

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος

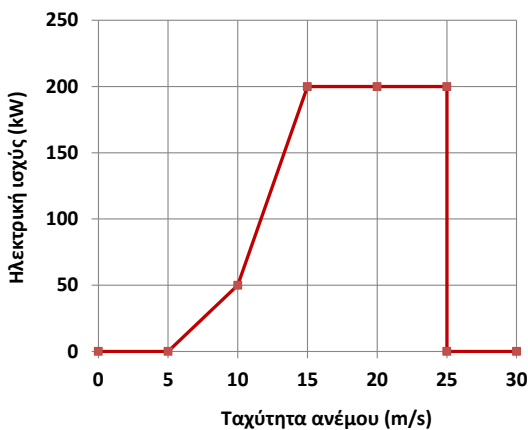
Μάθημα: Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

Ενότητα: Αιολική ενέργεια

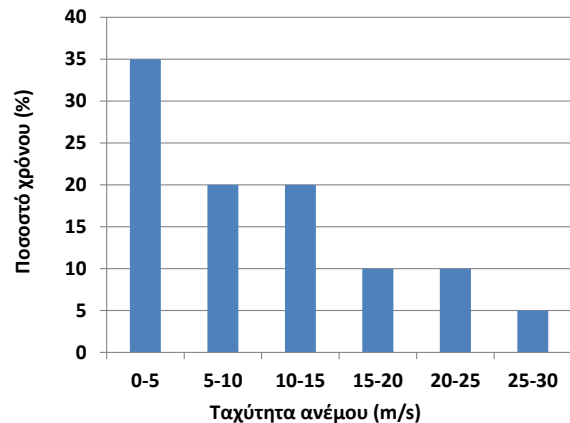
Πρότυπη άσκηση: Χαρακτηριστικά μεγέθη και ενεργειακοί υπολογισμοί ανεμογεννήτριας

Μελετάται η τοποθέτηση μιας μικρής ανεμογεννήτριας ισχύος 200 kW και διαμέτρου 16.1 m, η καμπύλη ισχύος της οποίας δίνεται σε μορφή νομογραφήματος. Στην περιοχή κατασκευής του έργου δίνονται οι μέσες ετήσιες συχνότητες των ωριαίων ταχυτήτων ανέμου, που αναφέρονται στο ύψος τοποθέτησης της πτερωτής. Ζητούνται:

1. Η μέση ετήσια αιολική ενέργεια που διατίθεται στο ύψος της πτερωτής
2. Η γραφική απεικόνιση του βαθμού απόδοσης της A/Γ συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου
3. Η μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ο συντελεστής δυναμικότητας του έργου
4. Επαναλάβετε τους υπολογισμούς του ερωτήματος (4) θεωρώντας την καμπύλη ισχύος μιας ιδεατής ανεμογεννήτριας ίδιας διαμέτρου, που λειτουργεί στο ίδιο εύρος ταχυτήτων (από 5 έως 25 m/s).



Καμπύλη ισχύος A/Γ



Ιστόγραμμα συχνοτήτων ταχύτητας ανέμου

Ερώτημα 1

Προκειμένου να υπολογίσουμε τη μέση ετήσια αιολική ενέργεια που διατίθεται στο ύψος της πτερωτής, αρκεί να κατασκευάσουμε το διάγραμμα αιολικής ισχύος – χρόνου και να υπολογίσουμε το ολοκλήρωμα:

$$E = \int_0^t P(t) dt \quad (1)$$

Αρχικά, κατασκευάζουμε το αθροιστικό διάγραμμα ταχύτητας ανέμου – χρόνου, αντιστοιχώντας σε κάθε ποσοστό χρόνου τον αντίστοιχο αριθμό ωρών του έτους. Συγκεκριμένα, στο 35% του χρόνου, δηλαδή για $0.35 \times 8760 = 3066$ ώρες, η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη των 5 m/s, στο $(35 + 20) = 55\%$ του χρόνου, δηλαδή για $0.55 \times 8760 = 4818$ ώρες, είναι μικρότερη των 10 m/s, κ.ο.κ. Οι σχετικοί υπολογισμοί δίνονται στον Πίνακα 1, ενώ το αθροιστικό διάγραμμα ταχύτητας ανέμου – χρόνου δίνεται στο Σχήμα 1.

