



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 6: Υδροηλεκτρική Ενέργεια

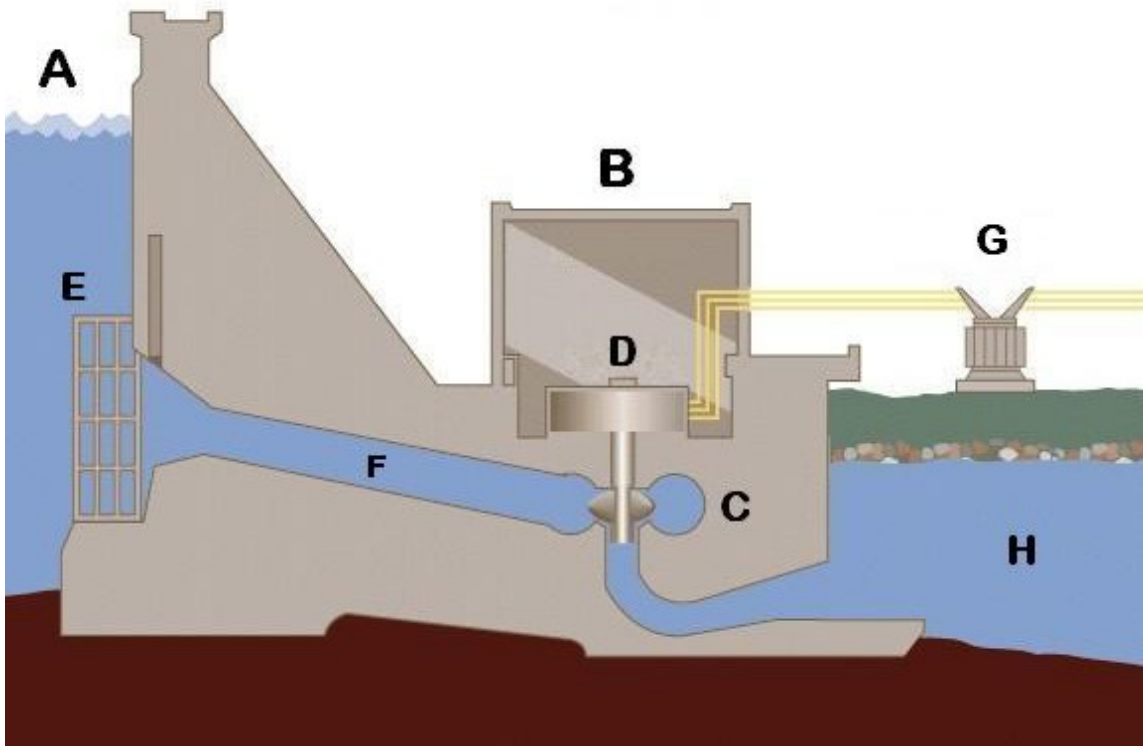
Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Τι είναι η Υδροηλεκτρική Ενέργεια;



Υδροηλεκτρική ενέργεια είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας νερού σε μηχανικό έργο και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια, μέσω στρόβιλου - γεννήτριας. Βασίζεται στο ύψος νερού (H), την παροχή (Q) και τη βαρύτητα (g). Αποτελεί ώριμη, σταθερή και προβλέψιμη ΑΠΕ.

Βασικός Σχηματισμός Ενέργειας



Η ισχύς νερού ορίζεται από:

$$P = \rho g Q H$$

όπου:

- ▶ $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ (πυκνότητα νερού)
- ▶ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- ▶ $Q = \text{παροχή (m}^3/\text{s)}$
- ▶ $H = \text{καθαρό υδραυλικό ύψος (m)}$

Η πραγματική ηλεκτρική ισχύς:

$$P_{el} = \eta_{tot} \rho g Q H$$

με συνολική απόδοση η_{tot}

$$= \eta_{turb} \eta_{gen} \eta_{penstock}$$

Στοιχεία Υδροηλεκτρικού Έργου

Το υδροηλεκτρικό έργο περιλαμβάνει:

- ▶ Φράγμα / Ταμιευτήρα
- ▶ Υδροληψία
- ▶ Αγωγούς πίεσης (penstocks)
- ▶ Στρόβιλο
- ▶ Γεννήτρια
- ▶ Σταθμό παραγωγής
- ▶ Κανάλια επιστροφής
- ▶ Υδρολογικό σταθμό παρακολούθησης



Υδροτουρμπίνες Pelton

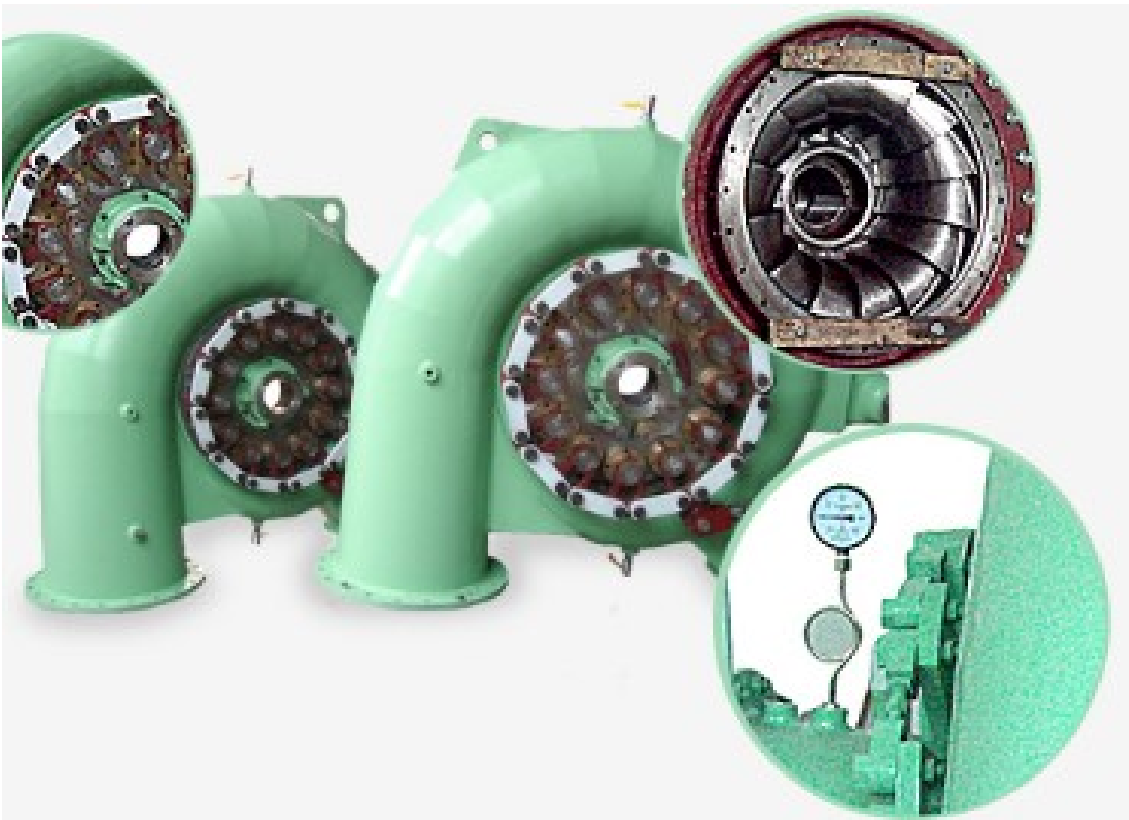


Χρησιμοποιούνται για μεγάλα ύψη ($> 300\text{ m}$) και μικρές παροχές.
Χαρακτηριστικά:

- ▶ Ακροφύσιο jet
- ▶ Περιστρεφόμενα κουτάλια (buckets)
- ▶ Απόδοση 90-95%

Ιδανικές για ορεινούς σταθμούς.

Υδροτουρμπίνες Francis



Η πιο διαδεδομένη
υδροτουρμπίνα.
Για μεσαία ύψη 50-300 m.
Πλεονεκτήματα:

- ▶ Υψηλή απόδοση
- ▶ Ευρεία περιοχή λειτουργίας
- ▶ Σταθερή λειτουργία σε μεταβαλλόμενες παροχές

Υδροτουρμπίνες Kaplan



Για μικρά ύψη (< 50 m)
και μεγάλες παροχές.
Πλεονεκτήματα:

- ▶ Ρυθμιζόμενα πτερύγια
- ▶ Υψηλή απόδοση σε χαμηλές πτώσεις
- ▶ Συνεχής λειτουργία

Penstock & Υδραυλικές Απώλειες



Οι αγωγοί πίεσης μεταφέρουν νερό από τον ταμιευτήρα στον στρόβιλο.

Απώλειες λόγω τριβών (Darcy-Weisbach):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

και πρόσθετες απώλειες εισόδου/εξόδου.

