

Ο σταθμός παραγωγής μικρού υδροηλεκτρικού έργου εκτροπής, το οποίο εκμεταλλεύεται ακαθάριστο ύψος πτώσης 60 m, περιλαμβάνει δύο στροβίλους Francis, ισχύος 3.5 και 1.0 MW, αντίστοιχα. Ο βαθμός απόδοσης κάθε στροβίλου δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

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

όπου Q_{min} και Q_{max} η ελάχιστη και μέγιστη παροχή λειτουργίας του στροβίλου, $\eta_{T,min}$ και $\eta_{T,max}$ η αντίστοιχη τιμή του βαθμού απόδοσης, και a , b παράμετροι. Για τον συγκεκριμένο τύπο στροβίλων εκτιμάται ότι $\eta_{T,min} = 0.330$, $\eta_{T,max} = 0.930$, $a = 0.780$, $b = 3.110$, ενώ η ελάχιστη παροχή λειτουργίας κάθε στροβίλου είναι ίση με το 30% της αντίστοιχης μέγιστης (βλ. σημειώσεις υδροστροβίλων). Ακόμη, ο βαθμός απόδοσης του λοιπού Η/Μ εξοπλισμού (γεννήτριες, μετασχηματιστές, κτλ.) θεωρείται σταθερός και ίσος με $\eta_{H/M} = 0.95$.

Με βάση προηγηθείσα ανάλυση, για το υπό μελέτη έργο έχει καταρτιστεί μια προσεγγιστική αναλυτική σχέση εκτίμησης των υδραυλικών απωλειών, ήτοι (βλ. πρότυπη άσκηση 2):

$$\Delta H = 0.0191 Q^{2.18} \quad (2)$$

όπου Q η εκτρεπόμενη παροχή, η οποία διέρχεται από τον αγωγό πτώσης (σε m^3/s), και ΔH οι υδραυλικές απώλειες (σε m) κατά την προσαγωγή του νερού, γραμμικές (λόγω τριβών) και τοπικές (λόγω ανάπτυξης τύρβης σε όλες τις γεωμετρικές μεταβολές).

Τέλος, από την υδρολογική μελέτη του έργου έχει προσδιοριστεί η περιβαλλοντική ροή που πρέπει να αφήνεται σε συνεχή βάση κατάντη της υδροληψίας, η οποία είναι ίση με $0.30 m^3/s$.

Με βάση τα παραπάνω εκτιμήστε:

(α) Τις παροχές λειτουργίας (ελάχιστη, μέγιστη) των δύο στροβίλων.

(β) Την κατανομή των ροών και της παραγόμενης ισχύος, για έξι χαρακτηριστικές τιμές της μέσης ημερήσιας παροχής του ποταμού λίγο ανάντη της θέσης υδροληψίας, ήτοι 0.10, 0.50, 2.0, 4.5, 8.0 και $20.0 m^3/s$.

Χαρακτηριστικά μεγέθη λειτουργίας στροβίλων

Συμβατικά, στους συμβολισμούς των επιμέρους μεγεθών, θα χρησιμοποιείται δείκτης (1) για τον μεγάλο στροβίλο, ισχύος $P_{1,max} = 3.5 MW$, και ο δείκτης (2) για τον μικρό, ισχύος $P_{2,max} = 1.0 MW$. Συνεπώς, η μέγιστη παροχή λειτουργίας των δύο στροβίλων συμβολίζεται με $Q_{1,max}$ και $Q_{2,max}$, αντίστοιχα, ενώ η ελάχιστη τιμή τους, για τον συγκεκριμένο τύπο, είναι το 30% της μέγιστης, ήτοι $Q_{1,min} = 0.30 Q_{1,max}$ και $Q_{2,min} = 0.30 Q_{2,max}$, αντίστοιχα. Η μέγιστη παροχή (παροχετευτικότητα) του συστήματος είναι το άθροισμα των επιμέρους, ήτοι $q_{max} = q_{1,max} + q_{2,max}$, ενώ η ελάχιστη είναι η μικρότερη εκ των $Q_{1,min}$ και $Q_{2,min}$, ήτοι η δεύτερη (ελάχιστη παροχή λειτουργίας μικρού στροβίλου).

Η συνολική (εγκατεστημένη) ισχύς του σταθμού είναι $P_{max} = P_{1,max} + P_{2,max} = 5.0 MW$, η οποία αποδίδεται όταν διέρχεται η μέγιστη παροχή του συστήματος, q_{max} . Για την υπόψη παροχή, ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων είναι $\eta_{max} = 0.930$, ενώ ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι:

$$\eta_{max} = \eta_{T,max} \times \eta_{H/M} = 0.930 \times 0.950 = 0.884 \quad (3)$$

Η μέγιστη παροχή του συστήματος εκτιμάται από την επίλυση της σχέσης:

$$P_{max} = \gamma \eta_{max} Q_{max} H_n \quad (4)$$

όπου $\gamma = 9.81 \text{ KN/m}^3$ και H_n το καθαρό ύψος πτώσης, ήτοι το ακαθάριστο (στην προκειμένη περίπτωση, 60 m), αφαιρουμένων των υδραυλικών απωλειών (για τις παραπάνω μονάδες, η ισχύς προκύπτει σε kW). Η σχέση εκτίμησης του καθαρού ύψους πτώσης γράφεται¹:

$$H_n = 60 - 0.0191 Q^{2.18} \quad (5)$$

Συνδυάζοντας τις (4) και (5) προκύπτει μια πεπλεγμένη έκφραση, η οποία επιλύεται με δοκιμές, μέσω της αναδρομικής σχέσης:

$$Q_{max}^{[k]} = \frac{P_{max}}{\gamma \eta_{max} H_n(Q_{max}^{[k-1]})} \quad (6)$$

Αρχικά, θεωρείται μια εύλογη προσεγγιστική τιμή του καθαρού ύψους πτώσης, ως ποσοστό ίσο με το 95% του ακαθάριστου, συνεπώς ως αρχική εκτιμήτρια για την επίλυση της (6) λαμβάνεται η τιμή $H_n^{[0]} = 0.95 \times 60 = 57.00 \text{ m}$. Με βάση την ως άνω εκτίμηση, επιλύοντας την σχέση (4) ως προς την παροχή προκύπτει $Q_{max}^{[1]} = 9.11 \text{ m}^3/\text{s}$. Εισάγοντας την τιμή αυτή στη σχέση (5), λαμβάνεται μια νέα εκτίμηση του καθαρού ύψους πτώσης, ήτοι $H_n^{[1]} = 60 - 0.0191 \times 9.11^{2.18} = 57.64 \text{ m}$. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές, ώσπου η διαδικασία να συγκλίνει στις τελικές εκτιμήσεις $H_n = 57.70 \text{ m}$ και $Q_{max} = 9.00 \text{ m}^3/\text{s}$.

Η μέγιστη παροχή του συστήματος επιμερίζεται στους δύο στροβίλους αναλογικά με την ισχύ τους. Συνεπώς, η μέγιστη παροχή λειτουργίας του μεγάλου στροβίλου είναι $Q_{1,max} = 7.00 \text{ m}^3/\text{s}$ και του μικρού $Q_{2,max} = 2.00 \text{ m}^3/\text{s}$. Οι αντίστοιχες ελάχιστες παροχές λειτουργίας είναι $Q_{1,min} = 2.10 \text{ m}^3/\text{s}$ και $Q_{2,min} = 0.60 \text{ m}^3/\text{s}$. Η τελευταία είναι και η ελάχιστη παροχή του όλου συστήματος, καθώς αν εκτραπεί προς το σταθμό μικρότερη ροή, το νερό θα διέλθει από τους στροβίλους χωρίς να παράξει ηλεκτρική ισχύ.

Επιμερισμός ροών και παραγόμενης ισχύος για διάφορες τιμές της ανάντη παροχής

Σενάριο A: Ανάντη παροχή 0.10 m³/s

Η παροχή του ποταμού είναι μικρότερη από την απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή των 0.30 m³/s, οπότε θα διέλθει στο σύνολό της από την υδροληψία, χωρίς να εκτραπεί καμία ποσότητα προς τη δεξαμενή φόρτισης και τον σταθμό παραγωγής. Υπενθυμίζεται ότι σε τέτοιου τύπου έργα, η περιβαλλοντική ροή διέρχεται από τον ιχθυοδιάδρομο.

Σενάριο B: Ανάντη παροχή 0.50 m³/s

Η συνολική παροχή θα επιμεριστεί σε 0.30 m³/s, που είναι η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή, ενώ τα υπόλοιπα 0.20 m³/s θα εκτραπούν μέσω της υδροληψίας και τελικά θα διέλθουν από τους στροβίλους, χωρίς ωστόσο να μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ισχύς (συνεπώς η εν λόγω ποσότητα νερού δεν θεωρείται *εκμεταλλεύσιμη*). Αυτό συμβαίνει επειδή η διερχόμενη παροχή των 0.20 m³/s είναι μικρότερη της ελάχιστης παροχής λειτουργίας του συστήματος, ήτοι 0.60 m³/s (ελάχιστη παροχή λειτουργίας μικρού στροβίλου).

¹ Η αναλυτική αυτή σχέση είναι προσεγγιστική, και εφαρμόζεται για απλούστευση των υπολογισμών. Η πληρέστερη προσέγγιση επιβάλλει λεπτομερείς υδραυλικούς υπολογισμούς των γραμμικών και τοπικών απωλειών κατά την προσαγωγή του νερού, σύμφωνα με την πρότυπη άσκηση 2.

Σενάριο Γ: Ανάντη παροχή 2.00 m³/s

Η συνολική παροχή θα επιμεριστεί σε 0.30 m³/s, που είναι η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή, ενώ τα υπόλοιπα 1.70 m³/s θα εκτραπούν μέσω της υδροληψίας προς τη δεξαμενή φόρτισης, και εν συνεχεία, μέσω του αγωγού πτώσης, θα κατευθυνθεί προς τον σταθμό παραγωγής. Η τιμή των 1.70 m³/s υπερβαίνει την ελάχιστη παροχή λειτουργίας του μικρού στροβίλου (0.60 m³/s), και άρα θεωρείται εκμεταλλεύσιμη, ενώ υπολείπεται της ελάχιστης παροχής λειτουργίας του μεγάλου στροβίλου (2.10 m³/s). Συνεπώς, θα ενεργοποιηθεί μόνο ο μικρός στροβίλος, από τον οποίο θα διέλθει το σύνολο των 1.70 m³/s. Σύμφωνα με τη σχέση (1), ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων τύπου Francis για την εν λόγω παροχή είναι:

$$\eta_T = 0.330 + \left(1 - \left(1 - \left(\frac{1.70 - 0.60}{1.40} \right)^{0.78} \right)^{3.11} \right) 0.60 = 0.928 \quad (7)$$

Παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης έχει πρακτικά μεγιστοποιηθεί, καθώς η διερχόμενη παροχή είναι ίση με το 85% της μέγιστης. Λαμβάνοντας υπόψη και τον λοιπό Η/Μ εξοπλισμό, ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος εκτιμάται σε 0.881, το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται, μέσω της εξ. (5), σε 59.94 m. Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, η αποδιδόμενη ισχύς εκτιμάται, μέσω της εξ. (4), σε 0.88 MW, που αντιστοιχεί σε ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 21.2 MWh.

Σενάριο Δ: Ανάντη παροχή 4.50 m³/s

Η συνολική παροχή θα επιμεριστεί σε 0.30 m³/s, που είναι η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή, ενώ τα υπόλοιπα 4.20 m³/s θα εκτραπούν μέσω της υδροληψίας. Η τιμή αυτή είναι εντός του εύρους λειτουργίας του μεγάλου στροβίλου (ήτοι από 2.10 έως 7.00 m³/s), συνεπώς, θα ενεργοποιηθεί μόνο ο εν λόγω στροβίλος, από τον οποίο θα διέλθει το σύνολο της παροχής που εκτράπηκε. Μετά από υπολογισμούς, προκύπτουν συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος ίσος με 0.824, καθαρό ύψος πτώσης 59.56 m, αποδιδόμενη ισχύς 2.02 MW και ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 48.5 MWh.

Σενάριο Ε: Ανάντη παροχή 8.00 m³/s

Η συνολική παροχή θα επιμεριστεί σε 0.30 m³/s, που είναι η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή, ενώ τα υπόλοιπα 7.70 m³/s θα εκτραπούν μέσω της υδροληψίας. Η τιμή αυτή υπερβαίνει την μέγιστη παροχή λειτουργίας του μεγάλου στροβίλου (7.00 m³/s), συνεπώς η υπόλοιπη ποσότητα, ήτοι 0.70 m³/s, θα διέλθει από τον μικρό στροβίλο. Συνεπώς, στην προκειμένη περίπτωση ενεργοποιούνται και οι δύο στροβίλοι, με τον πρώτο να λειτουργεί με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης (καθώς η παροχή του μεγιστοποιείται), ήτοι 0.884, και τον δεύτερο με σημαντικά χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, ήτοι 0.513, καθώς από αυτός διέρχεται μικρό μόνο ποσοστό της μέγιστης παροχής του. Για τη συνολικά εκτρεπόμενη παροχή (7.70 m³/s), το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται σε 58.36 m (κοινό για τους δύο στροβίλους, καθώς αφορά σε υδραυλικές απώλειες κατά την προσαγωγή του νερού), ενώ η επιμέρους παραγωγή ισχύος είναι 3.54 και 0.21 MW (σύνολο 3.75 MW), που αντιστοιχεί σε ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ίση με 89.9 MWh.

Σενάριο ΣΤ: Ανάντη παροχή 20.00 m³/s

Η συνολική παροχή θα επιμεριστεί σε 0.30 m³/s, που είναι η απαιτούμενη περιβαλλοντική ροή, ενώ η υπολειπόμενη ποσότητα των 19.70 m³/s υπερβαίνει την παροχетеυτικότητα των στροβίλων (9.00 m³/s). Συνεπώς, θα εκτραπεί προς τον σταθμό παραγωγής η μέγιστη δυνατή

ποσότητα, ήτοι $9.00 \text{ m}^3/\text{s}$, και το σύστημα θα λειτουργήσει στην πλήρη ισχύ του, ήτοι 4.50 MW (δεν απαιτούνται αναλυτικοί υπολογισμοί), παράγοντας, στην ημερήσια κλίμακα, τη μέγιστη εφικτή ηλεκτρική ενέργεια, ήτοι 108.0 MWh . Τα υπόλοιπα $19.70 - 9.00 = 10.70 \text{ m}^3/\text{s}$ θα διοχετευτούν κατάντη της υδροληψίας (όπως προφανώς και η περιβαλλοντική παροχή), μέσω του υπερχειλιστή.

Οι πλήρεις υπολογισμοί για τις έξι περιπτώσεις (σενάρια παροχών ποταμού ανάντη της θέσης υδροληψίας) που εξετάστηκαν τυποποιούνται στον κάτωθι συγκεντρωτικό πίνακα:

Σενάριο λειτουργίας	A	B	Γ	Δ	Ε	ΣΤ
Παροχή ποταμού ανάντη υδροληψίας (m^3/s)	0.10	0.50	2.00	4.50	8.00	20.00
Περιβαλλοντική ροή (m^3/s)	0.10	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Παροχή υπερχειλίσης (m^3/s)	-	-	-	-	-	10.70
Εκτρεπόμενη παροχή (m^3/s)	-	0.20	1.70	4.20	7.70	9.00
Καθαρό ύψος πτώσης (m)	-	60.00	59.94	59.56	58.36	57.70
Εκμεταλλεύσιμη παροχή στρόβιλου 1 (m^3/s)	-	-	-	4.20	7.00	7.00
Εκμεταλλεύσιμη παροχή στρόβιλου 2 (m^3/s)	-	-	1.70	-	0.70	2.00
Συνολικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου 1	-	-	-	0.824	0.884	0.884
Συνολικός βαθμός απόδοσης στρόβιλου 2	-	-	0.881	-	0.513	0.884
Παραγωγή ισχύος από στρόβιλο 1 (MW)	-	-	-	2.02	3.54	3.50
Παραγωγή ισχύος από στρόβιλο 2 (MW)	-	-	0.88	-	0.21	1.00
Συνολική παραγωγή ισχύος συστήματος (MW)	-	-	0.88	2.02	3.75	4.50
Ημερήσια παραγωγή ηλ. ενέργειας (MWh)	-	-	21.1	48.5	89.9	108.0