

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος**

**Μάθημα: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία**

**Ακαδημαϊκό έτος: 2023-2024**

**Επαναληπτική εξέταση Σεπτεμβρίου 2024 – Διάρκεια εξέτασης 2:15'**

**Όνοματεπώνυμο:** .....

1. Από έρευνα στο διαδίκτυο βρήκατε σε προσφορά φωτοβολταϊκά πάνελ, διαστάσεων 2279×1134×35 mm, ονομαστικής ισχύος 550 W και βαθμού απόδοσης 21.53%, σε τιμή 180 € (χωρίς τα κόστη εγκατάστασης και διασύνδεσης). Ελέγξτε την εγκυρότητα των ως άνω τεχνικών και οικονομικών μεγεθών (βαθμός απόδοσης και τιμή πώλησης), και εκτιμήστε την ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας που θα πετύχετε τοποθετώντας δέκα τέτοια στοιχεία στη στέγη του σπιτιού σας. **(2.0 μονάδες)**

*Επιφάνεια πλαισίου:*  $2.279 \times 1.134 = 2.58 \text{ m}^2$

*Βαθμός απόδοσης:*  $550 / (1000 \times 2.58) = 21.3\%$

*Η τιμή είναι έγκυρη (και εύλογη για Φ/Β σύγχρονης τεχνολογίας), ενώ μικρή απόκλιση σχετικά με την τιμή του εμπορίου οφείλεται στο γεγονός ότι η καμπύλη ισχύος είναι κατά προσέγγιση γραμμική.*

*Η μοναδιαία τιμή πώλησης είναι  $180/550 = 0.33 \text{ €/W}$ , η οποία επίσης χαρακτηρίζεται ως εύλογη, αφού ότι αφορά μόνο στο κόστος του εξοπλισμού και όχι στα έξοδα εγκατάστασης και διασύνδεσης.*

*Θεωρώντας συντελεστή δυναμικότητας 20%, που είναι μια τυπική τιμή μιας ικανοποιητικής τοποθεσίας στην Ελλάδα, η ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα 10 Φ/Β πάνελ, και η αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας, εκτιμάται σε:  $10 \times 0.55 \text{ (kW)} \times 0.20 \times 8760 \text{ (h)} = 9636 \text{ kWh}$ .*

2. Αιολικό πάρκο, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 13.5 MW, αποτελείται από πέντε ανεμογεννήτριες τύπου 1 και τρεις τύπου 2, με διαμέτρους  $D_1 = 80 \text{ m}$  και  $D_2 = 63 \text{ m}$ , αντίστοιχα. (α) Δεδομένου ότι η ετήσια παραγωγή ενέργειας του συστήματος ανέρχεται σε 70 GWh, προσδιορίστε αν αυτό βρίσκεται στη Βόρεια Θάλασσα ή σε νησί του Αιγαίου, (β) Εκτιμήστε την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος σε διάστημα μιας ώρας, κατά την οποία η ταχύτητα ανέμου,  $V$ , βρίσκεται στο εύρος μεταξύ 15 και 25 m/s. (γ) Αν για την υπόψη ταχύτητα, οι δύο τύποι Α/Γ έχουν βαθμό απόδοσης  $\eta_1 = 11.9\%$  και  $\eta_2 = 16.0\%$ , αντίστοιχα, εκτιμήστε την ονομαστική ισχύ του κάθε τύπου Α/Γ, καθώς και την τιμή της  $V$ . **(2.5 μονάδες)**

*(α) Με βάση την παραγόμενη ενέργεια και ισχύ, προκύπτει συντελεστής δυναμικότητας ίσος με 59%, που είναι αντιπροσωπευτικός για τη Βόρεια Θάλασσα.*

*(β) Δεδομένου ότι η ταχύτητα ανέμου βρίσκεται στο εύρος μεταξύ 15 και 25 m/s, το αιολικό πάρκο θα αποδίδει τη μέγιστη (ονομαστική) ισχύ του, ήτοι 13.5 MW, παράγοντας σε διάστημα μίας ώρας ηλεκτρική ενέργεια ίση με  $13.5 \times 1 = 13.5 \text{ MWh}$  (προσοχή, μονάδα ισχύος το MW, μονάδα ενέργειας η MWh).*

*(γ) Έστω  $P_1$  και  $P_2$  οι τιμές της ονομαστικής ισχύος των δύο τύπων Α/Γ, οπότε το συνολικό μίγμα είναι:*

$$5P_1 + 3P_2 = 13.5 \text{ MW}$$

*Για την ταχύτητα  $V$  ισχύει:*

$$P_1 = \eta_1 \rho \pi D_1^2 V^3 / 8$$

$$P_2 = \eta_2 \rho \pi D_2^2 V^3 / 8$$

*οπότε  $P_1/P_2 = (\eta_1/\eta_2) (D_1/D_2)^2 = 1.20$ , και άρα  $P_1 = 1.80 \text{ MW}$  και  $P_2 = 1.50 \text{ MW}$ .*

*Για πυκνότητα ανέμου  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , επιλύοντας την παραπάνω σχέση για γνωστή διάμετρο, βαθμό απόδοσης και ισχύ, προκύπτει ταχύτητα  $V = 17.0 \text{ m/s}$ .*

3. Στην υποθετική περίπτωση που η Ελλάδα κάλυπτε το σύνολο των αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια από λιγνίτη, και κάνοντας εύλογες παραδοχές, εκτιμήστε για πόσα έτη θα μπορούσε να εξασφαλιστεί ενεργειακή αυτονομία της χώρας. Δίνεται ότι η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας ανέρχεται σε 52 TWh, ενώ τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα λιγνίτη εκτιμώνται σε  $3.2 \times 10^9$  t. **(1.5 μονάδες)**

Θεωρώντας βαθμό απόδοσης της λιγνιτικών μονάδων της χώρας ίσο με 38%, η απαιτούμενη θερμική ενέργεια για την κάλυψη των ετήσιων αναγκών της σε ηλεκτρική ενέργεια είναι  $52/0.38 = 136.8$  TWh. Μια τυπική τιμή θερμογόνου δύναμης για τον εγχώριο λιγνίτη είναι 8.5 MJ/kg, ήτοι 2.4 kWh/kg (1 MJ = 3.6 kWh). Συνεπώς, η ετήσια ποσότητα λιγνίτη που απαιτείται για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας ανέρχεται σε  $(136.8 \times 10^9 \text{ kWh}) / (2.4 \text{ kWh/kg}) = 58.0 \times 10^6$  t, ποσότητα που αντιστοιχεί σε περίπου 55 έτη αυτονομίας.

4. Το υδροηλεκτρικό έργο Στράτου στον κάτω ρου του Αχελώου περιλαμβάνει ταμιευτήρα, με κατώτατη και ανώτατη στάθμη λειτουργίας +67.0 και +68.6 m, αντίστοιχα, και σταθμό παραγωγής σε υψόμετρο +31.6 m, αποτελούμενο από δύο στροβίλους τύπου Francis, ισχύος 75 MW έκαστος. Η μέση ετήσια παροχή εισροής στον ταμιευτήρα ανέρχεται σε 115 m<sup>3</sup>/s, από τα οποία περί τα 300 hm<sup>3</sup> εκτρέπονται ετησίως για άρδευση, ενώ οι απώλειες λόγω υπόγειων διαφυγών και υπερχειλίσεων είναι αμελητέες. Κάνοντας εύλογες παραδοχές, όπου απαιτείται: (α) εκτιμήστε το καθαρό ύψος πτώσης, την μέση ετήσια εκροή από τους στροβίλους, τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας, και την παροχή λειτουργίας των στροβίλων, (β) εκτιμήστε τις ετήσιες ώρες λειτουργίας του έργου, και εξηγήστε αν πρόκειται για έργο αιχμής ή βάσης, και (γ) αιτιολογήστε την επιλογή του συγκεκριμένου τύπου στροβίλων. **(2.0 μονάδες)**

(α) Λαμβάνοντας τη μέση στάθμη του ταμιευτήρα (67.8 m), προκύπτει ακαθάριστο ύψος πτώσης ίσο με  $67.8 - 31.6 = 36.2$  m. Ακόμη, κατά την προσαγωγή του νερού στους στροβίλους, θεωρούμε ποσοστό απωλειών υδραυλικής ενέργειας της τάξης του 5%, άρα το καθαρό ύψος πτώσης εκτιμάται σε  $0.95 \times 36.2 = 34.4$  m.

Η παραγωγή νερού (απορροή) από την ανάντη λεκάνη (μέσες ετήσιες εισροές στον ταμιευτήρα) ανέρχεται σε  $115 \times 86400 \times 365 \times 10^{-6} = 3627$  hm<sup>3</sup>. Αφαιρώντας την ποσότητα που δίνεται για άρδευση, η οποία δεν διέρχεται από τον κύριο σταθμό παραγωγής (στην πραγματικότητα διέρχεται από έναν πολύ μικρότερο σταθμό), και δεδομένου ότι οι απώλειες νερού λόγω υπερχειλίσεων και διαφυγών είναι αμελητέες, η μέση ετήσια εκροή από τους στροβίλους εκτιμάται σε 3327 hm<sup>3</sup>.

Υποθέτοντας ένας εύλογο βαθμό απόδοσης ίσο με 90%, η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε  $9.81 \times 0.90 \times 3327 \times 34.4 / 3600 = 280.6$  GWh.

Η συνολική ισχύς του συστήματος είναι  $2 \times 75 = 150$  MW, οπότε επιλύοντας τη σχέση της ισχύος ως προς την παροχή προκύπτει παροχή λειτουργίας στροβίλων ίση με  $150000 / (9.81 \times 0.90 \times 34.4) = 494$  m<sup>3</sup>/s.

(β) Οι ετήσιες ώρες λειτουργίας του έργου εκτιμώντας διαιρώντας την ενέργεια με την ισχύ (ή, ισοδύναμα, τον όγκο με την παροχή), ήτοι  $280600$  (MWh) /  $150$  (MW) = 1870 ώρες. Κατά μέσο όρο, ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί σε λίγο παραπάνω από πέντε ώρες λειτουργίας ημερησίως, το οποίο υποδηλώνει ότι πρόκειται για έργο αιχμής. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε μέσω του συντελεστή δυναμικότητας, που υπολογίζεται σε  $280600 / (150 \times 8760) = 21.4\%$ .

(γ) Ο τύπος στροβίλων Francis είναι ο πλέον κοινός σε μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα, καθώς καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα παροχών και υψών πτώσης. Για τα δύο αυτά χαρακτηριστικά μεγέθη του έργου (παροχή της τάξης των 500 m<sup>3</sup>/s, ύψος πτώσης της τάξης των 35 m), η επιλογή είναι αιτιολογημένη.

5. Μέχρι πρότινος, το νησί της Σίφνου εξυπηρετούνταν από μονάδα καύσης πετρελαίου, ισχύος 9.0 MW, ενώ πρόσφατα προστέθηκαν άλλα 1.4 MW από ΑΠΕ (αιολικά και φωτοβολταϊκά). Δεδομένου ότι οι ετήσιες ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια του νησιού ανέρχονται σε 17.3 GWh, με ωριαία αιχμή 5.4 MWh: (α) αιτιολογήστε την επιλογή της ισχύος του σταθμού, (β) εκτιμήστε το πλήθος των βαρελιών πετρελαίου

που απαιτούνται για την κάλυψη των ετήσιων αναγκών του νησιού, και (γ) αναφέρετε πώς μπορεί η ένταξη των ΑΠΕ να καταστεί πιο αποδοτική, με την κατασκευή συμπληρωματικών έργων. **(2.0 μονάδες)**

Στους υπολογισμούς σας εφαρμόστε τα ακόλουθα τυπικά μεγέθη: χωρητικότητα βαρελιού πετρελαίου: 159 λίτρα, θερμογόνος δύναμη πετρελαίου: 45 MJ/kg, πυκνότητα πετρελαίου: 0.80 kg/L, βαθμός απόδοσης θερμικής μονάδας: 38%.

(α) Με την ισχύ των 9.0 MW, υπερκαλύπτει η ωριαία αιχμή των 5.4 MWh (αντιστοιχεί σε αιχμή ισχύος 5.4 MW), και υπάρχουν σημαντικά περιθώρια αύξησης της κατανάλωσης καθώς και κάλυψης έκτακτων περιστατικών (π.χ. βλάβη κάποιας ή κάποιων εκ των μονάδων παραγωγής του σταθμού).

(β) Για να βρούμε το πλήθος των βαρελιών πετρελαίου που απαιτούνται για την κάλυψη των ετήσιων αναγκών του νησιού, αρκεί να εκτιμήσουμε την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται ανά βαρέλι. Για θερμογόνο δύναμη  $45/3.6 = 12.5 \text{ kWh/kg}$ , ένα βαρέλι πετρελαίου όγκου 159 L και μάζας  $159/0.8 = 127.2 \text{ kg}$  αποδίδει θερμική ενέργεια ίση με  $127.2 \times 12.5 = 1590 \text{ kWh}$ . Για βαθμό απόδοσης θερμικής μονάδας ίσο με 38%, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται σε 604 kWh/βαρέλι. Συνεπώς, το απαιτούμενο πλήθος βαρελιών για συνολική παραγωγή  $17.3 \text{ GWh} = 17.3 \times 10^6 \text{ kWh}$  είναι ίσο με 28 633.

(γ) Η προσθήκη επιπλέον 1.4 MW από τις δύο ΑΠΕ (αιολικά και φωτοβολταϊκά) δείχνει περιττή, από τεχνική σκοπιά, καθώς οι ανάγκες του νησιού υπερκαλύπτονται. Μάλιστα, καμία από τις δύο ΑΠΕ δεν παράγει ελεγχόμενη ενέργεια, και κυρίως τα αιολικά έργα, ενώ τα Φ/Β έργα λειτουργούν μόνο τις ώρες που έχει ηλιοφάνεια. Για να καταστούν τα έργα αυτά αποδοτικά, αντικαθιστώντας τμήμα της εγγυημένης παραγωγής από τη θερμική μονάδα, θα πρέπει να προβλεφθεί η κατασκευή έργων αποθήκευσης της περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (π.χ., έργα αντλησιοταμίευσης, μπαταρίες).