Στη συνέχεια εφαρμόζεται η σχέση υπολογισμού της θεωρητικής αιολικής ισχύος συναρτήσεως της ταχύτητας ανέμου, και κατ' αντιστοιχία ως συνάρτηση του αθροιστικού αριθμού ωρών, ήτοι:

$$P_0 = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V^3 \quad (2)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m^3).

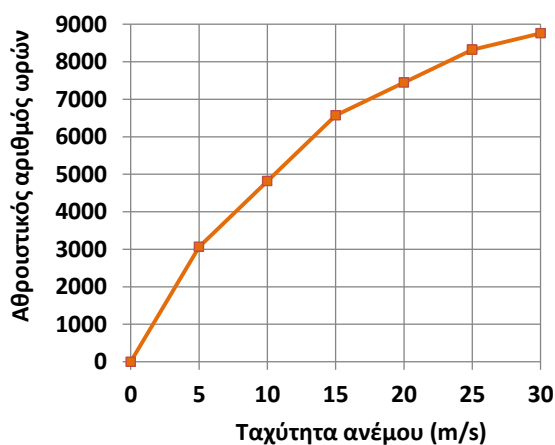
Με τον τρόπο αυτό, παράγεται η σχέση ισχύος-χρόνου, που απεικονίζεται στο **Σχήμα 2**. Επειδή η σχέση δίνεται σε διακριτοποιημένη μορφή, ο υπολογισμός του ολοκληρώματος (εξ. 1) γίνεται αριθμητικά, για κάθε κλάση ταχυτήτων ανέμου, υπολογίζοντας το εμβαδό με τον τύπου του τραpezίου. Συνεπώς, για την πρώτη κλάση, δηλαδή για ταχύτητα ανέμου μεταξύ 0 και 5 m/s, η οποία είναι διαθέσιμη 3066 ώρες ετησίως, και στην οποία αντιστοιχεί ισχύς από 0 έως 16 kW, παράγεται αιολική ενέργεια ίση με $E_{0-5} = 0.5 \times 16 \times 3066 / 1000 = 24$ MWh. Ομοίως, για τη δεύτερη κλάση ταχύτητας ανέμου, μεταξύ 5 και 10 m/s, παράγεται αιολική ενέργεια ίση με $E_{5-10} = 0.5 \times (16 + 125) \times (4818 - 3066) / 1000 = 123$ MWh, κοκ. Η γενική σχέση γράφεται:

$$E_{0,i} = \frac{1}{2} (P_{0,i} + P_{0,i-1}) (T_i - T_{i-1}) \quad (3)$$

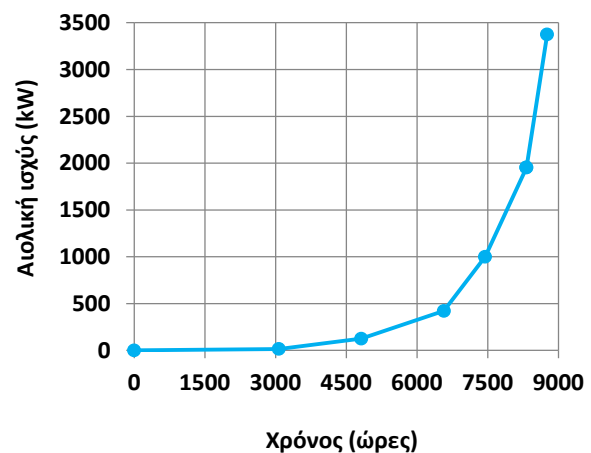
Αθροίζοντας όλες τις κλάσεις $E_{0,i}$ προκύπτει ετήσια θεωρητική ενέργεια ίση με 3709 MWh.

