

## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

Μάθημα: Ανανεώσιμη Ενέργεια και Υδροηλεκτρικά Έργα

Ακαδημαϊκό έτος: 2025-26

Κανονική εξέταση Ιουνίου 2026 – Διάρκεια εξέτασης 2:45'

Όνοματεπώνυμο: .....

### Άσκηση 1 (2.0 μονάδες)

(α) Εκτιμήστε τον μέσο ετήσιο όγκο νερού που διακινείται μέσω των στροβίλων υδροηλεκτρικού ταμιευτήρα, αν είναι γνωστό ότι ο ετήσιος συντελεστής δυναμικότητας του έργου ανέρχεται σε 28%, και ότι σε διάστημα 5 ωρών δύναται να παραχθούν έως 600 MWh. Η κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας του ταμιευτήρα είναι +240 και +280 m, αντίστοιχα, ενώ το υψόμετρο εξόδου του σταθμού παραγωγής είναι +160 m.

Η ονομαστική ισχύς του έργου είναι ίση με  $P = 600/5 = 120 \text{ MW}$ , συνεπώς η ετήσια παραγωγή ενέργειας για συντελεστή δυναμικότητας 28% εκτιμάται σε  $E_o = 120 \times 0.28 \times 8760 / 1000 = 294 \text{ GWh}$ .

Η μέση στάθμη του ταμιευτήρα είναι +260 m, άρα το μέσο ακαθάριστο ύψος πτώσης ανέρχεται σε  $260 - 160 = 100 \text{ m}$ , ενώ το καθαρό ύψος εκτιμάται χονδρικά σε 95 m (ποσοστό υδραυλικών απωλειών 5%). Θεωρώντας βαθμό απόδοσης 90% (εύλογη τιμή, για μεγάλο ΥΗΕ), και επιλύοντας ως προς τον ετήσιο όγκο νερού που διέρχεται από τους στροβίλους, προκύπτει  $V_o = (3600 \times 294) / (9.81 \times 0.90 \times 95) = 1263 \text{ hm}^3$ .

(β) Αν ο σταθμός παραγωγής αποτελείται από τρεις όμοιους στροβίλους Francis, αιτιολογήστε την επιλογή του συγκεκριμένου πλήθους και τύπου στροβίλων, και εκτιμήστε την ελάχιστη παροχή που απαιτείται να απελευθερωθεί από τον ταμιευτήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας των στροβίλων είναι  $T_o = 0.28 \times 8760 = 2453 \text{ h}$ , οπότε η παροχή σχεδιασμού τους ανέρχεται σε  $Q = (1263 \times 10^6) / (2453 \times 3600) = 143.1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ο συγκεκριμένος συνδυασμός παροχής και ύψους πτώσης αιτιολογεί την επιλογή στροβίλων τύπου Francis (βλ. σχετικά εμπειρικά διαγράμματα).

Η κατάτμηση της ισχύος (όπως και την παροχής) σε τρεις όμοιους στροβίλους παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία στο έργο, το οποίο δύναται να παράγει διαφορετικές τιμές ισχύος με υψηλό βαθμό απόδοσης.

Η ονομαστική παροχή κάθε στροβίλου είναι  $47.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , ενώ η ελάχιστη παροχή για παραγωγή ισχύος εκτιμάται στο 30% της ως άνω ποσότητας, ήτοι σε  $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$  (το ποσοστό αυτό αφορά σε στροβίλους Francis). Αυτή είναι και η ελάχιστη ροή που μπορεί να απελευθερωθεί από τον ταμιευτήρα για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια.

(γ) Από τον ταμιευτήρα θα πρέπει να αφήνεται οικολογική παροχή ίση με  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$  σε συνεχή βάση. Εξηγήστε γιατί δεν είναι σκόπιμο αυτή να διέρχεται από τους στροβίλους, και προτείνετε εναλλακτικούς τρόπους για τη βέλτιστη αξιοποίηση της υπόψη ποσότητας.

Η οικολογική παροχή είναι σημαντικά μικρότερη από το όριο των  $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$ , συνεπώς στο διάστημα που αυτή θα διέρχεται από τους στροβίλους δεν θα παράγεται ενέργεια. Η πλέον πρόσφορη επιλογή είναι η κατασκευή ενός μικρού ταμιευτήρα κατάντη του σταθμού παραγωγής, ημερήσιας ρύθμισης, και η διοχέτευση της οικολογικής παροχής σε 24ωρη βάση από έναν μικρό στρόβιλο, που θα λειτουργεί συνεχώς στο μέγιστο βαθμό απόδοσης. Εναλλακτικά, δύναται η διοχέτευση της οικολογικής παροχής από ανεξάρτητη υδροληψία, και αντίστοιχο ΜΥΗΕ.

### Άσκηση 2 (2.5 μονάδες)

Έργο αντλησιοταμίευσης αποτελείται από δύο διασυνδεδεμένους ταμιευτήρες, ωφέλιμη χωρητικότητας  $800\,000 \text{ m}^3$  έκαστος, με αμελητέες διακυμάνσεις στάθμης, και αντλιοστρόβιλο, με ισχύ παραγωγής και ισχύ άντλησης 100 και 110 MW, αντίστοιχα, και βαθμό απόδοσης 85% (κατά προσέγγιση κοινό για την παραγωγή και την άντληση). Με βάση υδραυλικούς υπολογισμούς, το καθαρό ύψος πτώσης του συστήματος ανέρχεται σε 415 m, ενώ το μανομετρικό ύψος σε 445 m.

(α) Εκτιμήστε την υψομετρική διαφορά μεταξύ των δύο ταμιευτήρων, την ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα, την ημερήσια παραγωγή ενέργειας, και τις ώρες παραγωγής και άντλησης κατά τη διάρκεια ενός 24ώρου.

Αν  $\Delta z$  η υψομετρική διαφορά και  $\Delta H$  οι υδραυλικές απώλειες (κατά προσέγγιση κοινές στην παραγωγή και την άντληση), τότε το καθαρό ύψος πτώσης είναι  $H_n = \Delta z - \Delta H$ , το μανομετρικό ύψος είναι  $H_m = \Delta z + \Delta H$ , άρα  $\Delta z = (H_n + H_m)/2 = 430 \text{ m}$ .

Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα στη διάρκεια ενός 24ώρου, με άντληση όλης της ωφέλιμης χωρητικότητας από τον κάτω στον άνω ταμιευτήρα, είναι  $E_p = (9.81 \times 0.80 \times 445) / (0.85 \times 3.6) = 1141 \text{ MWh}$ , ενώ η ενέργεια που δύναται να παραχθεί είναι  $E_g = (9.81 \times 0.85 \times 0.80 \times 415) / 3.6 = 769 \text{ MWh}$ . Διαιρώντας με την αντίστοιχη ισχύ, ο χρόνος άντλησης εκτιμάται σε  $t_p = 1141/110 = 10.4 \text{ h}$ , ενώ ο χρόνος παραγωγής σε  $t_g = 769/100 = 7.7 \text{ h}$ . Οι τιμές αυτές είναι εύλογες, για έργα αντλησιοταμίευσης ημερήσιου κύκλου.

(β) Εκτιμήστε και αξιολογήστε τον βαθμό απόδοσης του κύκλου και εξηγήστε ποια άλλα στοιχεία σας είναι απαραίτητα προκειμένου να τεκμηριώσετε την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Ο λόγος της αποδιδόμενης προς την απορροφούμενη ενέργεια, ήτοι  $E_g/E_p = 0.674$ , είναι ο βαθμός απόδοσης του κύκλου. Ο εν λόγω βαθμός απόδοσης είναι αρκετά ικανοποιητικός, αποτελώντας μια πρωτόλεια ένδειξη οικονομικής βιωσιμότητας του έργου. Ωστόσο, για την πλήρη τεκμηρίωση της τελευταίας, απαιτείται μια ολοκληρωμένη τεχνικοοικονομική ανάλυση, στην οποία θα ληφθούν επίσης υπόψη τα κόστη κεφαλαίου, τα λειτουργικά κόστη, και οι ενδοημερήσιες διακυμάνσεις του χρηματιστηρίου ενέργειας, που επηρεάζουν τα έσοδα από την ηλεκτροπαραγωγή και τα κόστη αγοράς ενέργειας τις περιόδους άντλησης.

(γ) Εξηγήστε πώς θα μπορούσε να αυξηθεί η ισχύς του συστήματος, χωρίς αλλαγές στα βασικά μεγέθη σχεδιασμού του (χωρητικότητα και υψομετρική διαφορά ταμιευτήρων).

Η ισχύς των υδροενεργειακών έργων που έχουν ελεγχόμενη λειτουργία συνιστά διαχειριστική απόφαση, που εξαρτάται από τις ώρες λειτουργίας (ισχύς = ενέργεια / χρόνος). Συνεπώς, αν μειωθούν οι χρόνοι παραγωγής και άντλησης, η ίδια ποσότητα ενέργειας που παράγεται και καταναλώνεται, που κυρίως εξαρτάται από την υψομετρική διαφορά και τον όγκο νερού που ανακυκλώνεται ημερησίως, θα απαιτήσει μεγαλύτερη ισχύ.

### Άσκηση 3 (2.0 μονάδες)

Μικρό υδροηλεκτρικό έργο εκτροπής αποτελείται από δύο στροβίλους, συνολικής ισχύος 4.50 MW, ο βαθμός απόδοσης των οποίων εκτιμάται από τη σχέση:

$$\eta_T = 0.25 + 0.65 \left( 1 - \left( 1 - \left( \frac{Q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \right)^a \right)^b \right)$$

όπου  $Q$  η διερχόμενη παροχή,  $Q_{min}$  και  $Q_{max}$  η ελάχιστη και μέγιστη παροχή λειτουργίας κάθε στροβίλου, με  $Q_{min} = 0.15 Q_{max}$ , και  $a, b$  παράμετροι σχήματος. Δίνεται ότι:

- Η περιβαλλοντική παροχή που αφήνεται κατάντη της υδροληψίας έχει τεθεί ίση με 200 L/s.
- Ο υπερχειλιστής του έργου λειτουργεί όταν η παροχή ανάντη της υδροληψίας υπερβαίνει τα 4.20 m<sup>3</sup>/s, ενώ όταν η τιμή της πέσει κάτω από τα 0.40 m<sup>3</sup>/s διακόπτεται η παραγωγή ισχύος.
- Ο βαθμός απόδοσης του λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού ανέρχεται σε 95%.
- Το καθαρό ύψος πτώσης του συστήματος θεωρείται κατά προσέγγιση σταθερό.

Εκτιμήστε το καθαρό ύψος πτώσης του συστήματος και την ισχύ κάθε στροβίλου.

Αφαιρώντας την περιβαλλοντική παροχή, η μέγιστη παροχή λειτουργίας του συστήματος των δύο στροβίλων ανέρχεται σε 4.00 m<sup>3</sup>/s, ενώ η ελάχιστη παροχή λειτουργίας του μικρότερου εκ των δύο ανέρχεται σε 0.20 m<sup>3</sup>/s. Επειδή ο λόγος της ελάχιστης προς τη μέγιστη παροχή είναι 0.15, η μέγιστη παροχή του μικρού στροβίλου είναι ίση με  $0.20 / 0.15 = 1.33 \text{ m}^3/\text{s}$ , συνεπώς η μέγιστη παροχή του μεγάλου στροβίλου είναι  $4.00 - 1.33 = 2.67 \text{ m}^3/\text{s}$ . Επειδή οι στροβίλοι είναι ίδιου τύπου, η ονομαστική ισχύς τους μοιράζεται αναλογικά με την αντίστοιχη μέγιστη παροχή, οπότε οι επιμέρους τιμές είναι 1.50 και 3.00 MW, αντίστοιχα.

Από την σχέση εκτίμησης του βαθμού απόδοσης των στροβίλων, προκύπτει ότι η τιμή του κυμαίνεται μεταξύ 0.25 και 0.90, όταν διέρχεται η ελάχιστη και μέγιστη παροχή, αντίστοιχα. Συνεπώς, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του συστήματος θα είναι  $0.90 \times 0.95 = 0.855$ , και ο ελάχιστος  $0.25 \times 0.95 = 0.238$ . Επιλύοντας την σχέση της ισχύος ως προς το καθαρό ύψος πτώσης, και θεωρώντας το σύστημα των δύο στροβίλων στη μέγιστη ισχύ και παροχή του, προκύπτει  $H_n = (4.5 \times 1000) / (9.81 \times 0.855 \times 4.00) = 134.1 \text{ m}$ .

#### Άσκηση 4 (1.5 μονάδες)

Σε φωτοβολταϊκό πλαίσιο επιφάνειας  $2.0 \text{ m}^2$ , μετρήθηκαν τα παρακάτω στοιχεία, σε διάστημα δύο ωρών:

	1 <sup>η</sup> ώρα	2 <sup>η</sup> ώρα
Προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ( $\text{W/m}^2$ )	1010	1080
Θερμοκρασία ατμόσφαιρας ( $^{\circ}\text{C}$ )	23.0	30.0
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh)	0.420	0.390

α) Εκτιμήστε τον ονομαστικό βαθμό απόδοσης και τον θερμοκρασιακό συντελεστή του πλαισίου, για τιμή της παραμέτρου NOCT (nominal operating cell temperature) ίση με  $45^{\circ}\text{C}$ .

Την πρώτη ώρα, η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπερβαίνει τα  $1000 \text{ W/m}^2$ , συνεπώς το πλαίσιο αποδίδει την ονομαστική του ισχύ, ήτοι  $P_{nom} = 420 \text{ W}$  (δεδομένου ότι παράγονται  $0.42 \text{ kWh}$  σε χρονικό διάστημα μίας ώρας). Επιπλέον, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι χαμηλότερη από την τιμή αναφοράς  $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$ , συνεπώς το πλαίσιο λειτουργεί στον ονομαστικό βαθμό απόδοσής του, που για επιφάνεια  $A = 2.0 \text{ m}^2$  είναι ίσος με  $n_{nom} = 420 / (1000 \times 2.0) = 0.210$ .

Την δεύτερη ώρα, η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας υπερβαίνει την τιμή αναφοράς  $T_{ref} = 25^{\circ}\text{C}$ , συνεπώς το πλαίσιο λειτουργεί σε χαμηλότερο βαθμό απόδοσης, καθώς αποδίδεται πραγματική ισχύς  $390 \text{ W}$  αντί για την ονομαστική των  $420 \text{ W}$  (ως όφειλε, καθώς η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπερβαίνει και πάλι τα  $1000 \text{ W/m}^2$ ). Ο πραγματικός βαθμός απόδοσης το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ανέρχεται σε  $n_{act} = 0.210 \times (390/420) = 0.195$ . Η θερμοκρασία του πλαισίου, για  $\text{NOCT} = 45^{\circ}\text{C}$  και εισερχόμενη ακτινοβολία  $1080 \text{ W/m}^2$ , εκτιμάται εμπειρικά σε  $T_c = 30.0 + (45 - 20)/800 \times 1080 = 63.8^{\circ}\text{C}$ , οπότε ο θερμοκρασιακός συντελεστής του εκτιμάται σε  $\alpha_T = (1 - 0.195/0.210) (63.8 - 25.0) \times 100 = 0.18\%/^{\circ}\text{C}$ .

β) Με βάση τα παραπάνω μεγέθη, εκτιμήστε αν πρόκειται για μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό πλαίσιο, και αν αυτό είναι παλαιάς ή σύγχρονης τεχνολογίας.

Με βάση τις τιμές του ονομαστικού βαθμού απόδοσης ( $>20\%$ ) και του θερμοκρασιακού συντελεστή, φαίνεται ότι πρόκειται για μονοκρυσταλλικό πλαίσιο αρκετά σύγχρονης τεχνολογίας.

γ) Εκτιμήστε τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας, δεδομένου ότι το πλαίσιο έχει τοποθετηθεί σε περιοχή με έντονη ηλιοφάνεια και χαμηλή υγρασία.

Σε περιοχή με υψηλή ηλιοφάνεια και χαμηλή υγρασία ο ετήσιος συντελεστής δυναμικότητας αναμένεται να είναι στα επίπεδα του  $25\%$ , συνεπώς η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας του πλαισίου εκτιμάται χονδρικά σε  $0.25 \times 8760 \times 420 / 1000 = 920 \text{ kWh}$ .

#### Άσκηση 5 (2.0 μονάδες)

Το ενεργειακό μίγμα μικρού νησιού περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια, ονομαστικής ισχύς  $1500 \text{ kW}$ , θερμική μονάδα ντίζελ, και μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ισχύος  $400 \text{ kW}$ , χωρητικότητας  $2000 \text{ kWh}$ , κοινού βαθμού απόδοσης κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση, και αμελητέων απωλειών λόγω αυτοεκφόρτισης. Σε διάστημα δύο διαδοχικών ωρών, η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος ανήλθε σε  $1200$  και  $900 \text{ kW}$ , αντίστοιχα, ενώ η μέση ταχύτητα ανέμου, μετρούμενη σε κοντινό μετεωρολογικό σταθμό, ανήλθε σε  $18.0$  και  $23.0 \text{ m/s}$ , αντίστοιχα. Στο διάστημα της πρώτης ώρας, η αποθηκευμένη ενέργεια αυξήθηκε από τις  $500$  στις  $750 \text{ kWh}$ .

(α) Κάνοντας εύλογες παραδοχές, εκτιμήστε την παραγόμενη αιολική ενέργεια κάθε ώρας και τον βαθμό απόδοσης του κύκλου της μονάδας αποθήκευσης.

Οι ταχύτητες ανέμου που έχουν μετρηθεί σε χαμηλό ύψος θα πρέπει να αναχθούν στο ύψος της πτερωτής. Αν και δεν δίνονται άλλες πληροφορίες, είναι βέβαιο ότι την πρώτη ώρα η Α/Γ έχει λειτουργήσει στην ονομαστική της ισχύ, παράγοντας 1500 kWh (αφού αυξήθηκε η αποθηκευμένη ενέργεια), ενώ είναι πρακτικά βέβαιο ότι τη δεύτερη ώρα η λειτουργία της Α/Γ διακόπηκε, καθώς η ταχύτητα στο ύψος της πτερωτής υπερέβη την οριακή τιμή των 25 m/s.

Την πρώτη ώρα, η περίσσεια σε σχέση με τη ζήτηση των 1200 kWh ανήλθε σε  $1500 - 1200 = 300$  kWh, ενώ αποθηκεύτηκαν  $750 - 500 = 250$  kWh. Οι 300 kWh απορροφήθηκαν στο σύνολό τους, καθώς η μέγιστη ισχύς του συστήματος αποθήκευσης είναι 400 kW, ενώ ο λόγος  $250/300 = 0.833$  είναι ο βαθμός απόδοσης της φόρτισης. Θεωρώντας κατά προσέγγιση κοινή τιμή με τον βαθμό εκφόρτισης, και μηδενικές απώλειες αυτοεκφόρτισης, ο βαθμός απόδοσης του κύκλου εκτιμάται σε  $0.833 \times 0.833 = 0.694$  (συνιστά τυπική τιμή για έργα αντλησιοταμίευσης).

(β) Συμπληρώστε τα στοιχεία ενεργειακού ισοζυγίου του πίνακα, εξηγώντας τους σχετικούς υπολογισμούς.

Όπως εξηγήθηκε, την πρώτη ώρα απορροφήθηκαν 300 kWh περίσσειας αιολικής ενέργειας, εκ των οποίων αποθηκεύτηκαν 250 kWh, αυξάνοντας την αποθηκευμένη ενέργεια από τις 500 στις 750 kWh.

Την δεύτερη ώρα, διακόπηκε η παραγωγή αιολικής ισχύος, οπότε το έργο τέθηκε σε λειτουργία εκφόρτισης, προκειμένου να καλύψει το έλλειμμα ζήτησης των 900 kWh. Ωστόσο, το έλλειμμα αυτό δεν μπορεί να καλυφθεί στο σύνολό τους, καθώς δεν υπάρχει ούτε η απαιτούμενη αποθήκευση ούτε η απαιτούμενη ισχύς. Συνεπώς, η ποσότητα που εκφορτίζεται είναι  $\min(750/0.833, 400/0.833, 900) = 480$  kWh, η τελική αποθήκευση είναι  $750 - 480 = 270$  kWh, η ποσότητα που εξάγεται στο δίκτυο είναι  $480 \times 0.833 = 400$  kWh (το έργο λειτουργεί στη μέγιστη ισχύ του), ενώ το τελικό έλλειμμα ανέρχεται σε  $900 - 400 = 500$  kWh.

Το ενεργειακό ισοζύγιο περιγράφεται στον ακόλουθο πίνακα (με πλάγια γράμματα φαίνονται τα στοιχεία που έχουν συμπληρωθεί, με κανονικά γράμματα είναι τα δεδομένα της άσκησης):

Μεταβλητή ενεργειακού ισοζυγίου (kWh)	1 <sup>η</sup> ώρα	2 <sup>η</sup> ώρα
Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας	1200	900
Παραγωγή αιολικής ενέργειας	1500	0
Αρχικό έλλειμμα	-	900
Αρχική περίσσεια αιολικής ενέργειας	300	-
Αρχική αποθήκευση ενέργειας	500	750
Απορρόφηση περίσσειας αιολικής ενέργειας	300	-
Φόρτιση μονάδας αποθήκευσης	250	-
Εκφόρτιση μονάδας αποθήκευσης	-	480
Απόδοση ενέργειας στο δίκτυο	-	400
Τελική αποθήκευση ενέργειας	750	270
Τελικό έλλειμμα ενέργειας	-	500
Τελική περίσσεια ενέργειας (απόρριψη)	-	-

(γ) Περιγράψτε, συνοπτικά, τους χειρισμούς που πρέπει να γίνουν από τον διαχειριστή του δικτύου, ώστε να καλυφθούν τα τελικά ελλείμματα ενέργειας, εφόσον προκύπτουν.

Το έλλειμμα των 500 kWh θα πρέπει να καλυφθεί από τη συμβατική μονάδα ντίζελ, η οποία ωστόσο θα πρέπει να τεθεί σε λειτουργία κάποιες ώρες νωρίτερα, σύμφωνα με το θερμικό προφίλ της. Πιθανότατα, αυτό θα δημιουργήσει περίσσειες ενέργειας σε προηγούμενα και επόμενα χρονικά βήματα, που με τη σειρά του θα απαιτήσει αναπροσαρμογές και στη διαχείριση της μονάδας αποθήκευσης.