

## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

### Μάθημα: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

#### Ενότητα: Υδροηλεκτρική ενέργεια

#### Λυμένες ασκήσεις από παλαιά θέματα εξετάσεων

1. Υδροηλεκτρικό έργο με δύο στροβίλους ισχύος 50 MW έκαστος παρήγαγε, την τελευταία δεκαετία, 2.5 TWh, συνολικά. Εκτιμήστε αν το έργο λειτούργησε για παραγωγή ενέργειας αιχμής ή βάσης.

*Η συνολική ισχύς του έργου είναι  $2 \times 50 = 100 \text{ MW}$ , ενώ η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας στα δέκα έτη ανήλθε σε  $2.5/10 = 0.25 \text{ TWh}$ . Συνεπώς, σε μέση ετήσια βάση οι στροβίλοι λειτούργησαν  $0.25 \times 106 / 100 = 2500$  ώρες (επί συνόλου 8760 ωρών), και άρα παρήγαγαν ενέργεια αιχμής.*

2. Το υδροηλεκτρικό φράγμα του Ασουάν (Aswan High Dam) επί του ποταμού Νείλου, στην Αίγυπτο, ύψους 110 m, διαθέτει στον πόδα του σταθμό παραγωγής αποτελούμενο από 12 στροβίλους Francis, ισχύος 175 MW και ολικού βαθμού απόδοσης 85% έκαστος, παράγοντας περίπου 8.0 TWh, σε μέση ετήσια βάση.

(α) Υπολογίστε τον ετήσιο συντελεστή δυναμικότητας του έργου

*Αφού η συνολική ισχύς των στροβίλων είναι  $12 \times 175 = 2100 \text{ MW}$  και η μέση παραγωγή ενέργειας ανήλθε σε 8.0 TWh, ο συντελεστής δυναμικότητας ανέρχεται σε  $(8.0 \times 10^6) / (2100 \times 8760) = 0.435$ .*

(β) Εκτιμήστε την μέση ετήσια ποσότητα νερού που διέρχεται από τους στροβίλους

*Αφού ο σταθμός παραγωγής είναι στον πόδα του φράγματος, θεωρείται καθαρό ύψος πτώσης όσο και το ύψος του φράγματος, ήτοι 110 m. Επιλύοντας η σχέση  $E = \gamma V H_n$  ως προς τον όγκο, προκύπτει ότι η μέση ετήσια εκροή από τους στροβίλους ανέρχεται σε περίπου  $31\,400 \text{ hm}^3$ .*

3. Το υδροηλεκτρικό έργο Στράτου στον κάτω ρου του Αχελώου περιλαμβάνει ταμιευτήρα, με κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας +67.0 και +68.6 m, αντίστοιχα, και σταθμό παραγωγής σε υψόμετρο +31.6 m, αποτελούμενο από δύο στροβίλους τύπου Francis, ισχύος 75 MW έκαστος. Η μέση ετήσια παροχή εισροής στον ταμιευτήρα ανέρχεται σε  $115 \text{ m}^3/\text{s}$ , από τα οποία περί τα  $300 \text{ hm}^3$  εκτρέπονται ετησίως για άρδευση, ενώ οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών και υπερχειλίσεων είναι αμελητέες. Κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται:

(α) Εκτιμήστε το καθαρό ύψος πτώσης, την μέση ετήσια εκροή από τους στροβίλους, τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας, και την παροχή λειτουργίας των στροβίλων.

*Λαμβάνοντας τη μέση στάθμη του ταμιευτήρα (67.8 m), προκύπτει ακαθάριστο ύψος πτώσης ίσο με  $67.8 - 31.6 = 36.2 \text{ m}$ . Ακόμη, κατά την προσαγωγή του νερού στους στροβίλους, θεωρούμε ποσοστό απωλειών υδραυλικής ενέργειας της τάξης του 5%, συνεπώς το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται σε  $0.95 \times 36.2 = 34.4 \text{ m}$ .*

*Η παραγωγή νερού (απορροή) από την ανάντη λεκάνη (μέσες ετήσιες εισροές στον ταμιευτήρα) ανέρχεται σε  $115 \times 86\,400 \times 365 \times 10^{-6} = 3627 \text{ hm}^3$ . Αφαιρώντας την ποσότητα που δίνεται για άρδευση, η οποία δεν διέρχεται από τον κύριο σταθμό παραγωγής (στην πραγματικότητα διέρχεται από έναν μικρότερο σταθμό), και δεδομένου ότι οι απώλειες νερού λόγω υπερχειλίσεων και διαφυγών είναι αμελητέες, η μέση ετήσια εκροή από τους στροβίλους εκτιμάται σε  $3327 \text{ hm}^3$ .*

*Υποθέτοντας ένα εύλογο βαθμό απόδοσης ίσο με 90%, η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε  $9.81 \times 0.90 \times 3327 \times 34.4 / 3600 = 280.6 \text{ GWh}$ .*

*Η συνολική ισχύς του συστήματος είναι  $2 \times 75 = 150 \text{ MW}$ , οπότε από τη σχέση της ισχύος προκύπτει παροχή λειτουργίας στροβίλων ίση με  $150\,000 / (9.81 \times 0.90 \times 34.4) = 494 \text{ m}^3/\text{s}$ .*

(β) Εκτιμήστε τις ετήσιες ώρες λειτουργίας του έργου, και εξηγήστε αν πρόκειται για έργο αιχμής ή βάσης.

Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του έργου εκτιμώντας διαιρώντας την ενέργεια με την ισχύ (ή, ισοδύναμα, τον όγκο με την παροχή), ήτοι  $280\,600 \text{ (MWh)} / 150 \text{ (MW)} = 1870$  ώρες. Κατά μέσο όρο, ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί σε λίγο παραπάνω από πέντε ώρες λειτουργίας ημερησίως, το οποίο υποδηλώνει ότι πρόκειται για έργο αιχμής. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε μέσω του συντελεστή δυναμικότητας, που υπολογίζεται σε  $280\,600 / (150 \times 8760) = 21.4\%$ .

(γ) Αιτιολογήστε την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου στροβίλων

Ο τύπος στροβίλων Francis είναι ο πλέον κοινός σε μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, καθώς καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα παροχών και υψών πτώσης. Για τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη του έργου (παροχή της τάξης των  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , ύψος πτώσης της τάξης των  $35 \text{ m}$ ), η επιλογή είναι αιτιολογημένη.

4. Εξετάζεται η κατασκευή δύο μικρών υδροηλεκτρικών έργων (χωρίς ταμιευτήρα). Το έργο στη θέση Α θα είναι πάνω στην κοίτη μεγάλου ποταμού, και θα εκμεταλλεύεται καθαρό ύψος πτώσης  $2 \text{ m}$  και παροχή  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ το Β θα είναι έργο εκτροπής εκτός ποταμού (run-of-river) και θα εκμεταλλεύεται καθαρό ύψος πτώσης  $200 \text{ m}$  και παροχή  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Υποθέτοντας κοινό βαθμό απόδοσης, που παραμένει σταθερός για όλο το εύρος παροχών, συγκρίνετε τα δύο έργα:

(α) ως προς την ετήσια παραγωγή ενέργειας

Υποθέτουμε βαθμό απόδοσης  $\eta = 0.85$ . Ο μέσος ετήσιος όγκος που θα εκμεταλλεύεται το έργο Α θα είναι  $V = 100 \times 86\,400 \times 10^{-6} = 3154 \text{ hm}^3$ , οπότε για καθαρό ύψος πτώσης  $H_n = 2.0 \text{ m}$ , προκύπτει μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας  $E = \gamma \eta H_n V / 3600 = 9.81 \times 0.85 \times 2 \times 3154 / 3600 = 14.6 \text{ GWh}$ . Η παραγωγή ενέργειας από το έργο Β θα είναι η ίδια, καθώς το γινόμενο  $\eta H_n V$  είναι ίδιο με το Α.

(β) ως προς τον τύπο στροβίλων που ενδείκνυται να τοποθετηθούν.

Το έργο στη θέση Α, το οποίο είναι πάνω στην κοίτη μεγάλου ποταμού, εκμεταλλεύεται μεγάλη παροχή με μικρό ύψος πτώσης, σε αντίθεση με το έργο στη θέση Β: Οι αντίστοιχοι τύποι στροβίλων που πρέπει να τοποθετηθούν για τα έργα Α και Β είναι Kaplan και Pelton.

5. Κατάντη φράγματος προβλέπεται να κατασκευαστεί υδροηλεκτρικός σταθμός για την εκμετάλλευση της οικολογικής παροχής των  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$  που θα διοχετεύεται σε συνεχή βάση. Ο σταθμός παραγωγής θα τοποθετηθεί στα  $+250 \text{ m}$ , ενώ η μέση στάθμη του ταμιευτήρα θα κυμαίνεται στα επίπεδα των  $+310 \text{ m}$ . Κάνοντας εύλογες παραδοχές για τον βαθμό απόδοσης των στροβίλων και τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής:

(α) Επιλέξτε ισχύ και τύπο στροβίλων

Υποθέτουμε βαθμό απόδοσης των στροβίλων ίσο με  $\eta = 0.90$  και ποσοστό απωλειών κατά την προσαγωγή του νερού ίσο με το  $5\%$  του ακαθάριστου ύψους πτώσης, οπότε το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται σε  $0.95 \times (310 - 250) = 57.0 \text{ m}$ . Για σταθερή παροχή  $Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , η απαιτούμενη ισχύς των στροβίλων υπολογίζεται από τη σχέση  $P = \gamma \eta Q H_n = 9.81 \times 0.90 \times 1.0 \times 57.0 = 503 \text{ kW} \approx 0.5 \text{ MW}$ . Ο συνδυασμός ύψους πτώσης και παροχής επιβάλλει την εφαρμογή στροβίλων Francis.

(β) Χαρακτηρίστε τον τύπο του έργου (μικρό ή μεγάλο).

Λόγω της χαμηλής τιμής της απαιτούμενης ισχύος (σημαντικά μικρότερης του νομικού ορίου των  $15 \text{ MW}$ ), το Υ/Η έργο χαρακτηρίζεται ως μικρό.

(γ) Εκτιμήστε την ετήσια παραγωγή ενέργειας.

Αφού το έργο λειτουργεί σε συνεχή βάση, ήτοι  $8760$  ώρες τον χρόνο, η ενέργεια που θα παράγει εκτιμάται σε  $0.5 \times 8760 = 4410 \text{ MWh}$ .

6. Μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο αποτελείται από: (α) ταμιευτήρα, με πρακτικά σταθερή στάθμη  $+270 \text{ m}$ , (β) αγωγό προσαγωγής με παροχή σχεδιασμού  $65 \text{ m}^3/\text{s}$  και υδραυλικές απώλειες  $3 \text{ m}$ , και (γ) σταθμό παραγωγής σε υψόμετρο  $+125 \text{ m}$ , που περιλαμβάνει δύο όμοιους στροβίλους, ισχύος  $40 \text{ MW}$  ο καθένας, δίνεται ότι το περασμένο έτος, ο ένας στροβίλος λειτούργησε  $1500$  ώρες και ο άλλος  $4000$  ώρες σε πλήρη ισχύ. Εκτιμήστε τον βαθμό απόδοσης και τον συντελεστή δυναμικότητας του έργου.

Αφού η ισχύς των στροβίλων είναι  $P = 2 \times 40 = 80 \text{ MW}$  και το καθαρό ύψος πτώσης  $H_n = 270 - 125 - 3 = 142 \text{ m}$ , ο βαθμός απόδοσης προκύπτει ίσο με  $\eta = P / (\gamma Q H_n) = 80\,000 / (9.81 \times 65 \times 142) = 0.88$ . Αφού η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το σύστημα των δύο στροβίλων ανήλθε σε  $E = (1500 + 4000) \times 40 / 1000 = 220 \text{ GWh}$ , ο συντελεστής δυναμικότητας εκτιμάται σε  $220\,000 / (8760 \times 80) = 0.314$ .

7. Σε θέση ποταμού, με μέση ετήσια παροχή  $8.0 \text{ m}^3/\text{s}$ , σχεδιάζεται μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο που θα εκμεταλλεύεται υψομετρική διαφορά  $500 \text{ m}$ , εκτρέποντας το 90% της απορροής σε γειτονική λεκάνη (η υπόλοιπη ποσότητα θα αξιοποιείται για τη διατήρηση μιας ελάχιστης περιβαλλοντικής ροής κατάντη του φράγματος). Κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται, εκτιμήστε τα παρακάτω μεγέθη, για την περίπτωση που το έργο λειτουργεί για παραγωγή ενέργειας (α) αιχμής και (β) βάσης:

- τον συντελεστή δυναμικότητας του έργου.
- τη μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- την παροχή σχεδιασμού του αγωγού πτώσης.
- τον τύπο των στροβίλων.
- την ισχύ των στροβίλων.

Η μέση ετήσια απορροή του ποταμού είναι  $V = 8.0 \times 365 \times 86\,400 \times 10^{-6} = 252.3 \text{ hm}^3$ , από το οποίο το 90% διατίθεται για παραγωγή ενέργειας, ήτοι  $V_E = 0.90 \times 252.3 = 227.1 \text{ hm}^3$ . Το εκτιμώμενο ύψος πτώσης, θεωρώντας ποσοστό 5% του ολικού ύψους πτώσης ως απώλειες κατά την προσαγωγή του νερού, είναι  $H_n = 0.95 \times 500 = 475 \text{ m}$ . Θεωρώντας βαθμό απόδοσης 90%, η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε  $E = 9.81 \times 0.90 \times 252.3 \times 475 / 3600 = 264.5 \text{ GWh}$ .

Η ετήσια ενέργεια και ο αντίστοιχος όγκος νερού δεν επηρεάζονται από το καθεστώς λειτουργίας του έργου, ήτοι αν είναι έργο αιχμής ή βάσης. Αυτό που επηρεάζεται είναι ο χρόνος λειτουργίας των στροβίλων, που στην πρώτη περίπτωση περιορίζεται σε λίγες ώρες ανά ημέρα (4 ως 6), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η λειτουργία είναι συστηματική, καθώς παράγεται ενέργεια βάσης σε μεγάλο ποσοστό του χρόνου. Ενδεικτικά, θεωρούμε συντελεστή δυναμικότητας 20 και 80%, για λειτουργία αιχμής και βάσης, αντίστοιχα. Για την εκτίμηση της παροχής σχεδιασμού του αγωγού πτώσης,  $Q$ , και της ισχύος των στροβίλων,  $P$ , πρέπει να είναι γνωστές οι ετήσιες ώρες παραγωγής ενέργειας,  $T$ , που υπολογίζονται με βάση τον συντελεστή δυναμικότητας (θεωρώντας, για απλούστευση, ότι οι στρόβιλοι λειτουργούν πάντοτε στην πλήρη ισχύ τους).

Στον πίνακα συμπληρώνονται τα ζητούμενα στοιχεία, σύμφωνα με τις παραπάνω υποθέσεις.

Τύπος έργου	Αιχμής	Βάσης
Συντελεστής δυναμικότητας, $CF$	0.20	0.80
Ετήσιος χρόνος λειτουργίας, $T = CF \times 8760 \text{ (h)}$	1752	7008
Παροχή σχεδιασμού στροβίλων, $Q = V/T \text{ (m}^3/\text{s)}$	36.0	9.0
Τύπος στροβίλων	Pelton	Pelton
Ισχύς στροβίλων, $P = E/T \text{ (MW)}$	151	32

Και στις δύο περιπτώσεις, επιλέγεται στρόβιλος Pelton, καθώς το ύψος πτώσης είναι πολύ μεγάλο, ενώ η παροχή σχετικά μικρή.

8. Έργο αντλησιοταμίευσης που περιλαμβάνει δύο δεξαμενές, σε υψόμετρο +250 και +180 m, διακινεί σε μέση ετήσια βάση  $200 \text{ hm}^3$ , παράγοντας  $30 \text{ GWh}$ . Θεωρώντας κοινό βαθμό απόδοσης 85% και στις δύο κατευθύνσεις (παραγωγή και άντληση), εκτιμήστε:

(α) τις απώλειες ενέργειας στον αγωγό προσαγωγής

Η παραγόμενη ενέργεια, σε  $\text{GWh}$ , δίνεται από τη σχέση  $E_n = \gamma \eta V H_n / 3600$ , όπου  $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού,  $\eta$  ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων,  $V$  ο όγκος νερού που διακινήθηκε από την άνω προς την κάτω δεξαμενή, και  $H_n$  το καθαρό ύψος πτώσης. Για  $E_n = 30 \text{ GWh}$ ,  $\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3$ ,  $\eta = 0.85$ , και  $V = 200 \text{ hm}^3$ , προκύπτει  $H_n = 64.8 \text{ m}$ . Οι δύο δεξαμενές έχουν υψομετρική διαφορά  $H = 250 - 180 = 70 \text{ m}$ , άρα η διαφορά  $\Delta H = H - H_n = 5.2 \text{ m}$  είναι οι απώλειες ενέργειας στον αγωγό.

(β) το μανομετρικό ύψος της αντλίας

Δεδομένου ότι διακινείται η ίδια ποσότητα νερού κατά την άντληση, μέσω του ίδιου αγωγού, οι απώλειες ενέργειας θα είναι οι ίδιες στις δύο κατευθύνσεις. Συνεπώς, το μανομετρικό ύψος κατά την άντληση είναι  $H_{\mu} = H + \Delta H = 75.2 \text{ m}$ .

(γ) το μέσο ετήσιο όφελος του έργου, για τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας 0.10 €/kWh και κόστος άντλησης 0.05 €/kWh

Το μέσο ετήσιο όφελος του συστήματος ισούται με τη διαφορά των εσόδων από την πώληση της ενέργειας που παράγεται και του κόστους άντλησης. Η ενέργεια που καταναλώνεται κατά την άντληση είναι ίση με  $E_A = \gamma V H_{\mu} / \eta_A \cdot 3600$ . Αντικαθιστώντας, για  $\eta_A = 0.85$  (κοινός βαθμό απόδοσης για άντληση και παραγωγή ενέργειας) προκύπτει  $E_A = 48.2 \text{ GWh}$ . Συνεπώς, το μέσο ετήσιο όφελος (σε εκατομμύρια ευρώ) είναι  $30.0 \times 0.10 - 48.2 \times 0.05 = 0.588 \text{ M€}$ .