 \text{ m}$

$$Q_{turb} = 500 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_t = Q_{turb} + Q_{spt}$$

Παραδείγματα Διαχείρισης και Διόδευσης Πλημμυρικών Επεισοδίων (2)

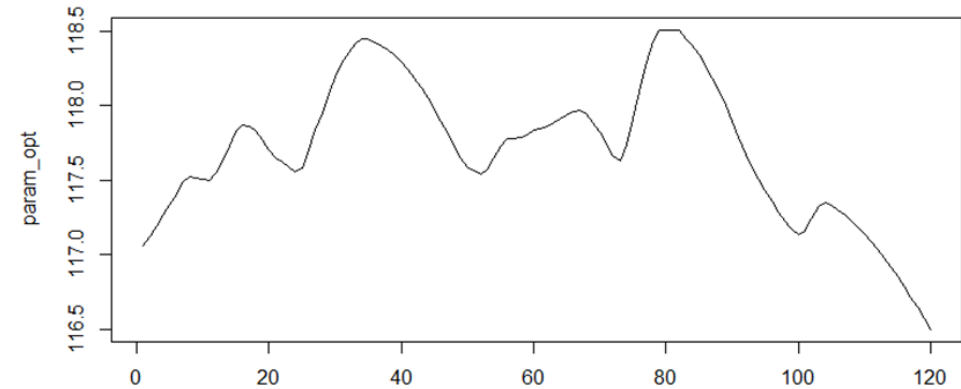
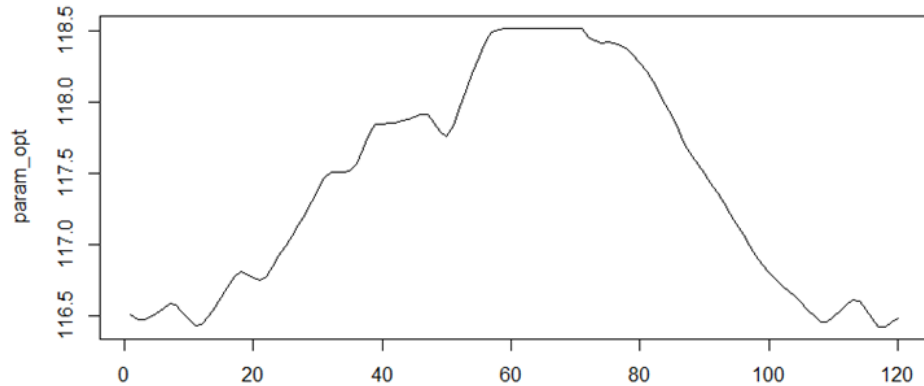
1^ο Επεισόδιο:

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
39	377	926	337	186

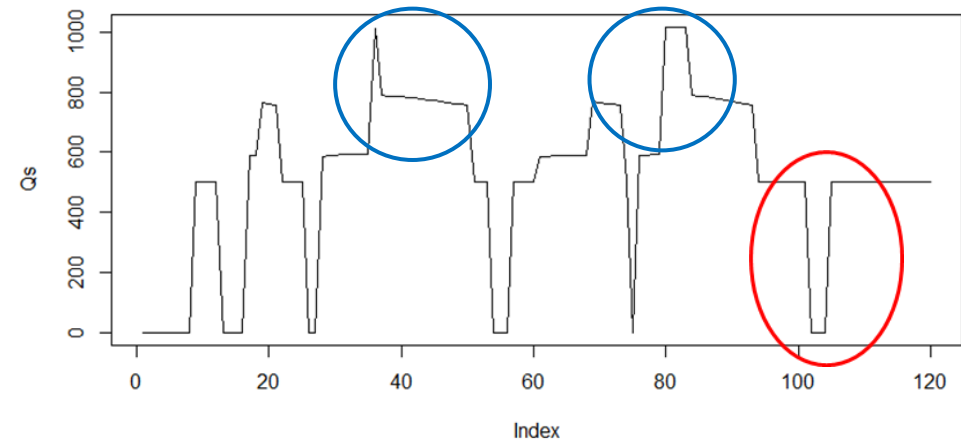
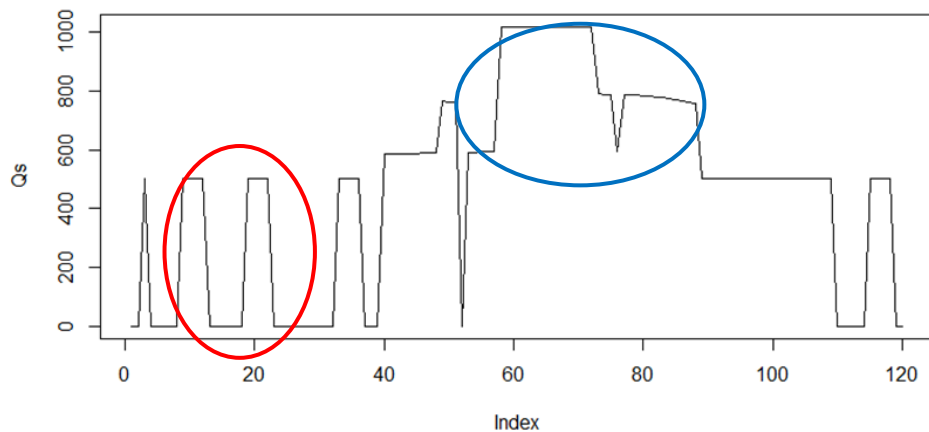
2^ο Επεισόδιο:

Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
337	686	498	628	199

Στάθμη



Παροχή εκροής

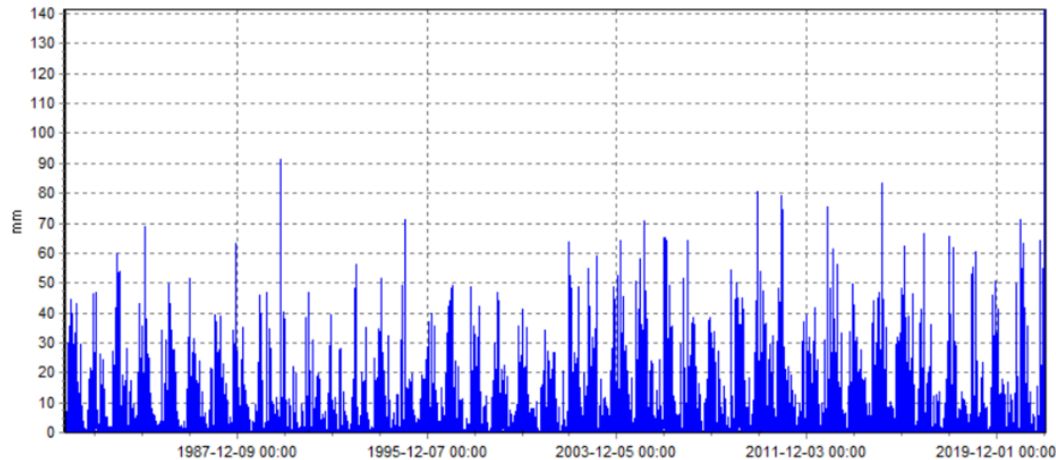


Στοχαστικό πλαίσιο

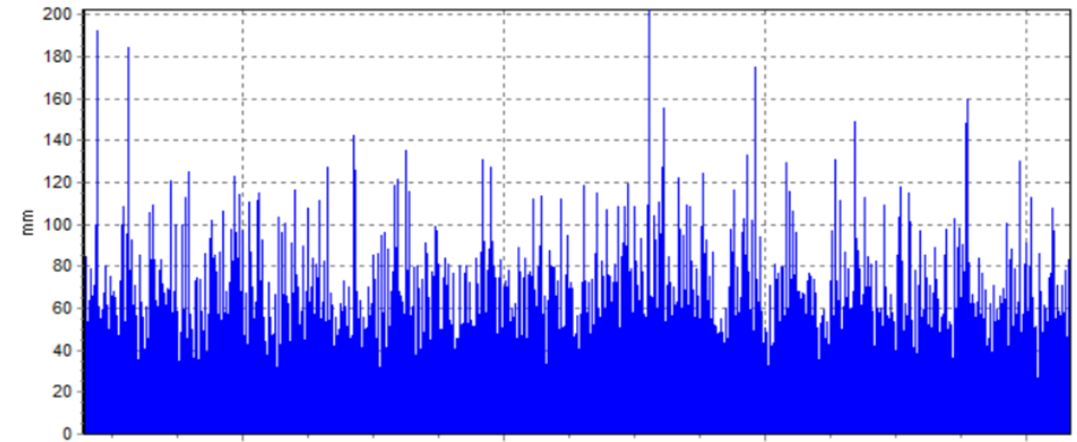
Ανάγκη στοχαστικής προσομοίωσης:

- ✓ δημιουργία συνθετικών βροχοπτώσεων (μοντέλο anySim)
- ✓ εξαγωγή στατιστικών αποτελεσμάτων

Ιστορική χρονοσειρά βροχόπτωσης (1980-2020)

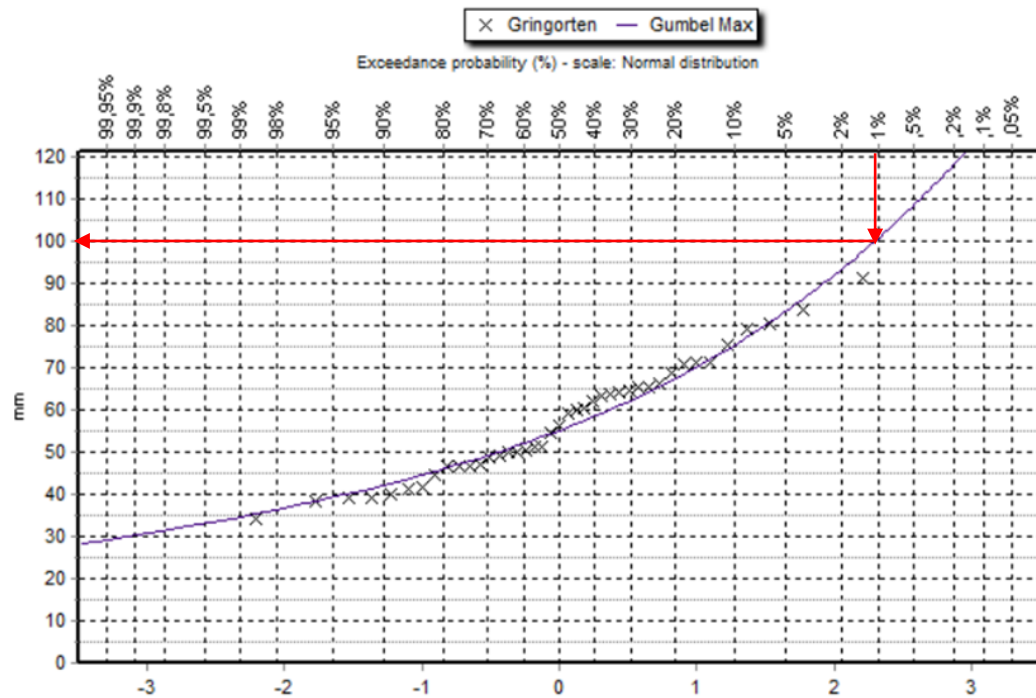


Συνθετική χρονοσειρά βροχόπτωσης μήκους 1000 ετών

