



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



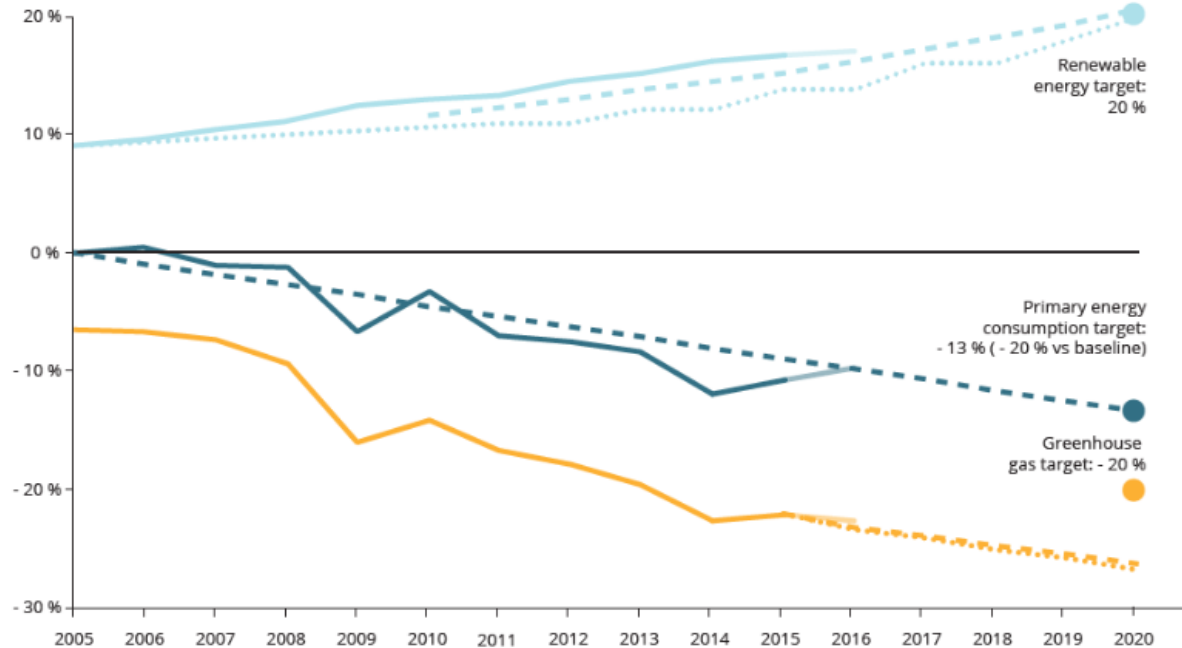
Αποσυναρμολογώντας τους μετασχηματισμούς παροχής-ενέργειας στα μικρά υδροηλεκτρικά έργα: από την αντίστροφη μηχανική στην εκτίμηση της αβεβαιότητας και τη βαθμονόμηση

ΣΑΚΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ

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

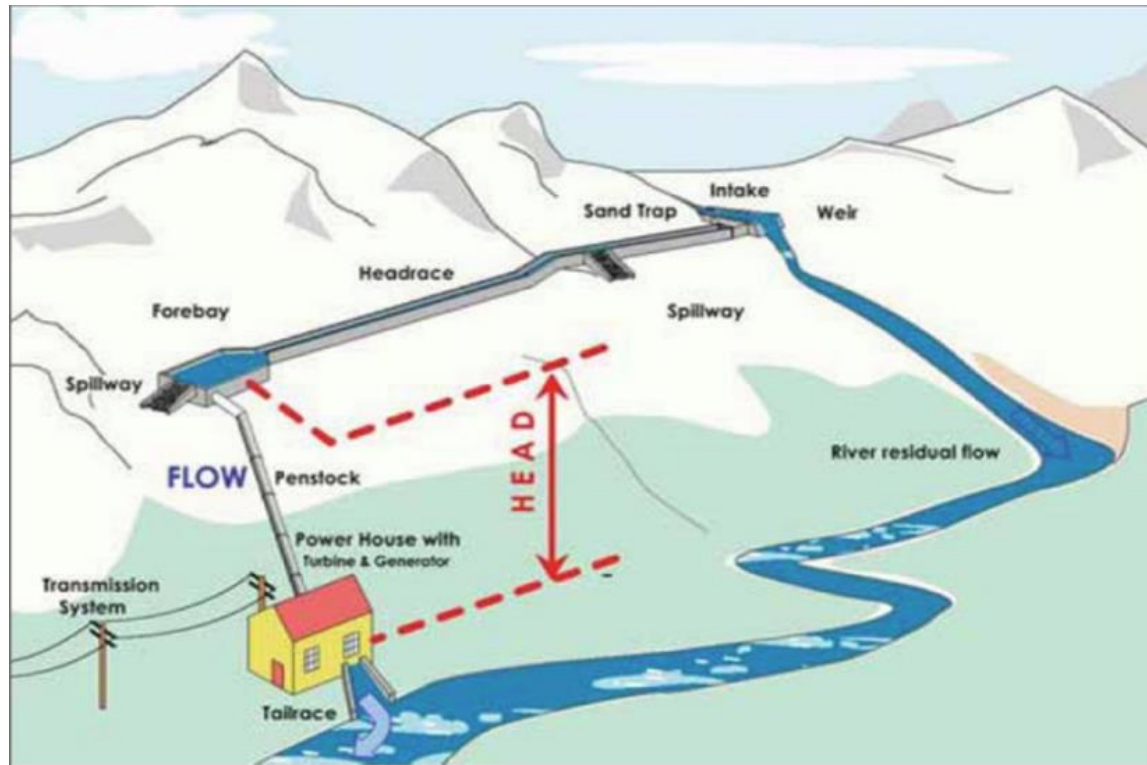
# Κίνητρα

- Το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο προωθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την ενεργειακή πολιτική, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της Ε.Ε. Ενδεικτικά, με βάση την συμφωνία «20-20-20», μια σειρά μέτρων υιοθετήθηκαν από τα κράτη-μέλη με στόχο:
  - Μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου.
  - Αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ).
  - Μείωση στη χρήση της πρωτογενούς ενέργειας.
- Η απεξάρτηση από τον λιγνίτη και η στροφή στις ΑΠΕ καθιστούν αναγκαία την μεγιστοποίηση της απόδοσης και διαχείρισης των υφιστάμενων υδροηλεκτρικών έργων.



# Μικρά υδροηλεκτρικά έργα (εκτροπής): τυπική διάταξη και ιδιαιτερότητες

- ❑ Μικρά υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) → Εγκατεστημένη ισχύς κάτω των 15 MW
- ❑ Τα ΜΥΗΕ εκμεταλλεύονται μόνο τη ροή του ποταμού και τη διαφορά υψομέτρου που δημιουργεί το φυσικό ανάγλυφο για να παράγουν ενέργεια.



# Διατύπωση του προβλήματος

---

- ❑ Όταν δεν υπάρχει αποθήκευση νερού, η παραγωγή ενέργειας μέσω των υδροστροβίλων είναι μη γραμμικός μετασχηματισμός της ροής του ποταμού.
- ❑ Διερευνώνται **τρεις εκδοχές** αυτού του μετασχηματισμού:
  - **Ευθεία διατύπωση**, ήτοι εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας για δεδομένη παροχή και γνωστά τεχνικά χαρακτηριστικά του ΜΥΗΕ.
  - **Αντίστροφη διατύπωση**, ήτοι εκτίμηση της παροχής από δεδομένα ενέργειας, και για γνωστά τεχνικά χαρακτηριστικά του ΜΥΗΕ.
  - Εκτίμηση τεχνικών μεγεθών (παράμετροι) του ΜΥΗΕ μέσω **βαθμονόμησης**, με βάση γνωστά δεδομένα ενέργειας και παροχής.
- ❑ Η ανάκτηση της χρονοσειράς παροχής του υδατορεύματος από δεδομένα ενέργειας καλείται ως το **αντίστροφο πρόβλημα της υδροηλεκτρικής ενέργειας** και είναι το επίκεντρο αυτής της εργασίας.

Σημείωση: Κάθε ΜΥΗΕ αποτελεί, στην πραγματικότητα, μια **δυνητική θέση υδρομετρικού σταθμού**. Αν μπορούμε να εξάγουμε παροχές από δεδομένα ενέργειας, μπορούμε να εμπλουτίσουμε σημαντικά την υδρομετρική μας πληροφορία!

# Αντικείμενο μελέτης

---

- ❑ Μοντελοποίηση της λειτουργίας μικρών υδροηλεκτρικών έργων υπό καθεστώς αβεβαιότητας.
- ❑ Το μοντέλο δέχεται δεδομένα παραγωγής ενέργειας και εξάγει την παροχή του υδατορεύματος, ποσοτικοποιώντας την αβεβαιότητα που προέρχεται από:
  - Τα σφάλματα στην ενέργεια που καταγράφηκε.
  - Τις εσωτερικές διεργασίες και χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως είναι οι καμπύλες απόδοσης των στροβίλων.
- ❑ Το πρόβλημα της αντίστροφης μοντελοποίησης περιλαμβάνει **τρεις περιοχές ροής**:
  - **Χαμηλές ροές**, κάτω από την ελάχιστη παροχή λειτουργίας των στροβίλων, για την οποία δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας.
  - **Ενδιάμεσες ροές**, οι οποίες υπολογίζονται άμεσα με βάση τα παρατηρημένα δεδομένα υδροηλεκτρικής ενέργειας.
  - **Υψηλές ροές**, που υπερβαίνουν την ονομαστική παροχή λειτουργίας των στροβίλων.

