

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ – ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Μάθημα: Ανανεώσιμη Ενέργεια και Υδροηλεκτρικά Έργα

Εξ αποστάσεως (ηλεκτρονική) εξέταση Ιουνίου 2021

Ερωτήσεις συνοπτικής ανάπτυξης (5 × 0.5 = 2.5 μονάδες)

1. Εξηγήστε για ποιον λόγο ένας υδροηλεκτρικός ταμιευτήρας που χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας αιχμής έχει χαμηλό συντελεστή δυναμικότητας.

Η ενέργεια αιχμής παράγεται για μικρό χρονικό διάστημα, συνεπώς οι στρόβιλοι λειτουργούν λίγες ώρες καθημερινά (ενδεικτικά, 5-6 ώρες ημερησίως, ήτοι περίπου 2000 ώρες ετησίως), με μεγάλη ισχύ. Αναγκαστικά, αυτό συνεπάγεται μικρό συντελεστή δυναμικότητας, της τάξης του 20 έως 25%.

2. Εξηγήστε τη σκοπιμότητα διαμόρφωσης μίγματος στροβίλων διαφορετικής ισχύος σε μικρά υδροηλεκτρικά έργα χωρίς ταμίευση.

Δεδομένου ότι κάθε στρόβιλος λειτουργεί σε δεδομένο εύρος παροχών, εξαρτώμενο από την ισχύ του, με τη διαμόρφωση μίγματος διαφορετικής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί η εκμετάλλευση σημαντικά μεγάλου εύρους παροχών. Η διαμόρφωση αυτή αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο σταθμίζονται τα οφέλη από την πώληση ενέργειας έναντι του κόστους του έργου.

3. Εκτιμήστε, κάνοντας εύλογες παραδοχές, την μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας μεγάλου υδροηλεκτρικού έργου, που πρόκειται να κατασκευαστεί θέση ποταμού, με μέση ετήσια απορροή 500 hm^3 , και θα εκμεταλλεύεται ακαθάριστο ύψος πτώσης 150 m.

Η παραγόμενη ενέργεια δίνεται από τη σχέση $E = \gamma \eta V H_n$, όπου η ο βαθμός απόδοσης του συστήματος (πρακτικά σταθερός, για μεγάλα Υ/Η έργα), V η ετήσια εκροή από τους στροβίλους, και H_n το καθαρό ύψος πτώσης, που εκτιμάται αφαιρώντας από το ακαθάριστο ύψος τις υδραυλικές απώλειες κατά την προσαγωγή του νερού. Ενδεικτικά, θεωρούμε βαθμό απόδοσης 0.90, ετήσια εκροή ίση με το 85% της μέσης ετήσιας απορροής (η απομείωση λαμβάνει υπόψη την οικολογική παροχή και τις απώλειες λόγω υπερχειλίσεων), και υδραυλικές απώλειες ίσες με το 5% του ακαθάριστου ύψους πτώσης, οπότε η μέση παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε περίπου 150 GWh.

4. Εκτιμήστε τον βαθμό απόδοσης ανεμογεννήτριας διαμέτρου 90 m και ισχύος 2.0 MW, όταν λειτουργεί στη μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανέμου.

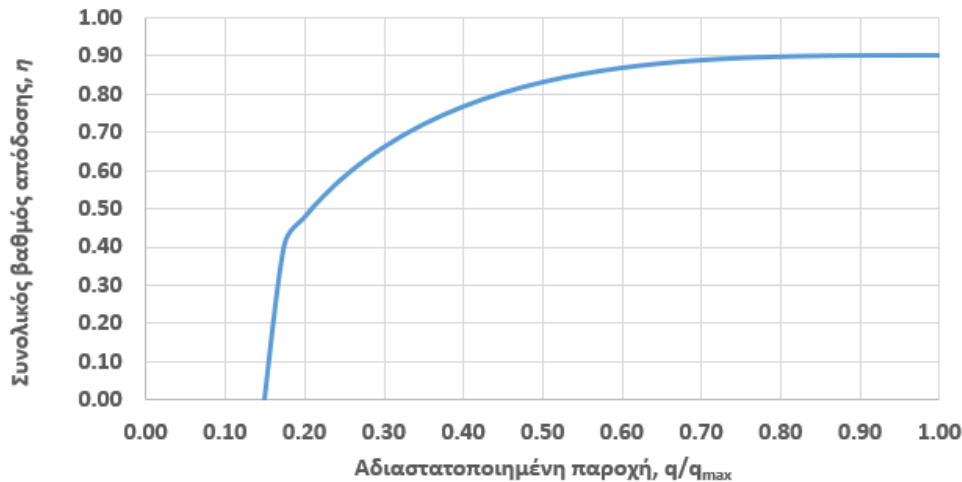
Στις ανεμογεννήτριες, η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα ανέμου είναι 25 m/s, για την οποία η θεωρητική αιολική ισχύς ανέρχεται σε $P_A = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3 = 49.7 \text{ MW}$ (πυκνότητα αέρα 1.225 kg/m^3). Η αποδιδόμενη ισχύς είναι 2.0 MW, συνεπώς ο βαθμός απόδοσης εκτιμάται σε $2.0/49.7 = 0.04$. Η πολύ χαμηλή τιμή οφείλεται στο γεγονός ότι για μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου, η καμπύλη ισχύος παραμένει σταθερή, ενώ η αιολική ισχύς αυξάνει με ρυθμό ανάλογο του V^3 .

5. Εκτιμήστε τις συνολικές απώλειες ενέργειας σε ένα έργο αντλησιοταμίευσης, υποθέτοντας κοινό βαθμό απόδοσης στην παραγωγή και την άντληση, ίσο με 85%, και αγνοώντας τις υδραυλικές απώλειες στον αγωγό προσαγωγής.

Αγνοώντας τις υδραυλικές απώλειες, το μανομετρικό ύψος στην άντληση ταυτίζεται με το καθαρό ύψος πτώσης στην παραγωγή ενέργειας, οπότε θεωρώντας κοινό βαθμό απόδοσης, η , οι συνολικές απώλειες ενέργειας ανέρχονται σε $1 - \eta^2 = 0.278$.

Άσκηση 1 (3.0 μονάδες)

Σε μικρό υδροηλεκτρικό έργο εκτροπής που εκμεταλλεύεται καθαρό ύψος πτώσης 100 m, τοποθετήθηκε αρχικά ένας στρόβιλος Francis, ισχύος 5.0 MW, ενώ προγραμματίζεται η τοποθέτηση ενός ακόμη στρόβιλου Francis, μικρότερης ισχύος. Στο διάγραμμα δίνεται η σχέση μεταβολής του συνολικού βαθμού απόδοσης για τον συγκεκριμένο τύπο στρόβιλου, συναρτήσει της αδιαστατοποιημένης παροχής. Δίνεται ακόμη ότι η οικολογική παροχή που αφήνεται κατάντη της υδροληψίας είναι $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$.



α) Εκτιμήστε το εύρος παροχών λειτουργίας του αρχικού στρόβιλου. (0.50 μονάδες)

Η μέγιστη παροχή του στρόβιλου είναι $q_{max} = \frac{P_{max}}{\gamma \eta_{max} h_n}$, όπου η_{max} ο μέγιστος βαθμός απόδοσης, για $q = q_{max}$, ήτοι 0.90. Αντικαθιστώντας προκύπτει $q_{max} = 5.66 \text{ m}^3/\text{s}$. Με βάση το διάγραμμα, η ελάχιστη παροχή λειτουργίας είναι το 15% της μέγιστης, ήτοι $q_{min} = 0.85 \text{ m}^3/\text{s}$.

β) Εκτιμήστε την ισχύ που θα πρέπει να έχει ο δεύτερος στρόβιλος, προκειμένου το έργο να εκμεταλλεύεται παροχές μεγαλύτερες των $0.30 \text{ m}^3/\text{s}$. (0.75 μονάδες)

Αφού η ελάχιστη παροχή λειτουργίας του δεύτερου στρόβιλου είναι το 15% της μέγιστης, ισχύει $q_{max} = q_{min}/0.15 = 2.00 \text{ m}^3/\text{s}$, για την οποία προκύπτει ισχύς $P = \gamma \eta_{max} q_{max} h_n = 1.77 \text{ MW}$.

γ) Εκτιμήστε τον συντελεστή δυναμικότητας του έργου και αξιολογήστε την αποδοτικότητά του, δεδομένου ότι με την τοποθέτηση του δεύτερου στρόβιλου έργου η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται ότι θα φτάνει τις 18.0 GWh (0.50 μονάδες)

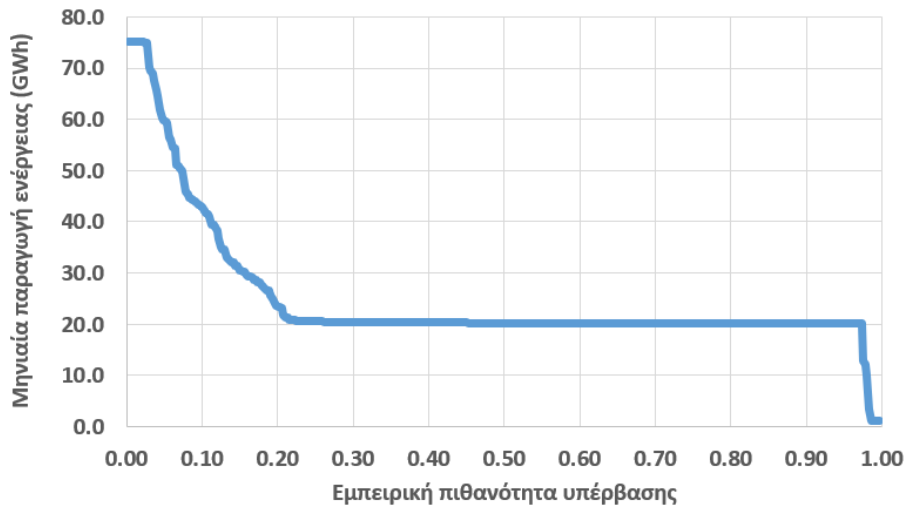
Η συνολική ισχύς του συστήματος είναι 6.77 MW, συνεπώς ο συντελεστής δυναμικότητας εκτιμάται σε $18000/(6.77 \times 8760) = 0.304$. Η τιμή αυτή κρίνεται ικανοποιητική για τέτοιου τύπου έργα, καθώς εξασφαλίζει έναν καλό συμβιβασμό μεταξύ του κόστους αγοράς και τοποθέτησης του εξοπλισμού (συνάρτηση της ισχύος) και του οφέλους από την παραγωγή ενέργειας.

δ) Εκτιμήστε την ενέργεια που θα παράγεται από τους δύο στρόβιλους σε διάστημα μίας ώρας, κατά την οποία η μέση παροχή ανάντη της θέσης υδροληψίας θα ανέρχεται σε $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$. (1.25 μονάδες)

Από την παροχή που φτάνει στην υδροληψία, τα $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ διοχετεύονται κατάντη ως οικολογική παροχή. Από την εκτρεπόμενη παροχή των $6.30 \text{ m}^3/\text{s}$, τα $5.66 \text{ m}^3/\text{s}$ διοχετεύονται στον πρώτο στρόβιλο, ο οποίος λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ του (5.00 MW), ενώ η υπολειπόμενη ποσότητα, ήτοι $0.64 \text{ m}^3/\text{s}$, παραλαμβάνονται από τον δεύτερο στρόβιλο, που λειτουργεί με ισχύ 0.42 MW. Η τιμή αυτή προκύπτει από τη σχέση $P = \gamma \eta \left(\frac{q}{q_{max}}\right) q h_n$, θέτοντας $q = 0.64 \text{ m}^3/\text{s}$ και $\eta = 0.68$, που με βάση το διάγραμμα αντιστοιχεί σε αδιαστατοποιημένη παροχή $0.64 / 2.00 = 0.32$. Συνεπώς, η συνολική ενέργεια που παράγεται σε διάστημα μίας ώρας είναι 5.42 MWh.

Άσκηση 2 (3.0 μονάδες)

Δίνεται η πιθανοτική καμπύλη της παραγωγής ενέργειας από υδροηλεκτρικό ταμιευτήρα, που έχει παραχθεί μέσω προσομοίωσης, με μηνιαίο βήμα υπολογισμών. Η κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι +255 και +275 m, αντίστοιχα, ενώ η μηνιαία παροχτευτικότητα των στροβίλων ανέρχεται σε 260 hm^3 . Στην προσομοίωση, θεωρήθηκε ειδική ενέργεια ίση με 0.23 GWh/hm^4 .



α) Εκτιμήστε την μηνιαία παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας και το αντίστοιχο επίπεδο αξιοπιστίας της. **(0.50 μονάδες)**

Από το γράφημα προκύπτει ότι η πρωτεύουσα ενέργεια ανέρχεται σε 20.0 GWh , και παράγεται στο 97% του χρόνου, ποσοστό που υποδηλώνει το αντίστοιχο επίπεδο αξιοπιστίας της.

β) Εκτιμήστε το ποσοστό του χρόνου που παράγεται δευτερεύουσα ενέργεια και το ποσοστό του χρόνου που ο ταμιευτήρας υπερχειλίζει. **(0.50 μονάδες)**

Από το γράφημα προκύπτει ότι η δευτερεύουσα ενέργεια παράγεται περίπου στο 21% του χρόνου, ενώ ο ταμιευτήρας υπερχειλίζει περίπου στο 3% του χρόνου, διάστημα στο οποίο η ενέργεια γίνεται μέγιστη (75.0 GWh).

γ) Αξιολογήστε την επίδοση του έργου και περιγράψτε τις αναμενόμενες μεταβολές στην πιθανοτική καμπύλη, εφόσον διπλασιαστεί ο στόχος παραγωγής ενέργειας. **(1.0 μονάδα)**

Η αξιοπιστία της παραγόμενης πρωτεύουσας ενέργειας είναι πολύ υψηλή, και το ποσοστό του χρόνου που ο ταμιευτήρας υπερχειλίζει πολύ μικρό, συνεπώς η επίδοση του έργου αναγνωρίζεται ως πολύ ικανοποιητική. Αν διπλασιαστεί ο στόχος της ενεργειακής παραγωγής, τότε θα αυξηθούν σημαντικά οι εκροές νερού, με συνέπεια την σημαντικά συχνότερη ταπείνωση των αποθεμάτων. Αυτό θα έχει ως συνέπεια τη δραστική μείωση της αξιοπιστίας του συστήματος, αλλά και δραστική μείωση της παραγόμενης δευτερεύουσας ενέργειας.

δ) Εκτιμήστε το ενεργειακό υψόμετρο εξόδου και την απαιτούμενη εκροή νερού από τους στροβίλους για παραγωγή πρωτεύουσας ενέργειας, όταν ο ταμιευτήρας είναι στην κατώτατη στάθμη λειτουργίας του. **(1.0 μονάδα)**

Όταν ο ταμιευτήρας βρίσκεται στην ανώτατη στάθμη του ($z = 275 \text{ m}$), παράγεται ενέργεια ίση με 75.0 GWh , με τους στροβίλους να λειτουργούν στο όριο τη παροχτευτικότητάς τους (260 hm^3). Επιλύοντας τη σχέση $E = \psi V (z - z_k)$ ως προς το κατάντη ενεργειακό υψόμετρο, για $\psi = 0.23 \text{ GWh/hm}^4$, λαμβάνεται $z_k = 149.6 \text{ m}$. Κατ' αντιστοιχία, προκειμένου να παραχθούν 20.0 GWh για στάθμη ίση με την κατώτατη ($z = 255 \text{ m}$), θα πρέπει να διοχετευτούν 82.5 hm^3 .

Άσκηση 3 (1.5 μονάδες)

Σε μικρό μη διασυνδεδεμένο νησί έχουν τοποθετηθεί ανεμογεννήτριες, ονομαστικής ισχύος 1.5 MW, και 2500 φωτοβολταϊκά πλαίσια, διαστάσεων 1800×1000 mm και βαθμού απόδοσης 20%.

(α) Εκτιμήστε την ονομαστική ισχύ κάθε Φ/Β πλαισίου. **(0.75 μονάδες)**

Σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, ο βαθμός απόδοσης του Φ/Β πλαισίου αναφέρεται σε εισερχόμενη ακτινοβολία 1000 W/m^2 , η οποία προσπίπτει στην επιφάνεια των 1.8 m^2 . Συνεπώς, για εισερχόμενη ηλιακή ισχύ 1800 W , παράγεται ηλεκτρική ισχύς ίση με $0.20 \times 1800 = 360 \text{ W}$.

(β) Εκτιμήστε το ελάχιστο απαιτούμενο πλήθος των ανεμογεννητριών, ώστε το μίγμα των δύο ανανεώσιμων πηγών να μπορεί να καλύψει ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας 5.0 MWh, με εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία 1050 W/m^2 και ταχύτητα ανέμου 17.0 m/s . **(0.75 μονάδες)**

Αφού η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία υπερβαίνει τα 1000 W/m^2 , τα Φ/Β πλαίσια θα λειτουργούν στην ονομαστική ισχύ τους, παράγοντας σε διάστημα μίας ώρας $2500 \times 360 \times 10^6 = 0.90 \text{ MWh}$. Η υπόλοιπη ενέργεια, ήτοι 4.1 MWh , πρέπει να παραχθεί από τις ανεμογεννήτριες. Για την δεδομένη ταχύτητα ανέμου, αυτές επίσης θα λειτουργούν στη μέγιστη ισχύ τους, συνεπώς κάθε Α/Γ θα παράγει 1.5 MWh . Συνεπώς, για να καλυφθεί η ζήτηση, απαιτούνται τουλάχιστον τρεις Α/Γ.