

## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

### Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

#### Επίλυση ασκήσεων επαναληπτικής εξέτασης Σεπτεμβρίου 2019

##### Άσκηση 1

Η ηλεκτροπαραγωγή σε τουριστικό νησί-κράτος γίνεται αποκλειστικά με πετρέλαιο. Οικολογικές οργανώσεις προτείνουν την αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων με στόχο την προστασία του περιβάλλοντος. Αξιολογήστε την πρόταση στην κλίμακα 1-5 (1 είμαι τελείως αρνητικός, 5 συμφωνώ απόλυτα) και αιτιολογήστε την απάντησή σας (έως 50 λέξεις).

Η πρόταση των οικολογικών οργανώσεων είναι εντελώς εσφαλμένη (η πρόταση αξιολογείται με 1). Ο βαθμός απόδοσης κατά τη μετατροπή ενός ορυκτού καυσίμου σε ενέργεια κίνησης των μεταφορικών μέσων είναι της τάξης του 80%, ενώ κατά τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια είναι της τάξης του 40%. Λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε ενέργεια κίνησης, προκύπτει ότι θα απαιτείται περίπου διπλάσια ποσότητα ορυκτών καυσίμων για την κίνηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε σχέση με τη χρήση συμβατικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν βενζίνη ή πετρέλαιο.

##### Άσκηση 2

Σε μη διασυνδεδεμένο νησί, με μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας 400 GWh, ανακαλύπτεται κοιτάσμα λιγνίτη που εκτιμάται σε  $10^6$  t, με θερμογόνο δύναμη 18 MJ/kg. Εξετάζεται η χρησιμοποίηση του κοιτάσματος για ηλεκτροπαραγωγή, με την κατασκευή θερμικού σταθμού απόδοσης 40%.

(α) Εκτιμήστε τα έτη που θα επαρκούσε το κοιτάσμα αν κάλυπτε το σύνολο της ζήτησης ενέργειας.

Η θερμογόνο δύναμη του κοιτάσματος είναι:

$$E_{\theta} = 18 \text{ (MJ/kg)} \times 10^6 \text{ (t)} \times 10^3 \text{ (kg/t)} / 3600 \text{ (s/h)} = 5.0 \times 10^6 \text{ MWh} = 5000 \text{ GWh}$$

Η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι:

$$E_H = 0.40 \times 5000 = 2000 \text{ GWh}$$

Η ενέργεια αυτή μπορεί να καλύψει τη ζήτηση του νησιού για πέντε έτη (= 2000 / 400).

(β) Για την αξιοποίηση του κοιτάσματος προτείνεται η κατασκευή θερμικού εργοστασίου ισχύος 100 MW, που θα λειτουργεί με ετήσιο συντελεστή δυναμικότητας 60%. Αξιολογήστε την πρόταση στην κλίμακα 1-5 (1 είμαι τελείως αρνητικός, 5 συμφωνώ απόλυτα) και αιτιολογήστε την απάντησή σας (έως 50 λέξεις).

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας από το θερμικό εργοστάσιο θα είναι:

$$E = 0.60 \times 100 \text{ (MW)} \times 8760 \text{ (h)} = 525\,600 \text{ MWh} = 525.6 \text{ GWh}$$

Δηλαδή, σε λιγότερο από τέσσερα έτη το κοιτάσμα θα εξαντληθεί, άρα και η χρήση του εργοστασίου θα απαξιωθεί. Συνεπώς, η πρόταση αξιολογείται με 1 (τελείως αρνητικά).

##### Άσκηση 3

Σε θέση ποταμού, με μέση ετήσια παροχή  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , μελετάται η κατασκευή φράγματος για την δημιουργία ταμιευτήρα με μέση στάθμη +350 m, που θα εξυπηρετεί δύο χρήσεις νερού, υδροηλεκτρική και αρδευτική. Ο σταθμός παραγωγής θα τοποθετηθεί σε υψόμετρο +200 m και θα περιλαμβάνει δύο στροβίλους των 40 MW έκαστος, βαθμού απόδοσης 90%, ενώ η άρδευση θα γίνεται μέσω ανεξάρτητου αγωγού εκτροπής (ήτοι χωρίς να διέρχεται νερό από τους στροβίλους). Το σύστημα έχει σχεδιαστεί ώστε:

- οι απώλειες ενέργειας στον αγωγό προσαγωγής να είναι το 5% του ακαθάριστου ύψους πτώσης
- τα έσοδα από την πώληση ενέργειας, με τιμή μονάδας 0.12 €/kWh, να είναι ίσα με τα έσοδα από την πώληση αρδευτικού νερού, με τιμή μονάδας 0.06 €/m<sup>3</sup>.

Με βάση τα παραπάνω:

(α) Εκτιμήστε την ετήσια ποσότητα νερού που θα διατίθεται για παραγωγή ενέργειας και άρδευση.

Έστω  $V_E$  και  $V_A$  η ποσότητα νερού που διατίθεται για παραγωγή ενέργειας και άρδευση, αντίστοιχα.

Η συνολική ποσότητα που διατίθεται για τις δύο χρήσεις, με την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν απώλειες λόγω διαφυγών και υπερχειλίσης, είναι ίση με την ετήσια απορροή του ποταμού, ήτοι:

$$V = Q T_A = 30 \text{ (m}^3/\text{s)} \times 365 \times 86400 \text{ (s)} = 946.1 \times 10^6 \text{ m}^3 = 946.1 \text{ hm}^3$$

Συνεπώς ισχύει:

$$V_E + V_A = 946.1 \text{ hm}^3$$

Η μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (σε GWh) δίνεται από τη σχέση:

$$E = \eta \gamma V_E H_n / 3600$$

όπου  $\eta$  ο βαθμός απόδοσης των στροβίλων,  $\gamma$  το ειδικό βάρος του νερού ( $\gamma = \rho g = 9.81 \text{ kN/m}^3$ ), και  $H_n$  το καθαρό ύψος πτώσης σε m.

Το (μέσο) καθαρό ύψος πτώσης δίνεται από τη σχέση:

$$H_n = H - \Delta H = z - z_0 - \Delta H$$

όπου  $H$  το ολικό (ακαθάριστο) ύψος πτώσης, ήτοι η υψομετρική διαφορά μεταξύ της μέσης στάθμης του ταμιευτήρα,  $z$ , και του υψομέτρου σταθμού παραγωγής,  $z_0$ , και  $\Delta H$  οι απώλειες ενέργειας (υδραυλικές απώλειες) κατά τη μεταφορά του νερού. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό, οι υπόψη απώλειες εκτιμώνται ως το 5% του ολικού ύψους πτώσης, ήτοι  $\Delta H = 0.05H$ . Αντικαθιστώντας:

$$H_n = 0.95 (350 - 200) = 142.5 \text{ m}$$

Συνεπώς, η μέση ετήσια παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας, συναρτήσει του όγκου νερού που διέρχεται από τους στροβίλους, είναι:

$$E = 0.90 \times 9.81 \times 142.5 \times V_E / 3600 = 0.35 V_E$$

Δεδομένου ότι τα έσοδα από την πώληση ενέργειας με τιμή μονάδας 0.12 €/kWh ή 0.12 Μ€/GWh, είναι ίσα με τα έσοδα από την πώληση αρδευτικού νερού, με τιμή μονάδας 0.06 €/m<sup>3</sup> ή 0.06 Μ€/hm<sup>3</sup>, προκύπτει:

$$0.12 \times 0.35 V_E = 0.06 V_A \Rightarrow V_A = 0.70 V_E$$

Αντικαθιστώντας λαμβάνουμε  $V_E = 556.9 \text{ hm}^3$  και  $V_A = 389.2 \text{ hm}^3$ .

(β) Εκτιμήστε την παροχή λειτουργίας των στροβίλων και εξηγήστε γιατί πρόκειται για έργο αιχμής.

Η παροχή των στροβίλων είναι συνάρτηση της ισχύος και δίνεται από τη σχέση:

$$P = \eta \gamma Q H_n$$

Λύνοντας ως προς την παροχή, για συνολική ισχύ  $2 \times 40 = 80 \text{ MW}$  ή  $80\,000 \text{ kW}$ , προκύπτει:

$$Q = 80\,000 / (0.90 \times 9.81 \times 142.5) = 63.6 \text{ m}^3/\text{s}$$

Η παραπάνω ποσότητα ισομοιράζεται στους δύο (όμοιους) στροβίλους.

Με βάση τον διερχόμενο όγκο που υπολογίστηκε στο ερώτημα (α), η ετήσια παραγωγή ενέργειας είναι:

$$E = 0.90 \times 9.81 \times 556.9 \times 142.5 / 3600 = 194.6 \text{ GWh}$$

Συνεπώς, οι ετήσιες ώρες λειτουργίας των στροβίλων είναι:

$$T = 1000 E / P = 2433 \text{ ώρες}$$

Δηλαδή οι στροβίλοι λειτουργούν (σε πλήρη ισχύ) περίπου το 28% του χρόνου (συντελεστής δυναμικότητας  $2433 / 8760 = 0.278$ ), που σημαίνει ότι πρόκειται για έργο αιχμής. Αυτή είναι και η τυπική λειτουργία

των μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων, στα οποία γίνεται παραγωγή ενέργειας αποκλειστικά τις ώρες αιχμής της ζήτησης, συνήθως για διάστημα 5-6 ωρών.

Σημειώνεται ότι η συνολική παροχή των στροβίλων είναι μεγαλύτερη από τη μέση ετήσια παροχή του ποταμού, καθώς ο ταμιευτήρας αναρρυθμίζει τις εισροές, αποθηκεύοντας νερό που χρησιμοποιείται μόνο τις ώρες αιχμής (καθώς και για άρδευση).

(γ) Αναφέρετε τα μεγέθη σχεδιασμού που θα πρέπει να μεταβληθούν προκειμένου ο σταθμός παραγωγής να λειτουργήσει ως έργο βάσης.

Τα έργα βάσης εξ ορισμού λειτουργούν μεγάλο ποσοστό του χρόνου (ισοδύναμα, έχουν μεγάλο συντελεστή δυναμικότητας). Η μετατροπή ενός έργου αιχμής σε έργο βάσης σημαίνει ότι θα παράγεται η ίδια ενέργεια, λειτουργώντας τους στροβίλους περισσότερες ώρες. Προφανώς, θα αξιοποιείται η ίδια ποσότητα νερού, καθώς το υδροδυναμικό δεν μπορεί να μεταβληθεί, ενώ ο στόχος άρδευσης θα πρέπει να τηρείται. Συνεπώς, τα μεγέθη σχεδιασμού που πρέπει να μεταβληθούν είναι η ισχύς των στροβίλων (ενέργεια / χρόνος) και η παροχή (όγκος νερού / χρόνος), τα οποία μειώνονται αναλογικά (π.χ. αν διπλασιαστεί ο χρόνος λειτουργίας, τα δύο αυτά μεγέθη θα υποδιπλασιαστούν). Αυτό θα επηρεάσει, οδηγώντας σε οικονομικότερο σχεδιασμό, τόσο την επιλογή των στροβίλων όσο και την επιλογή του αγωγού προσαγωγής.

Αν το έργο έχει ήδη κατασκευαστεί, για να παράγει την ίδια ενέργεια σε περισσότερο χρόνο θα πρέπει να λειτουργεί ο ένας από τους δύο στροβίλους, άρα να χρησιμοποιείται το ήμισυ της εγκατεστημένης ισχύος.

#### **Άσκηση 4**

α) Σχεδιάστε την καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας, διαμέτρου πτερωτής 45.2 m, που λειτουργεί για εύρος ταχυτήτων από 4.0 έως 25 m/s. Δίνεται ότι από τα 4.0 έως τα 12.0 m/s, η ισχύς της Α/Γ είναι γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και στη συνέχεια σταθεροποιείται, ενώ ο βαθμός απόδοσής της,  $\eta$ , στην ταχύτητα  $V_0 = 12.0$  m/s είναι κατά 18% μικρότερος από τον μέγιστο βαθμό απόδοσης μιας ιδεατής ανεμογεννήτριας.

Η αιολική ισχύς της ροής ανέμου που κινείται με ταχύτητα  $V$  και προσπίπτει σε επιφάνεια  $A$  είναι:

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m<sup>3</sup>). Για κυκλική επιφάνεια διαμέτρου  $D$  η σχέση γράφεται:

$$P_W = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3$$

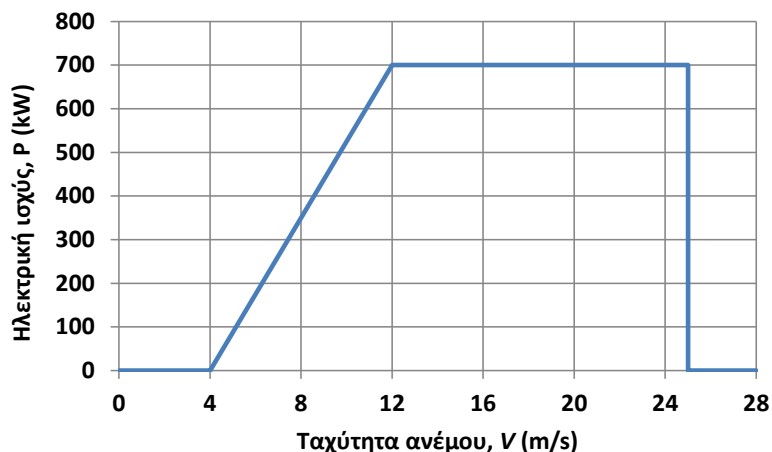
Αντικαθιστώντας για την ταχύτητα αναφοράς των 12.0 m/s και για διάμετρο πτερωτής 45.2 m, προκύπτει θεωρητική αιολική ισχύς ίση με  $P_W = 1698.3$  kW.

Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδεται σε μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου, για βαθμό απόδοσης  $\eta$ , είναι:

$$P = \eta P_W$$

Δίνεται ότι στην ταχύτητα αναφοράς των 12.0 m/s, η τιμή του  $\eta$  είναι κατά 18% μικρότερη από τον μέγιστο βαθμό απόδοσης μιας ιδεατής ανεμογεννήτριας, ήτοι το όριο Betz ( $16/27 = 0.593$ ). Υπενθυμίζεται ότι η ιδεατή Α/Γ δεν έχει απώλειες ισχύος κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική, και ο βαθμός απόδοσής της μεγιστοποιείται όταν η εξερχόμενη ταχύτητα ανέμου είναι ίση με το 1/3 της εισερχόμενης. Τελικά, για  $\eta = 0.593 - 0.180 = 0.413$  προκύπτει ότι η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς στην ταχύτητα των 12.0 m/s είναι ίση με 700 kW.

Η καμπύλη ισχύος της Α/Γ απεικονίζεται στο διάγραμμα. Παρατηρείται ότι η ισχύς των 700 kW αντιστοιχεί στην ονομαστική, καθώς μετά τα 12.0 m/s η τιμή της σταθεροποιείται.



(β) Η εταιρεία κατασκευής της Α/Γ σχεδιάζει ένα νέο μοντέλο που θα αποδίδει την ίδια ονομαστική ισχύ σε ταχύτητα  $0.95V_0$ , με συντελεστή απόδοσης  $1.2\eta_0$ . Εκτιμήστε το μήκος των πτερυγίων του νέου μοντέλου.

Αφού οι δύο μηχανές θα έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ θα ισχύει:

$$\eta_1 P_{1,W} = \eta_0 P_{0,W}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση της θεωρητικής ισχύος λαμβάνεται:

$$\eta_1 \frac{1}{8} \rho \pi D_1^2 V_1^3 = \eta_0 \frac{1}{8} \rho \pi D_0^2 V_0^3$$

Μετά από απλοποίηση προκύπτει:

$$\frac{D_1}{D_0} = \sqrt{\frac{\eta_0}{\eta_1} \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^3}$$

Για  $\eta_1 / \eta_0 = 1.20$  και  $V_1 / V_0 = 0.95$  προκύπτει λόγος διαμέτρων  $D_1 / D_0 = 1.014$ , συνεπώς τα δύο μοντέλα θα έχουν πρακτικά την ίδια διάμετρο, άρα και το ίδιο μήκος πτερυγίων (ελάχιστα μεγαλύτερο το νέο μοντέλο, με  $D_1 = 45.8$  m).

(γ) Πόση είναι η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί, σε ετήσια βάση, από το αρχικό και το νέο μοντέλο, αντίστοιχα, αν και στις δύο περιπτώσεις ο συντελεστής δυναμικότητας είναι ίσος με 35%;

Αφού τα δύο μοντέλα έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ, ήτοι 700 kW ή 0.70 MW, υποθέτοντας τον ίδιο συντελεστή δυναμικότητας, ήτοι 35%, η ετήσια παραγωγή ενέργειας θα είναι ίδια και ίση με:

$$E = 0.35 \times 0.70 \times 8760 = 2146 \text{ MWh}$$

### Άσκηση 5

Στον τύπο παρουσιάζεται ενεργειακό έργο και αναφέρεται ότι φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής έκτασης  $7000 \text{ m}^2$  θα παράγουν ετησίως 20 GWh ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες, εφόσον προέρχονταν από ορυκτά καύσιμα, θα εκπέμπονταν  $100\,000 \text{ t CO}_2$ . Αξιολογήστε την είδηση.

Προκειμένου να αξιολογηθεί το πρώτο σκέλος της παραπάνω είδησης, υποθέτουμε μια εύλογη τιμή της μέσης ετήσιας ηλιακής ενέργειας στο έδαφος, ήτοι  $1800 \text{ kWh/m}^2$  (δεχόμαστε μια αντιπροσωπευτική τιμή για τη νότια Ελλάδα), και έναν εύλογο βαθμό απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ήτοι 16%. Με τις παραπάνω παραδοχές, η ετήσια παραγωγή ενέργειας εκτιμάται σε:

$$E = 0.16 \times 1800 \times 7000 = 2\,016\,000 \text{ kWh}$$

Συνεπώς, το Φ/Β έργο αναμένεται να παράγει περίπου 2.0 GWh ανά έτος, τιμή που είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερη από αυτή που αναφέρεται στο δημοσίευμα. Ακόμα και αν υποθέσουμε μια εξαιρετικά ευνοϊκή

τιμή εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας (π.χ. 2500 kWh/m<sup>2</sup> για κάποιες περιοχές της γης, όπως η Σαχάρα, με μεγάλη ηλιοφάνεια και πολύ χαμηλή υγρασία) και βαθμό απόδοσης κοντά στο 20% (που προς το παρόν επιτυγχάνεται μόνο εργαστηριακά), δεν θα μπορούμε να παράξουμε πάνω από 3.5 GWh ετησίως.

Ως προς το δεύτερο σκέλος της είδησης, είναι γνωστό ότι η ετήσια εκπομπή CO<sub>2</sub> από την καύση πετρελαίου ανέρχεται στα 0.9 kg/kWh (ενώ είναι λίγο μεγαλύτερη για τον λιγνίτη). Αν υποθέσουμε ισοδύναμη ετήσια παραγωγή 20 GWh ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδα που χρησιμοποιεί πετρέλαιο, τότε η αντίστοιχη εκπομπή CO<sub>2</sub> θα ήταν της τάξης των 18 000 t ετησίως. Υπενθυμίζεται ότι το CO<sub>2</sub> είναι (αβλαβές για την υγεία) αέριο θερμοκηπίου, και όχι ρύπος, με την κυριολεκτική έννοια του όρου.

Συνεπώς, και ως προς τις δύο πτυχές του, το δημοσίευμα είναι απολύτως εσφαλμένο.

### **Άσκηση 6**

*Σε περιοχή της Ελλάδας προτείνεται η καλλιέργεια ενεργειακών φυτών με θερμογόνο δύναμη 25 MJ/kg και απόδοση 0.9 t ανά στρέμμα. Οι υδρευτικές ανάγκες της καλλιέργειας είναι 400 m<sup>3</sup> ανά στρέμμα, ενώ το νερό θα πρέπει να αντλείται από γεωτρήσεις βάθους 100 m. Εκτιμήστε το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την άντληση νερού ως προς την παραγόμενη ενέργεια από τη βιομάζα, σε θερμικό σταθμό με απόδοση 40%.*

Η αδιαστατοποιημένη (ανά μονάδα βιομάζας) ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ενεργειακά φυτά είναι:

$$E = 0.40 \times 25 \text{ (MJ/kg)} / 3600 \text{ (s/h)} \times 1000 \text{ (kg/t)} = 2.78 \text{ MWh/t}$$

Για παραγωγή 0.9 t ανά στρέμμα, προκύπτει ότι η ανά μονάδα καλλιεργούμενης επιφάνειας παραγωγή ενέργειας είναι:

$$E = 2.78 \text{ (MWh/t)} \times 0.90 \text{ (t/στρέμμα)} = 2.50 \text{ MWh/στρέμμα}$$

Δίνεται ότι οι ετήσιες ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών θα καλύπτονται από άντληση 400 m<sup>3</sup> ανά στρέμμα, ανυψώνοντας νερό από υψομετρική διαφορά (βάθος γεωτρήσεων) 100 m. Προσαυξάνοντας κατά 5% ώστε να ληφθούν υπόψη και οι υδραυλικές απώλειες στη μεταφορά του νερού, εκτιμάται ότι θα απαιτηθεί μανομετρικό ύψος της τάξης των 105 m. Υποθέτοντας βαθμό απόδοσης των αντλιών της τάξης του 0.85, προκύπτει ότι η εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας θα είναι:

$$E = \gamma V H_{\mu} / \eta / 3600 = 9.81 \text{ (kN/m}^3) \times 400 \text{ (m}^3\text{/στρέμμα)} \times 105 \text{ (m)} / 0.85 / 3600 \text{ (s/h)} = 135 \text{ kWh/στρέμμα}$$

Συνεπώς, για κάθε στρέμμα καλλιεργειών θα παράγονται περίπου 2500 kWh, ενώ θα καταναλώνονται μόνο 135 kWh για τις ανάγκες της άρδευσης, λόγω άντλησης, ήτοι ποσοστό της τάξης του 5%.

Βεβαίως, αν θέλουμε να υπολογίσουμε το πλήρες ενεργειακό ισοζύγιο, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη πρόσθετες ενεργειακές καταναλώσεις για τη διανομή του νερού (αν αυτή γίνεται με δίκτυα υπό πίεση, που απαιτούν περαιτέρω άντληση), τη χρήση γεωργικών μηχανημάτων, τη μεταφορά των βιοκαυσίμων στη μονάδα παραγωγής, κτλ.