## Το ευθύ πρόβλημα: από την παροχή στην ενέργεια

---

- ❑ Τα απαραίτητα δεδομένα για την επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της ενέργειας που παράγεται από μικρά υδροηλεκτρικά έργα (γενικότερα, έργα χωρίς ταμίευση) είναι:
  - Παροχή ποταμού στη θέση υδροληψίας,  $Q_{in}$ .
  - Ύψος πτώσης,  $H$  (πρακτικά σταθερό, όταν η υψομετρική διαφορά μεταξύ υδροληψίας και σταθμού παραγωγής είναι μεγάλη).
  - Βαθμός απόδοσης,  $\eta$ , του συστήματος, που είναι συνάρτηση της παροχής.
  - Μέγιστη παροχή που μπορεί να περάσει από τους στρόβιλους (ονομαστική παροχή),  $Q_{max}$ .
  - Ελάχιστη παροχή για παραγωγή ενέργειας,  $Q_{min}$ , η οποία εξαρτάται από τον τύπο των στρόβιλων και είναι το 10-30% της ονομαστικής.
- ❑ Για τα παραπάνω δεδομένα, η ισχύς που παράγει το σύστημα είναι:

$$P = \gamma \eta Q_T H_n$$

όπου  $Q_T$  η παροχή που διέρχεται από τους στρόβιλους.

- ❑ Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα λειτουργούν σε ένα εύρος παροχών ( $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ), επομένως ο βαθμός απόδοσης έχει διακυμάνσεις (αν υπήρχε δυνατότητα ταμίευσης, άρα και ελέγχου της παροχής, οι στρόβιλοι θα λειτουργούσαν με σταθερό  $\eta$ ).

# Το αντίστροφο πρόβλημα: από την ενέργεια στην παροχή

- Για δεδομένη ενέργεια η παροχή εκφράζεται μέσω της αντίστροφης σχέσης:

$$Q_T = \frac{P}{\gamma \eta(Q_T) H_n(Q_T)}$$

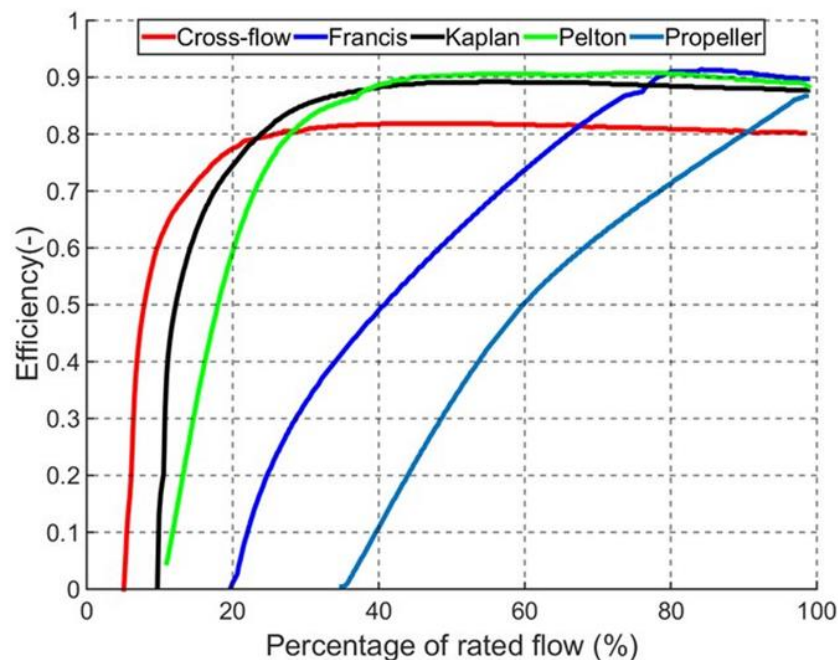
- Η άγνωστη παροχή  $Q_T$  που περνάει από τους στρόβιλους μπορεί να εκτιμηθεί μέσω ενός **επαναληπτικού αριθμητικού σχήματος**.
- **Σημείωση**: Η παραπάνω σχέση είναι **μη γραμμική** καθώς ο βαθμός απόδοσης και το καθαρό ύψος πτώσης εξαρτώνται από την παροχή.
- Δεδομένου ότι οι στρόβιλοι λειτουργούν μόνο στο εύρος  $Q_{min} \leq Q_T \leq Q_{max}$  προκύπτουν οι εξής περιπτώσεις:
  - Αν  $P = 0$  τότε  $Q_T \leq Q_{min}$  και  $Q_{in} \leq Q_{min}$ .
  - Αν  $P = P_{max}$  τότε  $Q_T = Q_{max}$  και  $Q_{in} \geq Q_{max}$  (ο βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται και το σύστημα λειτουργεί με την ονομαστική παροχή).
  - Αν  $0 < P < P_{max}$ , τότε  $Q_{in} = Q_T$ .

**Συμπέρασμα**: Η αντίστροφη σχέση δεν οδηγεί σε **μονοσήμαντη αναπαραγωγή** της ανάντη παροχής και μεταφέρει στην εκτιμώμενη παροχή τις **αβεβαιότητες** τόσο των δεδομένων ενέργειας όσο και των εσωτερικών διεργασιών του συστήματος της.

# Βαθμός απόδοσης συστήματος

- ❑ Η καμπύλη απόδοσης ενός στροβίλου εκφράζεται συνήθως ως **νομογράφημα** συναρτήσει του ποσοστού παροχής,  $Q_T/Q_{max}$ .
- ❑ Τα νομογραφήματα παρέχονται από τον κατασκευαστή και λαμβάνονται με βάση ένα μοντέλο υπό κλίμακα. Δεδομένου ότι δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί η δυναμική, γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα μεταξύ του μοντέλου και του πρωτοτύπου, δεν είναι επίσης δυνατό να παραχθεί με ακρίβεια η καμπύλη απόδοσης.
- ❑ Οι στρόβιλοι Pelton, Crossflow και Kaplan διατηρούν υψηλή απόδοση ακόμα και όταν λειτουργούν κάτω από την παροχή σχεδιασμού. Αντίθετα, η απόδοση των στροβίλων τύπου Francis μειώνεται απότομα όσο απομακρύνεται από την ονομαστική παροχή.

Συμπέρασμα: Η σχέση παροχής - βαθμού απόδοσης στα ΜΥΗΕ αποτελεί ταυτόχρονη πηγή **μη γραμμικότητας** και **αβεβαιότητας**.





# Αναλυτική σχέση έκφρασης βαθμού απόδοσης συστήματος

- Η σχέση παροχής - βαθμού απόδοσης μπορεί να προσεγγιστεί πολύ καλά από την παρακάτω αναλυτική σχέση, η οποία προήλθε από την κατανομή Kumaraswamy:

$$\eta = \eta_{min} + \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{Q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \right)^a \right)^b \right) (\eta_{max} - \eta_{min})$$

- Η εξίσωση χρησιμοποιεί τα δύο όρια παροχών,  $Q_{min}$  και  $Q_{max}$ , τα άνω και κάτω όρια του βαθμού απόδοσης,  $\eta_{min}$  και  $\eta_{max}$ , καθώς και δύο παραμέτρους σχήματος  $a$  και  $b$ .
- Η έκφραση είναι στην πραγματικότητα **τετραπαραμετρική** διότι για δεδομένη εγκαταστημένη ισχύ  $P$  έχουμε:

$$Q_{max} = \frac{P}{\gamma \eta_{max} H_n(Q_{max})}$$
$$Q_{min} = \frac{P}{\gamma \eta_{min} H_n(Q_{min})}$$

**Συμπέρασμα:** Ρυθμίζοντας τις παραμέτρους, μπορούμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο σε οποιαδήποτε εμπειρική καμπύλη και, συνακόλουθα, να διατυπώσουμε την εξαγωγή των καμπυλών απόδοσης από δεδομένα ισχύος και ροής ως **πρόβλημα βαθμονόμησης**.

# Εκτίμηση χρονοσειράς παροχής στροβίλων από δεδομένα παραγωγής ενέργειας: Ντετερμινιστική και στοχαστική προσέγγιση

---

1. Υπολογισμός διερχόμενης παροχής στροβίλων για κάθε χρονικό βήμα  $t = 1, \dots, n$ , χρησιμοποιώντας την **αντίστροφη ντετερμινιστική σχέση**:

$$Q_t = f(P_t)$$

3. Διατύπωση στοχαστικού μοντέλου για κάθε τύπο σφάλματος, που αναπαράγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης χρονοσειράς σφαλμάτων.

5. Παραγωγή σεναρίων παροχής για κάθε πραγματοποίηση  $j = 1, \dots, m$ :

$$Q_{t,j} = f(P_t) + w_{t,j}$$

2. Εκτίμηση σφάλματος μεταξύ παροχής μοντέλου και παρατηρημένης, ελέγχοντας τρεις εκφράσεις:

$$w_t = Q_{T,t} - Q_{obs,t}$$

$$w_t = \frac{Q_{T,t} - Q_{obs,t}}{Q_{obs,t}}$$

$$w_t = \ln(Q_{T,t}) - \ln(Q_{obs,t})$$

4. Γέννηση  $m$  πραγματοποιήσεων συνθετικών σφαλμάτων μήκους  $n$ .
6. Εμπειρική εκτίμηση διαμέσου και ορίων εμπιστοσύνης για κάθε χρονικό βήμα  $t$  με βάση το αντίστοιχο δείγμα συνθετικών παροχών  $Q_{t,j}$ .

# Στοχαστική μοντελοποίηση σφαλμάτων

---

Για την αναπαράσταση και τη σύνθεση του σφάλματος του μοντέλου  $w_t$  χρησιμοποιείται το μοντέλο πρώτης τάξης, AR(1) :

$$w_t = \varphi w_{t-1} + z_t$$

όπου  $w_t$  είναι το σφάλμα της παροχής με μέση τιμή  $\mu$ , τυπική απόκλιση  $\sigma$ , ασυμμετρία  $\gamma$ , και πρώτης τάξης συντελεστή αυτοσυσχέτισης  $\rho$ ,  $\rho = \varphi$  και  $z_t$  ονομάζεται λευκός θόρυβος με μέση τιμή  $\mu_z$ , τυπική απόκλιση  $\sigma_z$  και συντελεστή ασυμμετρίας  $\gamma_z$

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά του λευκού θορύβου  $z_t$  σχετίζονται με το σφάλμα  $w_t$  ως:

$$\mu_z = \mu_w (1 - \varphi) \qquad \sigma_z = \sigma_w \sqrt{1 - \varphi^2} \qquad \gamma_z = \gamma_w \frac{1 - \varphi^3}{(1 - \varphi^2)^{3/2}}$$

Υποθέτουμε ότι ο λευκός θόρυβος ακολουθεί μία τριπαραμετρική Γάμμα κατανομή:

$$f_x(x) = \frac{\lambda^\kappa}{\Gamma(\kappa)} (x - c)^{\kappa-1} e^{-\lambda(x-c)}$$

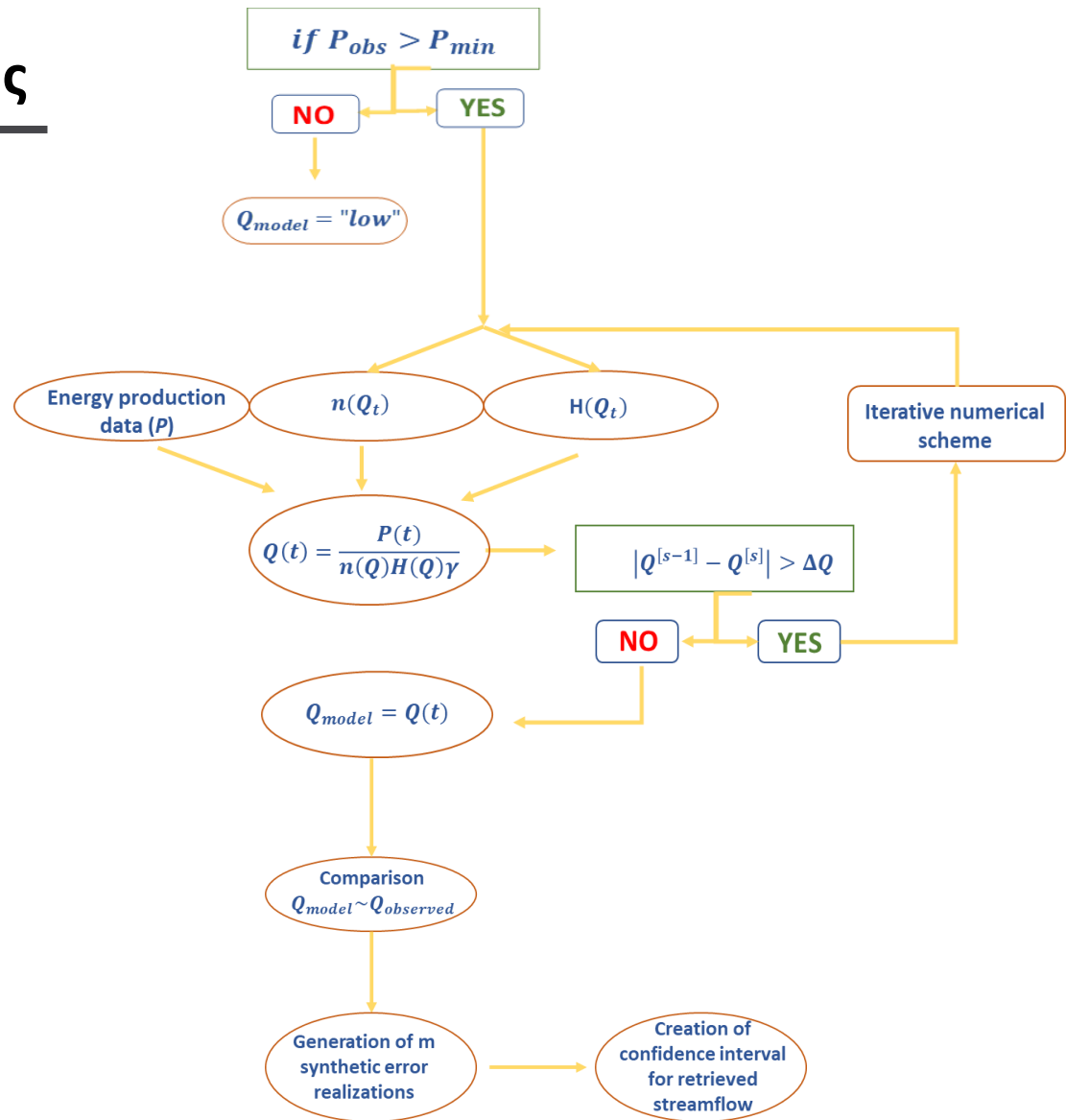
όπου  $\kappa$ ,  $\lambda$  και  $c$  είναι συντελεστές σχήματος, οι οποίοι εκτιμώνται ως εξής:

$$\kappa = \frac{4}{\gamma_z^2} \qquad \lambda = \frac{\sqrt{\kappa}}{\sigma_z} \qquad c = \mu_z - \kappa/\lambda$$

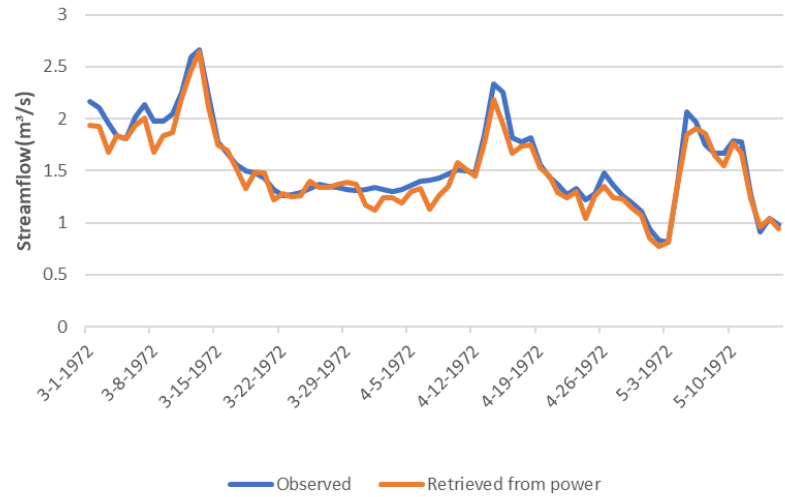
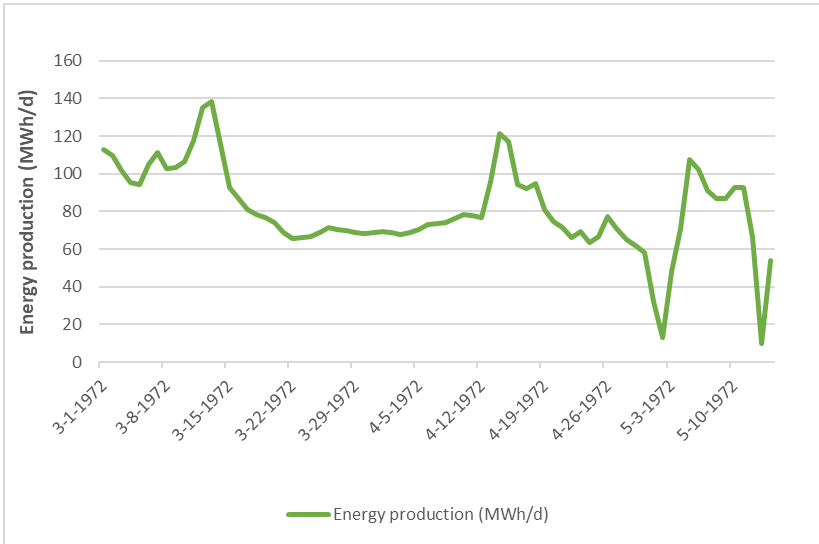
# Διάγραμμα ροής αντίστροφου προβλήματος

```

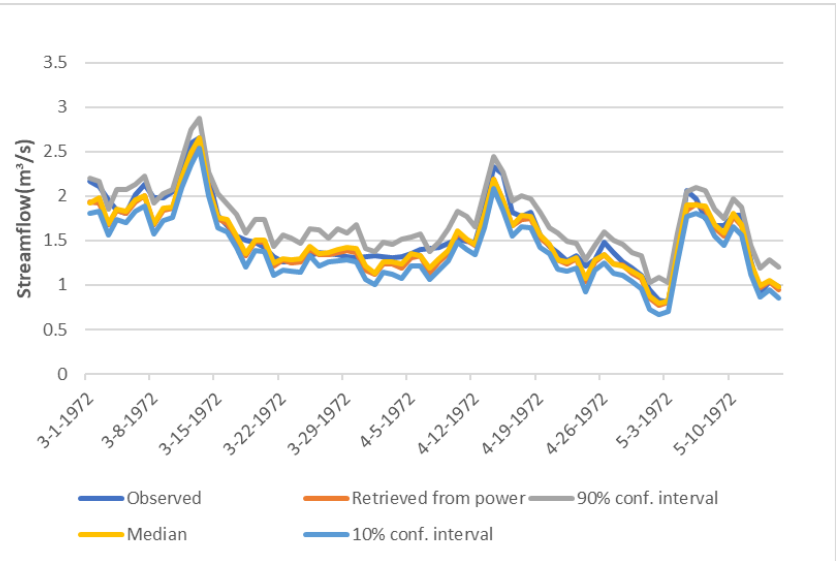
for k=1:hours
    Eep=Ehourdata(k);
    if Eep>I1
        de=E(1)-Ehourdata(k);
        t=2;
        while abs(de)>=error
            Hf=energy_loss_eik(q,D,e,L);
            kt=2;
            V=q/A;
            Ht=kt*(V^2)/2/g;
            H(t)=Hol-Hf-Ht;
            n=coef_francis_eik(q);
            Q(t)=Ehourdata(k)/(g*n*H(t));
            q=Q(t);
            dQ=Q(t)-Q(t-1);
            Qdok(1)=Q(t);
            Hdok(1)=H(t);
            s=2;
            if abs(dQ)>=0.05
                n=coef_francis_eik(q);
                Hf=energy_loss_eik(q,D,e,L);
                kt=2;
                V=q/A;
                Ht=kt*(V^2)/2/g;
                Hdok(s)=Hol-Hf-Ht;
                Qdok(s)=Eep/(g*n*Hdok(s));
                dQ=Qdok(s)-Qdok(s-1);
                H(t)=Hdok(s);
                Q(t)=Qdok(s);
            end
        end
    end
end
    
```



