

## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

### Μάθημα: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

Ακαδημαϊκό έτος: 2018-19

#### Πρότυπη άσκηση: Μελέτη προσθήκης υδροηλεκτρικών έργων σε αρδευτικό ταμιευτήρα

Σύστημα έργων εξυπηρέτησης των αρδευτικών αναγκών μιας περιοχής, που εκτιμώνται σε  $120 \text{ hm}^3$ , περιλαμβάνει: (α) φράγμα ύψους  $85 \text{ m}$ , με υψόμετρο στέψης  $+685 \text{ m}$ , (β) ταμιευτήρα, με ελάχιστη και μέγιστη στάθμη λειτουργίας  $+620 \text{ m}$  και  $+680 \text{ m}$ , αντίστοιχα, (γ) σήραγγα εκτροπής για την μεταφορά του αρδευτικού νερού σε γειτονική λεκάνη, και (δ) αγωγό υδροληψίας για τη διοχέτευση περιβαλλοντικής ροής  $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$  κατάντη του φράγματος. Στο σύστημα εξετάζεται η εγκατάσταση δύο έργων παραγωγής ενέργειας. Το πρώτο θα κατασκευαστεί στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής, σε υψόμετρο  $+100 \text{ m}$ , και θα λειτουργεί μόνο κατά την αρδευτική περίοδο (Μάιος-Σεπτέμβριος) σε εξάωρη καθημερινή βάση. Το δεύτερο έργο θα τοποθετηθεί στην έξοδο του αγωγού υδροληψίας, στο πόδα του φράγματος, και θα λειτουργεί σε συνεχή βάση, ώστε να εκμεταλλεύεται τη διερχόμενη περιβαλλοντική ροή.

Για τα υπόψη υδροηλεκτρικά έργα επιλέξτε τύπο και ισχύ στροβίλων και εκτιμήστε την μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας και τον συντελεστή δυναμικότητας, κάνοντας εύλογες παραδοχές σχετικά με τις υδραυλικές απώλειες στους δύο αγωγούς μεταφοράς και τον βαθμό απόδοσης των στροβίλων.

#### Λύση άσκησης

Στο σχήμα φαίνεται η γενική διάταξη του υπό μελέτη υδροσυστήματος, που περιλαμβάνει δύο σταθμούς παραγωγής υδροηλεκτρικής ενέργειας, στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής (ΥΗΣ 1) και την έξοδο του αγωγού διοχέτευσης της περιβαλλοντικής ροής στον ποταμό κατάντη του φράγματος (ΥΗΣ 2).

Αρχικά, γίνεται η παραδοχή βαθμού απόδοσης στροβίλων ίσου με  $\eta = 0.90$  (κοινός για τα δύο Υ/Η έργα) και ποσοστού υδραυλικών απωλειών στους αγωγούς προσαγωγής ίσο με  $5\%$  επί του αντίστοιχου ακαθάριστου ύψους πτώσης. Επίσης, θεωρείται ως ανάντη ενεργειακό υψόμετρο η μέση στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα, ήτοι  $650 \text{ m}$ .

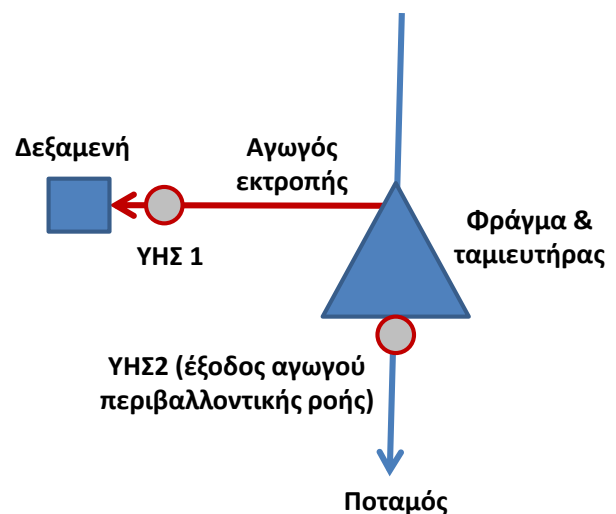
Το πρώτο έργο τοποθετείται στην έξοδο της σήραγγας εκτροπής, σε υψόμετρο  $+100 \text{ m}$ . Συνεπώς, το ακαθάριστο ύψος πτώσης είναι  $H = 650 - 100 = 550 \text{ m}$ , ενώ το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται χονδρικά σε  $H_n = (1 - 0.05) 550 = 522.5 \text{ m}$ . Οι στροβίλοι λειτουργούν έξι ώρες ημερησίως επί πέντε μήνες, ήτοι για χρόνο  $T = 900$  ώρες ανά έτος, ενώ ο διερχόμενος όγκος είναι  $120 \text{ hm}^3$ . Συνεπώς, η παροχή των στροβίλων είναι:

$$Q = (120 \times 10^6) / (5 \times 30 \times 86400) = 37.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

Για τον υπόψη συνδυασμό παροχής – ύψους πτώσης κρίνεται πλέον πρόσφορη η τοποθέτηση στροβίλων τύπου Pelton. Η απαιτούμενη ισχύς των στροβίλων είναι:

$$P = \gamma \eta Q H_n = 9.81 \text{ [kN/m}^3] \times 0.90 \times 37.0 \text{ [m}^3/\text{s}] \times 522.5 \text{ [m]} = 170.9 \times 10^3 \text{ kW} = 170.9 \text{ MW}$$

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι:



$$E = \gamma \eta V H_n = 9.81 \text{ [kN/m}^3] \times 0.90 \times 120 \times 10^6 \text{ [m}^3] \times 522.5 \text{ [m]} / 3600 \text{ [s/h]} = 153.8 \text{ GWh}$$

Τέλος, με την υπόθεση σταθερής παροχής λειτουργίας, ο συντελεστής δυναμικότητας (capacity factor) του έργου είναι:

$$CF = E / (P \times T_E) = T / T_E = 900 / 8760 = 10.3\%$$

Το δεύτερο έργο τοποθετείται στον πόδα του φράγματος, σε υψόμετρο +600 m (φράγμα ύψους 85 m, υψόμετρο στέψης +685 m). Συνεπώς, το ακαθάριστο ύψος πτώσης είναι  $H = 650 - 600 = 50$  m, ενώ το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται χονδρικά σε  $H_n = (1 - 0.05) 50 = 47.5$  m. Οι στρόβιλοι λειτουργούν σε συνεχή βάση, ήτοι για χρόνο  $T = 8760$  ώρες ανά έτος, με σταθερή παροχή  $Q = 1.0$  m<sup>3</sup>/s, συνεπώς ο διερχόμενος όγκος σε ετήσια βάση είναι:

$$V = 1.0 \times 365 \times 86400 / 10^6 = 31.5 \text{ hm}^3$$

Για τον υπόψη συνδυασμό παροχής – ύψους πτώσης κρίνεται πλέον πρόσφορη η τοποθέτηση στροβίλων τύπου Francis. Η απαιτούμενη ισχύς των στροβίλων είναι:

$$P = \gamma \eta Q H_n = 9.81 \text{ [kN/m}^3] \times 0.90 \times 1.0 \text{ [m}^3/\text{s]} \times 47.5 \text{ [m]} = 419 \text{ kW}$$

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι:

$$E = \gamma \eta V H_n = 9.81 \text{ [kN/m}^3] \times 0.90 \times 31.5 \times 10^6 \text{ [m}^3] \times 47.5 \text{ [m]} / 3600 \text{ [s/h]} = 3.7 \text{ GWh}$$

Προφανώς, αφού το έργο λειτουργεί αδιάλειπτα, ο συντελεστής δυναμικότητας είναι 100%.

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται τα βασικά μεγέθη των δύο έργων:

	ΥΗΣ 1	ΥΗΣ 2
Κύρια χρήση νερού	Αρδευτική	Περιβαλλοντική
Ετήσιος όγκος νερού (hm <sup>3</sup> )	120.0	31.5
Υψόμετρο ανάντη (m)	650.0	650.0
Υψόμετρο κατόντη (m)	100.0	600.0
Ολικό ύψος πτώσης (m)	550.0	50.0
Ώρες λειτουργίας στροβίλων (h)	900	8760
Παροχή στροβίλων (m <sup>3</sup> /s)	37.0	1.0
Τύπος στροβίλων	Pelton	Francis
Καθαρό ύψος πτώσης (m)	522.5	47.5
Ισχύς στροβίλων (MW)	170.9	0.42
Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)	153.8	3.7
Συντελεστής δυναμικότητας	0.103	1.000

#### Παρατηρήσεις:

- Πρόκειται για δύο έργα διαφορετικής κλίμακας, τόσο σε όρους ισχύος όσο και ετήσιας παραγωγής ενέργειας. Σύμφωνα με τη νομοθεσία, το πρώτο χαρακτηρίζεται ως μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο (ισχύς > 15 MW) και το δεύτερο ως μικρό. Είναι αξιοσημείωτο ότι βάσει του νόμου, το πρώτο έργο δεν πληρεί το ελάχιστο όριο των 1500 ωρών λειτουργίας ανά έτος, και ενδεχομένως να μην μπορεί να λάβει αδειοδότηση, παρόλο που από τεχνική σκοπιά πρόκειται για ένα σαφώς επωφελές έργο (σαφώς πιο επωφελές από το μικρό υδροηλεκτρικό έργο στον πόδα του φράγματος).

- Στα υδροηλεκτρικά έργα, ο συντελεστής δυναμικότητας δεν σχετίζεται με την ενεργειακή και οικονομική τους απόδοση. Στο παράδειγμα της άσκησης, το πρώτο έργο παράγει 50πλάσια ενέργεια σε σχέση με το δεύτερο, λειτουργώντας μόλις το 10% του χρόνου.
- Σχετικά με το πρώτο έργο, είναι απαραίτητο να συνδυαστεί με την κατασκευή αναρρυθμιστικής δεξαμενής κατάντη, δεδομένου ότι η λειτουργία του περιορίζεται σε έξι ώρες ημερησίως. Αντίθετα, η εκροή νερού για αρδευτική χρήση είναι συνεχής, το οποίο επιβάλλει την ύπαρξη αποθηκευτικού όγκου για τη χρονική ρύθμιση των εισροών και εκροών.
- Εφόσον κατασκευαστεί αναρρυθμιστική δεξαμενή επαρκούς χωρητικότητας, θα ήταν σκόπιμο να εξεταστεί η διαμόρφωση συστήματος αντλησιοταμίευσης που θα λειτουργεί τις υπόλοιπες ώρες της θερινής περιόδου, καθώς και τους χειμερινούς μήνες.
- Οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε χονδρικές παραδοχές των υδροενεργειακών μεγεθών. Ειδικότερα, το καθαρό ύψος πτώσης μπορεί να υπολογιστεί με καλή ακρίβεια αν είναι γνωστά τα γεωμετρικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των δύο αγωγών προσαγωγής (μήκος, διάμετρος, τραχύτητα) και η διερχόμενη παροχή (αντικείμενο Πολιτικού Μηχανικού), ενώ ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων καθορίζεται στη σχετική μελέτη (αντικείμενο Ηλεκτρολόγου-Μηχανολόγου Μηχανικού).
- Όσον αφορά στη στάθμη του ταμιευτήρα και τις εκροές για τις δύο χρήσεις νερού (αρδευτική, περιβαλλοντική), αυτές δεν είναι σταθερές αλλά εξαρτώνται από τη δίαιτα των υδρολογικών εισροών και τη διαχειριστική πολιτική του ταμιευτήρα. Αφού οι εισροές είναι τυχαίες μεταβλητές, τόσο η στάθμη όσο και οι εκροές είναι επίσης τυχαίες μεταβλητές, που διέπονται από αβεβαιότητα. Στη μελέτη λειτουργίας ενός ταμιευτήρα (και γενικότερα, των συστημάτων υδατικών πόρων), η ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας γίνεται μέσω *προσομοίωσης*. Καίριο ζητούμενο αυτής της προσέγγισης είναι η εκτίμηση της *αξιοπιστίας* των υδατικών συστημάτων για την κάλυψη των διαφόρων χρήσεων νερού που εξυπηρετούν. Στην παραπάνω ανάλυση, για απλούστευση θεωρήθηκε ότι τόσο η αρδευτική ζήτηση όσο και η περιβαλλοντική καλύπτονται με απόλυτη βεβαιότητα (100% αξιοπιστία), κάτι που δεν ισχύει στην πραγματικότητα.