Πίνακας 1: Υπολογισμοί θεωρητικής αιολικής ενέργειας που παράγεται στη θέση της Α/Γ για κάθε κλάση i .

Ταχύτητα, V_i (m/s)	0	5	10	15	20	25	30
Ποσοστό χρόνου (%)	0	35	20	20	10	10	5
Αθροιστικό ποσοστό (%)	0	35	55	75	85	95	100
Αθροιστικός αριθμός ωρών, T_i	0	3066	4818	6570	7446	8322	8760
Αιολική ισχύς, $P_{0,i}$ (kW)	0	16	125	422	1000	1953	3375
Αιολική ενέργεια, $E_{0,i}$ (MWh)	0	24	123	479	623	1293	1167



Σχήμα 1: Διάγραμμα ταχύτητας ανέμου – χρόνου



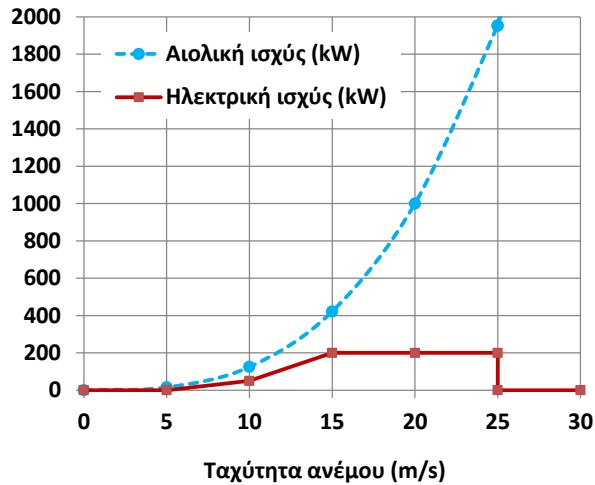
Σχήμα 2: Διάγραμμα αιολικής ισχύος – χρόνου

Ερώτημα 2

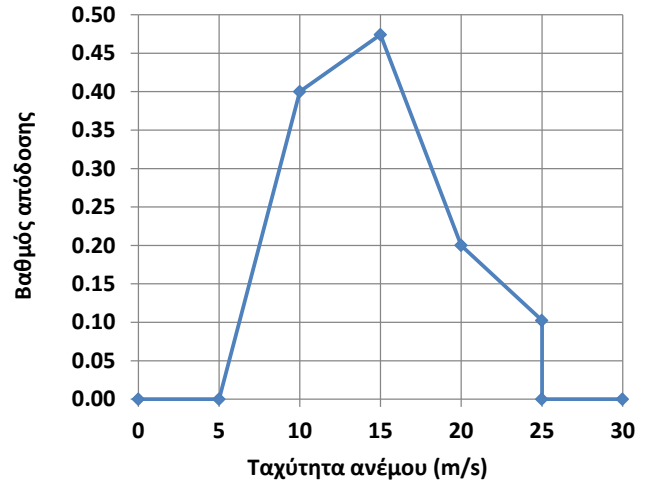
Ο βαθμός απόδοσης της Α/Γ είναι ο λόγος της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς τη θεωρητική αιολική ισχύ. Ο λόγος αυτός δεν είναι σταθερός, καθώς τόσο η αιολική όσο και η ηλεκτρική ισχύς μεταβάλλονται συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου (**Σχήμα 3**). Οι σχετικοί υπολογισμοί παρατίθενται στον **Πίνακα 2**, ενώ στο **Σχήμα 4** απεικονίζεται το διάγραμμα του βαθμού απόδοσης συναρτήσει της ταχύτητας ανέμου.

Πίνακας 2: Υπολογισμοί βαθμού απόδοσης Α/Γ.

Ταχύτητα, V_i (m/s)	0	5	10	15	20	25	30
Αιολική ισχύς, $P_{0,i}$ (kW)	0	16	125	422	1000	1953	3375
Ηλεκτρική ισχύς, P_i (kW)	0	0	50	200	200	200	0
Βαθμός απόδοσης, c_i	0.00	0.00	0.40	0.47	0.20	0.10	0.00



Σχήμα 3: Σύγκριση αιολικής και ηλεκτρικής ισχύος



Σχήμα 4: Διάγραμμα βαθμού απόδοσης A/G

Παρατηρείται ότι ο βαθμός απόδοσης μεγιστοποιείται στην ταχύτητα των 15 m/s, στο σημείο δηλαδή που η ηλεκτρική ισχύς της A/G φτάνει τη μέγιστη τιμή της (200 kW). Στη συνέχεια, ο βαθμός απόδοσης μειώνεται δραστικά, και π.χ. στην ταχύτητα των 20 m/s είναι μόλις 20%. Προφανώς, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης (0.47) υπολείπεται του ορίου Betz ($16/27 = 0.593$), που αναφέρεται στην ιδεατή ανεμογεννήτρια, η οποία δεν έχει απώλειες ισχύος κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική.

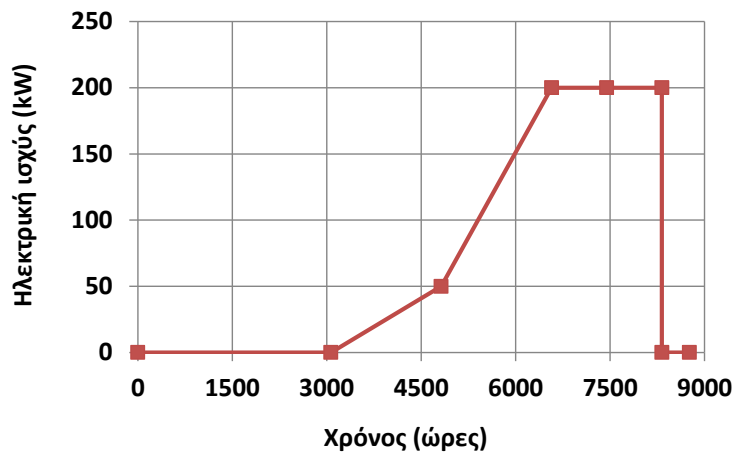
Ερώτημα 3

Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η A/G στην υπόψη θέση, εφαρμόζεται η ίδια διαδικασία με την αιολική ενέργεια. Οι σχετικοί υπολογισμοί δίνονται στον Πίνακα 3, ενώ η σχέση ηλεκτρικής ισχύος – χρόνου δίνεται στο Σχήμα 5.

Η συνολική ετήσια ηλεκτρική ενέργεια της A/G είναι 613 MWh, ενώ η δυνητική ετήσια ενέργεια για συνεχή λειτουργία στη μέγιστη ισχύ είναι $200 \times 8760 / 1000 = 1752$ MWh. Συνεπώς, ο συντελεστής δυναμικότητας εκτιμάται σε $613 / 1752 = 0.35$, τιμή που είναι εύλογη για αιολικά έργα.

Πίνακας 3: Υπολογισμοί ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στη θέση της A/G για κάθε κλάση i .

Ταχύτητα, V_i (m/s)	0	5	10	15	20	25	30
Αθροιστικός αριθμός ωρών, T_i	0	3066	4818	6570	7446	8322	8760
Ηλεκτρική ισχύς, P_i (kW)	0	0	50	200	200	200	0
Ηλεκτρική ενέργεια, E_i (MWh)	0	0	44	219	175	175	0



Σχήμα 5: Διάγραμμα ηλεκτρικής ισχύος – χρόνου (εμβαδόν = μέση ετήσια ηλεκτρική ενέργεια).

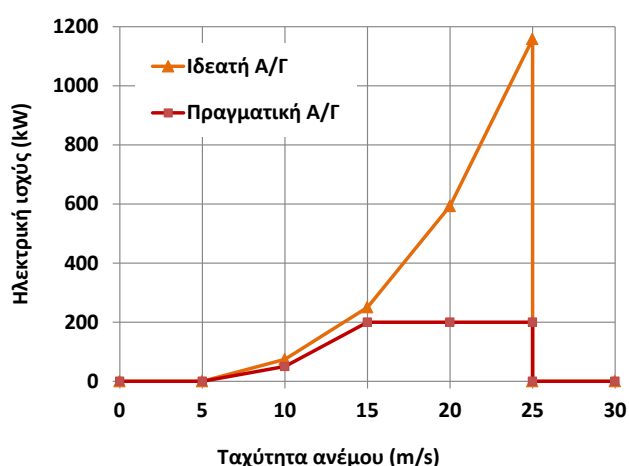
Ερώτημα 4

Για τον εκτίμηση της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει μια ιδεατή Α/Γ απαιτείται η κατασκευή της καμπύλης ισχύος της. Ως γνωστό, ο βαθμός απόδοσης μιας τέτοιας υποθετικής διάταξης είναι το όριο Betz, άρα η καμπύλη παράγεται πολλαπλασιάζοντας τις τιμές της αιολικής ισχύος επί 0.593. Επειδή η ιδεατή Α/Γ λειτουργεί στο ίδιο εύρος ταχυτήτων με την πραγματική, η ισχύς είναι μηδενική για ταχύτητες ανέμου μικρότερες των 5 m/s και μεγαλύτερες των 25 m/s. Με τις παραπάνω υποθέσεις, παράγεται η καμπύλη ισχύος (Σχήμα 6) και το διάγραμμα ισχύος-χρόνου (Σχήμα 7). Οι υπολογισμοί συνοψίζονται στον Πίνακα 4.

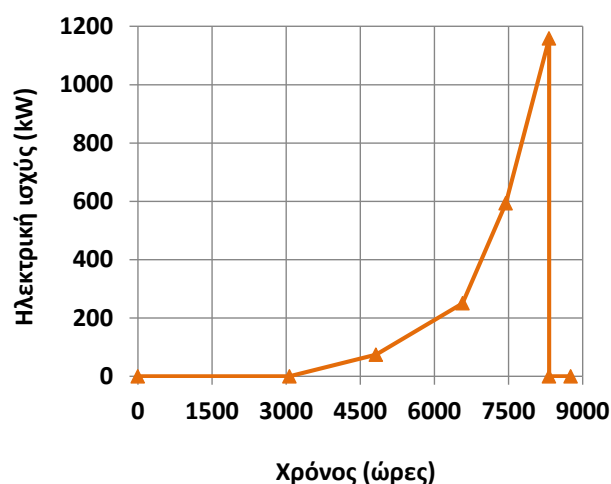
Η συνολική ετήσια ηλεκτρική ενέργεια της ιδεατής Α/Γ είναι 1485 MWh, ενώ η δυνητική ετήσια ενέργεια για συνεχή λειτουργία της στη μέγιστη ισχύ είναι $1158 \times 8760 / 1000 = 10\,146$ MWh (η μέγιστη ισχύς επιταχύνεται στη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας). Συνεπώς, ο συντελεστής δυναμικότητας στην υποθετική αυτή περίπτωση εκτιμάται σε $1485 / 10\,146 = 0.15$.

Πίνακας 4: Υπολογισμοί ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από μια ιδεατή Α/Γ για κάθε κλάση i .

Ταχύτητα, V_i (m/s)	0	5	10	15	20	25	30
Αθροιστικός αριθμός ωρών, T_i	0	3066	4818	6570	7446	8322	8760
Ηλεκτρική ισχύς, P_i (kW)	0	0	74	250	593	1158	0
Ηλεκτρική ενέργεια, E_i (MWh)	0	0	65	284	369	767	0



Σχήμα 6: Καμπύλες ισχύος ιδεατής & πραγματικής Α/Γ



Σχήμα 7: Διάγραμμα ισχύος ιδεατής Α/Γ – χρόνου