



Βελτιστοποίηση διαχείρισης θυροφραγμάτων υδροηλεκτρικών ταμιευτήρων – Εφαρμογή στο φράγμα Αράχθου



Ντεμίρογλου Χριστίνα

Επιβλέπων: Ευστρατιάδης Ανδρέας, Επικ. Καθηγητής

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

Προσδιορισμός του προβλήματος

Υπερχειλιστές με θυροφράγματα

- Αύξηση αποθηκευτικού όγκου ταμιευτήρα → αξιοπιστία
- Αύξηση ύψους πτώσης → ενέργεια
- Αύξηση πλημμυρικού κινδύνου → κίνδυνος υπερπήδησης



Πρόκληση

- Δημιουργία μοντέλου διαχείρισης θυροφραγμάτων



- Προσδιορισμός κανόνων λειτουργίας κατά την διέλευση πλημμυρών

Αντικείμενο και στόχοι

□ Αντικείμενο:

Ο προσδιορισμός καθολικά βέλτιστου κανόνα λειτουργίας θυροφραγμάτων με γνώμονες την αύξηση της ασφάλειας και την ελαχιστοποίηση της ενέργειας που χάνεται λόγω υπερχειλίσης.

□ Στόχοι:

- Κατάρτιση σχέσης στάθμης – παροχής εκχειλιστή τύπου Ogee.
- Μελέτη της διόδευσης πλημμύρας με χρήση θυροφραγμάτων.
- Προσδιορισμός κανόνων λειτουργίας θυροφραγμάτων.
- Βελτιστοποίηση των κανόνων λειτουργίας βάσει συνθετικών πλημμυρογραφημάτων.
- Εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου στο φράγμα Πουρνάρι Ι.

Υδροηλεκτρικό φράγμα, Πουρνάρι Ι

- Έναρξη λειτουργίας 1981.
- Χωμάτινο με ύψος 87 m, μήκος 580 m, πλάτος στέψης 10 m και βάσης 450 m.
- Ο ταμιευτήρας έχει επιφάνεια 23000 στρέμματα με μικτή χωρητικότητα 865 hm³ και ωφέλιμη 303 hm³.
- Η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας ανέρχεται στα 235 GWh.
- Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ισούται με 300 MW.

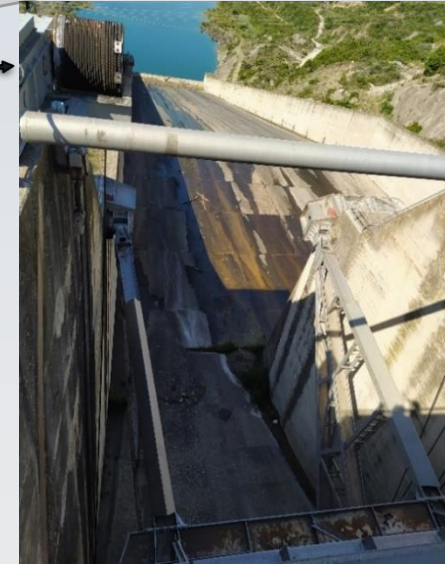


Επιτόπου επίσκεψη

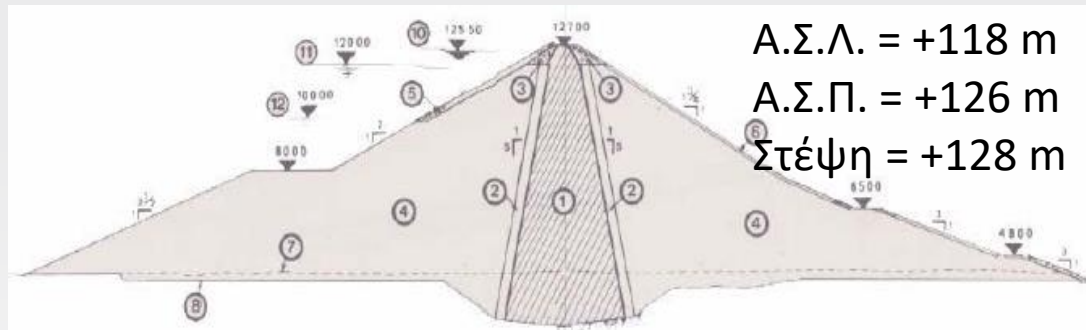


Διώρυγα απαγωγής του υπερχειλιστή παροχής σχεδιασμού $6100 \text{ m}^3/\text{s}$ και πλάτους 37.5 m

Τρία θυροφράγματα διαστάσεων $12.5 \times 12.5 \text{ m}$



Γερανογέφυρα απομάκρυνσης φερτών



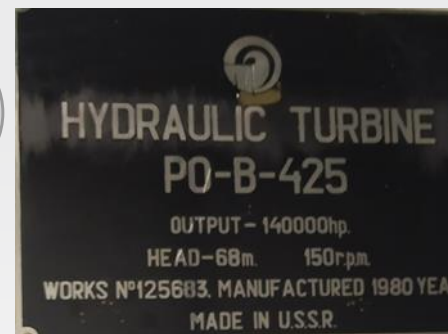
Κ.Σ.Λ. = +110 m
Α.Σ.Λ. = +118 m
Α.Σ.Π. = +126 m
Στέψη = +128 m



Σταθμός
παραγωγής
ενέργειας



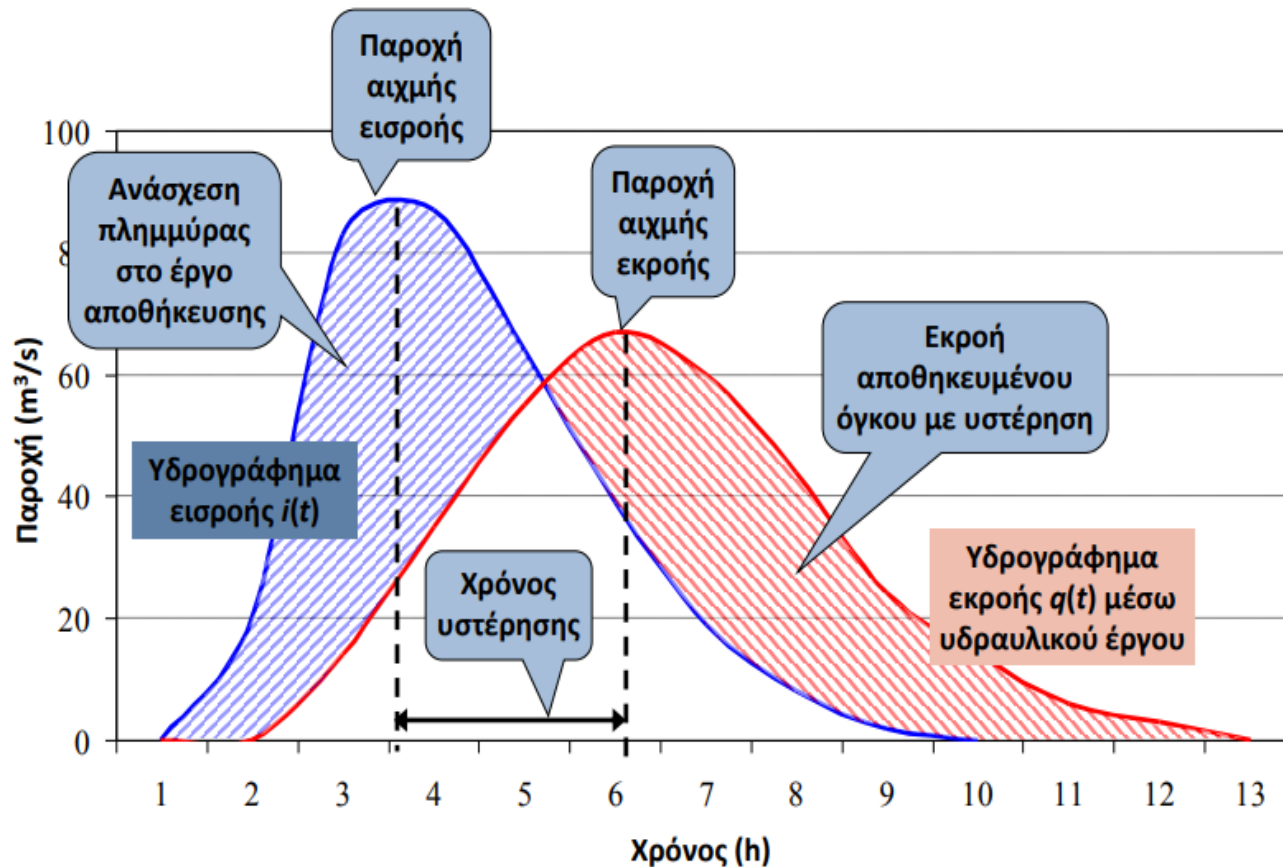
Τρεις στρόβιλοι
τύπου Francis
παροχетеυτικότητας
 $170 \text{ m}^3/\text{s}$ έκαστος





Διόδευση πλημμυρών

- Σκοπός :
 1. Εξομάλυνση του πλημμυρογραφήματος εισόδου.
 2. Εξασφάλιση της ακεραιότητας του φράγματος.



Γενικό πρόβλημα διόδευσης σε ταμιευτήρα

- Η διόδευση πλημμυρών βασίζεται στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου

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

- I_t η εισροή της ανάντη λεκάνης (γνωστή)
- $\frac{dS}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής του αποθέματος (συνάρτηση της στάθμης z)
- Q_t η εκροή από τα έργα απελευθέρωσης νερού (συνάρτηση της στάθμης z)

$$Q_t = Q_{\text{υπερχειλιστή}} + Q_{\text{υδροληψιών}}$$

$$S(z_j) - S(z_{j-1}) = [I_{j-1} + I_j - Q(z_j) - Q(z_{j-1})] \times \frac{\Delta t}{2}$$

$$E(z) = \sum \left[S(z_j) - S(z_{j-1}) - [I_{j-1} + I_j - Q(z_j) - Q(z_{j-1})] \times \frac{\Delta t}{2} \right]^2$$

Min(E(z)) → z_opt(i)



$S \rightarrow S(z)$

$Q \rightarrow Q(z)$



➤ Μη γραμμικότητα των σχέσεων

➤ Περιπλοκότητα φαινομένου

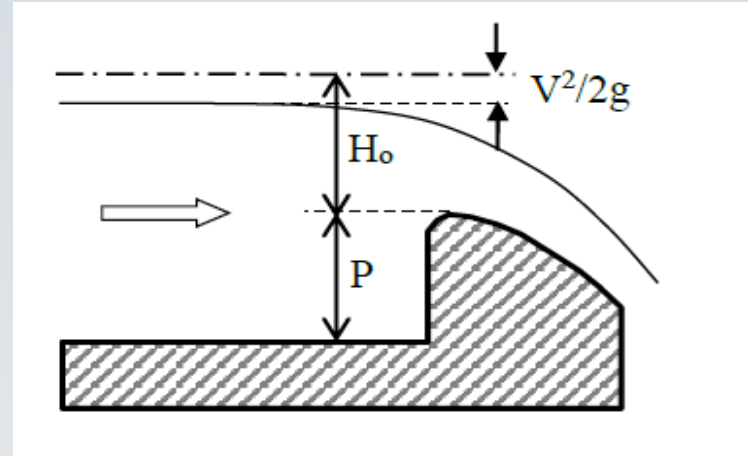
Κατάρτιση σχέσης στάθμης – παροχής εκχειλιστή τύπου Ogee

- Η θεωρητική σχέση στάθμης - παροχής εκχειλιστή τύπου ogee έχει τη μορφή

$$Q_{\text{θεωρ}} = c(Q) L'(Q) \sqrt{2g} H(Q)^{\frac{3}{2}},$$

όπου

- Q η παροχή που διέρχεται από τον εκχειλιστή (m^3/s)
- L' το ενεργό πλάτος του εκχειλιστή (m)
- $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
- H το υδραυλικό φορτίο, που αντιστοιχεί στην απόσταση από τη στέψη του υπερχειλιστή μέχρι τη γραμμή ενέργειας
- c συντελεστής παροχής



- Η απλοποιημένη σχέση έχει τη μορφή

$$Q_{\text{απλ}} = \alpha h^\beta$$

όπου

- ✓ $\alpha = c L \sqrt{2g}$
- ✓ $\beta = 1.5$
- ✓ $c = 1.7-2.3$
- ✓ L το ολικό άνοιγμα του υπερχειλιστή
- ✓ $h = z - z_c$, αμελώντας τον όρο της κινητικής ενέργειας

Μεθοδολογικό πλαίσιο

- **Σκοπός:** Η κατάρτιση αναλυτικής σχέσης της μορφής $Q = \alpha h^\beta$ όπου :

- $a(Q) = c(Q) L'(Q) \sqrt{2g}$
- h το βάθος νερού (m)
- L' το ενεργό πλάτος του εκχειλιστή (m)

- **Υπολογιστική διαδικασία:**

1. Για τη παροχή σχεδιασμού $Q_o \rightarrow H_o \rightarrow V$

2. Για παροχή $Q \rightarrow L'$

3. $P/H_o \rightarrow c_o$

4. Για ύψος νερού h , από $H/H_o \rightarrow c/c_o \rightarrow cv$

5. Για κεκλιμένο υπερχειλιστή από $P/H \rightarrow c_i/c_v \rightarrow c_i$

6. Για διάφορα $z \rightarrow h = z - zc \rightarrow Q, H = \frac{V^2}{2g}$

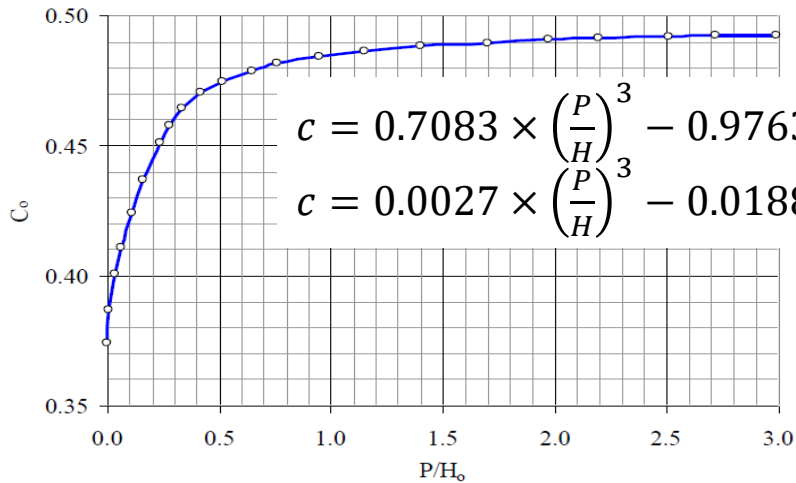
7. Προσαρμογή σχέσης μορφής δύναμης στα δεδομένα (h, Q)

$$V = \frac{Q}{L \times (P + h)}$$

$$H = h + \frac{V^2}{2 \times g}$$

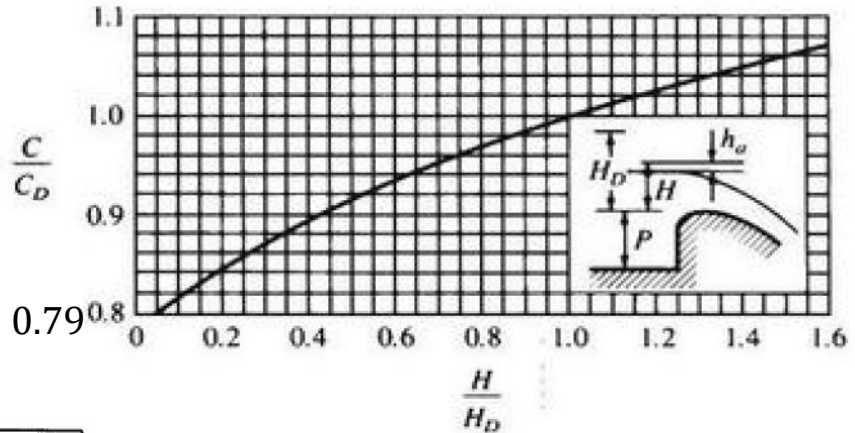
$$L' = L - 2 \times (N \times K_p + K_a) \times H_e$$

Νομογραφήματα και αναλυτικές σχέσεις

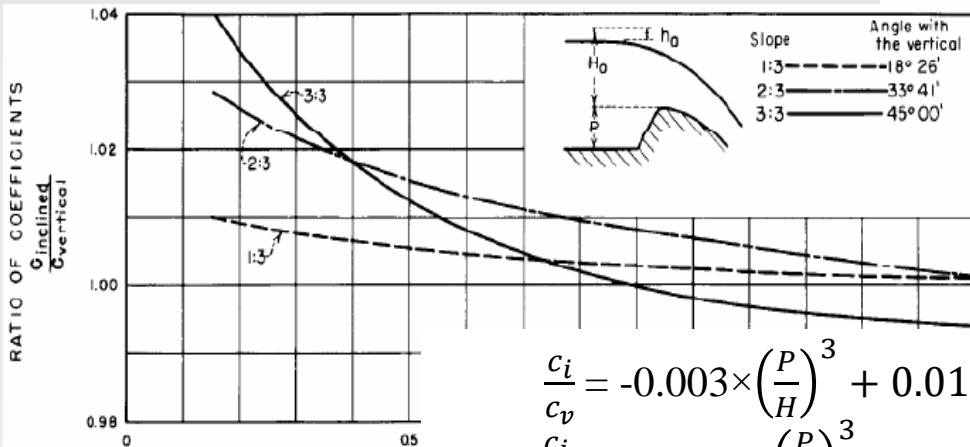


$$c = 0.7083 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 - 0.9763 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 + 0.5081 \times \frac{P}{H} + 0.3761 \quad \text{για } \frac{P}{H} < 0.5$$

$$c = 0.0027 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 - 0.0188 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 + 0.0434 \times \frac{P}{H} + 0.4577 \quad \text{για } 0.5 < \frac{P}{H} < 2.5$$



$$\frac{c}{c_0} = 0.03 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^3 - 0.14 \times \left(\frac{H}{H_0}\right)^2 + 0.32 \times \left(\frac{H}{H_0}\right) + 0.79$$



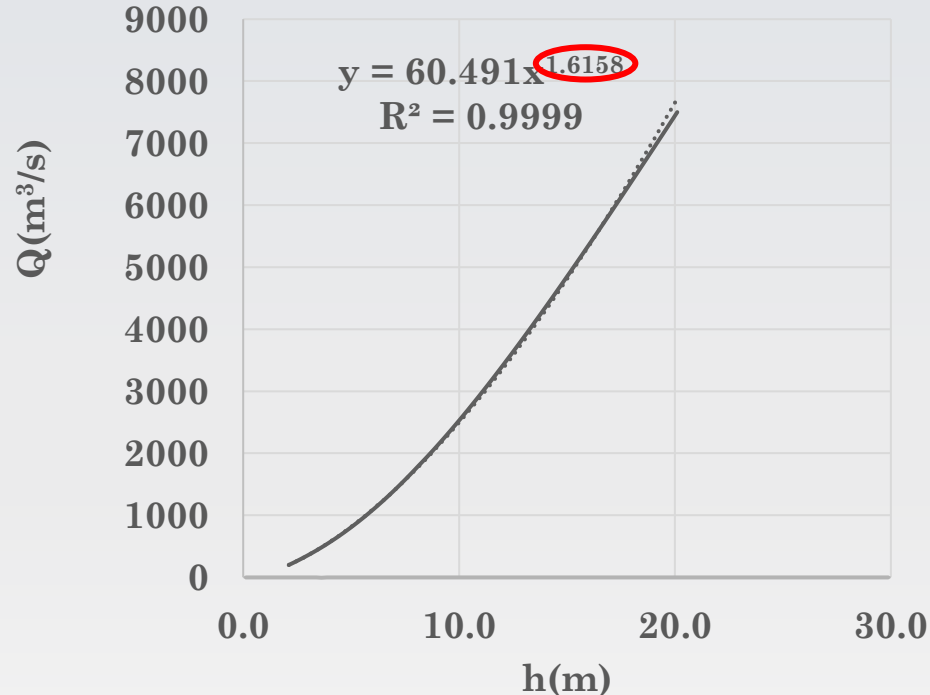
$$\frac{c_i}{c_v} = -0.003 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0118 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0191 \times \frac{P}{H} + 1.0127 \quad (1:3)$$

$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0068 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.0272 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.0479 \times \frac{P}{H} + 1.0343 \quad (2:3)$$

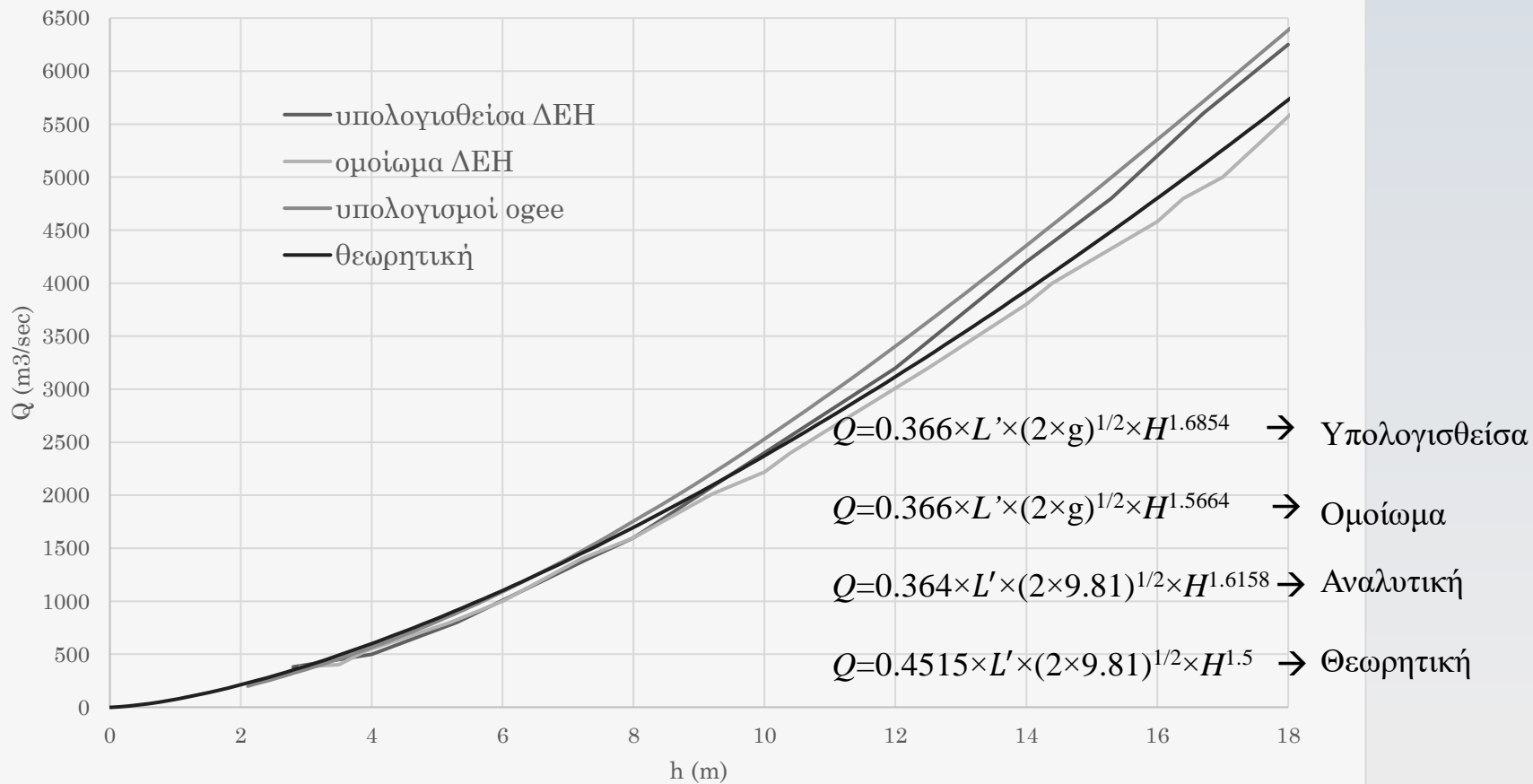
$$\frac{c_i}{c_v} = -0.0281 \times \left(\frac{P}{H}\right)^3 + 0.1022 \times \left(\frac{P}{H}\right)^2 - 0.1328 \times \frac{P}{H} + 1.057 \quad (3:3)$$

Στη περίπτωση του Πουρναρίου Ι...

- Η παροχή σχεδιασμού $Q_0 = 6100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Πλάτος υπερχειλιστή $L = 37.5 \text{ m}$
- Ύψος κατακόρυφης παρειάς υπερχειλιστή $P = 4.5 \text{ m}$
- Πλήθος μεσοβάθρων $N = 2$
- Συντελεστής συστολής για στρογγυλεμένες γωνίες $K_p = 0.01$
- Συντελεστής συστολής για αντέρρισμα $K_a = 0.1$



Σχέση στάθμης - παροχής εκχειλιστή



Παραμετροποίηση κανόνων λειτουργίας

□ Θυροφράγματα

- Τρεις χαρακτηριστικές στάθμες κατά την άνοδο και τρεις κατά την ύφεση της πλημμύρας
- Σε κάθε μεταβολή του ποσοστού εκχείλισης προστίθεται ή αφαιρείται το $1/3$ της παροχетеυτικότητας του εκχειλιστή
- Σταδιακές μεταβάσεις προκειμένου να μην υπάρχουν απότομες κινήσεις στο άνοιγμα και στο κλείσιμο των θυροφραγμάτων

□ Στρόβιλοι

- Για στάθμη μεγαλύτερη της z_0 λειτουργούν με πλήρη παροχетеυτικότητα
- Διαφορετικά ακολουθούν παλμική λειτουργία

Η προσομοίωση υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab

Στη περίπτωση του Πουρναρίου I...

- **Ορίσματα εισόδου:**

1. Πλημμυρογράφημα εισροής $I(t)$
2. Σχέση στάθμης – παροχής εκχειλιστή $Q_{\text{υπερχειλιστή}} = 0.364 L \sqrt{2g} H^{1.6158}$
3. Σχέση στάθμης – αποθέματος ταμιευτήρα $S = 0.042 (z - 40)^{2.23}$
4. Η στάθμη του ταμιευτήρα κατά την έναρξη του επεισοδίου z_0
5. Ο κανόνας λειτουργίας των θυροφραγμάτων
6. Παλμική λειτουργία στροβίλων για τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Ελαχιστοποίηση τετραγωνικού σφάλματος $(DS-DIQ)^2 \rightarrow z_{\text{opt}}$

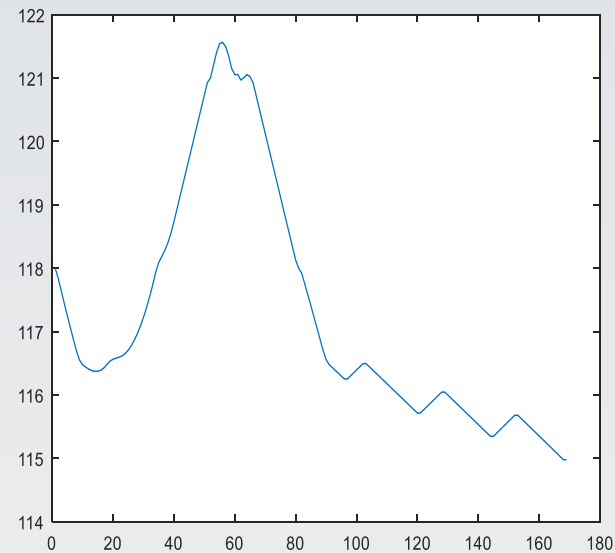
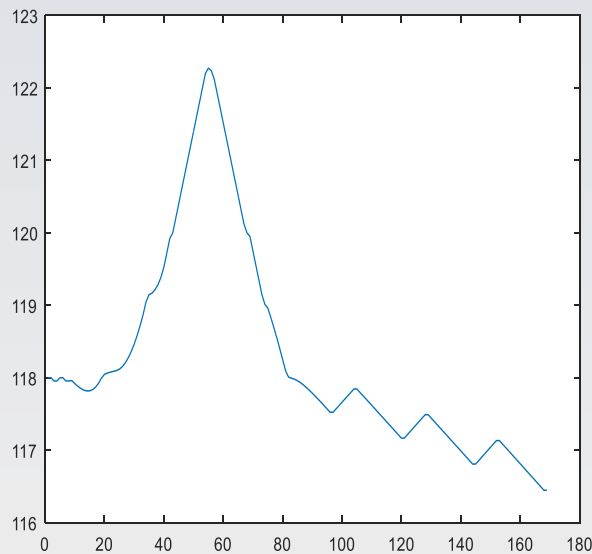
- **Ορίσματα εξόδου**

1. Πλημμυρογράφημα εκροής $Q_{\text{υπερχειλιστή}}(t)$
2. Ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης $\rightarrow E_{\text{ath}}$
3. Μέγιστη στάθμη ταμιευτήρα $z_{\text{max}} \rightarrow \text{dist}$

Παράδειγμα

- Για $z_0=+118$ m και $T=10000$ έτη:

	lev1=118,lev2=119,lev3=120, lev4=119,lev5=118,lev6=117	lev1=116.5,lev2=118,lev3=121, lev4=120,lev5=117.5,lev6=116
Dist (m)	5.73	6.43
Exath_ol (GWh)	100.30	91.98



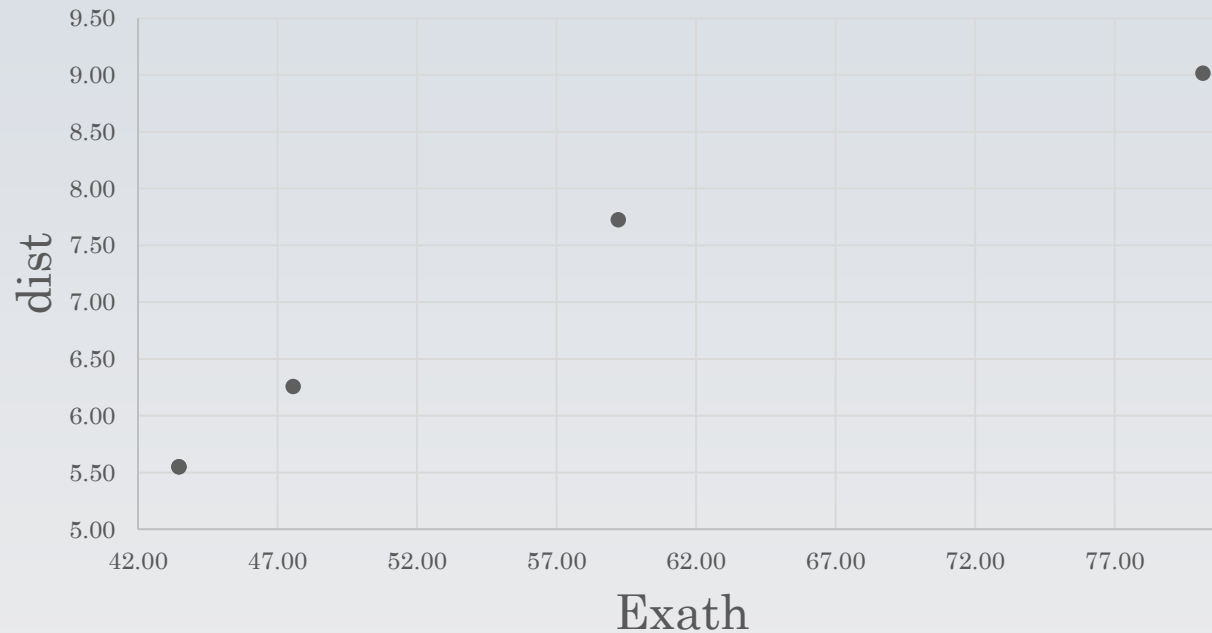
► Παρατηρείται έντονη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων με μικρή αλλαγή των χαρακτηριστικών τιμών στάθμης (levels), επομένως κρίνεται αναγκαία η βελτιστοποίηση τους.

Βελτιστοποίησης λειτουργίας θυροφραγμάτων

- 6 μεταβλητές ελέγχου lev1, ..., lev6
- 2 κριτήρια βελτιστοποίησης
 1. Η απόσταση της μέγιστης πλημμυρικής στάθμης από τη στέψη του φράγματος
 2. Η δυνητική ενέργεια που χάνεται λόγω υπερχείλισης
- Αναζήτηση βέλτιστου κανόνα λειτουργίας για τη πλημμύρα των T=10000 ετών
- Προσδιορισμός συντελεστών βάρους των κριτηρίων – Διαγράμματα Pareto
- Δοκιμαστικά σενάρια
 1. +107.5 m → ευμενές
 2. +114.0 m → κανονικό
 3. +118.0 m → δυσμενές

Ανάλυση Pareto

Για $z_0 = +114$ m και
 $T = 10000$ έτη:



95% ως προς την ασφάλεια
5% ως προς την ενέργεια



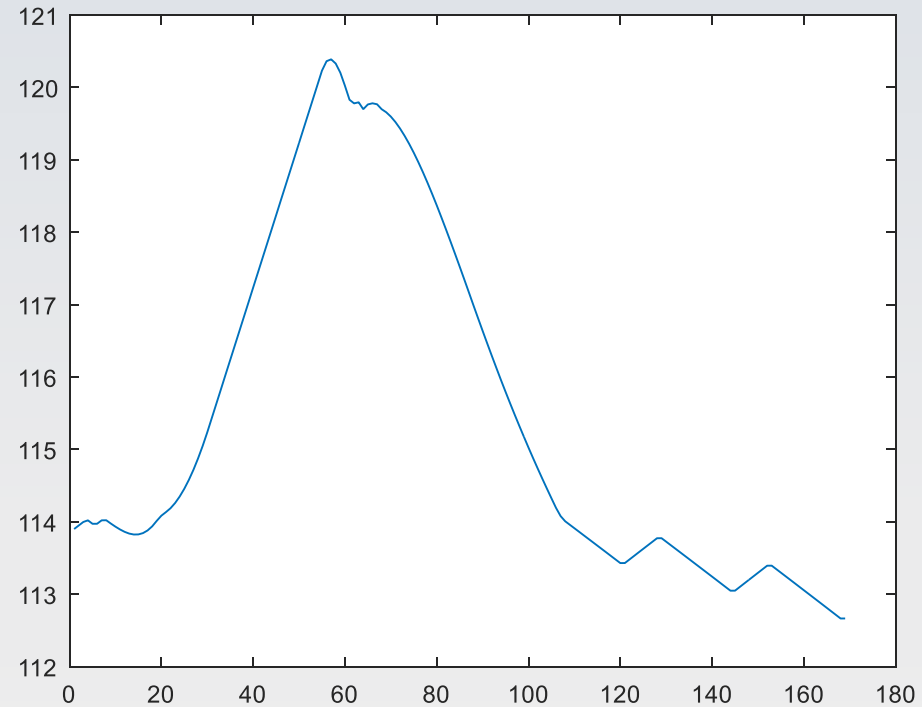
Συντηρητικό σενάριο

Τοπικός κανόνας λειτουργίας

Προσδιορισμός σεναρίου:

- $z_0 = +114$ m
- Συντηρητικός συνδυασμός βαρών \rightarrow 95-5
- Όριο ασφαλείας +118m
- Πλημμυρογράφημα εισόδου για $T=10000$ έτη

Lev 1	114.02
Lev 2	119.70
Lev 3	119.74
Lev 4	119.33
Lev 5	117.96
Lev 6	110.65



Dist (m)	7.61
Exath (GWh)	61.68

Εφαρμογή σε ακραίες πλημμύρες

	Dist (m)	Exath (GWh)
Σενάριο 1°	11.54	5.58
Σενάριο 2°	8.12	51.59
Σενάριο 3°	4.89	60.82

← T=5000 έτη

	Dist (m)	Exath (GWh)
Σενάριο 1°	10.36	22.51
Σενάριο 2°	6.40	92.35
Σενάριο 3°	3.16	100.59

← T=60000 έτη

- Σημαντική διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων
- Ανάγκη εφαρμογής κανόνα σε ρεαλιστικές πλημμύρες



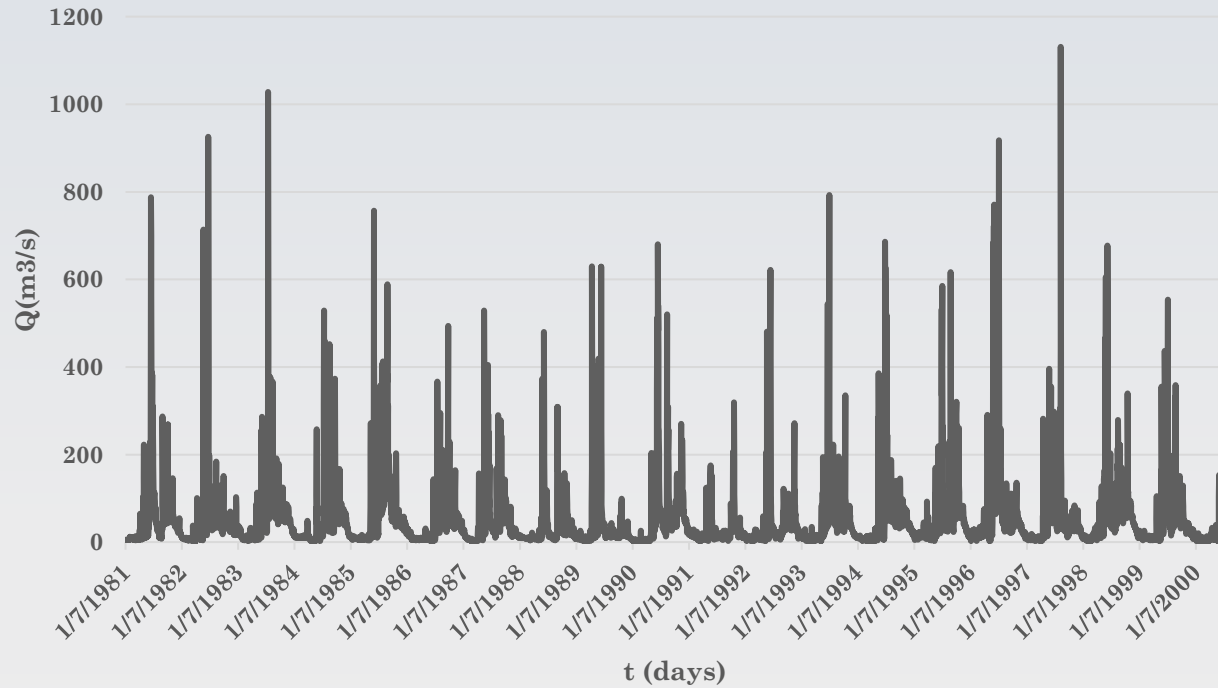
Ανάγκη παραγωγής συνθετικών πλημμυρογραφημάτων

Στοχαστικό πλαίσιο βελτιστοποίησης κανόνων λειτουργίας

- **Σκοπός:** Αναζήτηση κανόνων λειτουργίας που να ανταποκρίνονται σε ένα ευρύ φάσμα πλημμυρικών επεισοδίων
- **Πρόβλημα:**
 1. Περιορισμένο μήκος υδρολογικής πληροφορίας
 2. Ημερήσια κλίμακα (χρονοσειρά εισροών)
- **Αντιμετώπιση:**
 1. Ανάλυση ημερήσιας χρονοσειράς εισροών στον ταμιευτήρα
 2. Εφαρμογή μοντέλου καταβιβασμού (downscaling) των στατιστικών χαρακτηριστικών των παροχών από την ημερήσια στην ωριαία κλίμακα
 3. Παραγωγή συνθετικών ωριαίων εισροών μήκους 1000 ετών μέσω του στοχαστικού μοντέλου AnySim
 4. Εξαγωγή μέγιστου επεισοδίου κάθε έτους (1000 επεισόδια)
 5. Διαχωρισμός σε «μικρά» ($T < 5$ έτη) και «μεγάλα» ($T = 5$ ως 1000 έτη) επεισόδια
 6. Βελτιστοποίηση κανόνων λειτουργίας ανά κατηγορία βάσει ενός καθολικού δείκτη επίδοσης

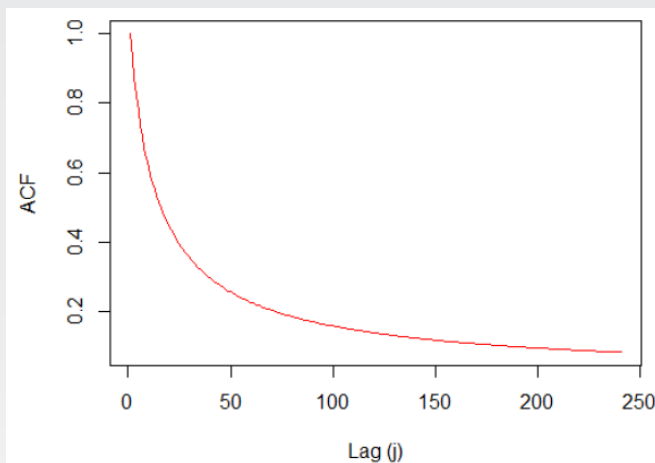
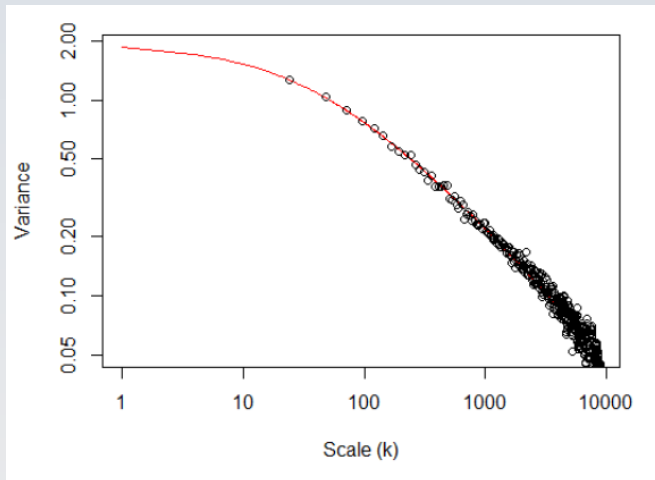
Πρωτογενή δεδομένα

Ημερήσιες χρονοσειρές εισροής :
Ιούλιος 1981 - Δεκέμβριος 2000



Μεθοδολογία παραγωγής συνθετικών ωριαίων πλημμυρογραφημάτων

1. Ανά μήνα τυποποίηση ημερήσιας χρονοσειράς
2. Δημιουργία εμπειρικού κλιμακογράμματος και προσδιορισμός στατιστικών χαρακτηριστικών στην ωριαία κλίμακα



Cauchy, $\beta=1.26$, $\kappa=0.074$



$\text{Var}^{(1)} = 1.85$

$\rho_{\tau}^{\text{CAS}} = (1 + \kappa\beta\tau)^{-\frac{1}{\beta}}$, $\tau \geq 0$ Συντελεστές κατανομής Γάμμα

3. $\bar{\chi}^{(1)}, \sigma^{(1)}$

μέθοδος ροπών

$\alpha = 1.85$
 $\gamma = 0.54$

4. Κατανομή Γάμμα

και

Δομή αυτοσυσχέτισης

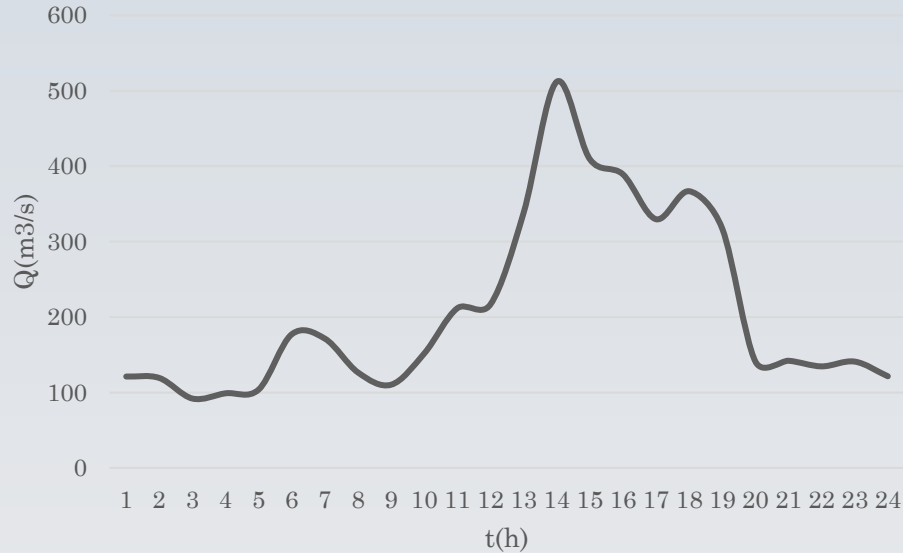


Μοντέλο Nataf
και
Πακέτο AnySim

Σε περιβάλλον R

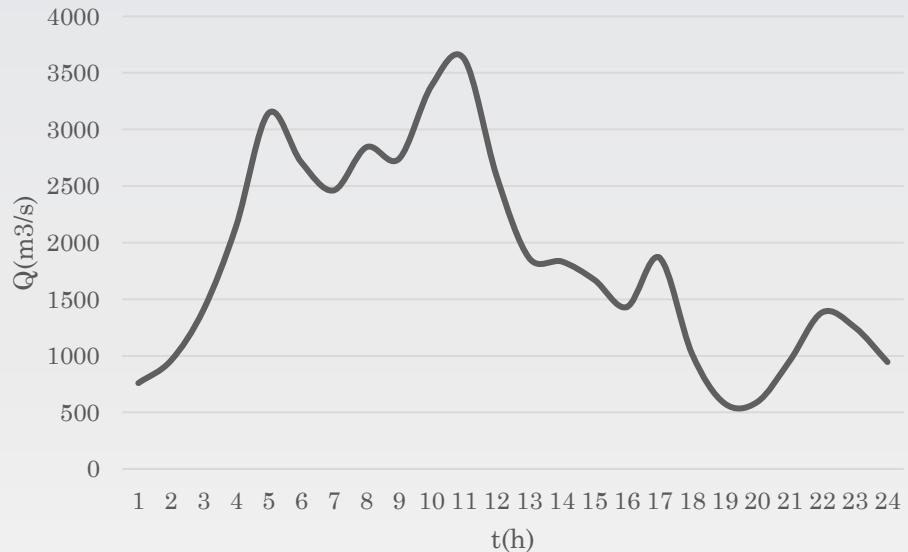
Παραγωγή ωριαίων χρονοσειρών

Παραδείγματα συνθετικών πλημμυρογραφημάτων



$T = 1.01$ έτη – Αιχμή στη μέση του επεισοδίου

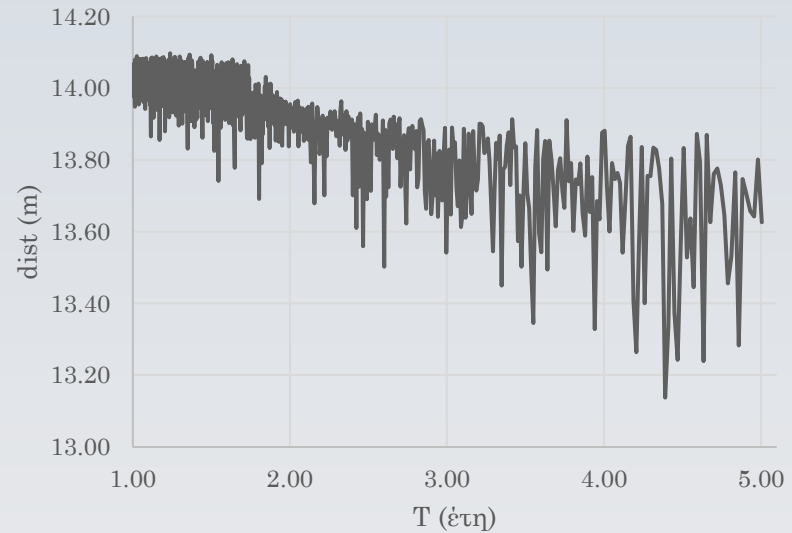
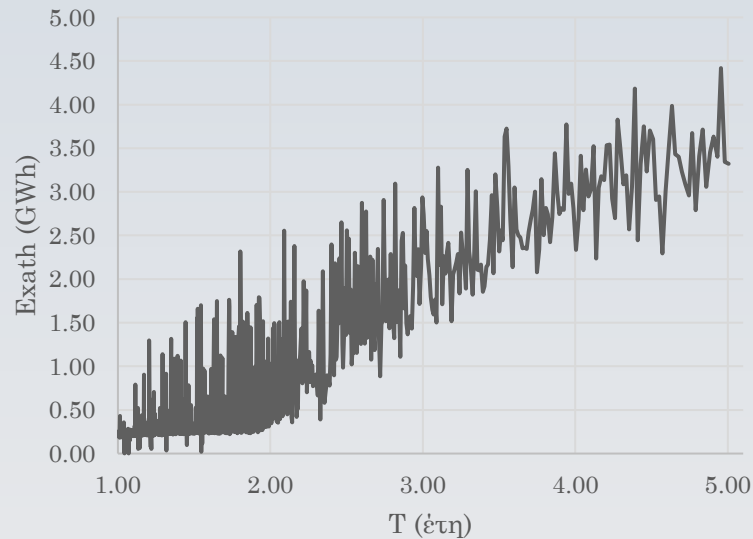
$T = 90$ έτη – Διπλή αιχμή στην αρχή του επεισοδίου



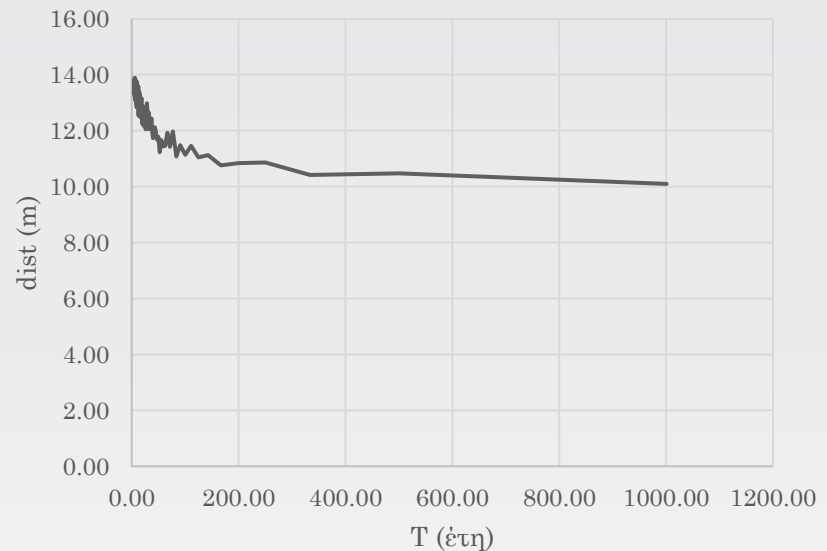
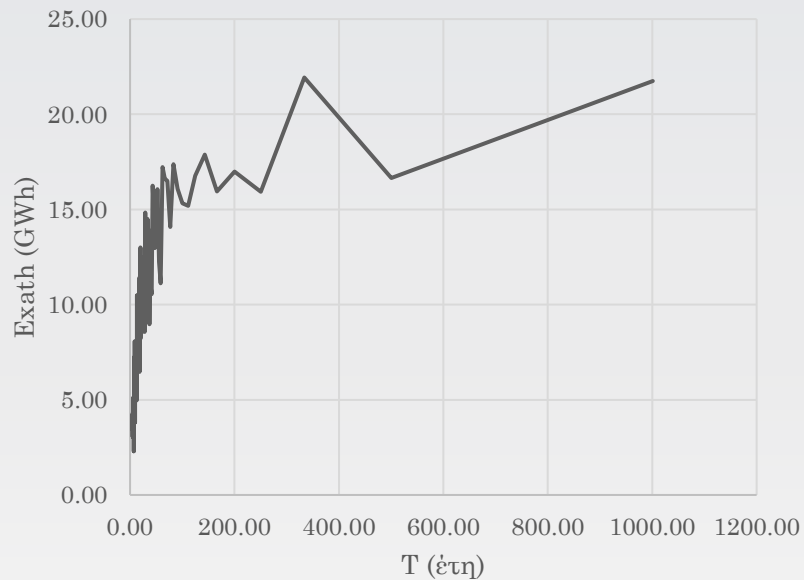
Αποτελέσματα προσομοίωσης

- $z_0 = +114$ m
- Συντηρητικός συνδυασμός βαρών (95-5)
- Τοπικός κανόνας λειτουργίας

T=1 έως 5 έτη



T=5 έως 1000 έτη



Ολικοί κανόνες λειτουργίας

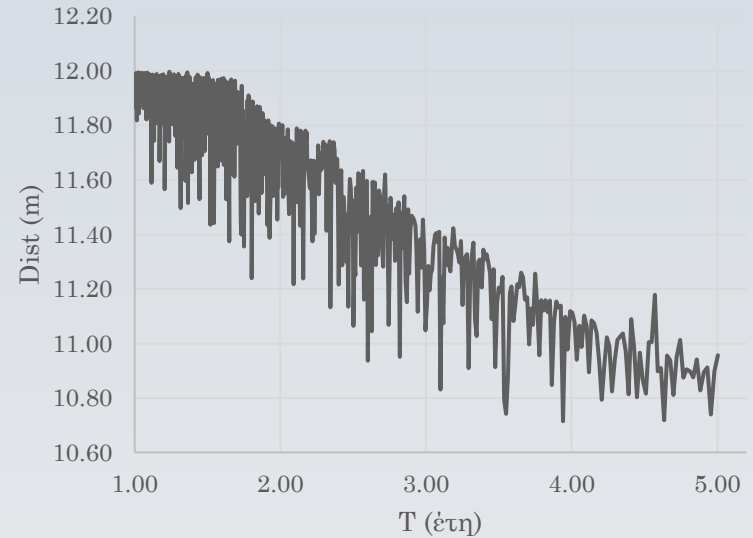
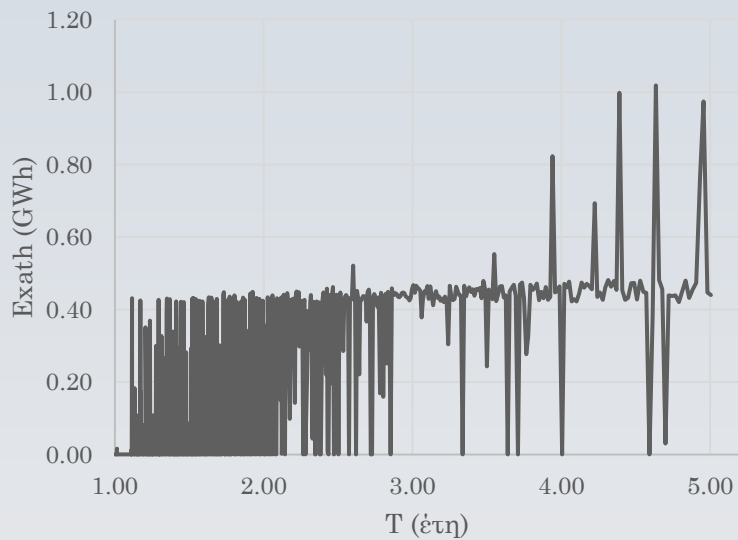
- Η συμπεριφορά του τοπικού κανόνα εξετάστηκε για:
 - ✓ τετραπλάσιο βάρος ενέργειας για την ίδια αρχική στάθμη
 - ✓ δυσμενέστερο - ενδιάμεσο σενάριο αρχικής στάθμης +116 m
 - ✓ το ακραίο σενάριο αρχικής στάθμης +118m
- ❖ Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ενδιάμεσου σεναρίου (+116m)

Ολικός κανόνας λειτουργίας μικρών επεισοδίων	
Lev 1	117.24
Lev 2	117.95
Lev 3	118.67
Lev 4	117.19
Lev 5	117.01
Lev 6	116.17

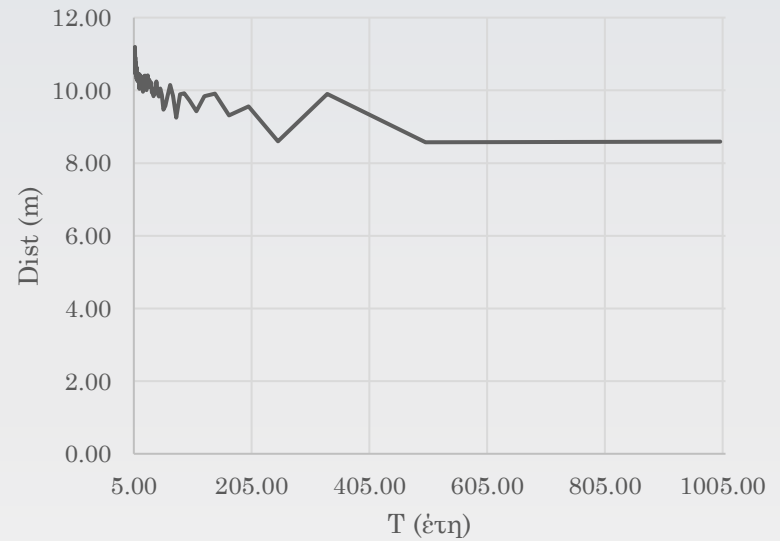
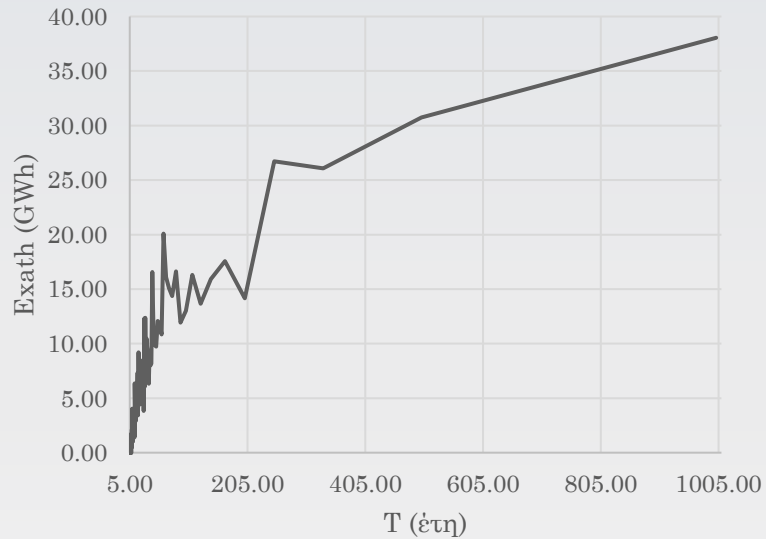
Ολικός κανόνας λειτουργίας μεγάλων επεισοδίων	
Lev 1	117.49
Lev 2	117.99
Lev 3	118.60
Lev 4	117.29
Lev 5	116.42
Lev 6	115.43

Αποτελέσματα προσομοίωσης

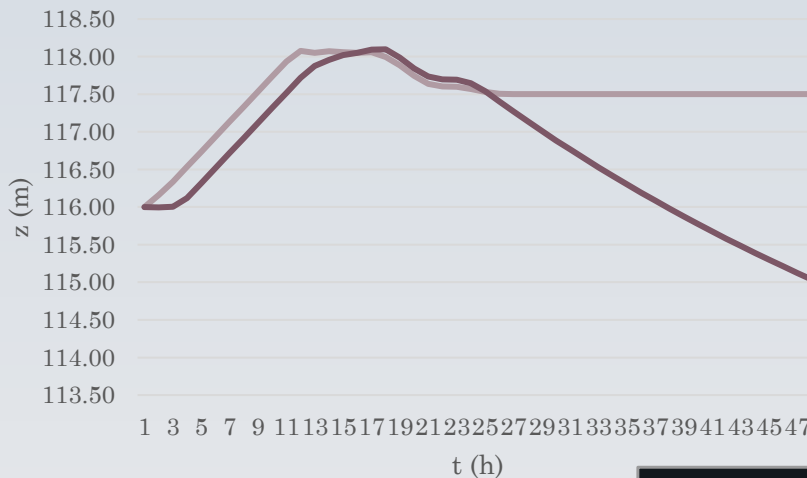
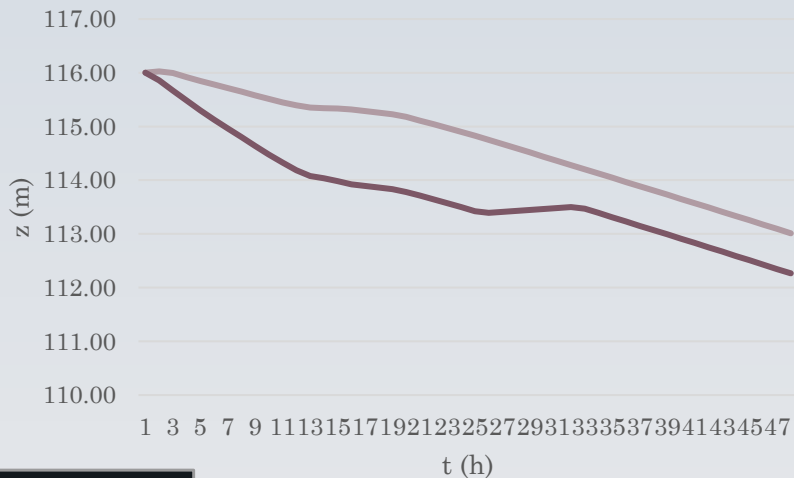
T = 1 έως 5 έτη



T = 5 έως 1000 έτη

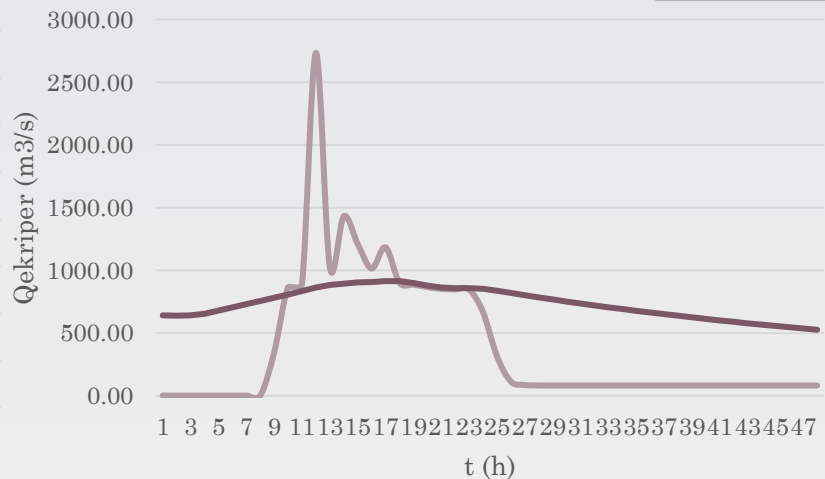
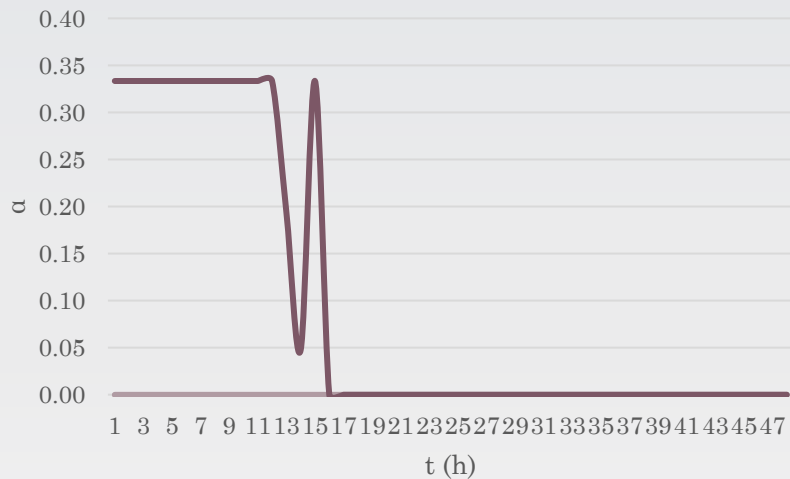


Αποτελέσματα προσομοίωσης



T=1.01 έτη

T=90 έτη



Πλημμύρα 2005 – Χειρισμός ΔΕΗ

- Η αρχική στάθμη του ταμιευτήρα κατά την έναρξη της πλημμύρας ανερχόταν στα +115.85 m.
- Τα θυροφράγματα άνοιξαν πρώτη φορά στη στάθμη των +117.40 m και η χρονοσειρά της στάθμης παρουσιάζεται στην εικόνα
- Με αυτό το χειρισμό χάθηκε ενέργεια ίση με 11.89 GWh ενώ η μέγιστη απόσταση της στάθμης του ταμιευτήρα από τη στέψη του υπερχειλιστή ήταν ίση με 9.75 m

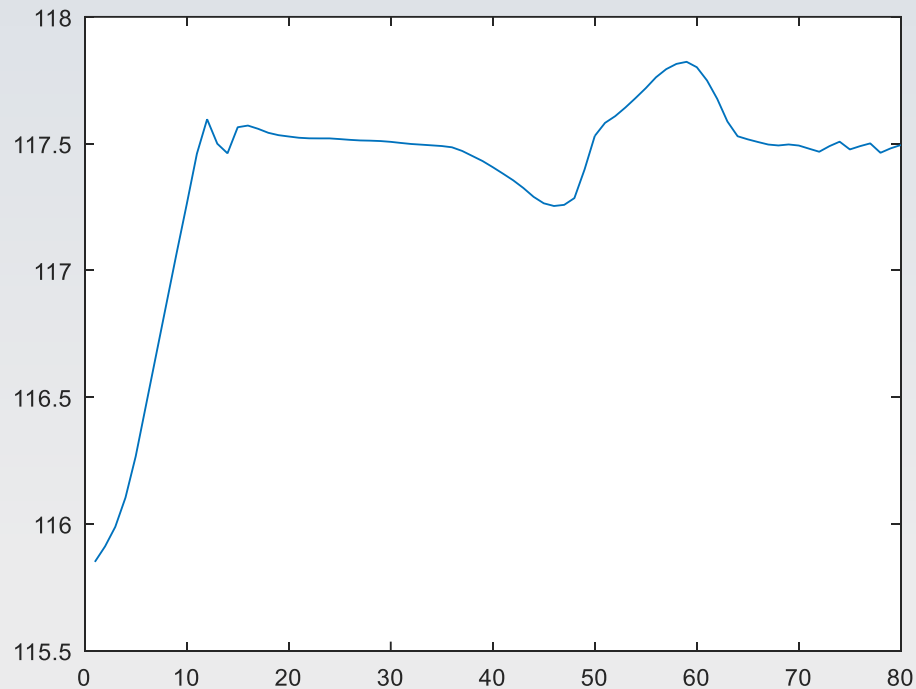


Πλημμύρα 2005 – Ολικός κανόνας

- Έπειτα από προσομοίωση του πλημμυρικού αυτού επεισοδίου βάσει του πρόσφορου ολικού κανόνα που απεικονίζεται παρακάτω προέκυψαν:

1. Exath = 13.53 GWh
2. Dist = 10.18 m

Lev 1	117.49
Lev 2	117.99
Lev 3	118.60
Lev 4	117.29
Lev 5	116.42
Lev 6	115.43



Συμπεράσματα

- ❖ Κατάρτιση αναλυτικής σχέσης στάθμης – παροχής εκχειλιστή και συναλήθευση με τις σχέσεις της ΔΕΗ.
- ❖ Ανάπτυξη αριθμητικού σχήματος διόδευσης και χρήση χαρακτηριστικών τιμών στάθμης.
- ❖ Υιοθέτηση δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης – ασφάλειας και οικονομικότητας.
- ❖ Πολυκριτηριακή ανάλυση και προσδιορισμός των συντελεστών βάρους.
- ❖ Παραγωγή τοπικού κανόνα για το πλημμυρογράφημα $T=10000$ ετών.
- ❖ Παραγωγή συνθετικών πλημμυρογραφημάτων.
- ❖ Διεξαγωγή ολικών κανόνων λειτουργίας «μικρών» και «μεγάλων» επεισοδίων.
- ❖ Σύγκριση με τους χειρισμούς της ΔΕΗ για τη πλημμύρα του 2005.

Μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι

- Ενσωμάτωση επιπλέον εμπειρικών υδρολογικών κανόνων.
- Επιπλέον έμφαση στο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών τιμών στάθμης.
- Εμπλουτισμός με εξωτερική πληροφορία (μετεωρολογικές προγνώσεις κ.ά.).
- Σύγκριση των συνθετικών πλημμυρογραφημάτων με πραγματικά ωριαίας κλίμακας.
- Εφαρμογή των ολικών κανόνων και σε άλλα πλημμυρικά επεισόδια.

A landscape photograph showing a dam in the background with several high-voltage power lines and towers. The foreground is dominated by a river with dense green reeds and bushes. The sky is blue with scattered white clouds. The text "Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας" is overlaid in the center of the image.

Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας