

## Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

### Μάθημα: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

#### Ενότητα: Αιολική ενέργεια

#### Ασκήσεις από παλαιά θέματα εξετάσεων

1. Εκτιμήστε την ηλεκτρική ενέργεια που αναμένεται να παραχθεί από Α/Γ ονομαστικής ισχύος 600 kW σε διάστημα μίας ώρας κατά την οποία η ταχύτητα ανέμου, μετρημένη σε κοντινό μετεωρολογικό σταθμό, είναι 20 m/s.

*Η ταχύτητα ανέμου, μετά την αναγωγή της στο υψόμετρο της πτερωτής, αναμένεται να υπερβαίνει τη συνήθη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας των Α/Γ (25 m/s), συνεπώς δεν θα παραχθεί ενέργεια στο υπόψη χρονικό διάστημα.*

2. Ανεμογεννήτρια, διαμέτρου πτερωτής  $D_1$ , συγκρίθηκε με παλαιότερο μοντέλο, διαμέτρου  $D_2 = 0.80 D_1$ , και διαπιστώθηκε ότι αποδίδει 80% περισσότερη ισχύ, για ταχύτητα ανέμου,  $V$ . (α) Εκτιμήστε τον βαθμό απόδοσης  $\eta_1$  συναρτήσει του  $\eta_2$  για την υπόψη ταχύτητα. (β) Αν η αποδιδόμενη ισχύς είναι η ονομαστική, δώστε ένα εύλογο εύρος τιμών της  $V$ .

*Η ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει μια Α/Γ είναι  $P = \eta P_0$ , όπου  $\eta$  ο βαθμός απόδοσης (μεταβλητός, εξαρτάται από την ταχύτητα) και  $P_0$  η θεωρητική αιολική ισχύς, ήτοι  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$ . Διαιρώντας κατά μέλη για  $P_1 = 1.80 P_2$ ,  $D_2 = 0.80 D_1$  και  $V_2 = V_1 = V$  προκύπτει  $\eta_2 = 0.80^3 / 1.80 = 0.356 \eta_1$ . Δεδομένου ότι αποδιδόμενη ισχύς είναι η ονομαστική, η ταχύτητα  $V$  θα κυμαίνεται μεταξύ 14 και 25 m/s.*

3. Ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας εμπορίου, στην τυπική ταχύτητα παύσης της λειτουργίας της, ανέρχεται σε 3.5%. Εκτιμήστε: (α) τον βαθμό απόδοσης, στην ταχύτητα των 15 m/s, (β) την διάμετρο της πτερωτής, για ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας ίση με 1.0 MW, (γ) την ισχύ που αποδίδεται για ταχύτητες ανέμου 1.5, 15 και 30 m/s, και (δ) την ισχύ που θα απέδιδε στην ταχύτητα παύσης μια ιδεατή ανεμογεννήτρια, ίδιας διαμέτρου.

*(α) Στις δύο αυτές ταχύτητες, ήτοι την τυπική ταχύτητα παύσης, 25 m/s, και στα 15 m/s, η Α/Γ θα αποδίδει την ονομαστική της ισχύ. Από τη σχέση  $P = \eta P_0$  προκύπτει ότι για την ίδια ηλεκτρική ισχύ, ο λόγος των βαθμών απόδοσης είναι αντιστρόφως ανάλογος των λόγων της θεωρητικής αιολικής ισχύος. Από τη σχέση  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$ , προκύπτει ότι  $\eta_2 / \eta_1 = (V_1 / V_2)^3$ . Αντικαθιστώντας για  $V_1 = 25$  m/s,  $V_2 = 15$  m/s, και  $\eta_1 = 0.035$ , λαμβάνεται  $\eta_2 = 0.162$ .*

*(β) Η διάμετρος της πτερωτής εκτιμάται από τη σχέση  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$ , γνωρίζοντας ότι στην ταχύτητα των 25 m/s, η ονομαστική ισχύς  $P = 1.0$  MW αντιστοιχεί στο 3.5% της θεωρητικής, συνεπώς  $P_0 = 28.6$  MW. Επιλύοντας τη σχέση  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$  ως προς τη διάμετρο, λαμβάνεται  $D = 61.7$  m (στο ίδιο αποτέλεσμα καταλήγουμε αν θεωρήσουμε την ταχύτητα των 15 m/s και τον βαθμό απόδοσης που υπολογίστηκε παραπάνω, ήτοι 16.2%).*

*(γ) Όπως αναφέρθηκε στο ερώτημα (α), για ταχύτητα 15 m/s αποδίδεται η ονομαστική ισχύς, ήτοι 1.0 MW. Στις άλλες δύο ταχύτητες η Α/Γ δεν παράγει ηλεκτρική ισχύ, καθώς στα 1.5 m/s ο βαθμός απόδοσης είναι μηδενικός, ενώ στα 30 m/s η λειτουργία της διακόπτεται για λόγους ασφαλείας.*

*(δ) Όπως αναφέρθηκε στο ερώτημα (γ), η θεωρητική αιολική ισχύς στην ταχύτητα παύσης εκτιμάται σε  $P_0 = 28.6$  MW. Αφού ο βαθμός απόδοσης της ιδεατής Α/Γ είναι το όριο Betz, ήτοι 59.3%, η ισχύς που θα απέδιδε θα ήταν ίση με 16.9 MW.*

4. Ανεμογεννήτρια και στρόβιλος βυθισμένος στη θάλασσα, για ταχύτητες ανέμου και θαλάσσιου ρεύματος 12.5 και 2.5 m/s, αντίστοιχα, αποδίδουν την ίδια ισχύ με τον ίδιο βαθμό απόδοσης. Υπολογίστε την αναλογία των αντίστοιχων διαμέτρων του ρότορα.

Οι δύο διατάξεις εκμεταλλεύονται την ταχύτητα δύο διαφορετικών ρευστών, ήτοι του ανέμου, με τυπική πυκνότητα  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , και του θαλασσινού νερού, με πυκνότητα  $1035 \text{ kg/m}^3$ . Θεωρώντας τη σχέση  $P = \eta \rho \pi D^2 V^3 / 8$ , και εξισώνοντας τον βαθμό απόδοσης,  $\eta$ , και την παραγόμενη ισχύ,  $P$ , των δύο έργων, προκύπτει ότι  $D_1/D_2 = (\rho_2/\rho_1)^{1/2} (V_2/V_1)^{3/2} = (1035/1.225)^{1/2} (2.5/12.5)^{3/2} = 2.60$ .

5. Εκτιμήστε την ισχύ που αποδίδει μια ιδεατή ανεμογεννήτρια διαμέτρου 50 m, για ταχύτητα ανέμου 10 m/s, η οποία έχει τοποθετηθεί στην επιφάνεια της θάλασσας, και αιτιολογήστε αν, για τη ίδια ταχύτητα ανέμου, η ισχύς αυτή θα μεταβληθεί, στην υποθετική περίπτωση που η ίδια ανεμογεννήτρια τοποθετηθεί στην κορυφή των Άλπεων.

Θεωρώντας πυκνότητα αέρα ίση με  $1.225 \text{ kg/m}^3$  (τυπική τιμή, στην επιφάνεια της θάλασσας), από τη σχέση  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$  εκτιμάται θεωρητική ισχύς ανέμου ίση με 1202 kW. Πολλαπλασιάζοντας με το όριο Betz, ήτοι  $16/27 = 0.593$  (βαθμός απόδοσης ιδεατής Α/Γ) προκύπτει ισχύς 712.3 kW. Ωστόσο, η ίδια Α/Γ τοποθετηθεί σε μεγάλο υψόμετρο, η πυκνότητα του αέρα θα είναι μικρότερη, άρα θα αποδίδει μικρότερη ισχύ.

6. Αξιολογήστε την εγκυρότητα της ακόλουθης δήλωσης: Ανεμογεννήτρια διαμέτρου 32 m κάλυψε ζήτηση 1.5 MWh σε διάστημα μίας ώρας, κατά την οποία η μέση ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πτερωτής ανήλθε σε 17 m/s.

Αφού παρήχθησαν 1.5 MWh σε διάστημα μίας ώρας, η ισχύς που απέδωσε η Α/Γ ήταν  $P = 1500 \text{ kW}$ . Η αντίστοιχη αιολική ισχύς ισούται με  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8 = 1.225 \times 3.14 \times 32^2 \times 17^3 / 8000 = 2419 \text{ kW}$ . Ο λόγος της πραγματικής προς τη θεωρητική ισχύ είναι ο βαθμός απόδοσης, που προκύπτει ίσος με 0.62. Η τιμή αυτή είναι μη ρεαλιστική καθώς υπερβαίνει το όριο Betz, ήτοι 0.593, το οποίο μάλιστα αναφέρεται σε ιδεατές ανεμογεννήτριες.

7. Υπολογίστε τον βαθμό απόδοσης και τη διάμετρο Α/Γ για την οποία είναι γνωστό ότι σε ταχύτητα ανέμου 20 m/s, στην οποία αποδίδει το 65% της ισχύος μιας ιδεατής ανεμογεννήτριας ίδιας διαμέτρου, καλύπτει ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας 2.0 MWh.

Ο βαθμός απόδοσής της Α/Γ είναι το 65% του ορίου Betz, ήτοι  $\eta = 0.65 \times 0.593 = 0.385$ . Συνεπώς, για την ηλεκτρική ισχύ που απέδωσε η Α/Γ στο υπόψη διάστημα, ήτοι  $2.0 \times 1000 = 2000 \text{ kW}$ , απαιτήθηκε αιολική ισχύς  $P_0 = 2000 / 0.385 = 5192 \text{ kW}$ . Επιλύοντας τη σχέση  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8$  ως προς την διάμετρο, προκύπτει  $D = 36.7 \text{ m}$  (ταχύτητα ανέμου  $V = 20 \text{ m/s}$ , πυκνότητα αέρα  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ).

8. Σχεδιάστε την καμπύλη ισχύος Α/Γ διαμέτρου πτερωτής 45 m, που λειτουργεί για εύρος ταχυτήτων από 4.0 έως 25 m/s, και στη συνέχεια εκτιμήστε την ενέργεια που παράγει σε μέση ετήσια βάση. Δίνεται ότι: (α) από τα 4.0 έως τα 14.0 m/s, η ισχύς της Α/Γ είναι γραμμική συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου και στη συνέχεια σταθεροποιείται, (β) ο βαθμός απόδοσής της Α/Γ στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου είναι 41%, και (γ) ο μέσος συντελεστής δυναμικότητας του έργου ανέρχεται σε 35%.

Για τα δύο ερωτήματα απαιτείται η εκτίμηση της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ, που αποδίδεται για ταχύτητα  $14.0 \text{ m/s}$ , με βαθμό απόδοσης  $\eta = 0.41$ . Συνεπώς, για αιολική ισχύ  $P_0 = \rho \pi D^2 V^3 / 8 = 1.225 \times 3.14 \times 44^2 \times 14^3 / 8000 = 2672 \text{ kW}$ , αποδίδεται ηλεκτρική ισχύς  $P = \eta P_0 = 1100 \text{ kW}$  (1.1 MW). Με τα στοιχεία αυτά, σχεδιάζεται η καμπύλη ισχύος του σχήματος.

Η δυνητική παραγωγή ενέργειας σε ένα έτος, με την υπόθεση συνεχούς λειτουργίας της Α/Γ στην πλήρη (ονομαστική) ισχύ της, είναι  $1.1 \times 8760 = 9636 \text{ MWh}$ . Συνεπώς, η πραγματική μέση ετήσια παραγωγή είναι  $0.35 \times 9636 = 3373 \text{ MWh}$ .