Water Hammer (Υδραυλικό Κρουστικό Κύμα)

Προκαλείται όταν:

- η βάννα κλείνει γρήγορα
- αλλάζει απότομα η ταχύτητα νερού

Προκαλεί υπερπιέσεις σε αγωγούς:

$$\Delta p = \rho a \Delta v$$

όπου a η ταχύτητα κύματος στο νερό (~1400 m/s).

Λύσεις: surge tanks, air valves, soft closing.

Στροβιλοαντλίες (Pumped Storage)

Σε σταθμούς διπλής λειτουργίας:

- ▶ Αντλούν νερό προς τα επάνω όταν υπάρχει πλεόνασμα ΑΠΕ
- ▶ Το αφήνουν να κατέβει όταν χρειάζεται ισχύς

Βοηθούν στη σταθερότητα δικτύου.

Παράδειγμα: Σταθμός Σφηκιάς (Αλιάκμονας).



Μικρά Υδροηλεκτρικά (ΜΥΗΕ)



Χαρακτηριστικά:

- ▶ Ισχύς < 10 MW (στην Ελλάδα ΜΥΗΕ έως 15 MW)
- ▶ Εύκολη αδειοδότηση
- ▶ Χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις
- ▶ Αξιόπιστη ενέργεια για δίκτυο

Μεγάλα Υδροηλεκτρικά

Μέγιστη ευελιξία:

- ▶ Υδροληψία
- ▶ Μεταβολή παραγωγής σε λίγα δευτερόλεπτα
- ▶ Τεράστιοι ταμιευτήρες

Στην Ελλάδα: Κρεμαστά, Πολύφυτο, Θησαυρός.



ΥΗΕ Πλατανόβρυσης

Υδρολογικός Κύκλος



Περιλαμβάνει:

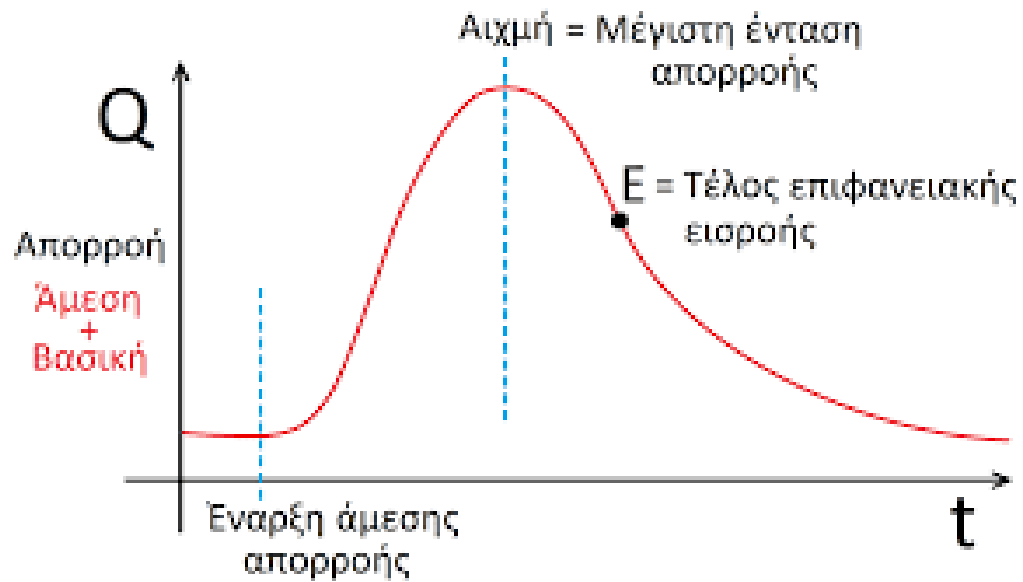
- Βροχόπτωση
 - Διήθηση
 - Επιφανειακή απορροή
 - Εξατμισοδιαπνοή
 - Ροή ποταμών
- Από εδώ εξαρτάται η τροφοδοσία των ΥΗΕ.

Παροχή Ποταμών

Η παροχή $Q(t)$ μεταβάλλεται εποχικά:

- ▶ Υψηλή το χειμώνα
 - ▶ Χαμηλή το καλοκαίρι
- Μοντελοποίηση με υδρομετρικούς σταθμούς και υδρογραφήματα.

Υδρογράφημα



Απεικόνιση $Q(t)$ σε μήνες/ημέρες.
Δείχνει:

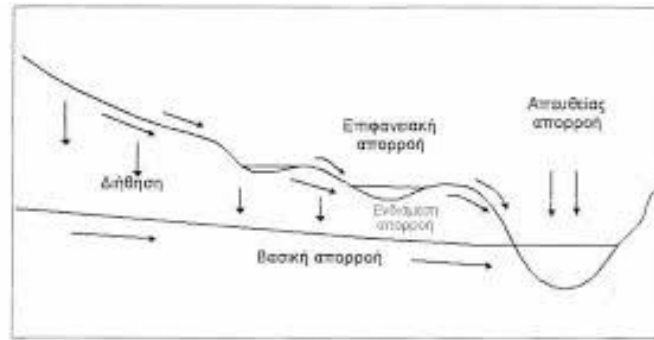
- ▶ αιχμές
- ▶ περιόδους χαμηλής ροής
- ▶ διαθεσιμότητα νερού για ηλεκτροπαραγωγή

Στατιστικά $Q_{\max}$ - $Q_{\min}$

Χρησιμοποιούνται για:

- σχεδιασμό έργων
- εκτίμηση ασφάλειας
- μέγιστη δυνατή ισχύ

Π.χ., υπολογισμός 100-year flood (πλημμύρας 100ετίας).



Σχήμα 5.6 Σκετς που δείχνει τους παράγοντες που διαμορφώνουν την παροχή του ρεύματος

Πλημμυρικός Κίνδυνος

Στα υδροηλεκτρικά έργα σχεδιάζουμε:

- ▶ υπερχειλιστές (spillways)
- ▶ βάθη ασφαλείας
- ▶ ικανότητα απορροής πλημμυρών

Μηνιαία Υδρολογία

Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται από τη μηνιαία εισροή.

Π.χ., για τα ελληνικά φράγματα:

Μέγιστη εισροή: Ιαν - Μαρ

Ελάχιστη: Ιούλ - Σεπ

Εξίσωση Ισχύος Υδροηλεκτρικού

Εξίσωση πραγματικής ηλεκτρικής ισχύος υδροηλεκτρικού:

$$P = \rho g Q H \eta_t \eta_g \left(1 - \frac{h_f}{H} \right)$$

Αυτή η εξίσωση περιγράφει την ενέργεια που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ, λαμβάνοντας υπόψη απώλειες τριβών, απόδοση υδροστρόβιλου και απόδοση γεννήτριας.

Πυκνότητα & Βαρύτητα (ρ , g)

ρ – Πυκνότητα νερού (kg/m^3)

Τυπική τιμή: 1000 kg/m^3

Προσδιορίζει πόση μάζα έχει το νερό και επηρεάζει άμεσα τη διαθέσιμη δυναμική ενέργεια.

g – Επιτάχυνση βαρύτητας (m/s^2)

Τυπική τιμή: 9.81 m/s^2

Η βαρύτητα προκαλεί τη μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική και τελικά σε μηχανικό έργο στον στρόβιλο.

Παροχή & Ύψος Πτώσης (Q, H)

Q – Παροχή (m^3/s)

Ο όγκος νερού που διέρχεται από την τουρμπίνα ανά δευτερόλεπτο.
Μεγαλύτερη παροχή → μεγαλύτερη υδραυλική ισχύς.

H – Ακαθάριστο υδραυλικό ύψος (m)

H διαφορά στάθμης μεταξύ:

- ▶ επιφάνειας ταμιευτήρα
- ▶ άξονα του στρόβιλου

Αποτελεί τη διαθέσιμη **δυναμική ενέργεια** του νερού.

$$E_{pot} = mgH$$

Υδραυλικές Απώλειες (h_f)

Οι απώλειες προκύπτουν από:

- ▶ τριβές στους αγωγούς (penstock)
- ▶ στροβιλισμούς
- ▶ ανωμαλίες εισόδου/εξόδου
- ▶ τοπικές αντιστάσεις

Υπολογίζονται με την εξίσωση Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Ο όρος:

$$1 - \frac{h_f}{H}$$

αντιπροσωπεύει το **ποσοστό του ύψους που απομένει** προς αξιοποίηση από την τουρμπίνα.

Το f εξαρτάται από Re και σχετική τραχύτητα:

$$f = f(R, e, \epsilon/D)$$

Απόδοση Υδροστρόβιλου & Γεννήτριας (η_t , η_g)

η_t — Απόδοση υδροστρόβιλου (90-95%)

Μετατρέπει υδραυλική ισχύ $\rightarrow$ μηχανική ισχύ.
Εξαρτάται από:

- ▶ τύπο στρόβιλου (Pelton, Francis, Kaplan)
- ▶ παροχή
- ▶ σημείο λειτουργίας
- ▶ ποιότητα κατασκευής

η_g — Απόδοση γεννήτριας (97-99%)

Μετατρέπει μηχανική $\rightarrow$ ηλεκτρική ισχύ.

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν υψηλή απόδοση λόγω ελάχιστων ηλεκτρικών και μαγνητικών απωλειών.

Φυσική Ερμηνεία της Εξίσωσης

Η ηλεκτρική ισχύς προκύπτει από:

Αρχική υδραυλική ισχύ:

$$P_{water} = \rho g Q H$$

Αφαίρεση απωλειών:

$$H_{net} = H - h_f$$

Απόδοση μετατροπής:

$$P_{el} = P_{water} \cdot \eta_t \cdot \eta_g \cdot \frac{H_{net}}{H}$$

Άρα το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται από:

- ▶ την ποσότητα νερού (Q)
- ▶ το ύψος πτώσης (H)
- ▶ τις απώλειες στον αγωγό (h_f)
- ▶ την απόδοση μετατροπής του συστήματος (η_t , η_g)

Αποδόσεις Συστήματος

Αποδόσεις:

- ▶ Στρόβιλου: 90-95%
- ▶ Γεννήτριας: 97-99%
- ▶ Penstock: 98-99%

Συνολικός Βαθμός απόδοσης: 85-90%.

Σπηλαίωση (Cavitation)

Σπηλαίωση (cavitation) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο η τοπική πίεση του νερού πέφτει κάτω από την πίεση ατμοποίησης του, προκαλώντας σχηματισμό φυσαλίδων ατμού μέσα στο υγρό.

Όταν αυτές οι φυσαλίδες μετακινούνται σε περιοχή υψηλότερης πίεσης, καταρρέουν βίαια, δημιουργώντας:

- ▶ κρουστικά μικρο-κύματα
- ▶ υψηλές τοπικές πιέσεις (έως 1000 atm)
- ▶ διάβρωση υλικών και πτερυγίων
- ▶ θόρυβο & δονήσεις
- ▶ απώλεια απόδοσης του υδροστρόβιλου

Εμφανίζεται όταν η πίεση πέσει κάτω από την πίεση ατμών.

Συνθήκη:

$$NPSH_{available} > NPSH_{required}$$

Προκαλεί:

- ▶ Διάβρωση πτερυγίων
- ▶ Μείωση απόδοσης

Πότε εμφανίζεται η σπηλαίωση;

Η σπηλαίωση εμφανίζεται όταν:

$$p_{local} < p_{vapor}$$

δηλαδή η τοπική πίεση του νερού πέσει κάτω από την **πίεση κορεσμένων ατμών** στη θερμοκρασία λειτουργίας.

Αυτό συμβαίνει:

- ▶ στην **είσοδο του στρόβιλου** (αναρρόφηση)
- ▶ σε περιοχές **υψηλής ταχύτητας** (Bernoulli → μείωση πίεσης)
- ▶ σε **απότομα στενώματα ροής**
- ▶ όταν το **ύψος τοποθέτησης του στρόβιλου είναι πολύ πάνω από τη στάθμη νερού**

Το φαινόμενο με βάση την εξίσωση Bernoulli

Η πίεση πέφτει σε περιοχές υψηλής ταχύτητας:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z = \text{σταθερή}$$

Άρα, όταν η ταχύτητα v αυξάνεται $\rightarrow$
η πίεση p μειώνεται.

Αν p πέσει έως:

$$p_{\text{vapor}} \approx 2.3 \text{ kPa (σε } 20^\circ\text{C)}$$

τότε δημιουργούνται φουσαλίδες ατμού.

Συνθήκη Αποφυγής Σπηλαίωσης (NPSH)

Για να ΜΗΝ εμφανιστεί σπηλαίωση, πρέπει να ισχύει:

$$NPSH_{available} > NPSH_{required}$$

✓ $NPSH_{available}$

Το διαθέσιμο καθαρό ύψος αναρρόφησης:

$$NPSH_a = \frac{p_{atm}}{\rho g} + z - \frac{p_{vapor}}{\rho g} - h_f$$

όπου:

- ▶ p_{atm} = ατμοσφ. πίεση
- ▶ z = υψομετρική διαφορά μεταξύ στάθμης νερού και εισόδου στρόβιλου
- ▶ p_{vapor} = πίεση ατμών
- ▶ h_f = απώλειες στον σωλήνα αναρρόφησης

✓ $NPSH_{required}$

Το ελάχιστο απαιτούμενο ύψος αναρρόφησης που δίνει ο κατασκευαστής ώστε να μην υπάρξει σπηλαίωση.

Φυσική Ερμηνεία της Συνθήκης NPSH

Αν το διαθέσιμο NPSH είναι μικρότερο από το απαιτούμενο:

- ▶ η τοπική πίεση κοντά στην περωτή πέφτει κάτω από την πίεση ατμών
- ▶ δημιουργούνται φυσαλίδες ατμού
- ▶ οι φυσαλίδες εκρήγνυνται πάνω στην επιφάνεια των πτερυγίων
- ▶ προκαλούν:
 - ▶ διάβρωση
 - ▶ απομάκρυνση υλικού
 - ▶ καταστροφή κοπής
 - ▶ μειωμένη απόδοση στρόβιλου

Πρακτικές Λύσεις Αποφυγής Σπηλαιώσης

Για αποφυγή cavitation ρυθμίζουμε:

✓ Αύξηση NPSHavailable

- ▶ μείωση του ύψους τοποθέτησης του στρόβιλου (χαμηλότερα → καλύτερα)
- ▶ αύξηση διαμέτρου σωλήνων
- ▶ μείωση τραχύτητας σωλήνα → μικρότερα h_f
- ▶ αποφυγή απότομων στενώσεων
- ▶ μείωση λειτουργικής θερμοκρασίας (ρίχνει p_{vapor})

✓ Μείωση NPSHrequired

- ▶ επιλογή κατάλληλης τουρμπίνας
- ▶ σχεδιασμός πτερυγίων χαμηλής υποπίεσης
- ▶ συντήρηση → αποφυγή αποθέσεων / διάβρωσης

Συστήματα Αυτοματισμού

Περιλαμβάνουν:

- ▶ Έλεγχο στροφών στρόβιλου
- ▶ Έλεγχο θυροφραγμάτων
- ▶ SCADA
- ▶ Προστασία από υπερτάσεις και υδραυλικό πλήγμα

Δίκτυα & Ευστάθεια

ΥΗΕ παρέχουν:

- ▶ πρωτεύουσα και δευτερεύουσα εφεδρεία
- ▶ ρύθμιση συχνότητας
- ▶ ρύθμιση τάσης
- ▶ black start

Μεγάλα Υδροηλεκτρικά της Ελλάδας

Μεγαλύτερα έργα ΔΕΗ:

- ▶ Κρεμαστά (437 MW)
- ▶ Καστράκι (320 MW)
- ▶ Στράτος (155 MW)
- ▶ Πολύφυτο (375 MW)
- ▶ Θησαυρός (384 MW)

Παραγωγή ανά Φράγμα

Μεσοσταθμικά (GWh/έτος):

- ▶ Κρεμαστά → 400-500
- ▶ Θησαυρός → 500-600
- ▶ Πολύφυτο → 200-300
- ▶ Πουρνάρι → 200-250

Ρόλος στην Ευστάθεια Δικτύου

ΥΗΕ είναι:

- ▶ πολύ γρήγορα
- ▶ αξιόπιστα
- ▶ ρυθμίζουν συχνότητα
- ▶ παρέχουν ευελιξία για ένταξη ΑΠΕ

Υδροηλεκτρική Αποθήκευση (Pumped Storage)

Συστήματα:

- ▶ Σφηκιά - Ασώματα
- ▶ Θησαυρός - Πλατανόβρυση

Επιτρέπουν:

- ▶ αποθήκευση ενέργειας
- ▶ εξομάλυνση φορτίου
- ▶ υποστήριξη ΑΠΕ

Άσκηση

- ▶ Δεδομένα υδροηλεκτρικού έργου

- ▶ Παροχή:

$$Q = 48 \text{ m}^3/\text{s}$$

- ▶ Ακαθάριστο υδραυλικό ύψος:

$$H = 135 \text{ m}$$

- ▶ Penstock:

- ▶ Μήκος $L = 420 \text{ m}$

- ▶ Διάμετρος $D = 3.0 \text{ m}$

- ▶ Τραχύτητα χάλυβα: $\varepsilon = 0.00015 \text{ m}$

- ▶ Απώλειες τοπικών αντιστάσεων:

$$h_{local} = 2.5 \text{ m}$$

- ▶ Θερμοκρασία νερού: $20^\circ \text{C} \rightarrow$

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3, p_{vapor} = 2.34 \text{ kPa}, \mu \text{ (ιξώδες) (εσωτερική τριβή ρευστού)} = 1.002 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

- ▶ Απόδοση στροβίλου:

$$\eta_t = 0.93$$

- ▶ Απόδοση γεννήτριας:

$$\eta_g = 0.98$$

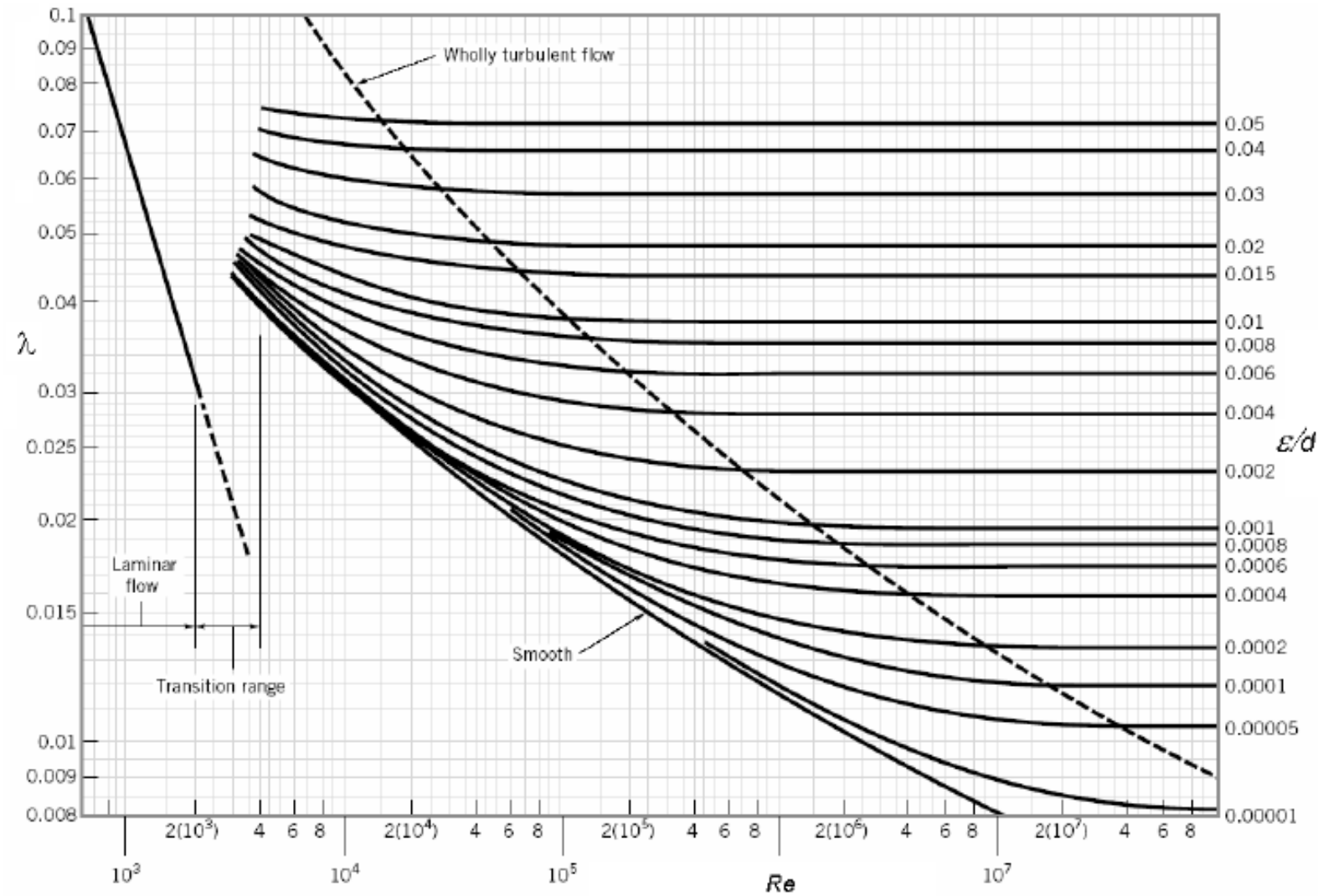
- ▶ Ατμοσφαιρική πίεση στο σημείο εγκατάστασης:

$$p_{atm} = 90 \text{ kPa}$$

- ▶ Ύψος τοποθέτησης στροβίλου **κάτω από** στάθμη νερού:

$$z = +7 \text{ m}$$

Moody Diagram



Ζητούμενα Άσκησης

- ▶ Ταχύτητα νερού στον penstock.
- ▶ Reynolds και συντελεστής τριβής f (διάγραμμα Moody).
- ▶ Υπολογισμός απωλειών τριβής και συνολικών απωλειών.
- ▶ Καθαρό υδραυλικό ύψος H_{net} .
- ▶ Έλεγχος σπηλαίωσης: $NPSH_a > NPSH_r = 5 \text{ m}$
- ▶ Υδραυλική ισχύς, μηχανική ισχύς, ηλεκτρική ισχύς.
- ▶ Σχολιασμός αποτελέσματος.

Ταχύτητα ροής στο penstock

Εμβαδόν διατομής:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 3^2}{4} = 7.07 \text{ m}^2$$

Ταχύτητα:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{48}{7.07} = 6.79 \text{ m/s}$$

Reynolds και συντελεστής τριβής

Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$
$$Re = \frac{998 \cdot 6.79 \cdot 3}{1.002 \times 10^{-3}}$$
$$Re = 2.03 \times 10^7$$

ισχυρά τυρβώδης ροή

Συντελεστής τριβής f

Υπολογίζεται από:

Moody με καμπύλη $\varepsilon/D = 0.00005$

$$f = 0.0107$$

Απώλειες τριβής και συνολικές απώλειες

Τριβές Darcy-Weisbach

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

$$h_f = 0.0107 \cdot \frac{420}{3} \cdot \frac{6.79^2}{2 \cdot 9.81}$$

$$h_f = 0.0107 \cdot 140 \cdot 2.35 = 3.52 \text{ m}$$

Τοπικές απώλειες:

$$h_{local} = 2.5 \text{ m}$$

Συνολικές:

$$h_{tot} = h_f + h_{local} = 3.52 + 2.5 = 6.02 \text{ m}$$

Καθαρό υδραυλικό ύψος

$$H_{net} = H - h_{tot}$$
$$H_{net} = 135 - 6.02 = 128.98 \text{ m}$$

Έλεγχος σπηλαίωσης

$$NPSH_a = \frac{p_{atm}}{\rho g} + z - \frac{p_{vapor}}{\rho g} - h_f$$

Υπολογισμοί:

$$\frac{p_{atm}}{\rho g} = \frac{90000}{998 \cdot 9.81} = 9.19 \text{ m}$$

$$\frac{p_{vapor}}{\rho g} = \frac{2340}{998 \cdot 9.81} = 0.24 \text{ m}$$

$$NPSH_a = 9.19 + 7 - 0.24 - 3.52 = 12.43 \text{ m}$$

Σύγκριση:

$$NPSH_a = 12.43 > NPSH_r = 5$$

Δεν υπάρχει κίνδυνος σπηλαίωσης.

Υπολογισμός ισχύος

Υδραυλική ισχύς

$$\begin{aligned}P_{hyd} &= \rho g Q H_{net} \\P_{hyd} &= 998 \cdot 9.81 \cdot 48 \cdot 128.98 \\P_{hyd} &= 60.4 \text{ MW}\end{aligned}$$

Μηχανική ισχύς στην άτρακτο

$$\begin{aligned}P_{mech} &= P_{hyd} \eta_t \\P_{mech} &= 60.4 \cdot 0.93 = 56.17 \text{ MW}\end{aligned}$$

Ηλεκτρική ισχύς εξόδου

$$\begin{aligned}P_{el} &= P_{mech} \eta_g \\P_{el} &= 56.17 \cdot 0.98 = 55.05 \text{ MW}\end{aligned}$$

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

- ▶ Οι ολικές απώλειες περιορίζονται στα **6.02 m**, πολύ χαμηλότερα από τις αρχικές εκτιμήσεις.
- ▶ Η καθαρή πτώση παραμένει υψηλή: **~129 m**.
- ▶ Η υδραυλική ισχύς φτάνει τα **60.4 MW**, από τα οποία στην έξοδο παράγονται **55.0 MW** ηλεκτρικής ισχύος.
- ▶ Ο έλεγχος cavitation δείχνει ότι υπάρχει **πολύ μεγάλη ασφάλεια** (12.4 m διαθέσιμη NPSH έναντι 5 m απαιτούμενης).
- ▶ Η τιμή $f = 0.0107$ είναι **θεωρητικά ακριβής** και προκύπτει από τις σωστές καμπύλες για το συγκεκριμένο pipe.

Βιβλιογραφία

- ▶ ASHRAE Handbook
- ▶ US Bureau of Reclamation - Design of Hydropower Plants
- ▶ ESHA - Guide on Small Hydropower
- ▶ ΔΕΗ Α.Ε. - Στατιστικά ΥΗΕ
- ▶ Chow, Maidment, Mays - Applied Hydrology
- ▶ Gordon - Hydropower Engineering Handbook
- ▶ Cengel & Cimbala - Fluid Mechanics