



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Υδρολογικά μοντέλα στείρευσης ροής ως εργαλεία πρόγνωσης της  
ενεργειακής παραγωγής σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΠΑΛΑΜΠΡΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ-ΜΑΡΙΑ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΔΡΕΑΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΑΔΗΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

*ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2020*

# Ερέθισμα...

- Αντικατάσταση της σημερινή προστατευόμενης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας (mandatory pool) με ένα νέο μοντέλο για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (**Target Model**)
- Το νέο μοντέλο αποτελείται:

1. Αγορά επόμενης ημέρας (day-ahead)
2. Ενδοημερήσια αγορά (intraday)
3. Αγορά εξισορρόπησης
4. Προθεσμιακή αγορά



## Πρόκληση ΜΥΗΕ

αμελητέα ικανότητα αποθήκευσης ➡ αδυναμία προγραμματισμού

- Κατάρτιση μοντέλου πρόγνωσης για **δύο μηχανισμούς στείρευσης**:
  - ξηρή περίοδος
  - ύφεση πλημμύρας
- Εκτίμηση παραμέτρων μοντέλων και **αβεβαιότητάς** τους
- Παραγωγή «σεναρίων» παροχής με χρήση **συνθετικών συντελεστών στείρευσης**
- Μετατροπή των «σεναρίων» παροχής σε «σενάρια» παραγωγής ενέργειας
- **Αξιολόγηση** με χρήση υδρολογικών, ενεργειακών και οικονομικών δεικτών

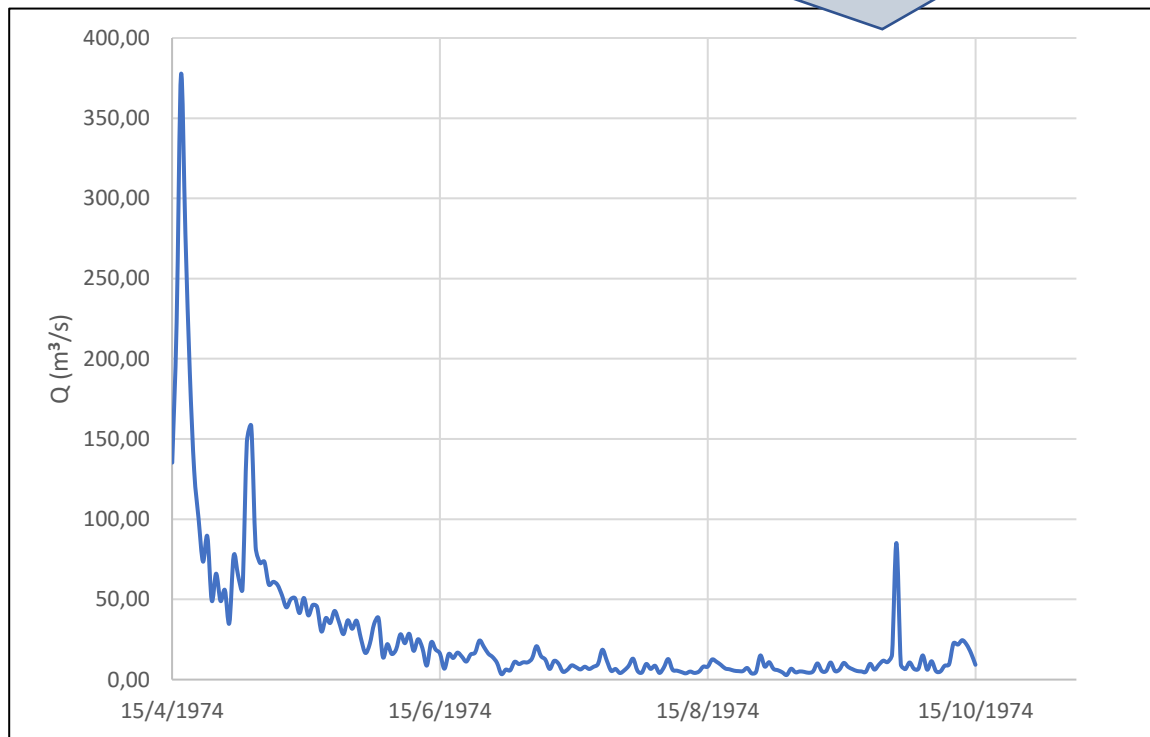
## **Κρίσιμα σημεία:**

- 1. Σχεδιασμός πρότυπου ΜΥΗΕ**
- 2. Διαχωρισμός πλημμυρικών επεισοδίων από χρονοσειρά παροχών**

# Περίοδος Πρόγνωσης

## Μακροπρόθεσμη πρόγνωση

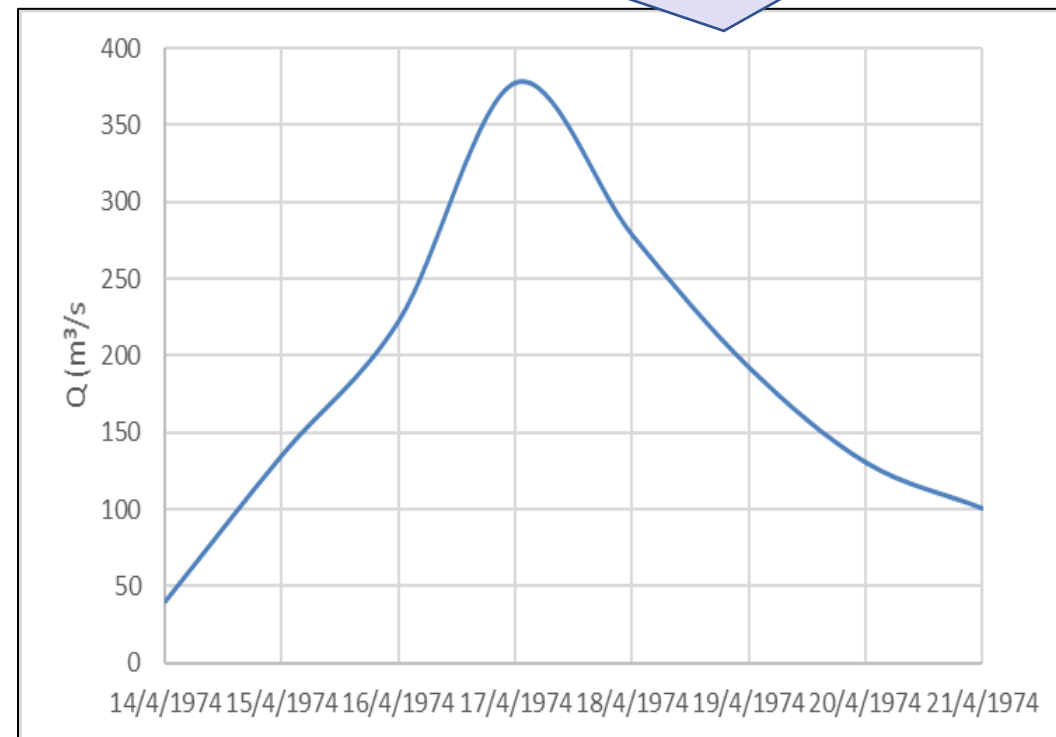
➔ Στείρευση ξηρής περιόδου



15 Απριλίου – 15 Οκτωβρίου

## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση

➔ Ύφεση πλημμυρικού επεισοδίου

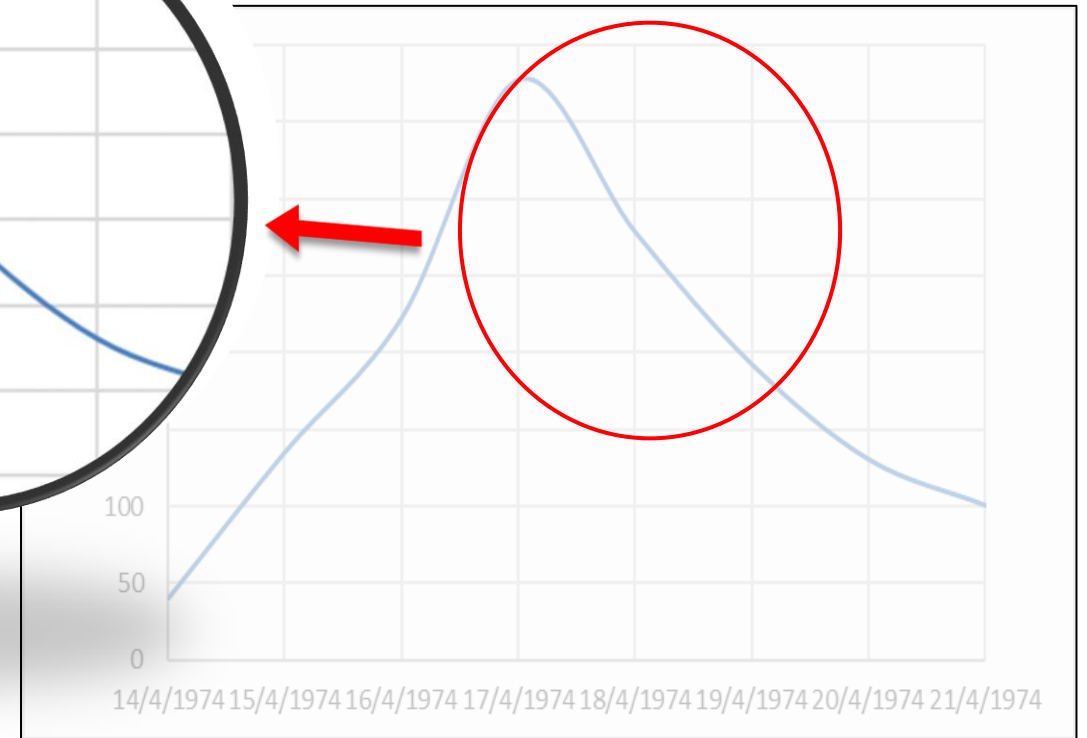


Εκτόνωση πλημμύρας (ημέρες)

# Περίοδος Πρόγνωσης

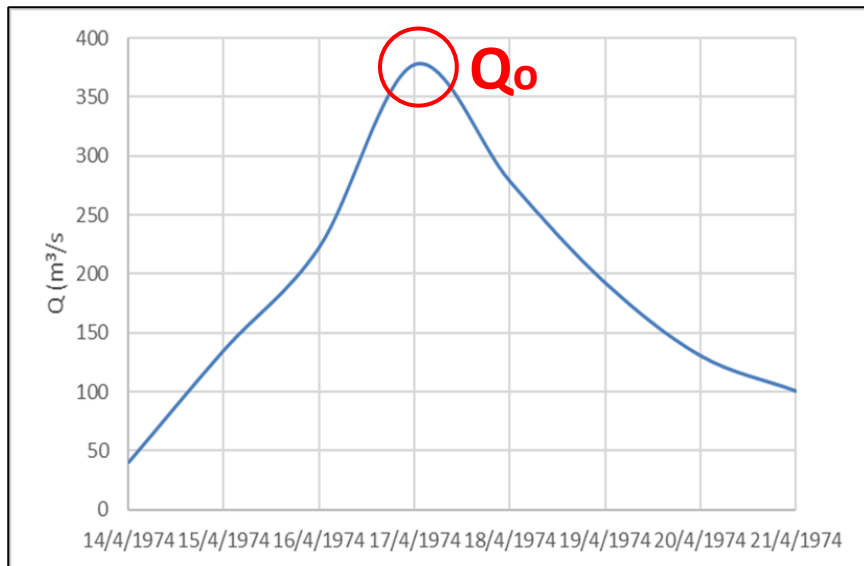
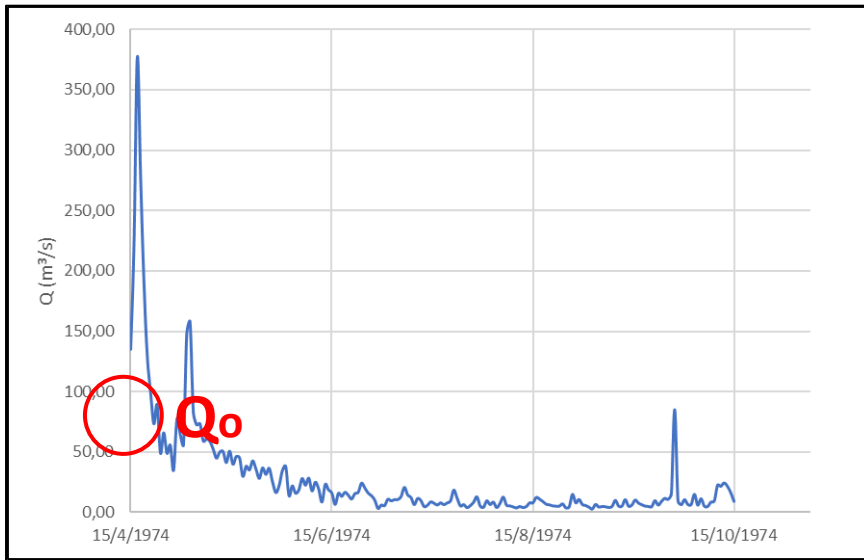


15 Απριλίου – 15 Οκτωβρίου



Εκτόνωση πλημμύρας (ημέρες)

# Καμπύλες στείρευσης: Θεωρητικό Υπόβαθρο



## Μαθηματική έκφραση καμπυλών στείρευσης:

Θεωρώντας την αποθηκευτικότητα του ταμιευτήρα γραμμικώς ανάλογη της απορροής:

$$s(t) = k q(t) \quad (1)$$

Η καμπύλη στείρευσης ακολουθεί την απλή εκθετική σχέση:

$$q(t) = q_0 \exp(-kt) \quad (2)$$

Η σχέση επιλύεται σε διακριτά χρονικά βήματα  $\Delta t$  που αναφέρονται στην ημερήσια κλίμακα.

$k$  : ο συντελεστής στείρευσης

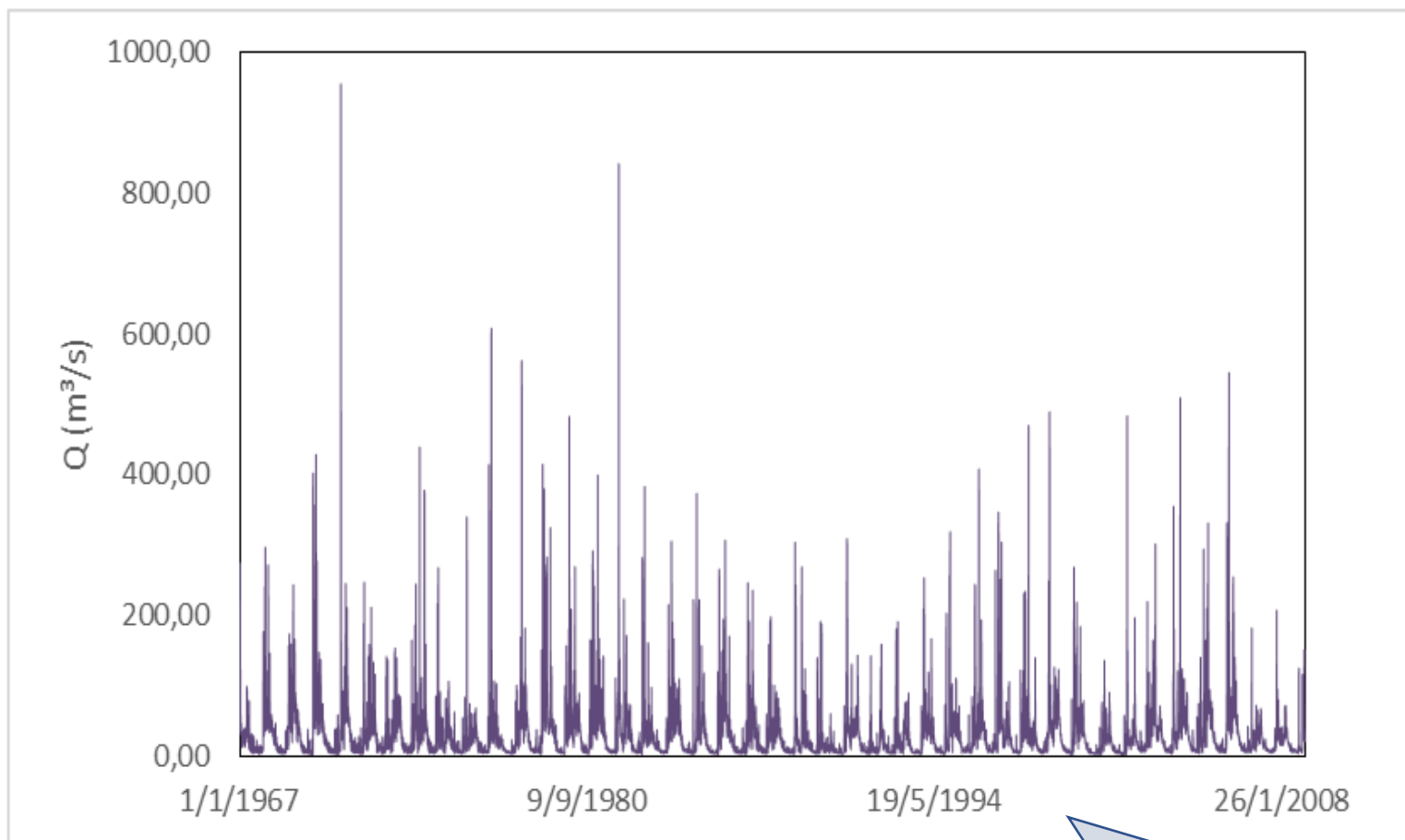
$q(t)$ : η εκτιμώμενη απορροή την χρονική στιγμή  $t$

$q_0$  : η απορροή στην αρχή της προσομοίωσης



Ως  $q_0$  για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση χρησιμοποιήθηκε η **βέλτιστη** τιμή για κάθε έτος (Risva et al., 2018), ενώ για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση η **αιχμή της πλημμύρας**.

# Περιοχή μελέτης: Λεκάνη Αχελώου (Κρεμαστά)



Μέση Τιμή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	30,24
Μέγιστη Τιμή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	951,31
Ελάχιστη Τιμή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1,63
Τυπική Απόκλιση ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	40,26
Ασυμμετρία	5,38
Κυρτότητα	-3,03

Μήκος διαθέσιμης χρονοσειράς: 41 έτη (1967 – 2008)

# Διαχωρισμός πλημμυρικών επεισοδίων: Αρχική προσέγγιση

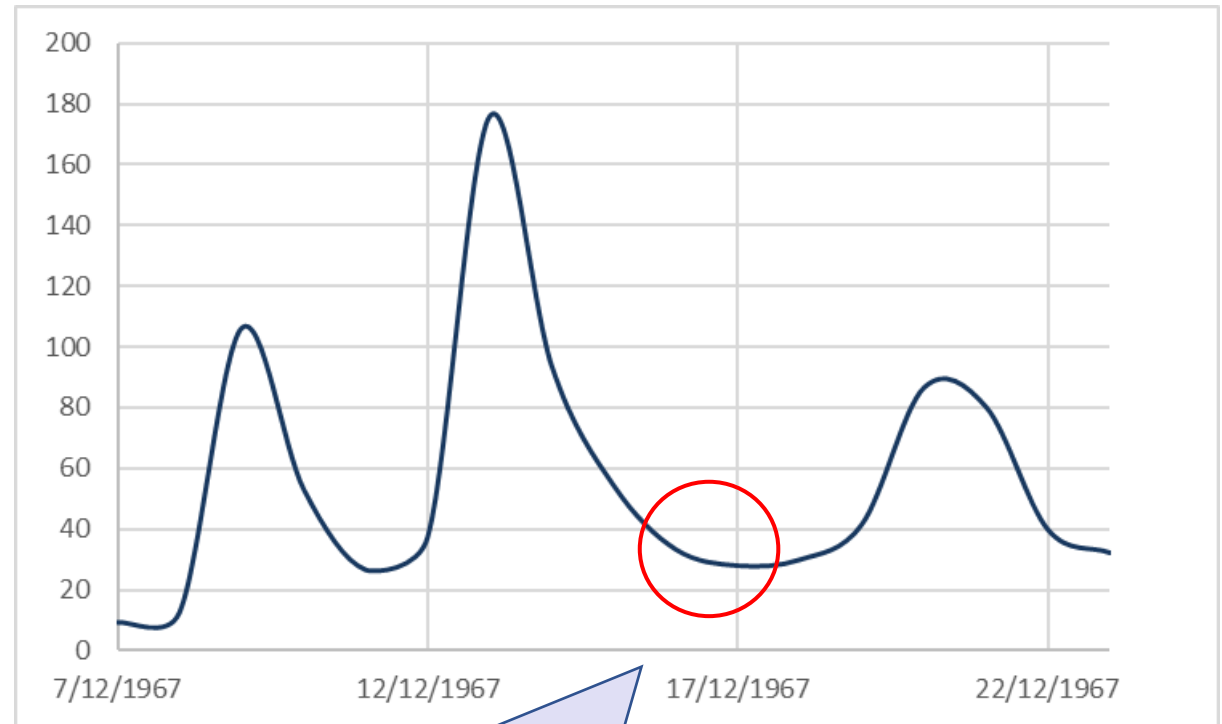
$$q(t) = q_0 \exp(-kt)$$



$$q(t + 1) = q(t) \exp(-k)$$



Επίλυση της σχέσης ως προς  $k$



Σημείο αλλαγής κλίσης ( $k \approx 0$ )

Δυσκολία στην διάκριση σημαντικών και μικρών πλημμυρικών επεισοδίων



## Κατάρτιση εμπειρικών κανόνων:

1. Κατώτατο όριο

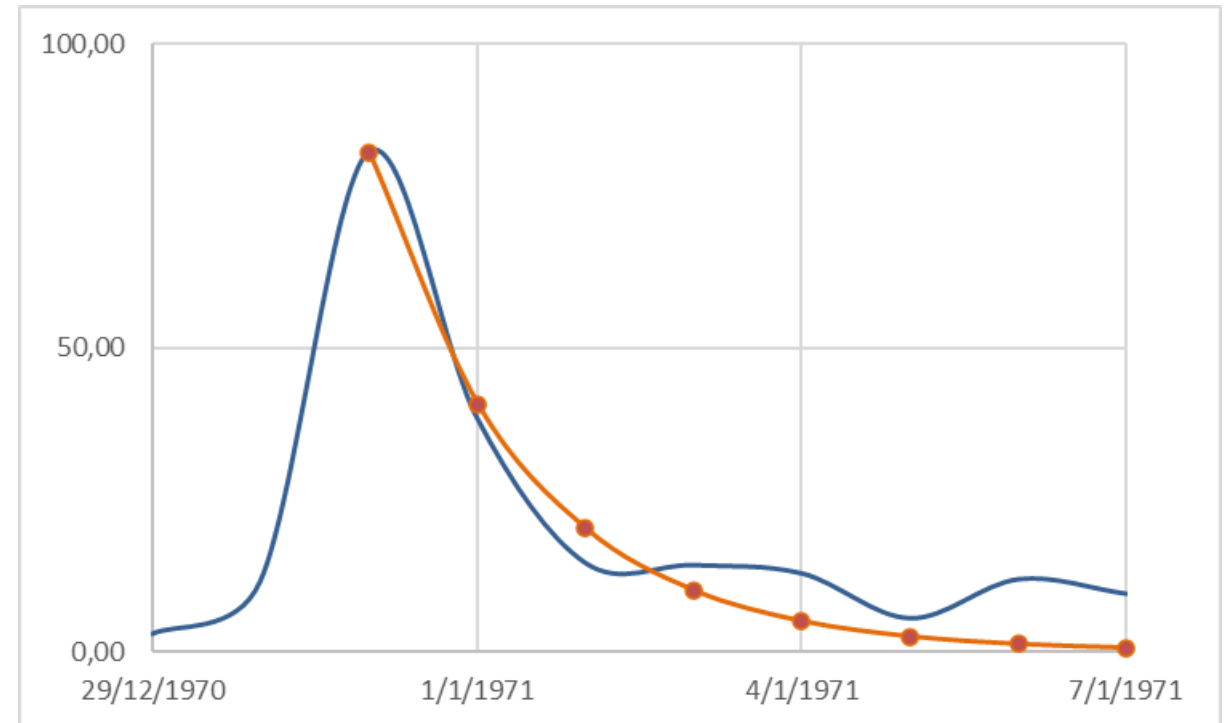
$$Q^* = \text{mean}(Q) + \lambda \text{std}(Q)$$

2. Απορροές μεγαλύτερες από  $Q^*$  για συνεχόμενα χρονικά βήματα

3. Απομόνωση πλημμυρικών επεισοδίων

4. Απομόνωση πτωτικών κλάδων

Πρόκληση: Επεισόδια με πολλαπλές κορυφές



**Επόμενο βήμα:** Εκτίμηση συντελεστή στείρευσης  $k$  με προσαρμογή της εξ. (2) στο δείγμα δεδομένων κάθε επεισοδίου, μέσω **μη γραμμικής βελτιστοποίησης**.

**Κριτήριο προσαρμογής:**  $\varepsilon = \sum(Q - Q_{est})^2$

## Κατάρτιση εμπειρικών κανόνων:

1. Κατώτατο όριο

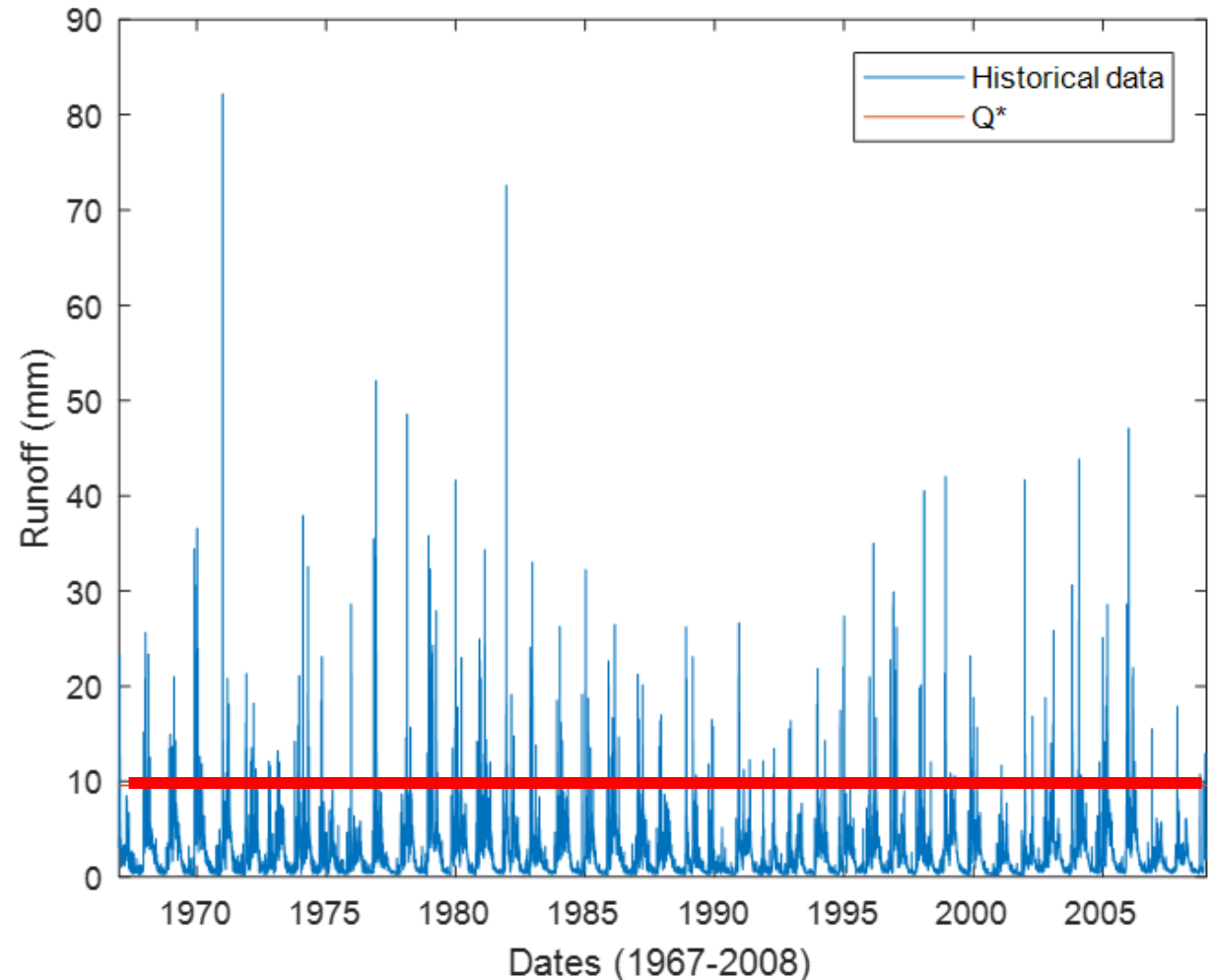
$$Q^* = \text{mean}(Q) + \lambda \text{std}(Q)$$

2. Απορροές μεγαλύτερες από  $Q^*$  για συνεχόμενα χρονικά βήματα

3. Απομόνωση πλημμυρικών επεισοδίων

4. Απομόνωση πτωτικών κλάδων

Πρόκληση: Επεισόδια με πολλαπλές κορυφές



## Κατάρτιση εμπειρικών κανόνων:

1. Κατώτατο όριο

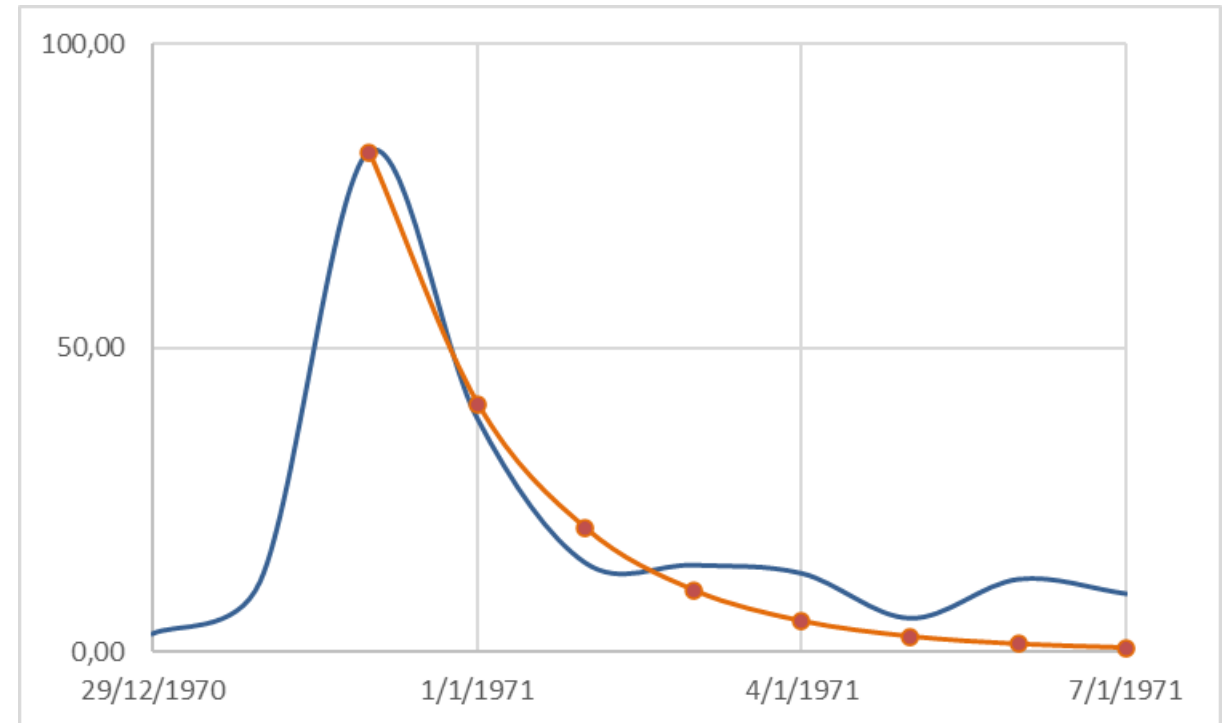
$$Q^* = \text{mean}(Q) + \lambda \text{std}(Q)$$

2. Απορροές μεγαλύτερες από  $Q^*$  για συνεχόμενα χρονικά βήματα

3. Απομόνωση πλημμυρικών επεισοδίων

4. Απομόνωση πτωτικών κλάδων

Πρόκληση: Επεισόδια με πολλαπλές κορυφές



**Επόμενο βήμα:** Εκτίμηση συντελεστή στείρευσης  $k$  με προσαρμογή της εξ. (2) στο δείγμα δεδομένων κάθε επεισοδίου, μέσω **μη γραμμικής βελτιστοποίησης**.

**Κριτήριο προσαρμογής:**  $\varepsilon = \sum(Q - Q_{est})^2$

## Κατάρτιση εμπειρικών κανόνων:

1. Κατώτατο όριο

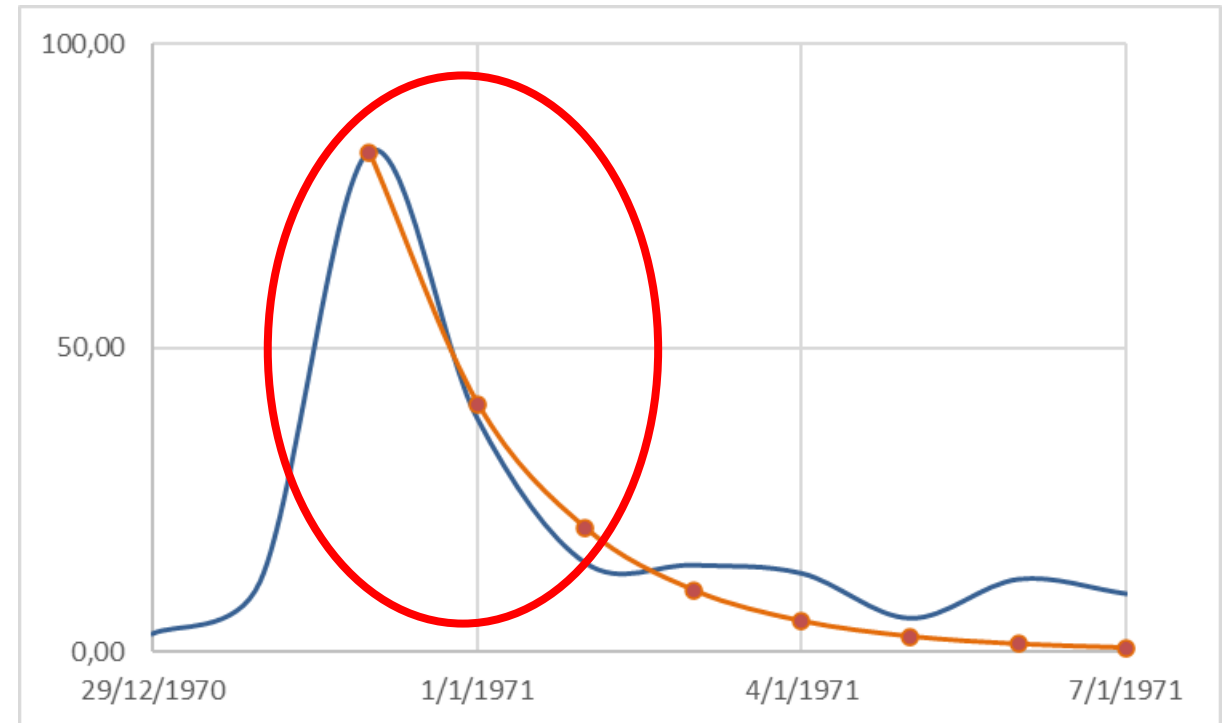
$$Q^* = \text{mean}(Q) + \lambda \text{std}(Q)$$

2. Απορροές μεγαλύτερες από  $Q^*$  για συνεχόμενα χρονικά βήματα

3. Απομόνωση πλημμυρικών επεισοδίων

4. Απομόνωση πτωτικών κλάδων

Πρόκληση: Επεισόδια με πολλαπλές κορυφές

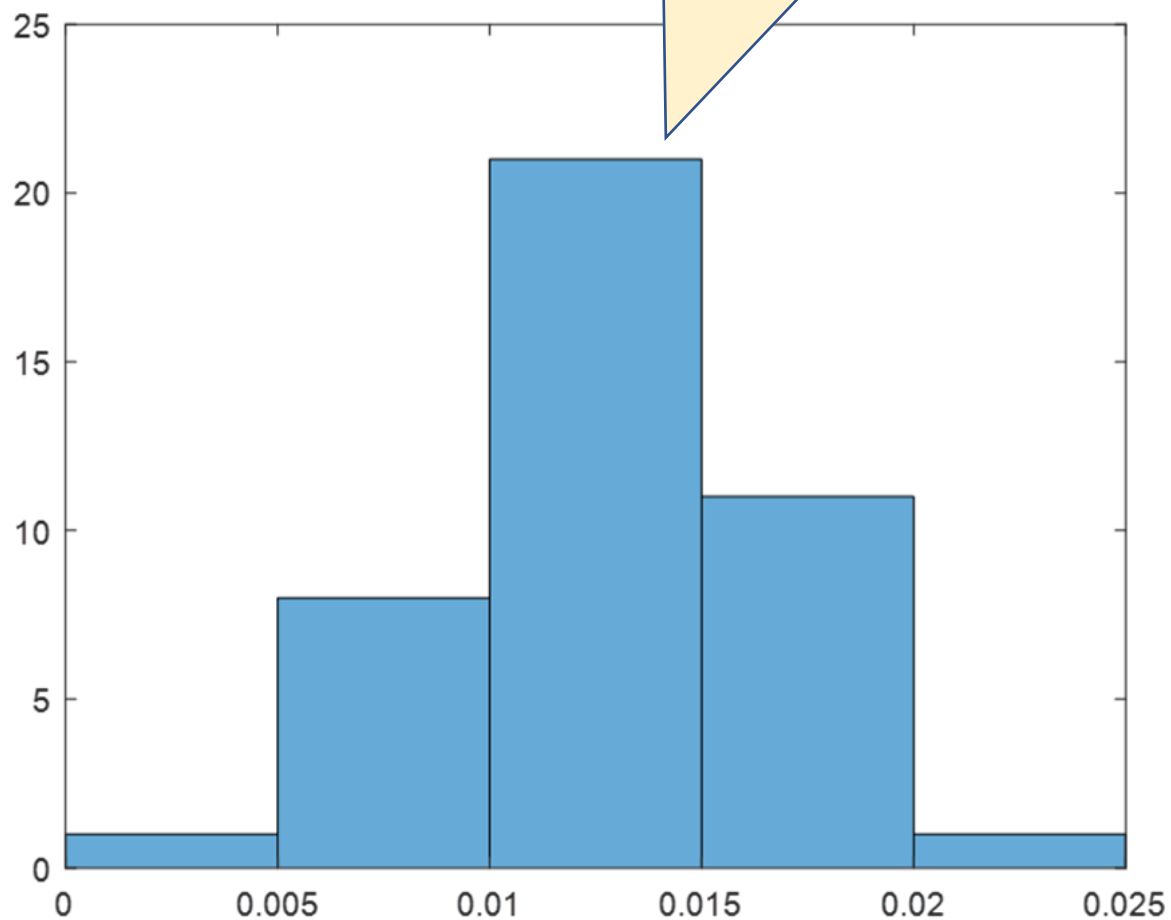


**Επόμενο βήμα:** Εκτίμηση συντελεστή στείρευσης  $k$  με προσαρμογή της εξ. (2) στο δείγμα δεδομένων κάθε επεισοδίου, μέσω **μη γραμμικής βελτιστοποίησης**.

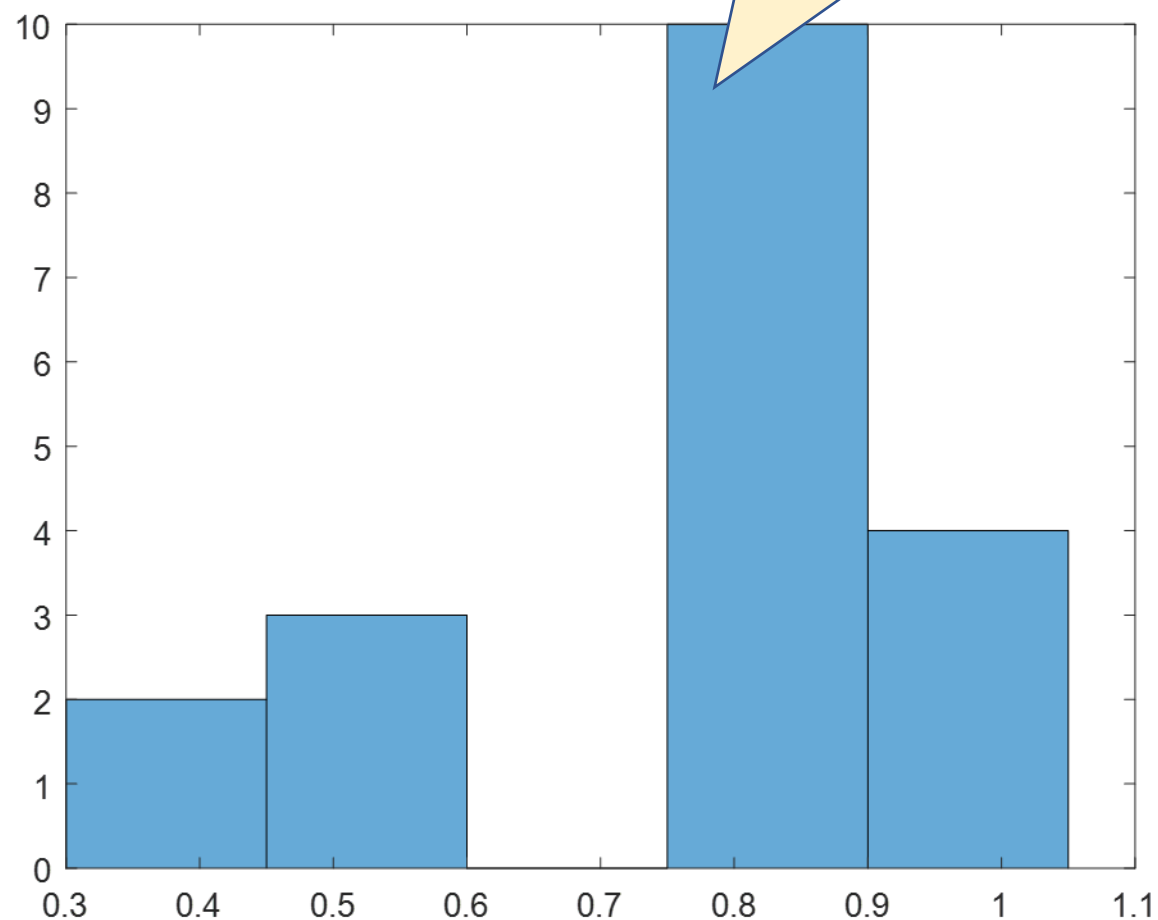
**Κριτήριο προσαρμογής:**  $\varepsilon = \sum(Q - Q_{est})^2$

# Παράμετροι μοντέλου: Συντελεστής στείρευσης $k$

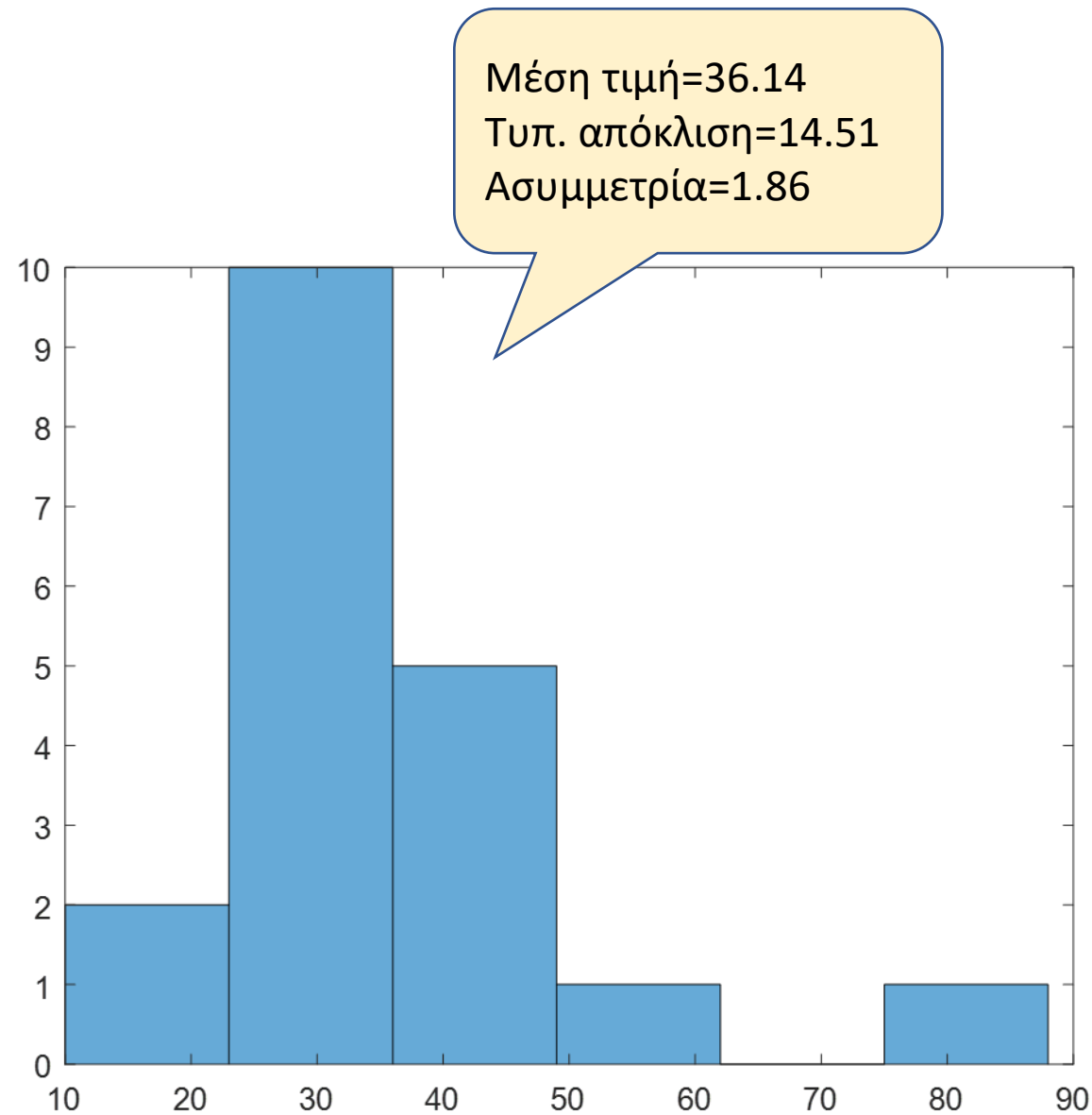
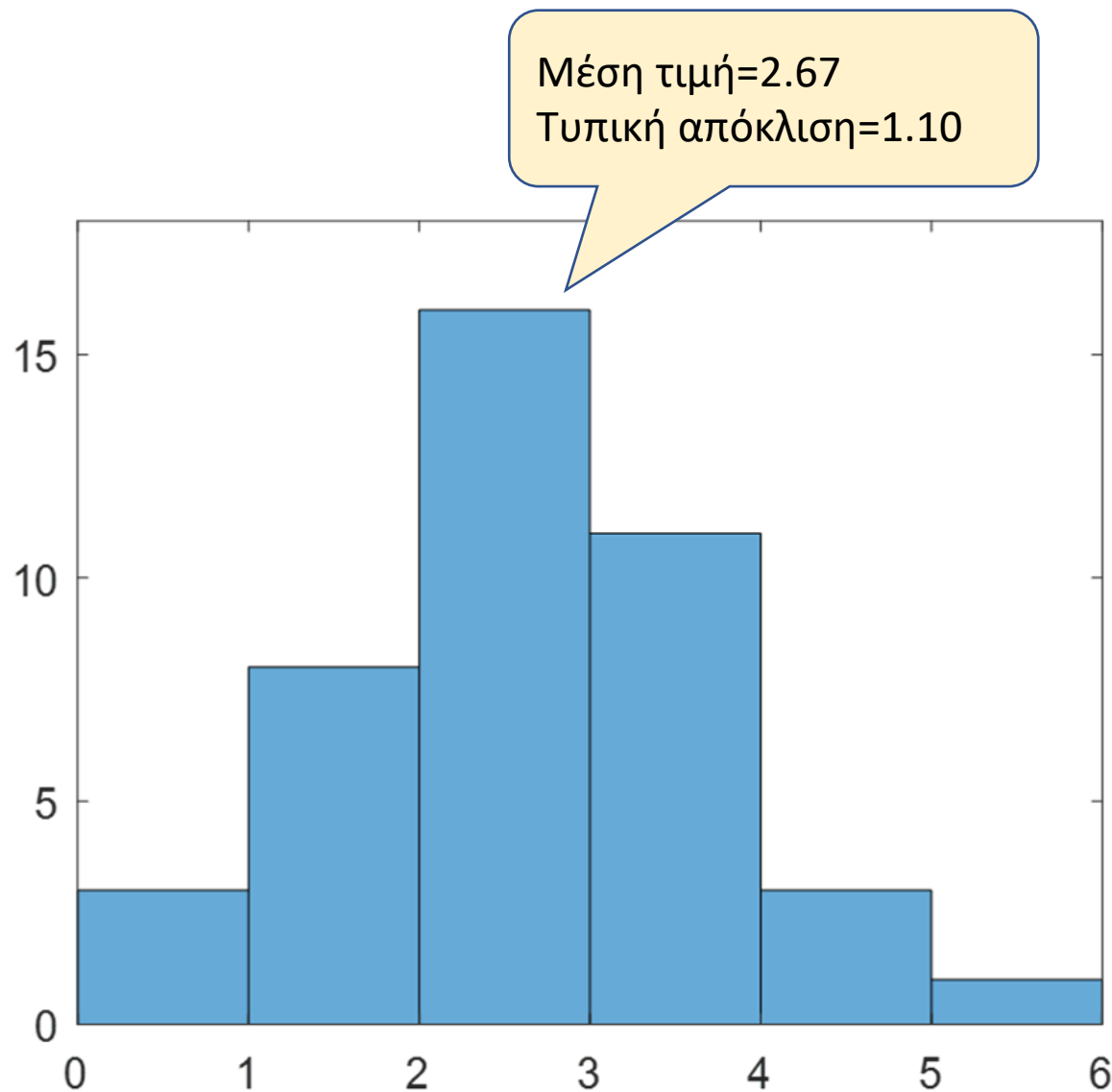
Μέση τιμή=0.013  
Τυπική απόκλιση=0.004  
Ασυμμετρία=-0.09



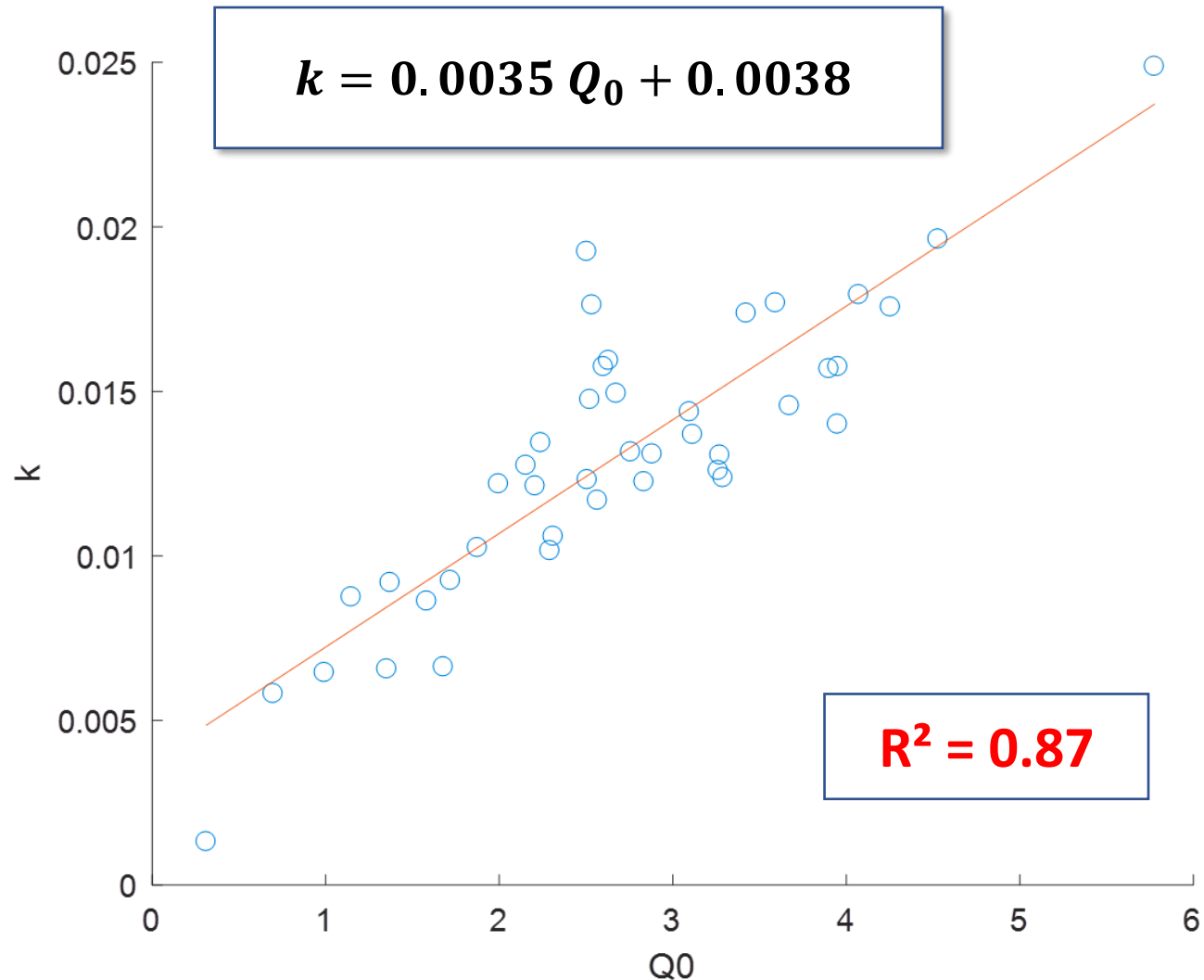
Μέση τιμή=0.77  
Τυπ. απόκλιση=0.19  
Ασυμμετρία=-0.80



# Παράμετροι μοντέλου: Αρχική απορροή μοντέλου $Q_0$



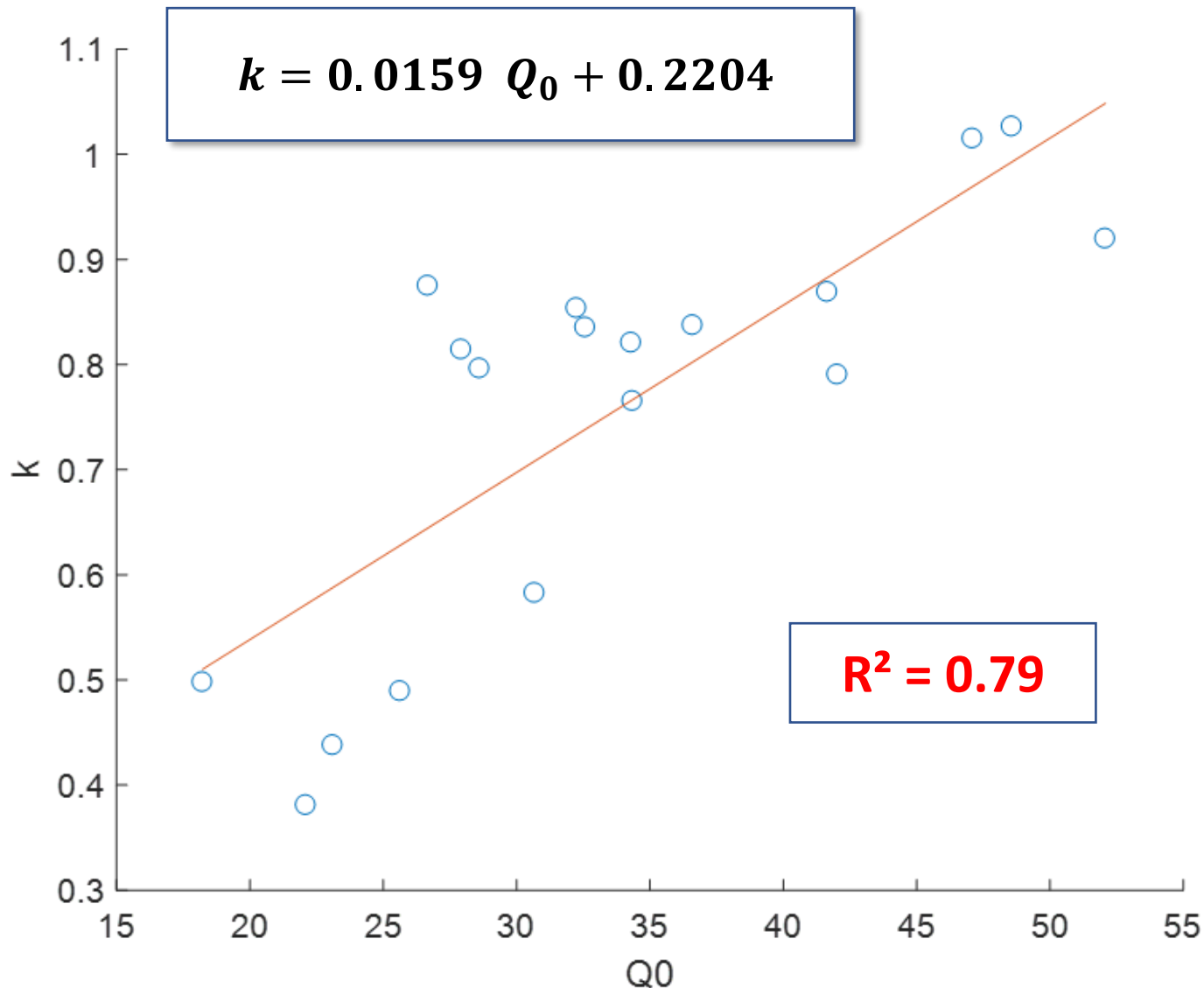
# Συσχέτιση Παραμέτρων: Μακροπρόθεσμη Πρόγνωση



Ισχυρή συσχέτιση μεταξύ  $Q_0$  και  $k$

- Δυνατότητα χρήσης γραμμικής σχέσης ως ντετερμινιστικό μοντέλο για την εξαγωγή συντελεστών στείρευσης
- Ωστόσο, το μοντέλο εμφανίζει σφάλμα το οποίο αποτυπώνεται στην διασπορά των δεδομένων
- Για τον λόγο αυτό, προσεγγίζουμε το πρόβλημα στοχαστικά και εισάγουμε έναν όρο αβεβαιότητας στην παραγωγή των συντελεστών στείρευσης

# Συσχέτιση Παραμέτρων: Βραχυπρόθεσμη Πρόγνωση



Ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ  $Q_0$  και  $k$

- Πέραν της γραμμικής σχέσης, διερευνήθηκε και η εκθετική.
- Έγινε απαλοιφή ενός πλημμυρικού επεισοδίου (ακραίο φαινόμενο).
- Η συσχέτιση μεταξύ των δύο παραμέτρων είναι μικρότερη σε αυτήν την περίπτωση (Υπενθυμίζεται ότι  $R^2=0.87$  στην μακροπρόθεσμη πρόγνωση)
- Για τον λόγο αυτό, το μοντέλο είναι πιο αβέβαιο.



# Παραγωγή συνθετικών συντελεστών στείρευσης $k'$

Παραγωγή συντελεστών  $k'$  σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης για γνωστές αρχικές απορροές

Υπολογισμός σφάλματος

Κατάρτιση συνθετικών συντελεστών στείρευσης που υποθέτουμε ότι ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση του σφάλματος

$$k' = a q_o + \beta$$

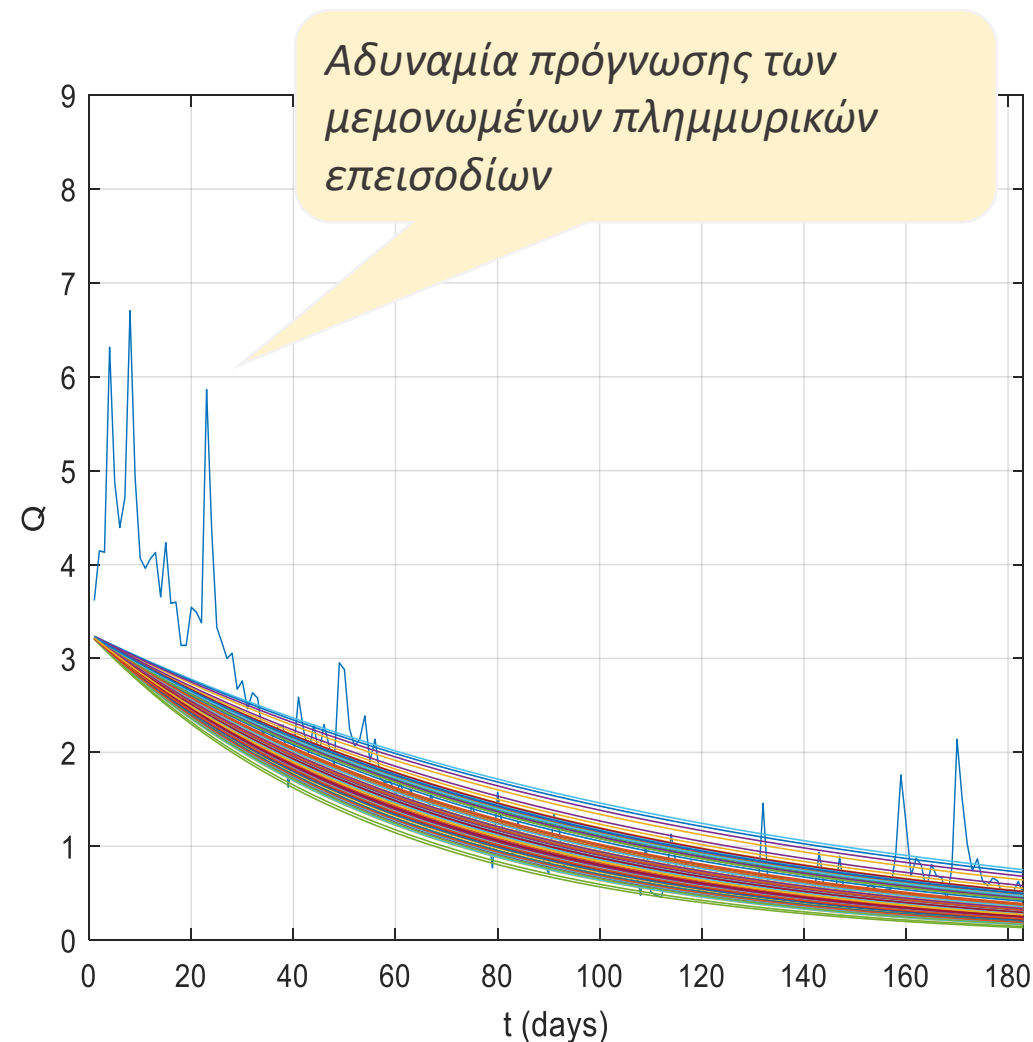
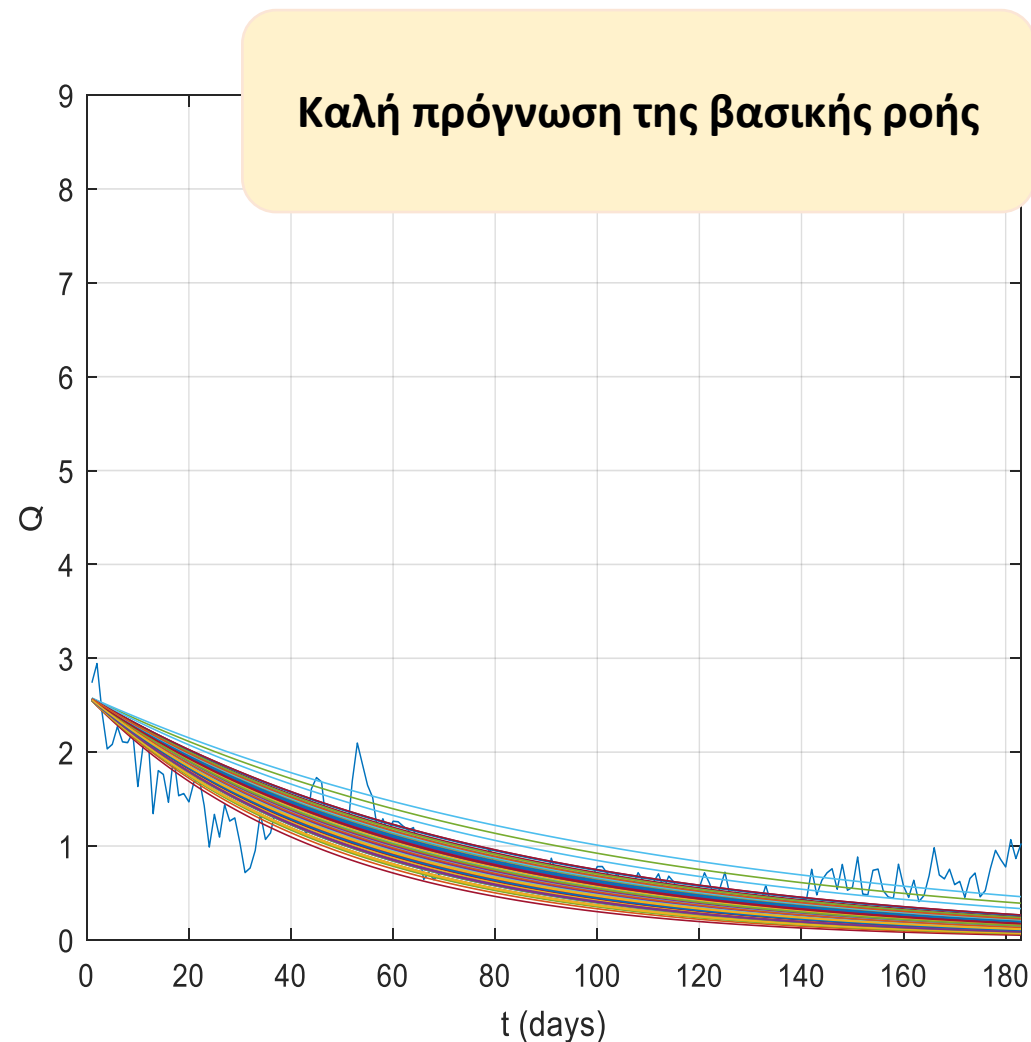
$$\varepsilon = k - k'$$

$$k' = a q_o + \beta + N(0, \sigma_\varepsilon)$$

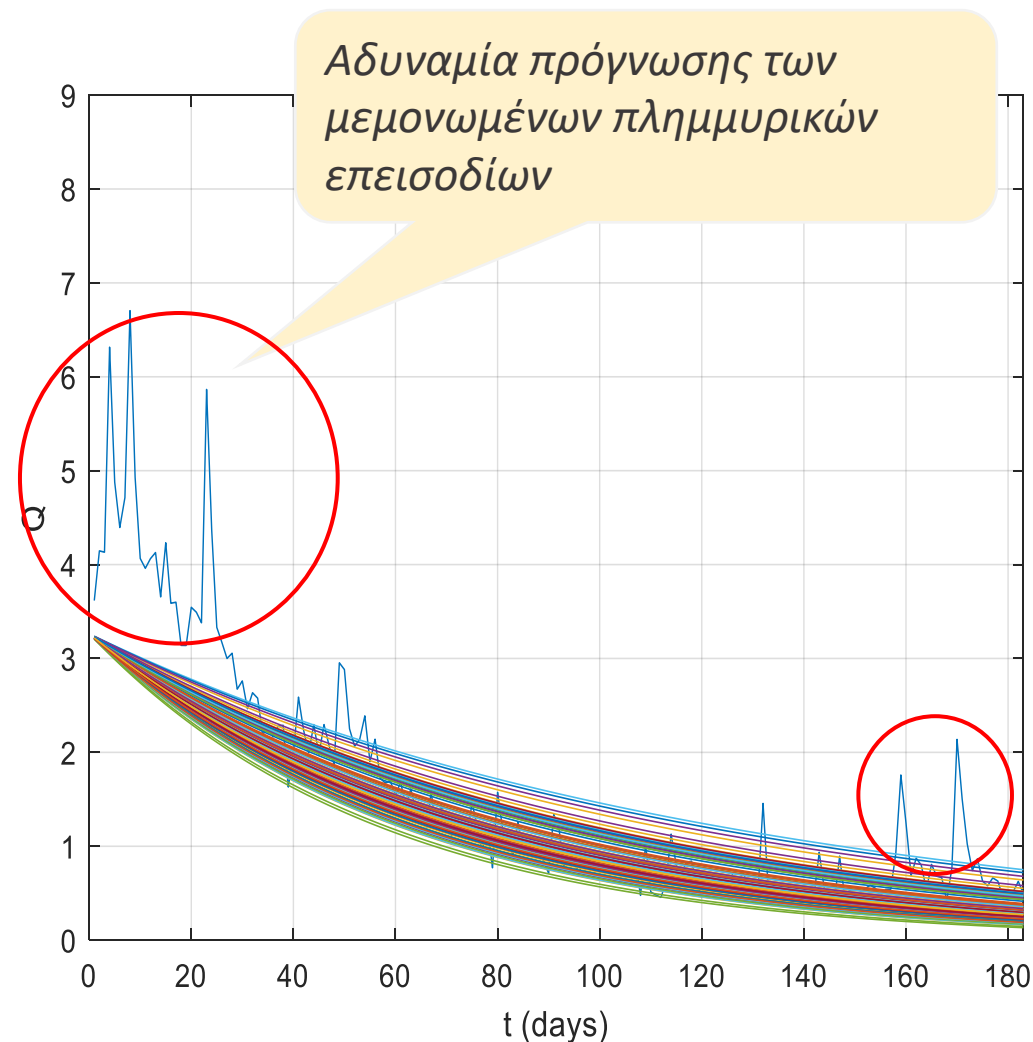
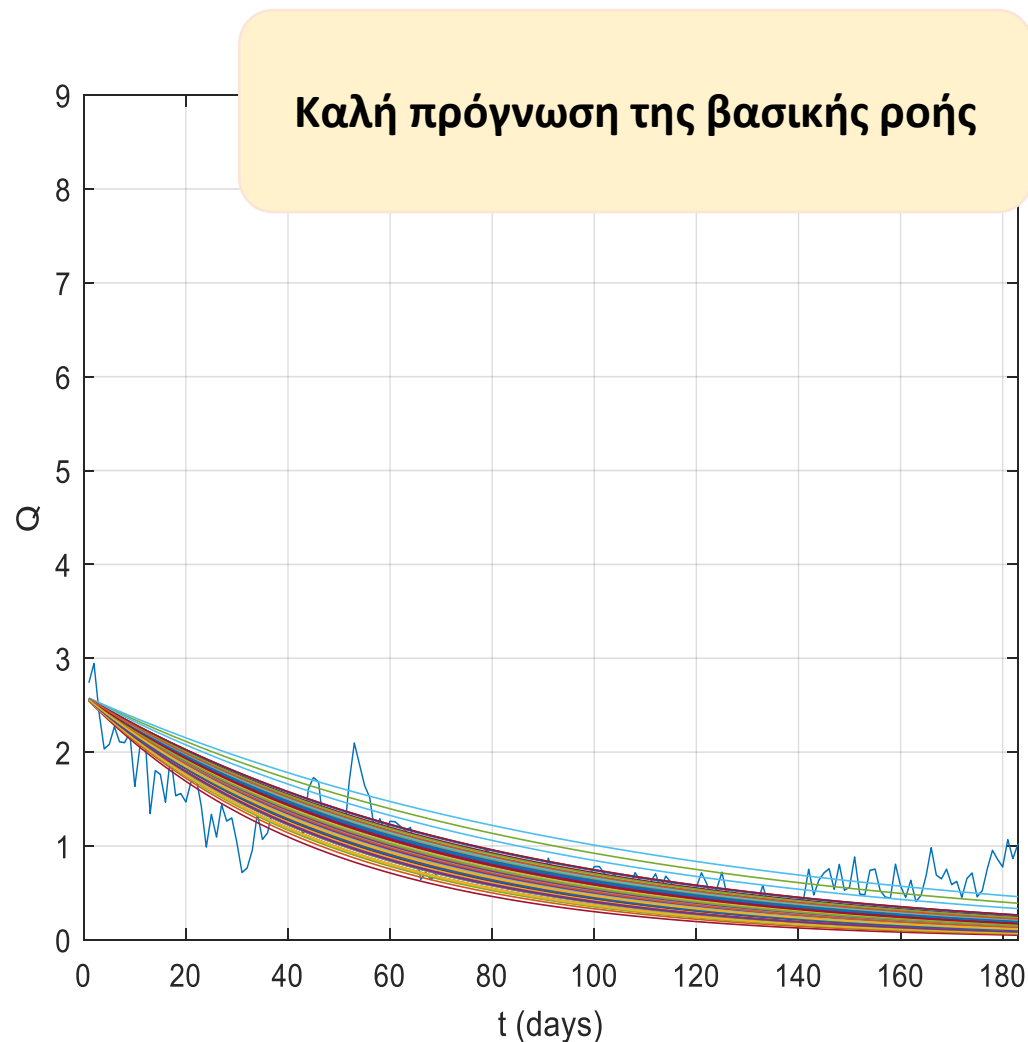
- Μέσω των συνθετικών συντελεστών στείρευσης εισάγουμε **αβεβαιότητα στην πρόγνωση** της παροχής
- Θεωρώντας **δεδομένη την αρχική απορροή** του μοντέλου προκύπτουν, από την **εξίσωση (2)** τα «σενάρια» παροχής
- Η διαδικασία **επαναλαμβάνεται** για κάθε έτος ή πλημμυρικό επεισόδιο, αντίστοιχα



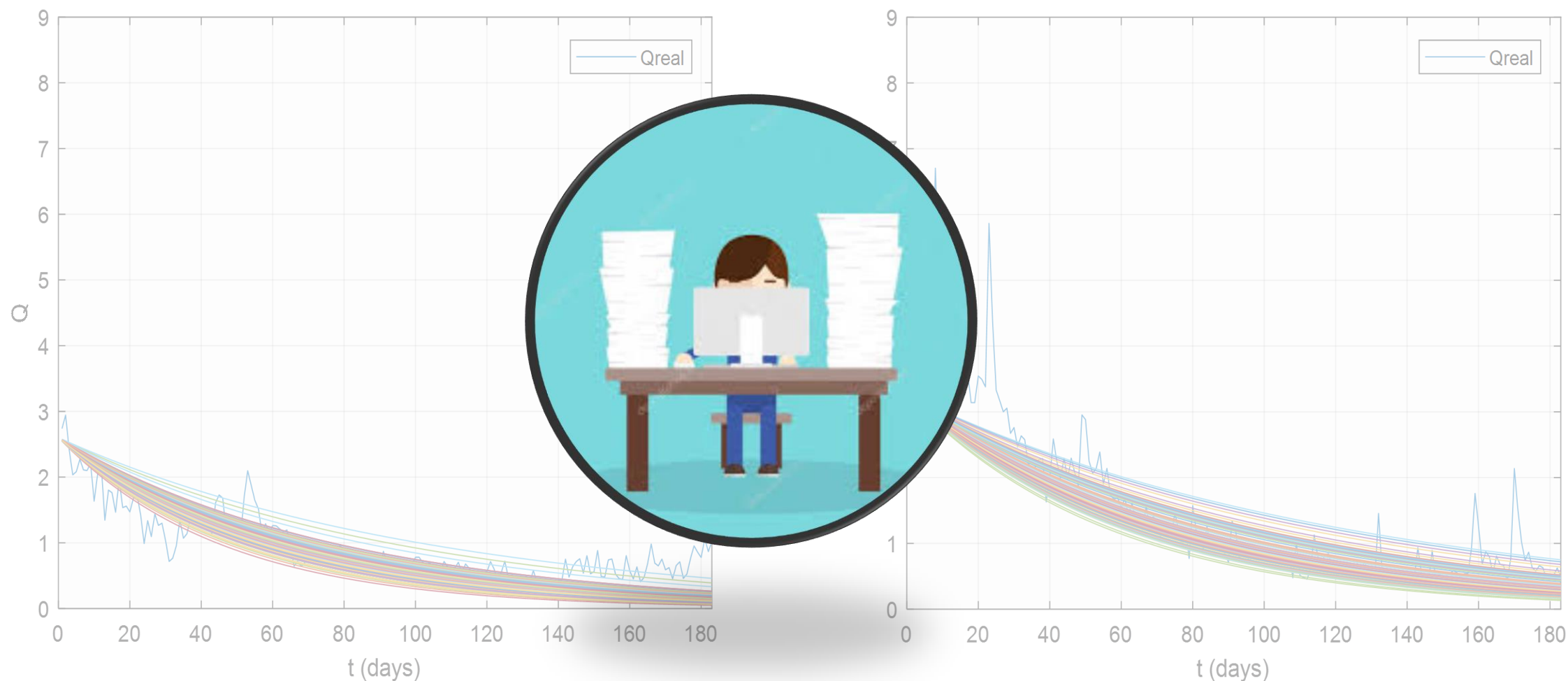
# Παραγωγή «σεναρίων» παροχής: μακροπρόθεσμη πρόγνωση



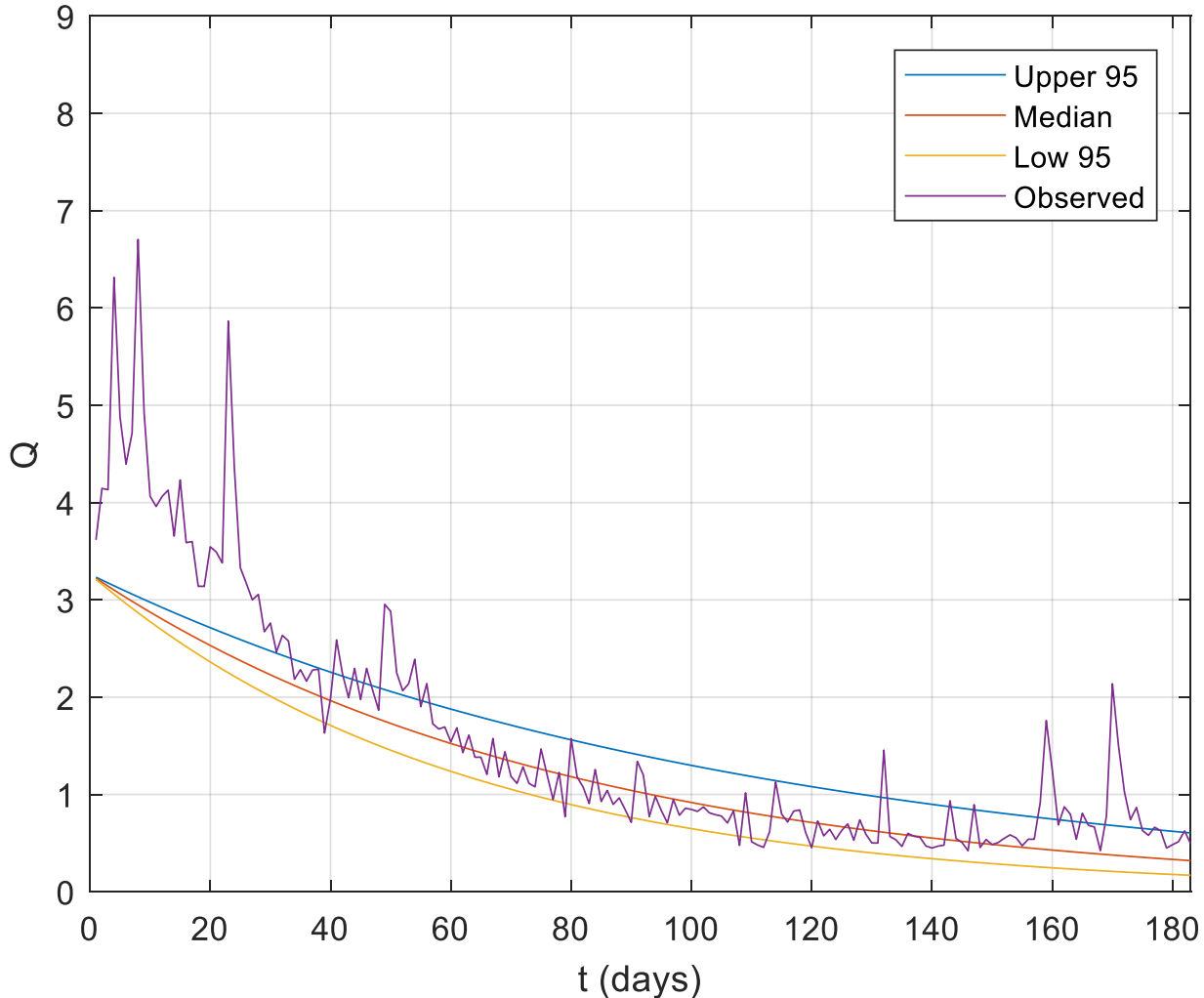
# Παραγωγή «σεναρίων» παροχής: μακροπρόθεσμη πρόγνωση



**100 \* 43 = 4300 σενάρια**



# Παραγωγή «σεναρίων» παροχής: εισαγωγή ρίσκου

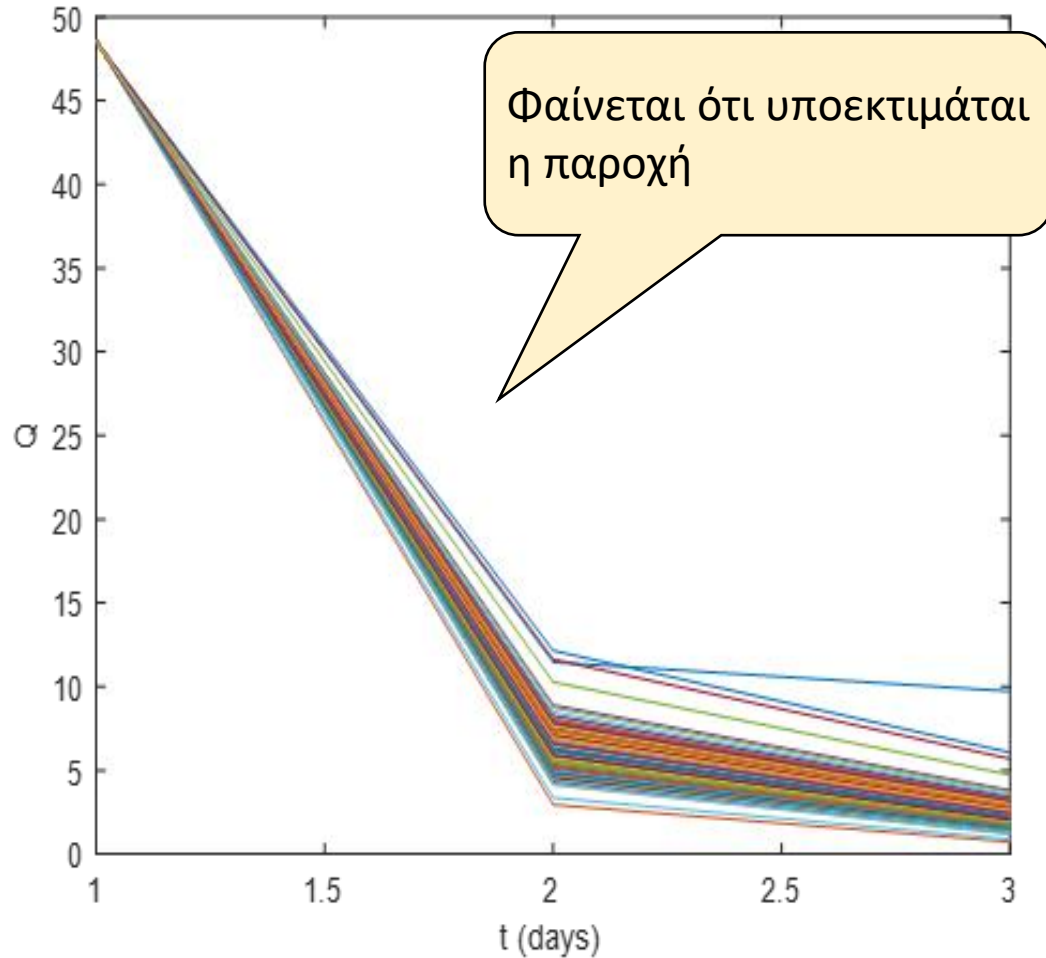


Κάθε πρόγνωση συνοδεύεται από καθορισμένο ρίσκο με αποτέλεσμα ένας επενδυτής να μπορεί να καταρτίσει την στρατηγική του για την παραγωγή και διάθεση ενέργειας με βάση την προσωπική ανοχή του στο ρίσκο.

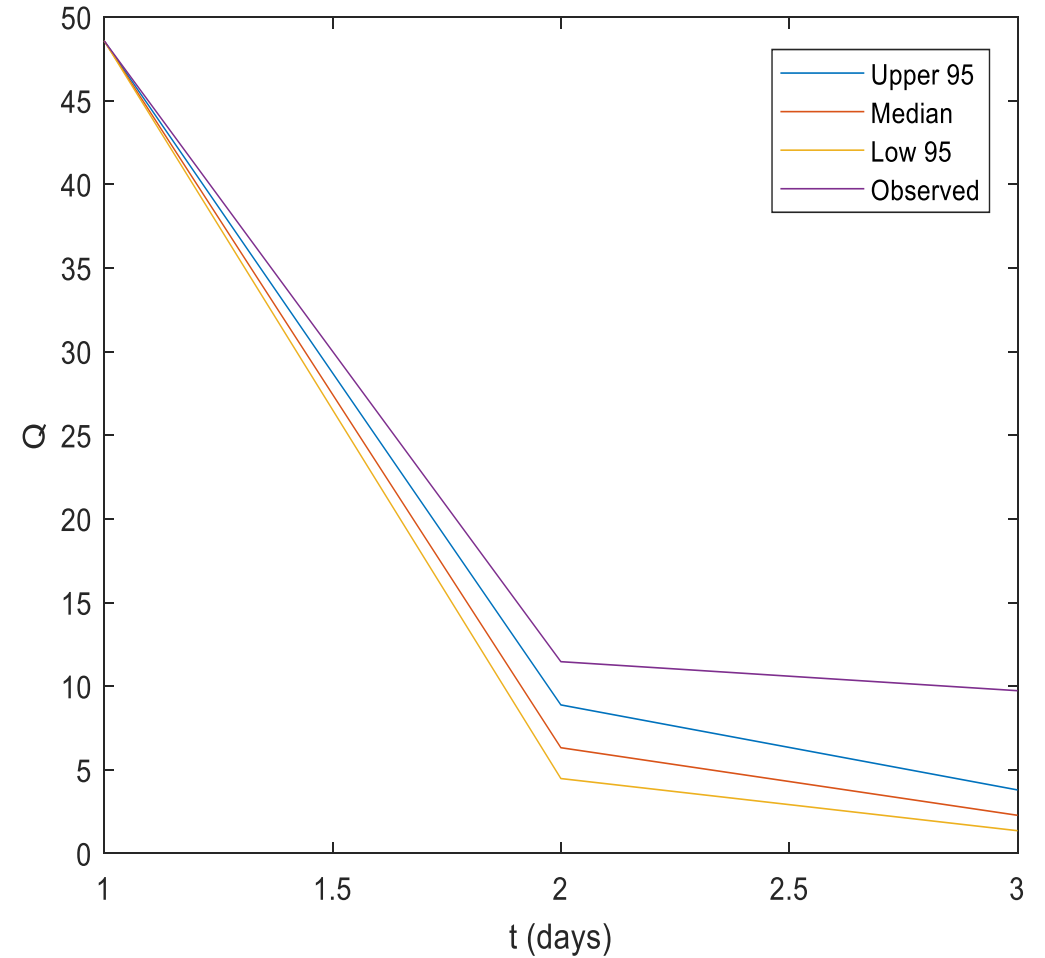
- i. Συντηρητικό σενάριο πρόγνωσης
- ii. Μετριοπαθές σενάριο πρόγνωσης
- iii. Επιθετικό σενάριο πρόγνωσης

# Παραγωγή «σεναρίων» απορροής: βραχυπρόθεσμη πρόγνωση

Σύνολο σεναρίων πρόγνωσης



Σενάρια πρόγνωσης  
Συντηρητικό, Μετριοπαθές, Επιθετικό



## ➤ Καθορισμός περιβαλλοντικής ροής

1. 30% I-I-A
2. 50% Σεπτεμβρίου
3. 30 L/s (κατώτερο όριο)

➤ **Μοντέλο προσομοίωσης** με δεδομένα εισόδου τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου και την χρονοσειρά παροχής με στόχο την **βελτιστοποίηση** της μέγιστης παροχής εκμετάλλευσης.

➤ Το σύστημα βελτιστοποιείται **μεταβάλλοντας την ονομαστική ισχύ ( $I_{max}$ )** κάθε στροβίλου, ώστε να **μεγιστοποιείται η συνολική μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας**

➤ **Βαθμός απόδοσης στροβίλου** από την αναλυτική σχέση:

$$n = n_{min} + \left(1 - \left(1 - \left(\frac{Q}{Q_{max}} - \varphi\right)^{\alpha}\right)^{\beta}\right) (n_{max} - n_{min})$$

**Πρότυπο:** οι παράμετροι σχεδιασμού του βελτιστοποιούνται, ώστε να έχουμε την μέγιστη παραγωγή ενέργειας, και κατ' επέκταση την μέγιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου υδατικού δυναμικού.

### Βασικές Παραδοχές

- ❑ Ύψος πτώσης (H): 100 m
- ❑ Έκταση λεκάνης απορροής (A): 1000 km<sup>2</sup>
- ❑ 2 Στρόβιλοι τύπου Francis διαφορετικής ισχύος, που δουλεύουν συμπληρωματικά
- ❑ Μέγεθος αναφοράς: μονάδες ισοδύναμου ύψους νερού (mm)



Νομικό όριο για ΜΥΗΕ  
15 MW

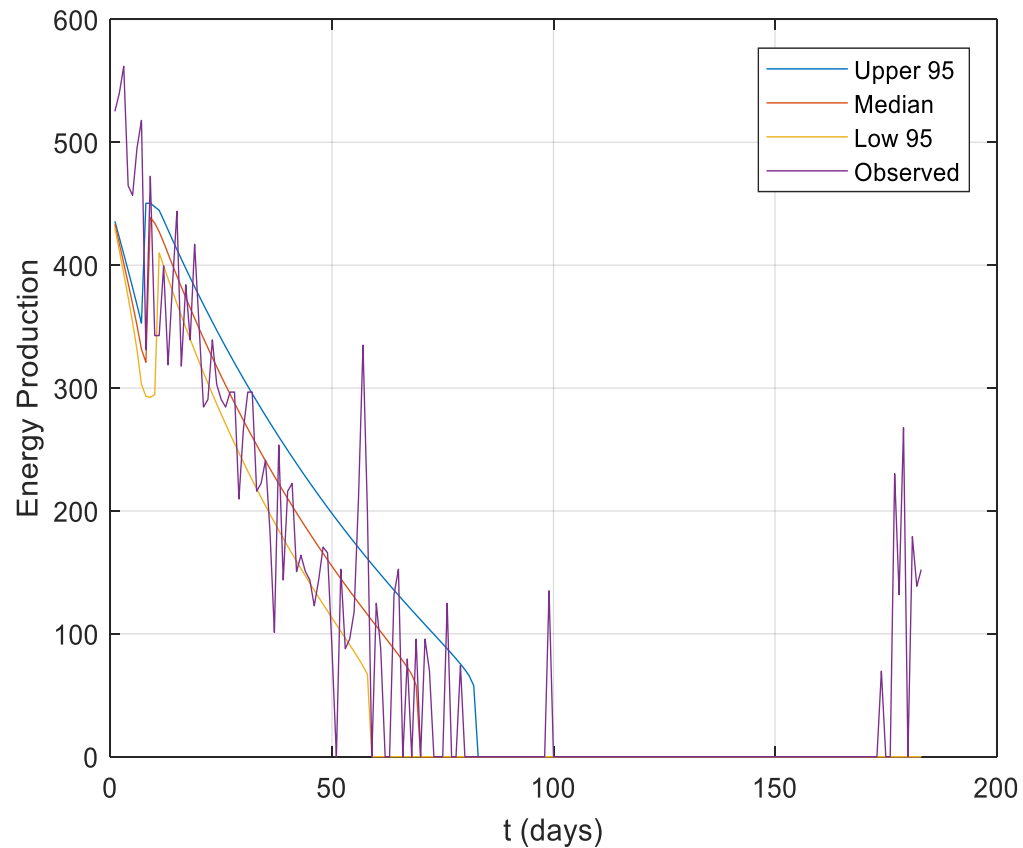
- ❑ Προκειμένου να μπορεί να μεγιστοποιηθεί το αξιοποιήσιμο υδατικό δυναμικό, δεν τέθηκε άνω όριο για την εκτίμηση της ισχύος των στροβίλων
- ❑ Κύριο ενδιαφέρον μας ήταν η φύση των ΜΥΗΕ:
  - Λειτουργία μεταξύ ανώτερης και κατώτερης παροχής
  - Αδυναμία αποθήκευσης

	1	2	Συνολικά
<b>Ισχύς για ονομαστική παροχή (MW)</b>	93,71	19,08	112,78
<b>Βαθμός απόδοσης στη μέγιστη παροχή</b>	0,91	0,91	-
<b>Ονομαστική παροχή Q<sub>max</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	105,2 9	21,43	126,72
<b>Ελάχιστη παροχή λειτουργίας Q<sub>min</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	21,06	4,29	4,29
<b>Q<sub>min</sub>/Q<sub>max</sub></b>	0,20	0,20	-
<b>Ποσοστό χρόνου λειτουργίας</b>	0,403	0,367	0,737
<b>Ποσοστό όγκου που χρησιμοποιείται (%)</b>	74,59	16,07	90,654
<b>Μέση ετήσια ενέργεια (GWh)</b>	148,9 6	32,55	181,51

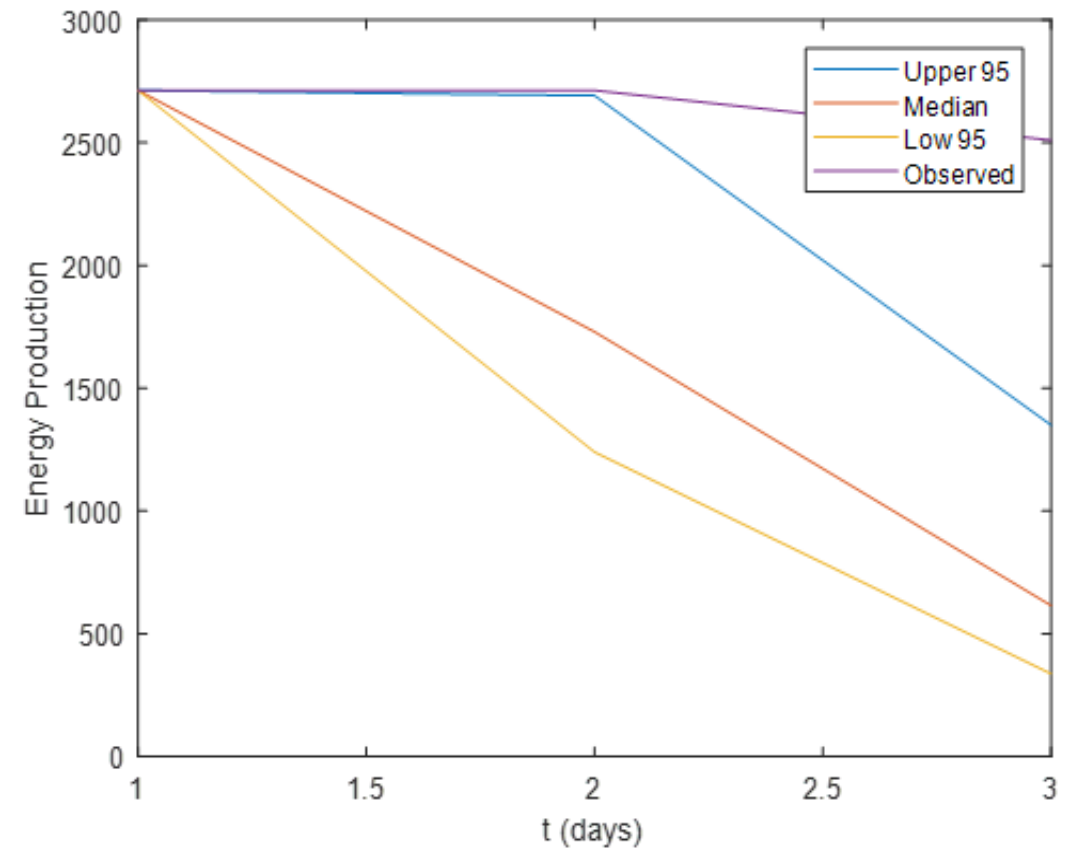
Μεγέθη αναφοράς

# Παραγωγή «σεναρίων» παραγωγής ενέργειας

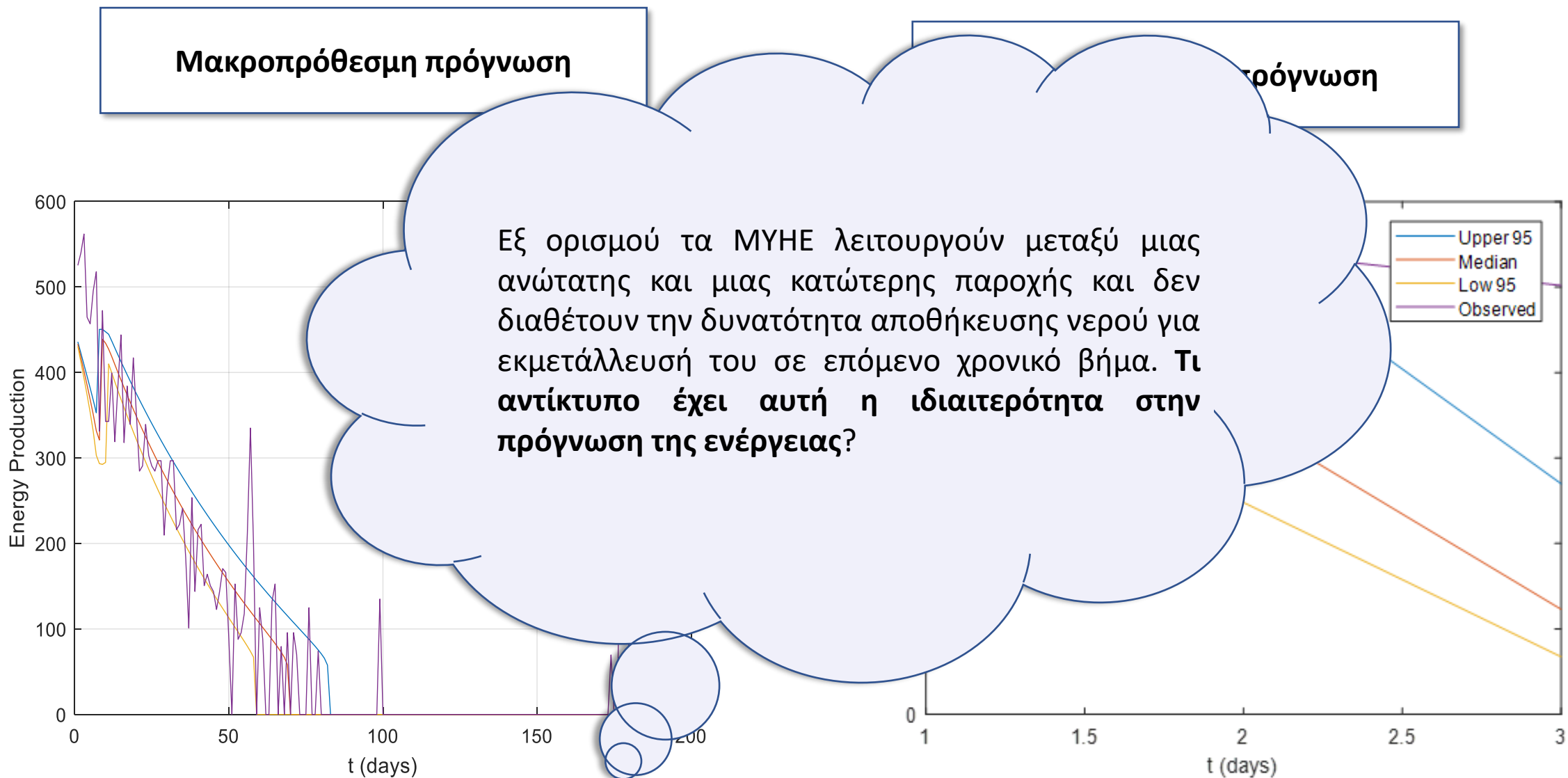
## Μακροπρόθεσμη πρόγνωση



## Βραχυπρόθεσμη πρόγνωση



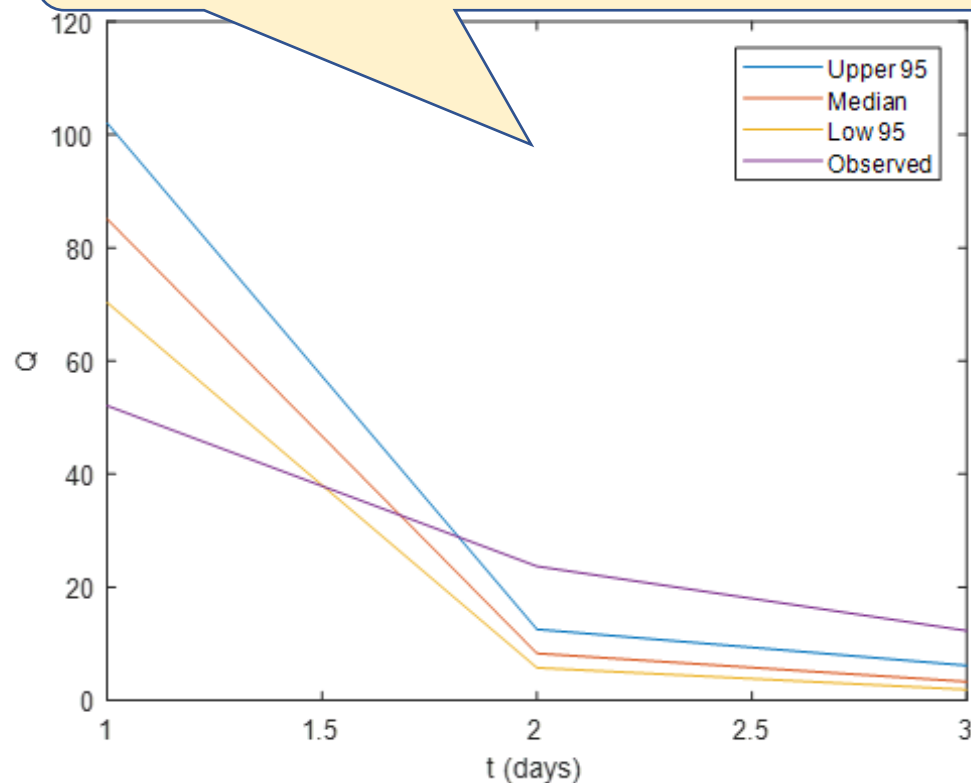
# Παραγωγή «σεναρίων» παραγωγής ενέργειας



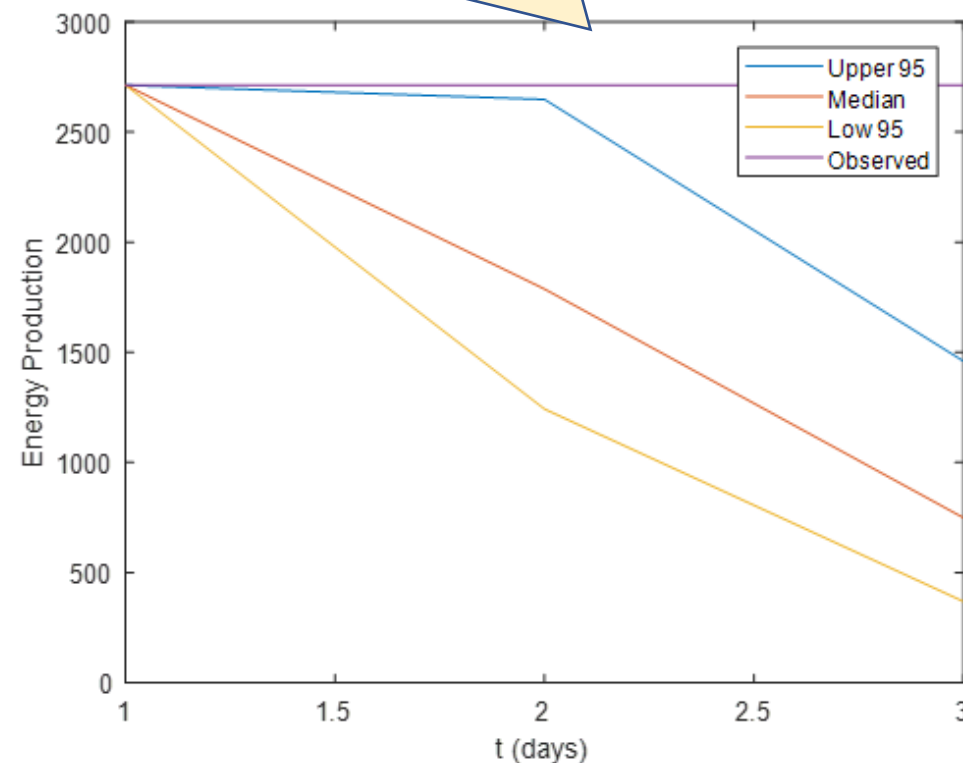
# Διερεύνηση: Εισαγωγή αβεβαιότητας στην αρχική απορροή

Το  $q_0$  προκύπτει από το άθροισμα της μέγιστης παρατηρημένης απορροής κάθε επεισοδίου και ενός **τυχαίου όρου** που ακολουθεί την **κανονική κατανομή** με μέση τιμή και τυπική απόκλιση, όπως ορίζονται από την στατιστική ανάλυση των κορυφών των πλημμυρικών επεισοδίων.

Μετά το δεύτερο χρονικό βήμα, φαίνεται να προβλέπει καλύτερα την απορροή



Τα αποτελέσματα στην πρόγνωση ενέργειας δεν βελτιώνονται



## Αξιολόγηση μοντέλων πρόγνωσης (1/2)

- Μέτρα **ενεργειακής επίδοσης** των μοντέλων (ποσοστό αστοχίας και κατά πόσες μονάδες ενέργειας το σύστημα αστοχεί)
- Κατά την μακροπρόθεσμη πρόγνωση έμφαση δίνεται στην ικανότητα εκπλήρωσης των δεσμεύσεων στην αγορά, ενώ στην βραχυπρόθεσμη πρόγνωση έμφαση δίνεται στην αποδοτικότητα του κάθε σεναρίου ως προς την ακρίβεια
- **Ιδιαιτερότητα ξηρής περιόδου:** η ημερήσια (**day-to-day**) πρόβλεψη είναι τελείως αφερέγγυα, μας ενδιαφέρει η μακροπρόθεσμη πρόγνωση (**Προθεσμιακή Αγορά Ενέργειας**)

	Συντηρητικό σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Επιθετικό Σενάριο
Συνολικές αστοχίες	542	1613	3784
Ποσοστό αστοχίας	7,05%	20,99%	49,23%
Αξιοπιστία	93%	79%	51%
Ευαισθησία	63,10	75,46	111,04

	Συντηρητικό σενάριο	Μετριοπαθές σενάριο	Επιθετικό Σενάριο
Συνολικές αστοχίες	25	31	32
Ποσοστό αστοχίας	52,08%	64,58%	66,67%
Αξιοπιστία	48%	35%	33%
Ευαισθησία	886,62	1563,11	2010,39

## Αξιολόγηση μοντέλων πρόγνωσης (2/2)

- **Δείκτης αξιολόγησης** του δυνητικού **κέρδους** από την εφαρμογή των μοντέλων.
- Στο πλαίσιο της εφαρμογής, θεωρούμε τρεις επενδυτές με **διαφορετική ανοχή στο ρίσκο**, οι οποίοι επιλέγουν μια πρόγνωση συνοδευόμενη από το επίπεδο εμπιστοσύνης της.
- Ως **υπόσχεση** στην αγορά θεωρούμε την ενέργεια που θα παραγόταν για τις πραγματικές παροχές.
- Ο δείκτης προκύπτει από την **αδιαστατοποίηση των κερδών** που θα απέδιδε στο σύστημα το κάθε σενάριο πρόγνωσης, μετά από διαίρεση με τα κέρδη που προκύπτουν από την πραγματική πρόγνωση ενέργειας.
- Στηρίζεται στην ιδέα της **τιμολόγησης της υδροηλεκτρικής ενέργειας**

	Δείκτης απόκλισης
Συντηρητικό σενάριο	-1,35
Μετριοπαθές σενάριο	-36,66
Επιθετικό Σενάριο	-74,92
Πραγματική Ενέργεια	1,00

	Δείκτης απόκλισης
Συντηρητικό σενάριο	-0,49
Μετριοπαθές σενάριο	-0,12
Επιθετικό Σενάριο	0,49
Πραγματική Ενέργεια	1,00

- Το περιορισμένο εύρος παροχών λειτουργίας των ΜΥΗΕ οδηγεί σε δυνητική **εξομάλυνση** των έντονων διακυμάνσεων των προγνώσεων παροχής σε όρους παραγόμενης ενέργειας, ιδίως στις **περιόδους χαμηλών παροχών**.
- Παρουσιάζεται σημαντική προγνωστική αδυναμία λόγω της **πτωτικής συμπεριφοράς** του μοντέλου, ιδίως σε περιόδους μέγιστης ενεργειακής παραγωγής.
- Το **συντηρητικό σενάριο** πρόγνωσης εμφανίζει μεγαλύτερη αξιοπιστία για την μακροπρόθεσμη πρόγνωση, ενώ το επιθετικό σενάριο εμφανίζει μεγαλύτερα περιθώρια κέρδους για την βραχυπρόθεσμη πρόγνωση.
- Παρά τις χαμηλές τιμές του δείκτη οικονομικής αξιολόγησης το συντηρητικό μοντέλο μακροπρόθεσμης πρόγνωσης παρέχει **υψηλή αξιοπιστία**.
- Προσφέρεται, λοιπόν, η χρήση του συντηρητικού μοντέλου ως **εργαλείο πρόγνωσης** σε εφαρμογές όπου κρίσιμος παράγοντας θεωρείται η αξιοπιστία (**υδρευτικά προβλήματα** σε συνθήκες ξηρασίας, **βελτιστοποίηση ταμιευτήρων πολλαπλής χρήσης**..)

- Εφαρμογή της μεθοδολογίας και σε άλλες λεκάνες, ώστε να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας.
- Επέκταση της προσέγγισης και σε άλλα χρονικά βήματα, όπως π.χ. ωριαία (*Ενδοημερήσια*)
- Συνδυασμός της μεθοδολογίας με υδρομετεωρολογικά εργαλεία για πρόγνωση του ανοδικού κλάδου και δυνατότητα εντοπισμού των πλημμυρικών επεισοδίων
- Βελτιστοποίηση της αρχικής απορροής για την βραχυπρόθεσμη κλίμακα
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πραγματικά case studies προσομοίωσης ενεργειακής αγοράς
- Σύγκριση της μεθοδολογίας με μοντέλα μηχανικής μάθησης και συνδυασμός αυτών



Σας ευχαριστώ για  
την προσοχή σας!!!