Ντετερμινιστική  
προσέγγιση

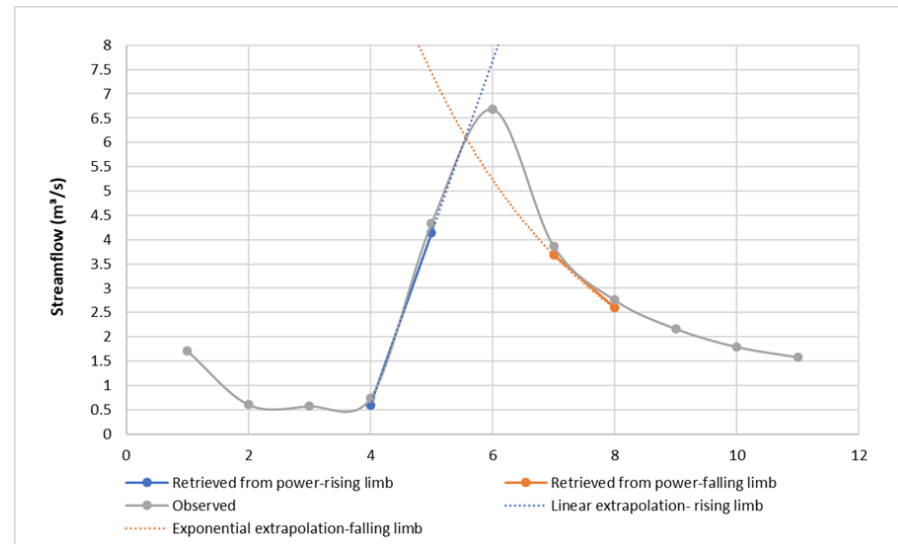
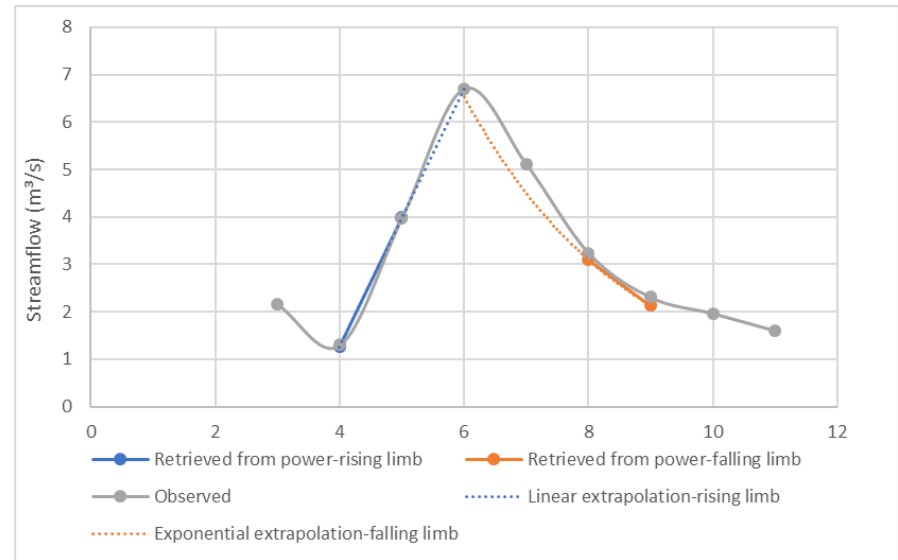


Στοχαστική  
προσέγγιση



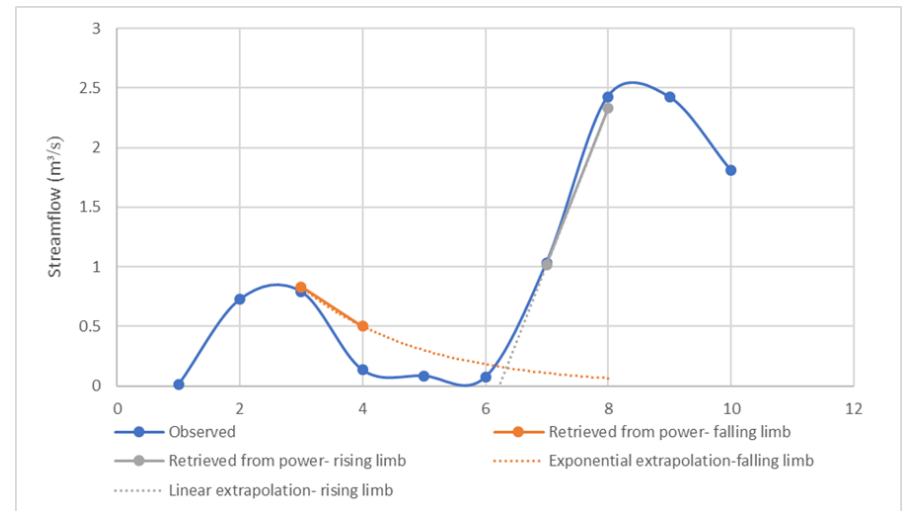
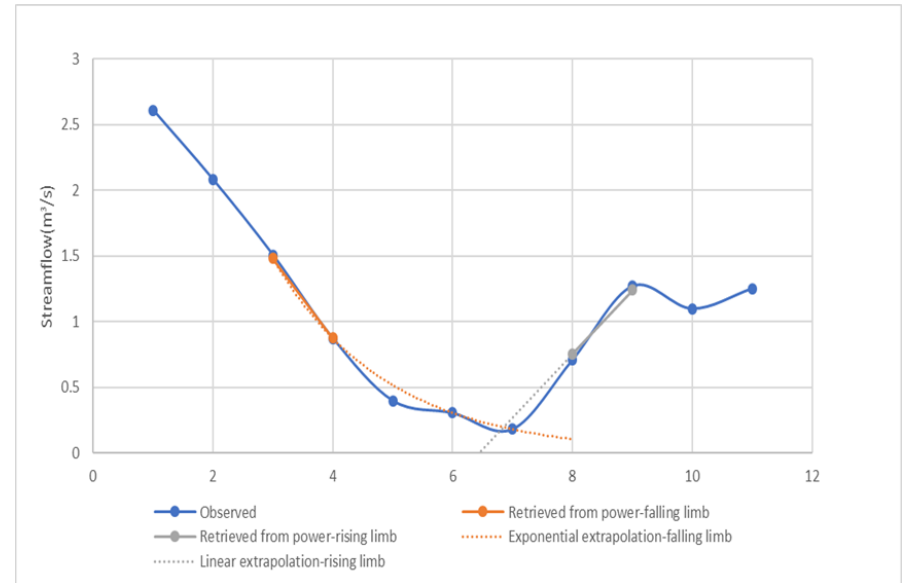
# Συμπλήρωση υδρογραφήματος για υψηλές παροχές

- ❑ Η συμπλήρωση αυτή επιβάλλεται όταν  $Q > Q_{max}$ , δηλαδή οι στρόβιλοι λειτουργούν με τη μέγιστη ισχύ τους και η διερχόμενη παροχή είναι  $Q_{max}$ .
- ❑ Η συμπλήρωση γίνεται ξεχωριστά για τον ανοδικό και καθοδικό κλάδο με βάση τις δύο πιο κοντινές τιμές της παροχής, ήτοι τις δύο τελευταίες στον ανοδικό και τις δύο πρώτες στον καθοδικό.
- ❑ Υποθέτουμε ότι ο ανοδικός κλάδος μεταβάλλεται **γραμμικά**, ενώ ο καθοδικός ακολουθεί **εκθετική στείρευση** (μοντέλο γραμμικού ταμιευτήρα).
- ❑ Η **παροχή αιχμής** εκτιμάται ως το σημείο τομής των δύο κλάδων και γενικά δεν αναφέρεται σε ακέραιο βήμα.



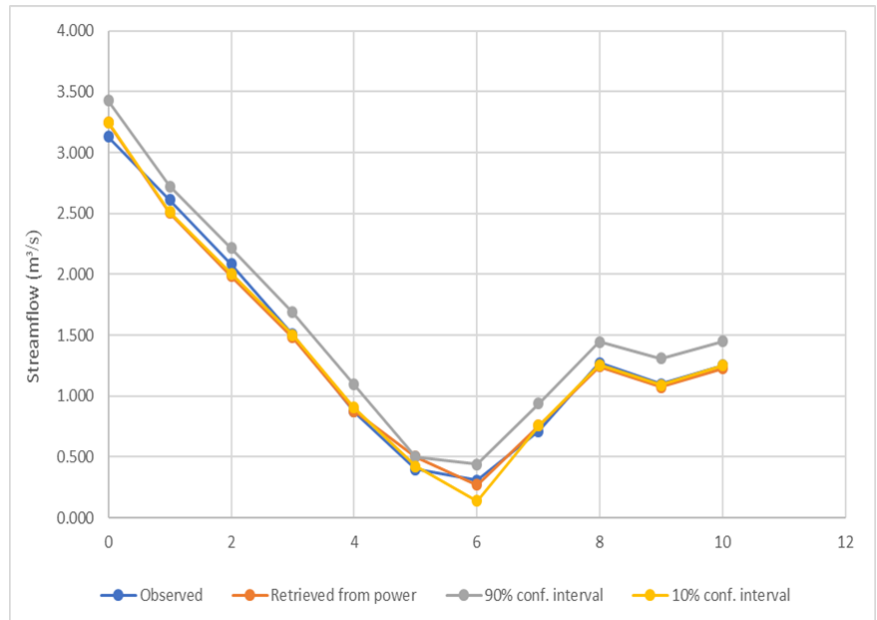
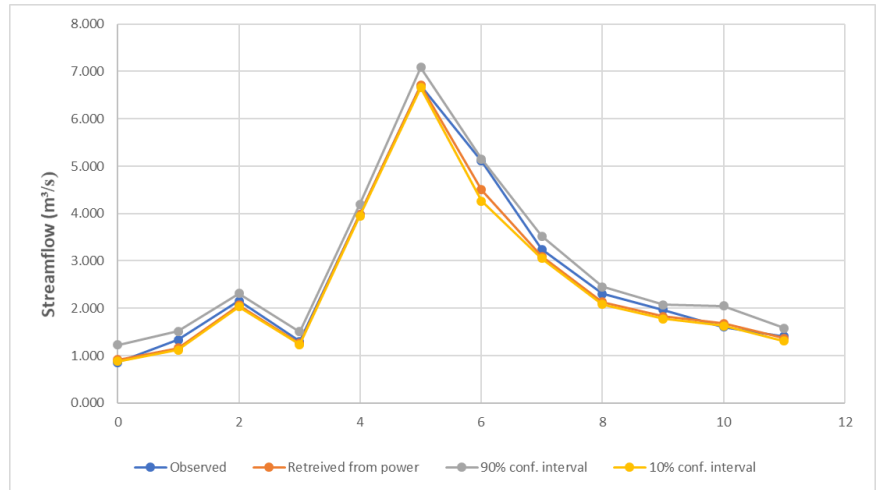
# Συμπλήρωση υδρογραφήματος για χαμηλές παροχές