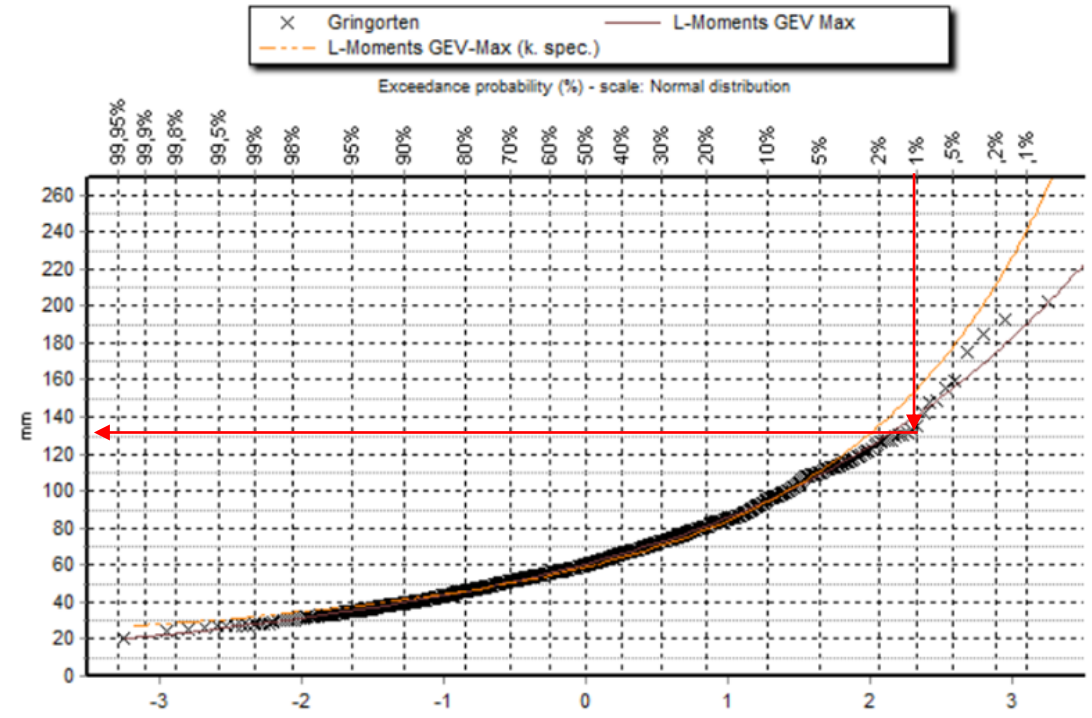


Σύγκριση μεγίστων

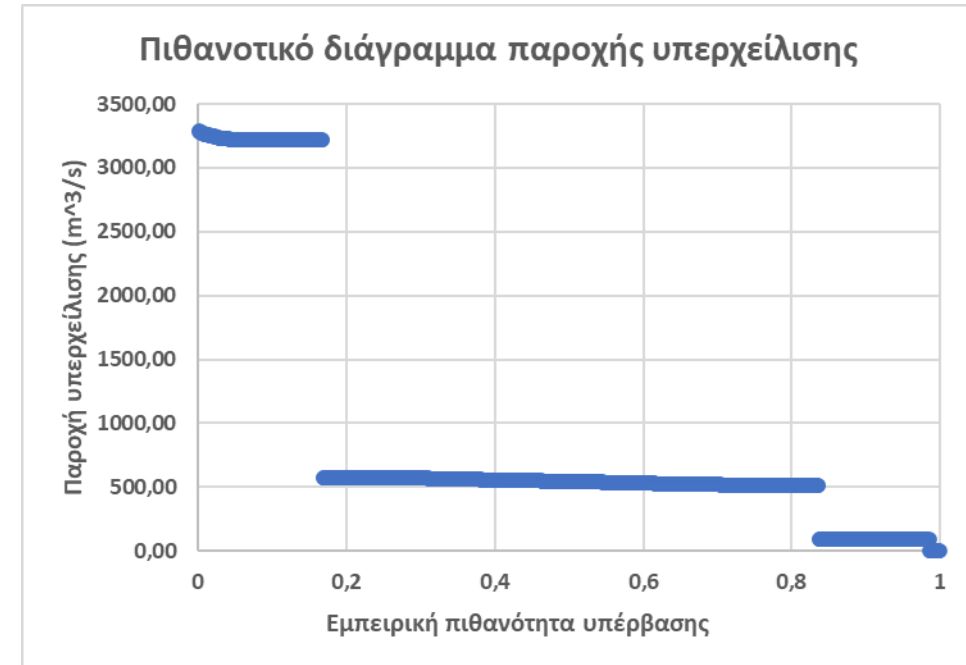
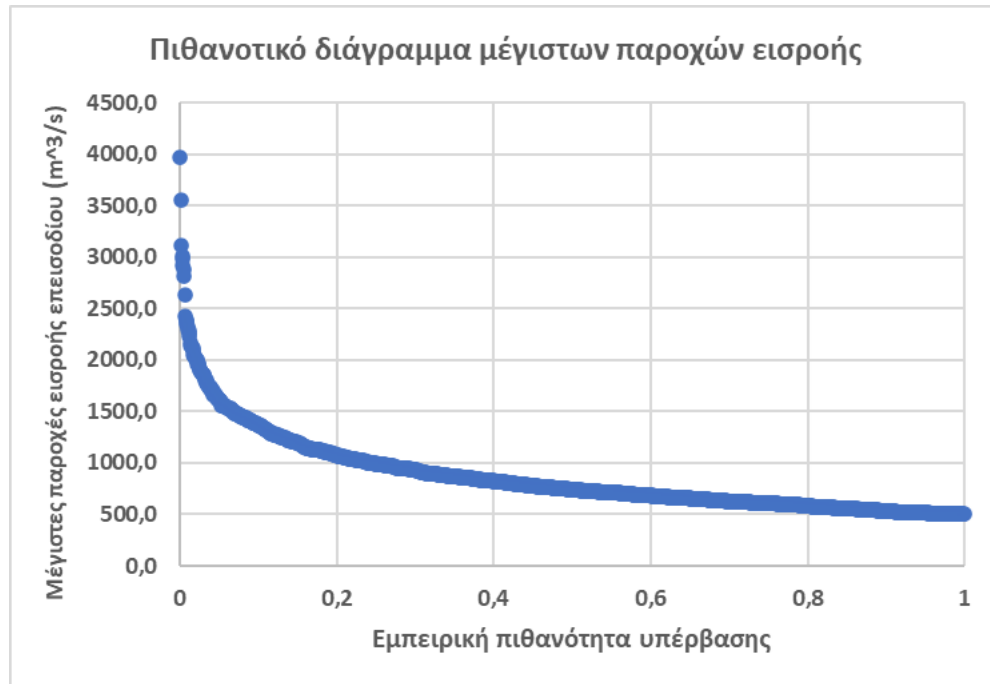
Προσαρμογή κατανομής Gumbel-Max, στο ιστορικό δείγμα βροχοπτώσεων



Προσαρμογή κατανομής GEV, στο συνθετικό δείγμα βροχοπτώσεων



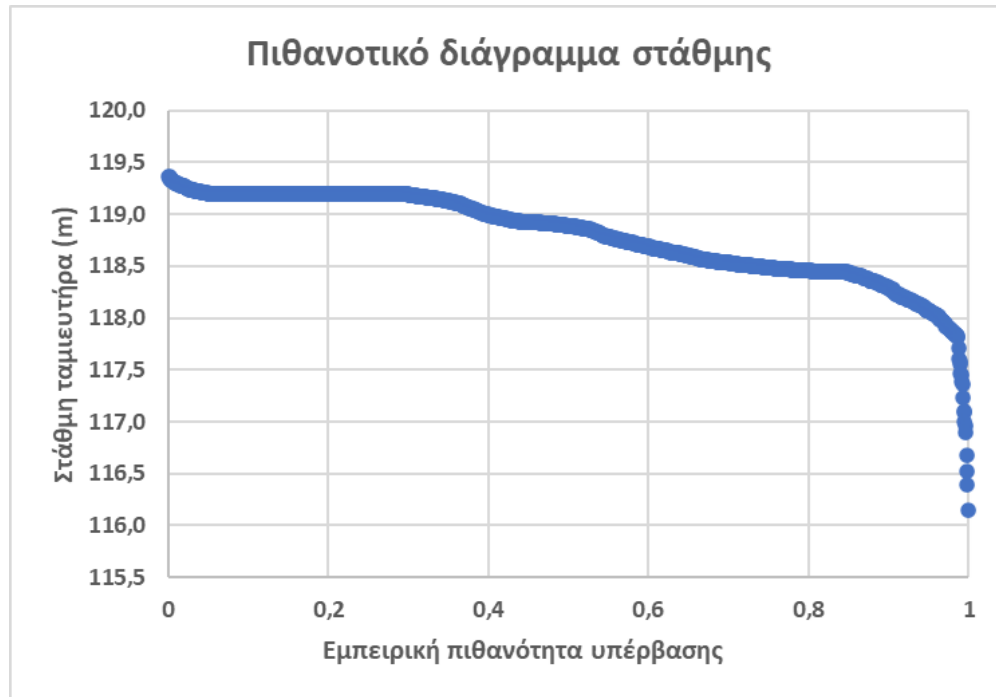
Στοχαστική προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα (1)



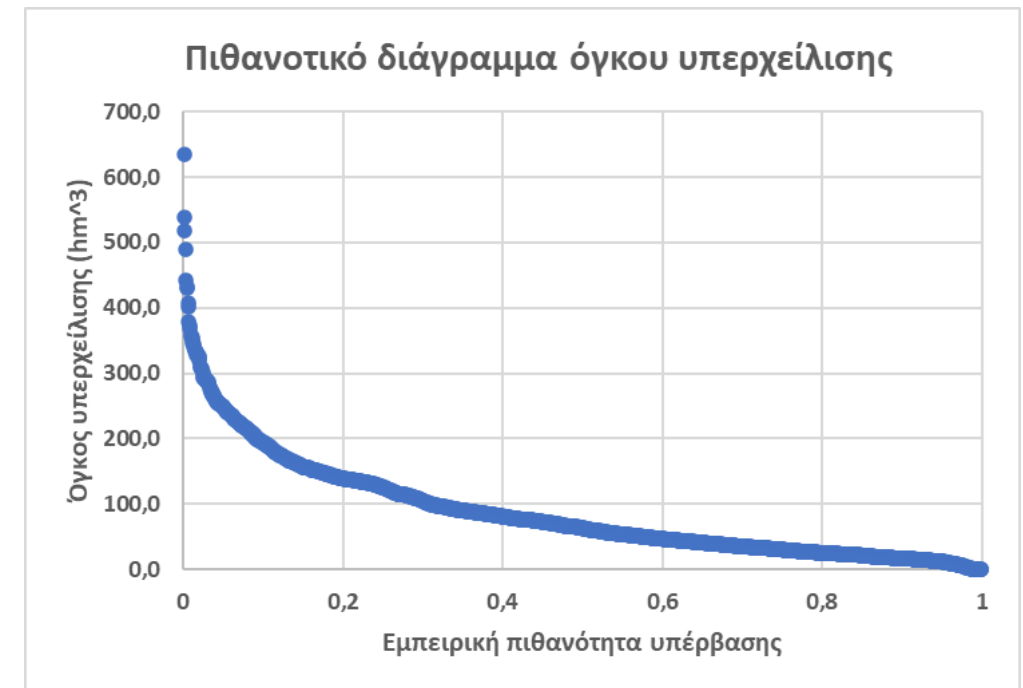
✓ Ομαλή μορφή, αφού περιγράφει φυσική διεργασία

- 2%: δεν καταγράφεται παροχή εκροής από τον υπερχειλιστή
- 16%: τα θυροφράγματα ανοίγουν στο 3,3% και καταγράφεται εκροή 50 m³/s
- 65%: τα θυροφράγματα ανοίγουν στο 17,7% και καταγράφεται εκροή 500 m³/s
- 17%: τα θυροφράγματα ανοίγουν στο 100% και καταγράφεται εκροή 3200 m³/s

Στοχαστική προσομοίωση λειτουργίας ταμιευτήρα (2)



- Η μέγιστη τιμή της στάθμης είναι: +119,4 m
- Α.Σ.Π. κατά τον σχεδιασμό: +126 m



Μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι



Για το φράγμα Πουρναρίου

- Δημιουργία μεγαλύτερου μήκους προσομοίωσης

Για το μοντέλο επιμερισμού των ημερήσιων παροχών

□ Βελτίωση:

- Το ίδιο το μοντέλο
- Τη διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων του
- Την μείωση του υπολογιστικού φόρτου

Η μεθοδολογική διαδικασία:

- Να αξιοποιηθεί για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση των κανόνων διαχείρισης θυροφραγμάτων
- Να ενταχθεί σε συστήματα υδρομετεωρολογικής πρόγνωσης



Μοντέλα καιρού



Ημερήσια βροχόπτωση



input

υδρολογική προσομοίωση έως
διαχείριση των θυροφραγμάτων

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας!