

Το υδροηλεκτρικό έργο Πλαστήρα, ένα από τα παλαιότερα της χώρας (έναρξη λειτουργίας 1960) περιλαμβάνει τοξωτό φράγμα ύψους 83 m επί του ποταμού Ταυρωπού ή Μέγδοβα (παραπόταμος του Αχελώου), για τη δημιουργία ταμιευτήρα, που συλλέγει τα νερά της ανάντη υδρολογικής λεκάνης, η μέση ετήσια απορροή της οποίας εκτιμάται σε  $150 \text{ hm}^3$ . Η κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι +776.0 και +792.0 m, αντίστοιχα, με την ωφέλιμη χωρητικότητά του να ανέρχεται σε  $286 \text{ hm}^3$ . Από τον πύργο υδροληψίας, τα νερά του ταμιευτήρα εκτρέπονται αρχικά μέσω σήραγγας, μήκους 2625 m και διαμέτρου 3.5 m, και στη συνέχεια μέσω αγωγού πτώσης, μήκους 2985 m και κυμαινόμενης διαμέτρου 3.0/2.6/2.4 m, προς τον σταθμό παραγωγής, ο οποίος βρίσκεται στις παρυφές της Θεσσαλικής πεδιάδας, με υψόμετρο εξόδου +206.0 m. Ο σταθμός αποτελείται από τρεις όμοιους στροβίλους Pelton, ισχύος 43.3 MW και ονομαστικής παροχής  $8.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , έκαστος, για την παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας αιχμής. Με βάση στοιχεία της ΔΕΗ, η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας του συστήματος ανέρχεται σε 198 GWh, ενώ από το ιστορικό λειτουργίας του έργου είναι γνωστό ότι οι υπερχειλίσεις του ταμιευτήρα είναι εξαιρετικά σπάνιες.

Με βάση τα υδρολογικά και γεωμετρικά μεγέθη του συστήματος, και κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται, τεκμηριώστε την επιλογή του συγκεκριμένου υδροενεργειακού σχεδιασμού, ήτοι του τύπου, ισχύος και παροχής των στροβίλων, καθώς και την εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας.

#### **Αρχικές εκτιμήσεις (εμπειρική εκτίμηση υδραυλικών απωλειών)**

Σε πρώτο επίπεδο, γίνεται μια χονδρική παραδοχή για τις υδραυλικές απώλειες, οι οποίες λαμβάνονται ίσες με το 5% του ακαθάριστου ύψους πτώσης. Επειδή το τελευταίο εξαρτάται από την μεταβαλλόμενη στάθμη του ταμιευτήρα, θεωρείται μια αντιπροσωπευτική τιμή της, ίση με το μέσο όρο της κατώτατης και ανώτατης στάθμης λειτουργίας, ήτοι  $(776.0 + 792.0)/2 = 784.0 \text{ m}$  (στην πραγματικότητα, στους Υ/Η ταμιευτήρες, η στάθμη διατηρείται αρκετά πιο ψηλά από τη μέση τιμή, και μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση θα ήταν τουλάχιστον στα  $2/3$  των δύο ορίων). Αφαιρώντας από το υψόμετρο του σταθμού παραγωγής, προκύπτει μια χονδρική εκτίμηση του ακαθάριστου ύψους πτώσης ίση με  $H = 784.0 - 206.0 = 578.0 \text{ m}$ . Συνακόλουθα, μια χονδρική εκτίμηση του καθαρού ύψους πτώσης είναι το 95% της ως άνω τιμής, οπότε  $H_n = 549.1 \text{ m}$ .

Όσον αφορά στον όγκο νερού που διέρχεται σε μέση ετήσια βάση από τους στροβίλους, μπορεί να θεωρηθεί ίσος με τη μέση ετήσια απορροή της λεκάνης ( $V = 150 \text{ hm}^3$ ), δεδομένου ότι στον ταμιευτήρα παράγονται αμελητέες υπερχειλίσεις, δεν πραγματοποιούνται εκροές νερού που διέρχονται εκτός των στροβίλων (π.χ. για τη διοχέτευση περιβαλλοντικής παροχής κατάντη του φράγματος) και δεν υπάρχουν ουσιώδεις απώλειες νερού από τον ταμιευτήρα, λόγω διαφυγών.

Θέτοντας μια εύλογη τιμή του βαθμού απόδοσης του συστήματος, ίση με 0.90 (τυπική τιμή για μεγάλο υδροηλεκτρικό έργο), η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε:

$$E = \eta \gamma V H_n = 0.90 \times 9.81 \times 150 \times 549.1/3600 = 202 \text{ GWh}$$

Η τιμή αυτή είναι πολύ κοντά στη μέση ιστορική που αναφέρεται από τη ΔΕΗ.

Στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε θεωρώντας μια τυπική τιμή ειδικής ενέργειας ίσης με  $0.23 \text{ GWh/hm}^4$ , οπότε η ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε:

$$E = \psi V H = 0.23 \times 150 \times 578/100 = 199 \text{ GWh}$$

Αφού πρόκειται για έργο αιχμής, ένας τυπικός χρόνος λειτουργίας των στροβίλων είναι της τάξης των 1500 ωρών ετησίως. Διαιρώντας την ετήσια παραγωγή ενέργειας με τον παραπάνω χρόνο, προκύπτει μια χονδρική εκτίμηση της απαιτούμενη ισχύος του σταθμού παραγωγής σε περίπου  $200\,000 / 1500 = 133 \text{ MW}$ . Ομοίως, διαιρώντας τον μέσο ετήσιο όγκο νερού που διοχετεύεται στους στροβίλους με τον χρόνο, εκτιμάται η απαιτούμενη παροχολογική τους σε περίπου  $(150 \times 10^6)/(1500 \times 3600) = 27.8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Όσον αφορά στον τύπο των στροβίλων, ο συνδυασμός του πολύ μεγάλου ύψους πτώσης με τη σχετικά μικρή παροχή καθιστά προφανή την επιλογή στροβίλων δράσης Pelton.

### Αναλυτική εκτίμηση υδραυλικών απωλειών

Αφού δίνεται η ονομαστική παροχή των στροβίλων ( $3 \times 8.8 = 26.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ) καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του συστήματος προσαγωγής (σήραγγα εκτροπής και αγωγός πτώσης), μπορεί να γίνει αναλυτική εκτίμηση των υδραυλικών απωλειών, άρα και πιο τεκμηριωμένη εκτίμηση του καθαρού ύψους πτώσης που εισέρχεται στις εκτιμήσεις των λοιπών υδροενεργειακών μεγεθών.

Επειδή η διάμετρος του κατάντη τμήματος (αγωγός πτώσης) είναι μεταβλητή, χωρίς να είναι γνωστά τα επιμέρους μήκη, θεωρούμε ως αντιπροσωπευτική τιμή την ενδιάμεση, ήτοι 2.60 m. Και στα δύο τμήματα, λαμβάνεται ισοδύναμη τραχύτητα  $k_s = 1.0 \text{ mm}$  και συντελεστής τοπικών απωλειών  $K = 1.0$ . Επισημαίνεται ότι η έξοδος του νερού γίνεται στην ατμόσφαιρα (στροβίλοι δράσης), οπότε η τιμή του  $K$  στον αγωγό πτώσης κυρίως εμπεριέχει τις τοπικές απώλειες στο ακροφύσιο.

Οι υδραυλικοί υπολογισμοί στα δύο τμήματα συνοψίζονται στον Πίνακα 1. Οι λεπτομέρειες της υπολογιστικής διαδικασίας εξηγούνται στην πρότυπη άσκηση 2. Αθροίζοντας τις απώλειες στους δύο αγωγούς, προκύπτει μια καθολική τιμή απωλειών ίση με 28.80 m, που πράγματι αντιστοιχεί στο 5% του ακαθάριστο ύψους πτώσης.

**Πίνακας 1:** Σύνοψη υδραυλικών υπολογισμών

	Σήραγγα εκτροπής	Αγωγός πτώσης
Παροχή ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	26.40	26.40
Διάμετρος (m)	3.50	2.60
Μήκος (m)	2625	2985
Ισοδύναμη τραχύτητα (m)	0.001	0.001
Κινηματική συνεκτικότητα ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.1 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^{-6}$
Ταχύτητα (m/s)	2.74	4.97
Αριθμός Reynolds	8 730 785	11 752 980
Σχετική τραχύτητα	0.00029	0.00038
Συντελεστής τριβών	0.01488	0.01581
Γραμμικές απώλειες (m)	4.28	22.88
Συντελεστής τοπικών απωλειών	1.0	1.0
Τοπικές απώλειες (m)	0.38	1.26
Συνολικές απώλειες (m)	4.67	24.14

### Αξιολόγηση σχεδιασμού

Η παραπάνω ανάλυση επιβεβαιώνει τόσο η επιλογή της εγκατεστημένης ισχύος των  $3 \times 43.3 = 129.9$  MW, όσο και της ονομαστικής τους παροχής, ήτοι  $26.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Σημειώνεται ότι αν διαιρεθεί η εκτιμώμενη παραγωγή ενέργειας της ΔΕΗ με την πραγματική ισχύ του συστήματος, ο χρόνος λειτουργίας που προκύπτει είναι ίσος με  $202\,000 / 129.9 = 1555$  ώρες, πολύ κοντά δηλαδή στην προαναφερθείσα εκτίμηση των 1500 ωρών. Κατ' αντιστοιχία, ο συντελεστής δυναμικότητας του συστήματος, σε μέση ετήσια κλίμακα, είναι:

$$CF = \frac{202\,000}{129.9 \times 8760} = 17.8\%$$

Η τιμή αυτή είναι χαμηλή επειδή αποτελεί επιλογή του σχεδιασμού του έργου η λειτουργία του ως μονάδας αιχμής, καθώς αυτός είναι ο ρόλος των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων στο ενεργειακό μίγμα της χώρας. Στην υποθετική περίπτωση που είχε επιλεχθεί η χρήση του έργου για παραγωγή ενέργειας βάσης, τότε ο χρόνος λειτουργίας θα ήταν μεγαλύτερος, ο συντελεστής δυναμικότητας υψηλότερος, και θα απαιτούνταν μικρότερη ισχύς στροβίλων και μικρότερη παροχετευτικότητα, άρα και μικρότερες διαστάσεις των μονάδων παραγωγής και του συστήματος προσαγωγής του νερού.