- ❑ Η συμπλήρωση αυτή επιβάλλεται όταν  $Q < Q_{min}$ , δηλαδή οι στρόβιλοι δεν λειτουργούν και η παραγόμενη ενέργεια είναι μηδενική.
- ❑ Η συμπλήρωση γίνεται υιοθετώντας τις ίδιες παραδοχές με τις υψηλές παροχές, με τη διαφορά ότι προηγείται ο καθοδικός κλάδος και έπεται ο ανοδικός.
- ❑ Και στις δύο περιπτώσεις, είναι σημαντικό να διασφαλίσουμε ότι στις μεν υψηλές ροές οι εκτιμώμενες τιμές της παροχής δεν υπολείπονται της ονομαστικής παροχής  $Q_{max}$ , ενώ στις χαμηλές δεν υπερβαίνουν την  $Q_{min}$ .



# Στοχαστική προσέγγιση στην συμπλήρωση του υδρογραφήματος

- ❑ Η συμπλήρωση του υδρογραφήματος γίνεται και με στοχαστική προσέγγιση.
- ❑ Η διαδικασία είναι ίδια με τις παροχές των στροβίλων, ενδεικτικά:
  - i. Υπολογισμός σφαλμάτων και στατιστικών χαρακτηριστικών.
  - ii. Επιλογή στοχαστικού μοντέλου.
  - iii. Γέννηση συνθετικών πραγματοποιήσεων σφαλμάτων.
  - iv. Σύνθεση χρονοσειρών σφάλματος και χρονοσειράς προσομοιωμένων παροχών.
- ❑ Για κάθε σενάριο παροχών επεκτείνεται το υδρογράφημα, ώστε να δημιουργηθούν τα όρια εμπιστοσύνης.





# Παράδειγμα 1: Υποθετικό μικρό υδροηλεκτρικό έργο

---

- ❑ Υποθετικό ΜΥΗΕ αποτελούμενο από έναν στρόβιλο με εγκατεστημένη ισχύ **10.8 MW**.
- ❑ Μέσο καθαρό ύψος πτώσης,  $H_n = 260$  m.
- ❑ Ημερήσιες εισροές, δείγμα **10 ετών**.
- ❑ Δύο στρόβιλοι, Pelton και Francis, με **παραμετρικές καμπύλες απόδοσης**.

Ευθύ  
πρόβλημα



Εκτίμηση ημερήσιας  
παραγωγής ενέργειας

Αντίστροφο  
πρόβλημα



Εξαγωγή παροχών εισάγοντας **τεχνητά  
σφάλματα** στα δεδομένα

**Σφάλματα παρατηρημένης ενεργειακής παραγωγής:** Εισάγονται ως τυχαίες διαταραχές στα δεδομένα ενέργειας που έχουν εξαχθεί από το ευθύ πρόβλημα (ως προσθετικός ή πολλαπλασιαστικός όρος).

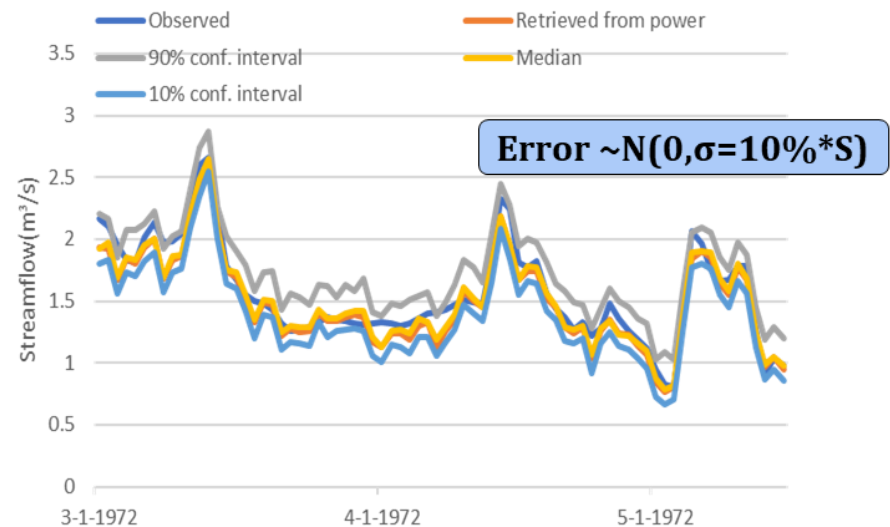
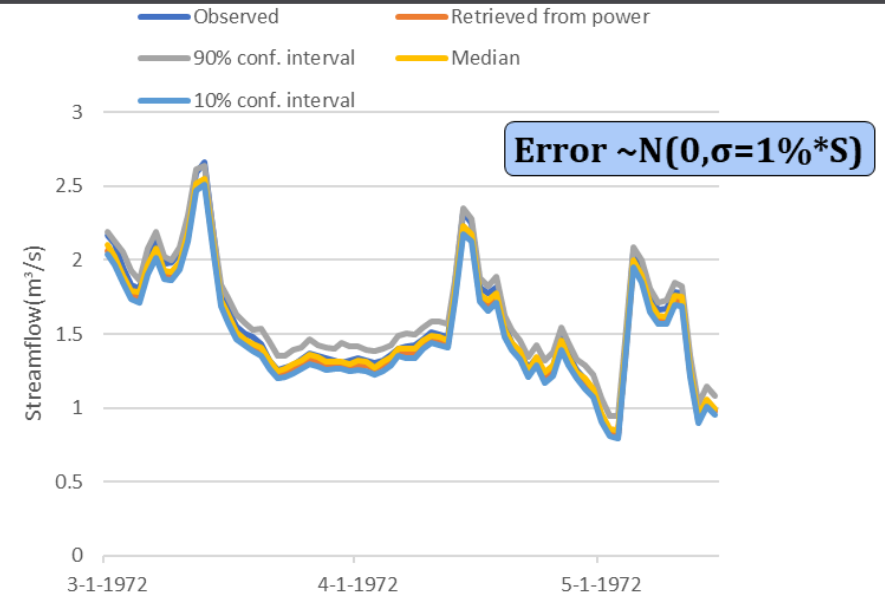
**Σφάλματα στα τεχνικά χαρακτηριστικά:** Παράγεται ένα σύνολο **100 τυχαίων καμπυλών απόδοσης** γύρω από την «πραγματική» του κάθε τύπου στρόβιλου.

# Σφάλματα παρατηρημένης ενέργειας

Η αβέβαιη παραγωγή ενέργειας εκφράζεται με την προσθήκη στις «πραγματικές» τιμές  $e_t(Q_t)$  που λαμβάνονται από τις εισροές  $Q_t$ , τον όρο σφάλματος  $\Delta e_t$ :

$$e_t^* = e_t(q_t) + \Delta e_t$$

- ❑ Ο όρος  $\Delta e_t$  διατυπώνεται στη μορφή αμερόληπτου θορύβου, είτε Κανονικού  $N(0, \sigma_e)$  είτε Γάμμα με ασυμμετρία  $\gamma_e$ .
- ❑ Η τιμή  $\sigma_e$  εκφράζεται ως ποσοστό της τυπικής απόκλισης της προσομοιωμένης παραγωγής ενέργειας, 1%, 5% και 10%.
- ❑ Η αβεβαιότητα των εισροών που ανακτώνται με την αντίστροφη διαδικασία ποσοτικοποιείται με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά των σφαλμάτων της παροχής.



# Στατιστικά χαρακτηριστικά σφαλμάτων

Στατιστικά χαρακτηριστικά προσομοιωμένων σφαλμάτων παροχής, μετά την προσθήκη ενός κανονικού όρου σφάλματος στα πραγματικά ενεργειακά δεδομένα (μηδενική μεροληψία, τυπική απόκλιση 1, 5 και 10% της ενεργειακής τυπικής απόκλισης).

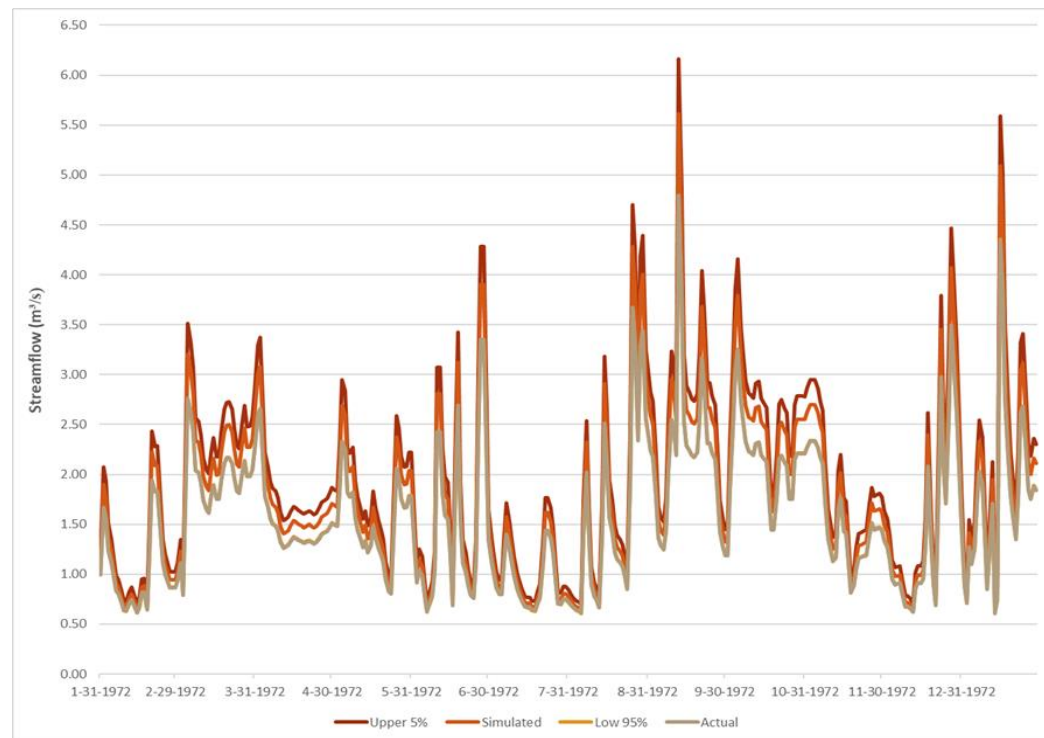
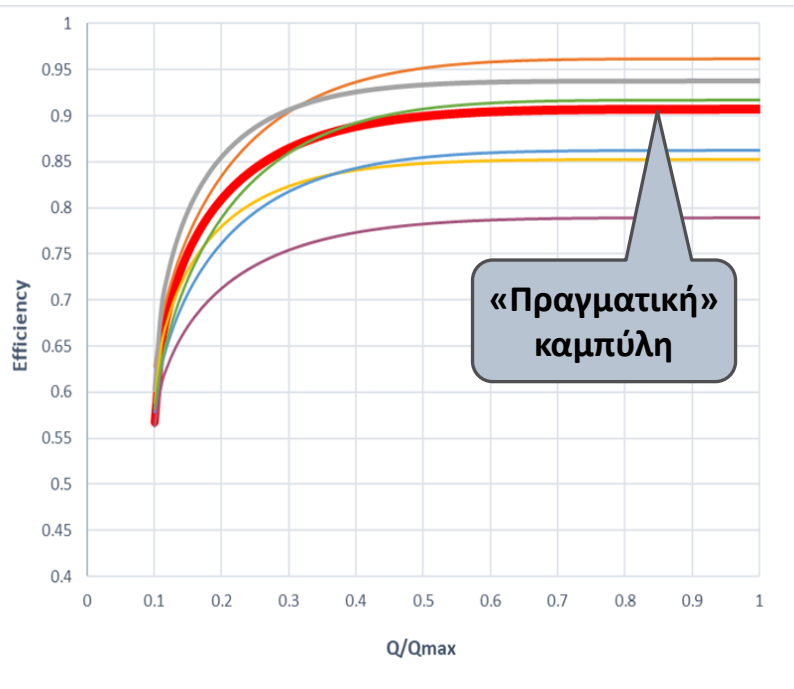
	$\sigma = 1\%$		$\sigma = 5\%$		$\sigma = 10\%$	
	PELTON	FRANCIS	PELTON	FRANCIS	PELTON	FRANCIS
Mean	0.037	-0.109	0.044	-0.115	0.049	-0.109
St. deviation	0.065	0.201	0.100	0.196	0.139	0.205
Skewness	1.411	1.212	1.968	1.225	1.154	0.921
Autocorrelation	0.619	0.768	0.243	0.736	0.125	0.672
Cross-correl.	0.777	0.312	0.398	0.947	0.310	0.900

Στατιστικά χαρακτηριστικά προσομοιωμένων σφαλμάτων παροχής, μετά την προσθήκη ενός όρου σφάλματος στα πραγματικά ενεργειακά δεδομένα (μηδενική μεροληψία, τυπική απόκλιση 1 της ενεργειακής τυπικής απόκλισης, συντελεστής ασυμμετρίας 0.3, 1, 5).

	$\gamma = 0.3$		$\gamma = 1.0$		$\gamma = 5.0$	
	PELTON	FRANCIS	PELTON	FRANCIS	PELTON	FRANCIS
Mean	0.037	-0.117	0.037	-0.116	0.036	-0.116
St. deviation	0.064	0.179	0.064	0.180	0.060	0.179
Skewness	1.442	0.674	1.174	0.683	0.573	0.680
Autocorrelation	0.600	0.794	0.633	0.795	0.723	0.796
Cross-correl.	0.773	0.968	0.780	0.968	0.862	0.968

# Αβεβαιότητα καμπυλών απόδοσης στροβίλων

- ❑ **Ντετερμινιστική προσέγγιση:** Εξαγωγή παροχών, θεωρώντας έναν στρόβιλο Francis με γνωστή καμπύλη απόδοσης (δίνεται σε αναλυτική μορφή).
- ❑ **Στοχαστική προσέγγιση:** Δημιουργία 100 συνθετικών καμπυλών απόδοσης γύρω από τη γνωστή (κόκκινη γραμμή), για τυχαίες τιμές παραμέτρων, και εφαρμογή αντίστροφης προσέγγισης, για την εξαγωγή στοχαστικής χρονοσειρών παροχής στροβίλου.



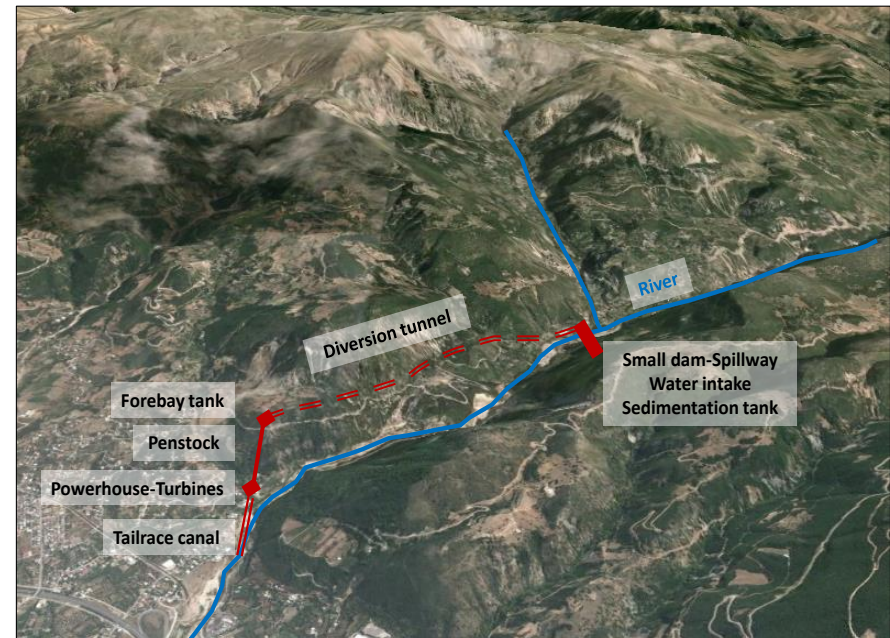
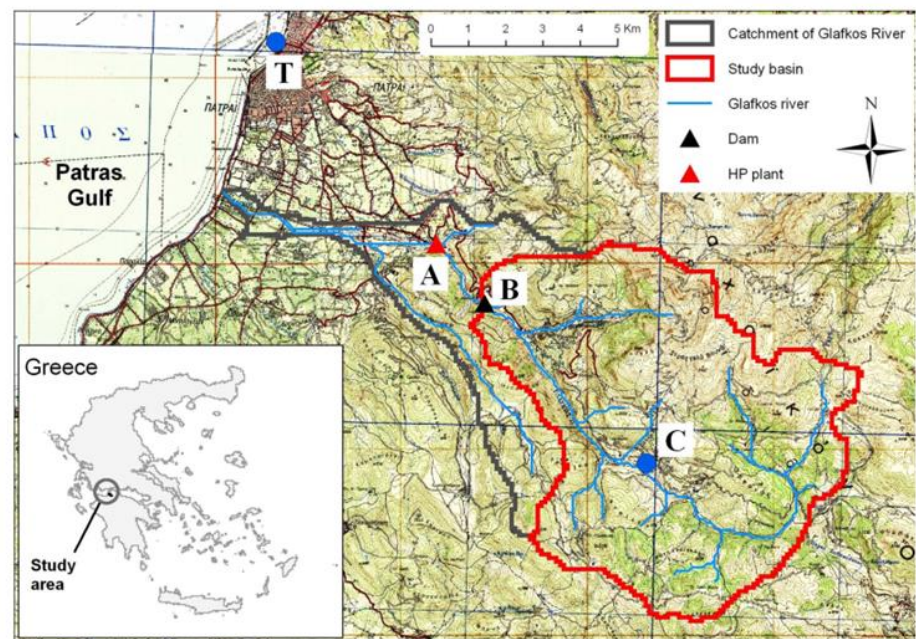
## Παράδειγμα 2: ΜΥΗΕ Γλαύκου

Ο ποταμός Γλαύκος βρίσκεται στη ΒΔ Πελοπόννησο. Το ομώνυμο ΜΥΗΕ κατασκευάστηκε το 1927 (το πρώτο στην Ελλάδα) και ανακαινίστηκε πλήρως το 1997.

Πρόκειται για τυπικό ΜΥΗΕ εκτροπής (run-of-river), που περιλαμβάνει:

- Μικρό φράγμα, με μέση εισροή  $39 \text{ hm}^3$ .
- Σήραγγα για την εκτροπή  $31 \text{ hm}^3$ .
- Αγωγό πτώσης μήκους 308 m και διαμέτρου 0.90 m.
- Δύο στροβίλους, Francis (2.3 MW) και Pelton (1.4 MW) που εκμεταλλεύονται ύψος πτώσης 150 m.

Η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας των τελευταίων 20 ετών είναι **10.4 GWh**.



# Η «αντίστροφη μηχανική» στον Γλαύκο

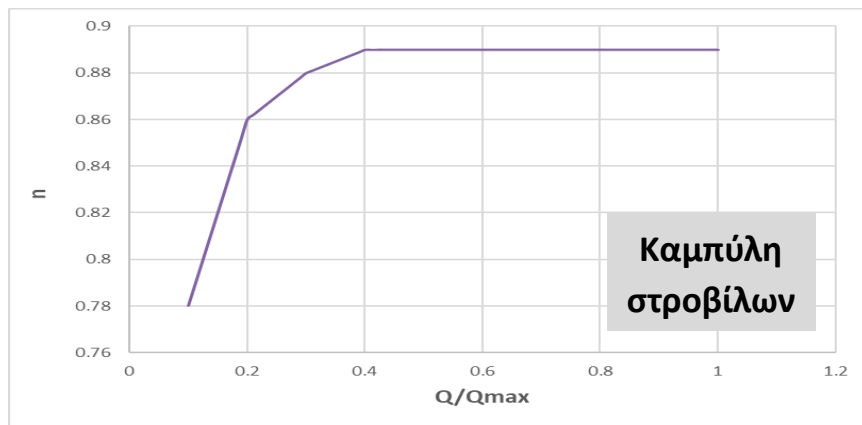
---

- ❑ Διαθέσιμα δεδομένα από το 2008 έως το 2018:
  - Ημερήσιος όγκος νερού που εκτρέπεται στον σταθμό παραγωγής
  - Ωριαία παραγωγή ενέργειας για κάθε στρόβιλο.
- ❑ Υπολογιστική διαδικασία (σε κώδικα **MATLAB**):
  - Εξαγωγή ωριαίων παροχών από τα δεδομένα ενέργειας και συνάθροισή τους στην ημερήσια κλίμακα.
  - Υπολογισμός σφαλμάτων μεταξύ μέσων ημερήσιων προσομοιωμένων παροχών με τις παρατηρημένες.
  - Στατιστική ανάλυση σφαλμάτων κια επιλογή στοχαστικού μοντέλου.
  - Γέννηση τυχαίων σφαλμάτων μέσω του μοντέλου AR(1).
  - Δημιουργία 100 δειγμάτων παροχής προσθέτοντας στις τιμές του μοντέλου τα τυχαία σφάλματα.
  - Εμπειρική εκτίμηση διάμεσης τιμής και ορίων εμπιστοσύνης 90%.

Παρατήρηση: Η συνάθροιση των παροχών αποτελεί επιπλέον παράγοντα αβεβαιότητας.

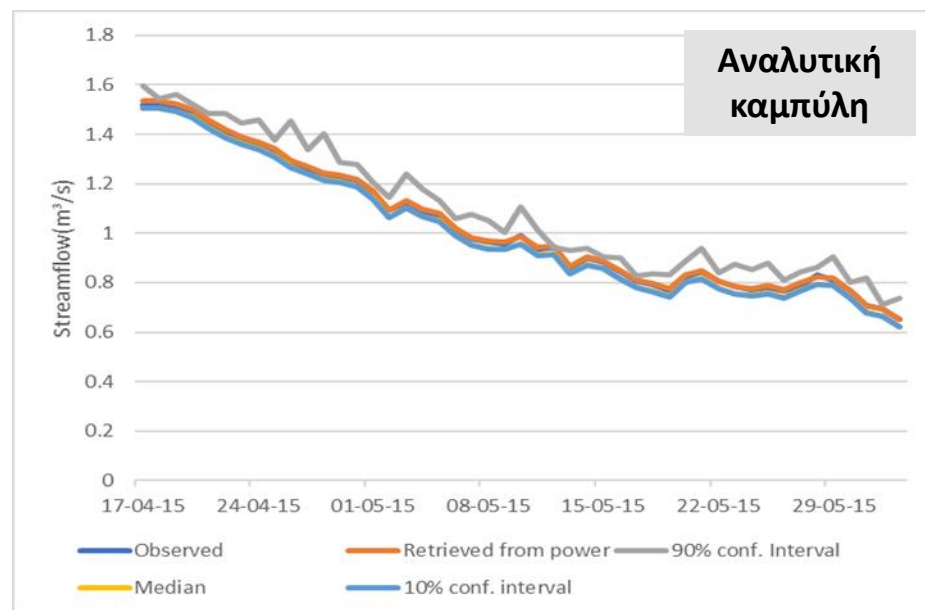
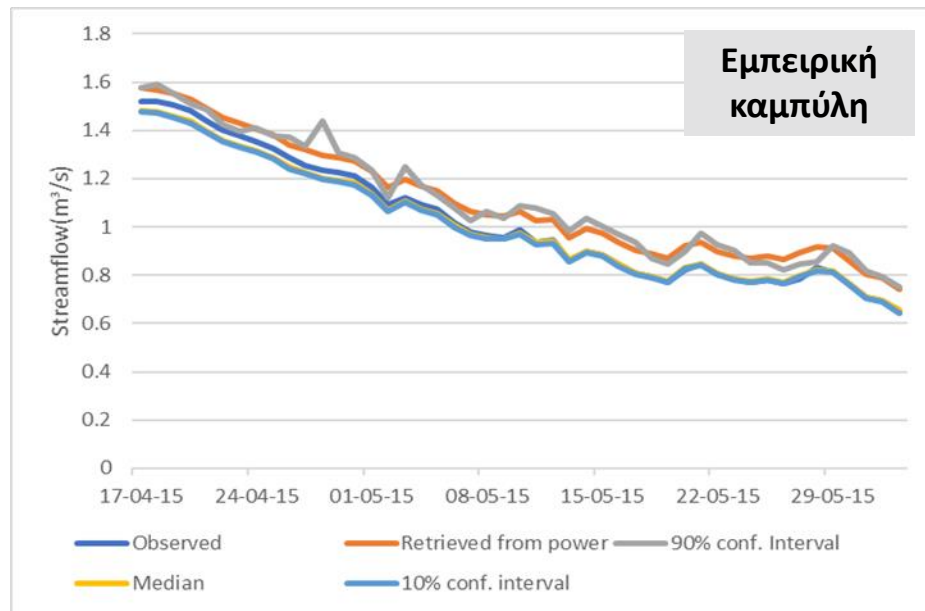
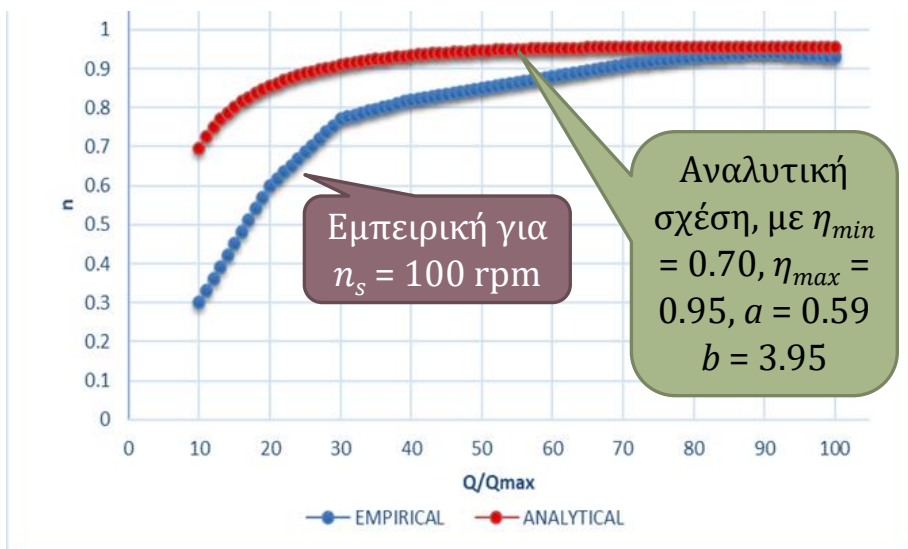
# Η «αντίστροφη μηχανική» στον Γλαύκο: Pelton

- ❑ Συνεχόμενη λειτουργία 7 μηνών
- ❑ Καμπύλη απόδοσης στροβίλου
- ❑ Ωριαία δεδομένα ενέργειας



# Η «αντίστροφη μηχανική» στον Γλαύκο: Francis

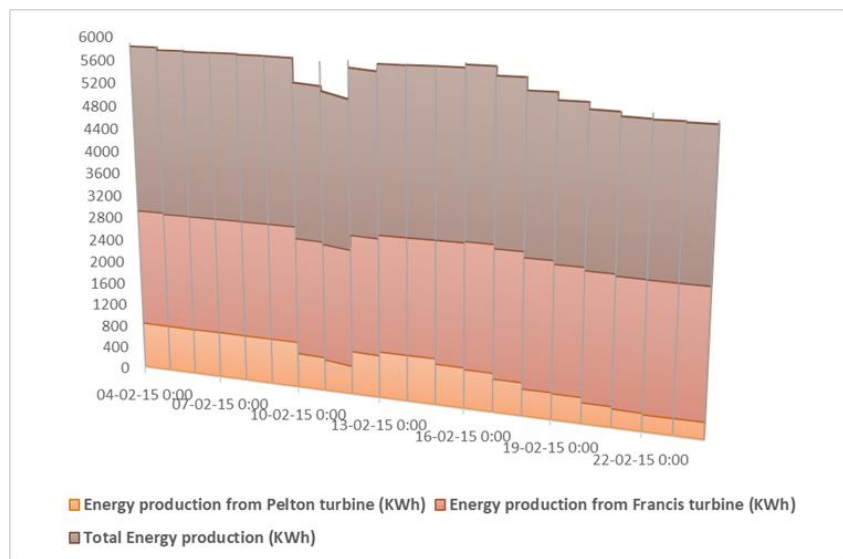
- Με την εμπειρική καμπύλη το μοντέλο υπερεκτιμά συνεχώς την παροχή, ενώ τα όρια εμπιστοσύνης αποκλίνουν σημαντικά από την αναμενόμενη περιβάλλουσα.
- Αντίθετα, η βελτιστοποιημένη καμπύλη απόδοσης αντικατοπτρίζει σωστά τη σχέση παροχής-ενέργειας.



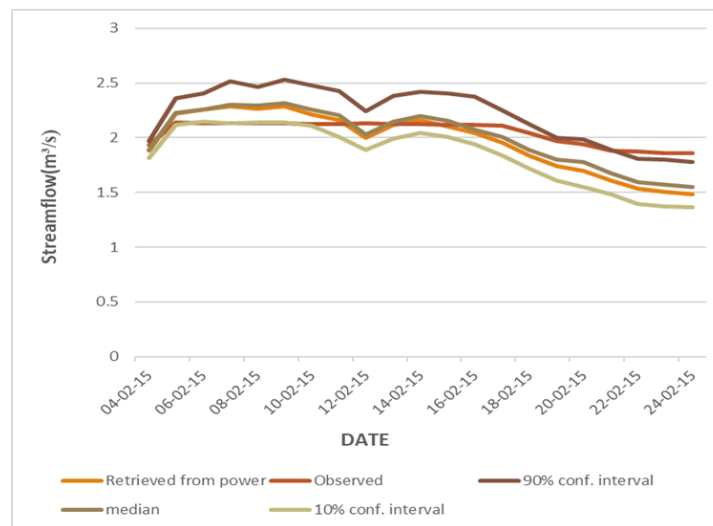
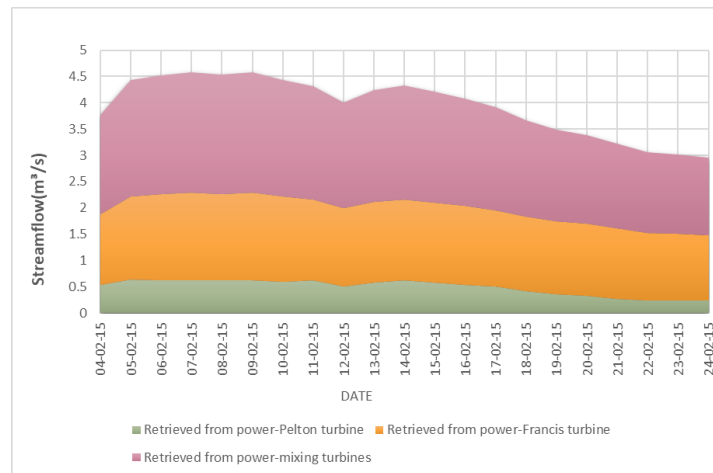


# Η «αντίστροφη μηχανική» στον Γλαύκο: Μίξη στροβίλων

Ντετερμινιστική  
προσέγγιση



Στοχαστική  
προσέγγιση



# Συμβολές εργασίας

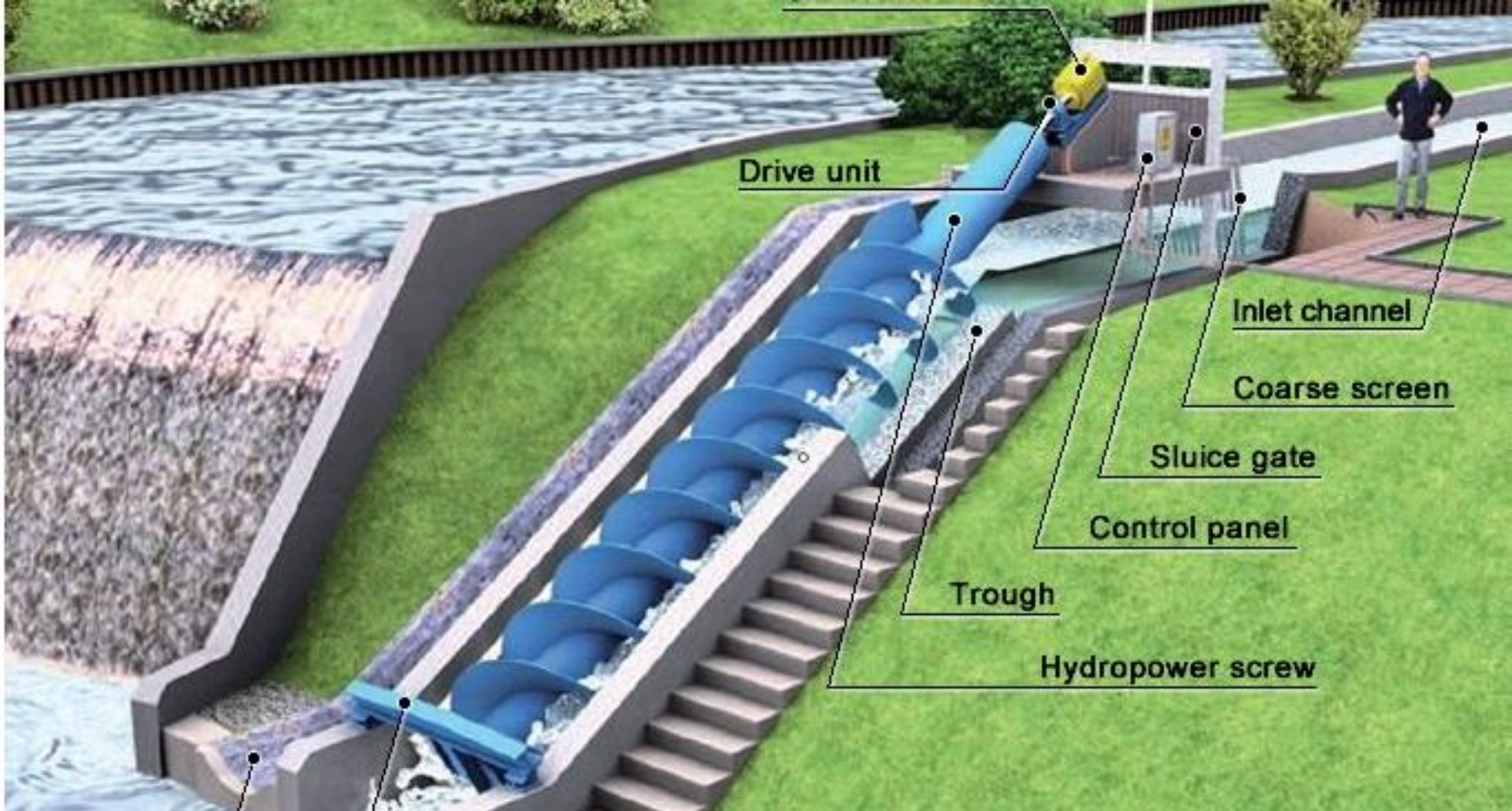
---

- ❑ Τυποποίηση μετασχηματισμού παροχής ποταμού σε ενέργεια που παράγεται από ΜΥΗΕ και διερεύνηση **μη γραμμικότητας** και πηγών **αβεβαιότητας**.
- ❑ Διαμόρφωση και **υπολογιστική υλοποίηση** τριών εκδοχών, ήτοι **ευθύ πρόβλημα**, **αντίστροφο πρόβλημα** και **πρόβλημα βαθμονόμησης**.
- ❑ Ανάπτυξη γενικού **στοχαστικού πλαισίου** για το αντίστροφο πρόβλημα της υδροηλεκτρικής ενέργειας, εστιάζοντας σε δύο βασικές πιθανές πηγές αβεβαιότητας:
  - ❑ παρατηρήσεις παραγόμενης ενέργειας
  - ❑ καμπύλες απόδοσης στροβίλων → αποδείχθηκε ότι αποτελούν τον πλέον καθοριστικό παράγοντα αβεβαιότητας.
- ❑ **Παραμετροποίηση σχέσης βαθμού απόδοσης – παροχής**, επιτρέποντας την εξαγωγή της βελτιστοποιημένων σχέσεων από ταυτόχρονα δεδομένα ενέργειας και παροχής.
- ❑ Ανάπτυξη **ημιπεμειρικής τεχνικής ανάκτησης του πλήρους υδρογραφήματος**, με επέκταση των παροχών που εκτιμώνται μέσω του αντίστροφου προβλήματος εκτός των ορίων λειτουργίας των στροβίλων.
- ❑ Έλεγχος πολλαπλών πτυχών της μεθοδολογίας σε **υποθετικά** και **πραγματικά** ΜΥΗΕ.

# Ερευνητικές προοπτικές

---

- ❑ Εφαρμογή προτεινόμενου πλαισίου σε όλες τις εκδοχές του σε **πραγματικά συστήματα** με διαφορετικό υδρολογικό καθεστώς, τεχνικά χαρακτηριστικά και πηγές αβεβαιότητας.
- ❑ Μοντελοποίηση πρόσθετων στοιχείων που αποτελούν δυνητική πηγή αβεβαιότητας στα ΜΥΗΕ (π.χ. **τραχύτητα** αγωγού πτώσης).
- ❑ Διερεύνηση διαφορετικών εκφράσεων **σφαλμάτων** και **πιθανοτικών-στοχαστικών προσεγγίσεων** κατά την ανάκτηση των χρονοσειρών παροχής από δεδομένα ενέργειας.
- ❑ Έλεγχος και προσαρμογή προτεινόμενης **παραμετρικής σχέσης βαθμού απόδοσης** σε μεγάλο εύρος καμπυλών στροβίλων εμπορίου.
- ❑ Ευρύτερες προοπτικές:
  - ❑ **Σχεδιασμός ΜΥΗΕ μέσω γενικευμένης στοχαστικής προσομοίωσης** όλων των πτυχών του μετασχηματισμού ροής-ενέργειας.
  - ❑ **Βελτιστοποίηση διαχείρισης ΜΥΗΕ υπό καθεστώς αβεβαιότητας**, με έμφαση στη μίξη στροβίλων και στόχο τη μεγιστοποίηση του ολικού βαθμού απόδοσης.
  - ❑ **Προγραμματισμός ενεργειακής παραγωγής** συνδυάζοντας το αντίστροφο πρόβλημα για την εξαγωγή των παροχών, τεχνικές πρόγνωσης της παροχής, και το ευθύ πρόβλημα για την **πρόγνωση της ενέργειας υπό αβεβαιότητα**.



**ΣΑΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ**