



ΑΝΩΤΑΤΗ ΣΧΟΛΗ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ενότητα 3: Αιολική Ενέργεια

Δρ. Γεώργιος Μητσόπουλος

Εισαγωγή στην Αιολική Ενέργεια

- ▶ Η αιολική ενέργεια αποτελεί τη μηχανική εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Προέρχεται από τη **διαφορά θερμοκρασίας και πίεσης** που δημιουργείται στην ατμόσφαιρα λόγω της **ηλιακής ακτινοβολίας** και της **περιστροφής της Γης**. Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως μέσω **ανεμογεννητριών (Α/Γ)**, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε **μηχανική** και στη συνέχεια σε **ηλεκτρική ενέργεια**.
- ▶ Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα της ΕΕ υπερβαίνει πλέον το **20 % της ηλεκτροπαραγωγής** (WindEurope 2024).



Φυσική του ανέμου

- ▶ Η ισχύς το ανέμου σε μέσα γεωγραφικά πλάτη δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα
- ▶ Η ισχύς είναι ανάλογη της επιφάνειας σάρωσης
- ▶ Η ισχύς είναι συνάρτηση του κύβου της ταχύτητας

- ▶ Η κινητική ενέργεια του ανέμου ανά μονάδα όγκου είναι:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho v^2$$

όπου

ρ = πυκνότητα αέρα ($\approx 1.225 \text{ kg/m}^3$ στο επίπεδο της θάλασσας)

v = ταχύτητα ανέμου (m/s).

- ▶ Η ροή ισχύος ανά επιφάνεια Αείναι:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

- ▶ Η εξάρτηση από το v^3 καθιστά την ταχύτητα του ανέμου καθοριστικό παράγοντα για την παραγόμενη ισχύ. Διπλασιασμός του v οδηγεί σε οκταπλασιασμό της ισχύος.

Νόμος Betz

Κανένας δρομέας δεν μπορεί να μετατρέψει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ισχύ.

Το θεωρητικό ανώτατο όριο απόδοσης δίνεται από τον **νόμο του Betz (1919)**:

$$C_p = \frac{P_t}{P_{wind}} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

όπου C_p = συντελεστής απόδοσης ισχύος (power coefficient).

Πρακτικά, οι σύγχρονες Α/Γ επιτυγχάνουν $C_p \approx 0.45$.

Ισχύς Ανεμογεννήτριας

Η παραγόμενη μηχανική ισχύς είναι:

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3$$

όπου $A = \pi R^2$ είναι το εμβαδόν σάρωσης των πτερυγίων.

Παράδειγμα:

$$R = 50m, v = 12m/s \rightarrow P_t \approx 0.5 \times 0.45 \times 1.225 \times \pi \times 50^2 \times 12^3 \approx 15MW_{th}.$$

Η πραγματική ηλεκτρική ισχύς περιορίζεται περαιτέρω από τον βαθμό απόδοσης του γεννήτριας (≈ 0.95) και των ηλεκτρονικών ισχύος (≈ 0.97).

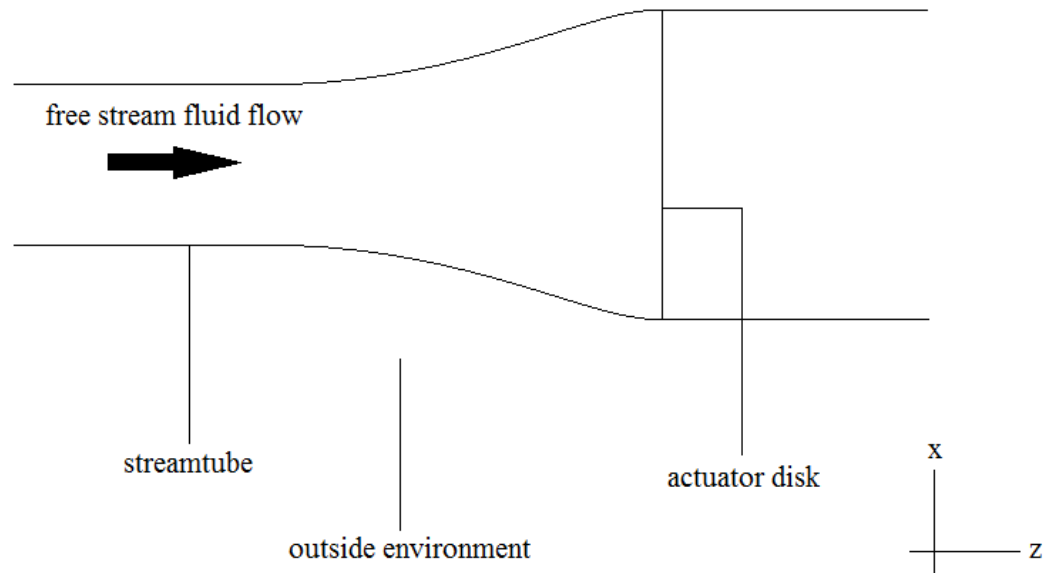
Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- ▶ Σύμφωνα με την θεωρία του δίσκου ενέργειας ο μηχανισμός δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου από τον δρομέα θεωρείται ιδανικός ,δηλαδή χωρίς απώλειες.
- ▶ Ο δρομέας εξετάζεται ως «μαύρο κουτί» διαμέσου του οποίου περνά ο αέρας που υφίσταται μεταβολή της ενέργειάς του, μεταβολή που ουσιαστικά εκφράζεται με πτώση της στατικής του πίεσης.
- ▶ Η πτερωτή θεωρείται ως δίσκος που ενεργεί πάνω στο ρευστό (δίσκος ενέργειας)
- ▶ Μία αιολική μηχανή δεν μπορεί να δεσμεύσει όλη την κινητική ενέργεια του ανέμου γιατί τότε η μάζα του αέρα που διαπερνά την πτερωτή μηχανή θα είχε στην συνέχεια μηδενική ενέργεια

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- ▶ Το μέγιστο ποσό της κινητικής ενέργειας που μπορεί να δεσμεύσει μια ιδανική αεροδυναμική μηχανή υπολογίστηκε από τον Betz.
- ▶ Ο Betz υπέθεσε ότι έχουμε μια ιδανική πτερωτή η οποία δεν φέρει το μηχανικό εξοπλισμό της πάνω στο άξονα περιστροφής και ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι απεριόριστος, χωρίς να παρατηρείται αντίσταση από την διέλευση του αέρα από αυτά
- ▶ Αυτές οι προϋποθέσεις επιτρέπουν να θεωρηθεί ότι:
 - Υπάρχουν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την περιοχή σάρωσης της πτερωτής
 - Η ταχύτητα του αέρα, τόσο διαμέσου της πτερωτής όσο και μακριά από αυτή είναι αξονική.

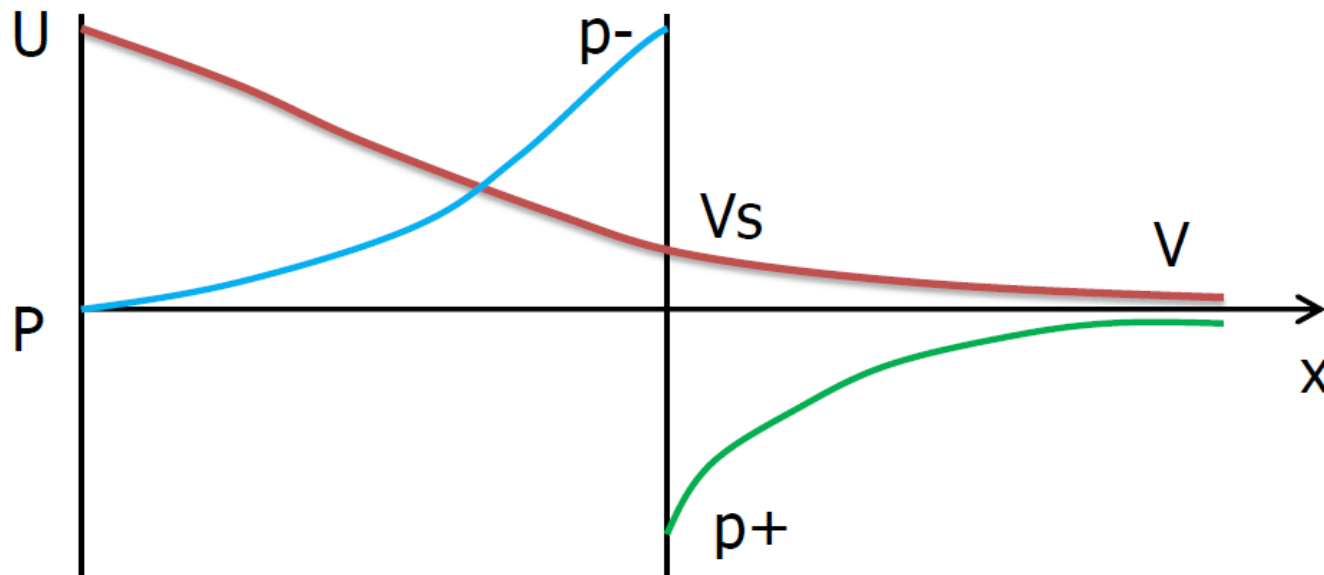
Θεωρία Δίσκου Ενέργειας



- ▶ Η διάμετρος μίας ιδανικής πτερωτής, τοποθετημένη μέσα σε φλέβα κινούμενου αέρα ορίζει τον ροϊκό σωλήνα του ανεμοκινητήρα
- ▶ Ο αέρας πολύ μακριά (στο άπειρο) στα προσήνεμα του δίσκου έχει πίεση p και πλησιάζει τον δίσκο με ταχύτητα U .
- ▶ Ο δίσκος αφαιρεί ενέργεια από τον αέρα και υπήνεμα από τον δίσκο όπου η πίεσή του αέρα θα έχει αποκατασταθεί από την πίεση του περιβάλλοντος p , η ταχύτητα του ανέμου θα είναι V μικρότερη από την U ($V < U$)
- ▶ Λόγω διατήρησης της μάζας μέσα στον ροϊκό σωλήνα θα πρέπει η διατομή του ροϊκού σωλήνα να μεγαλώνει πίσω από την πτερωτή

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

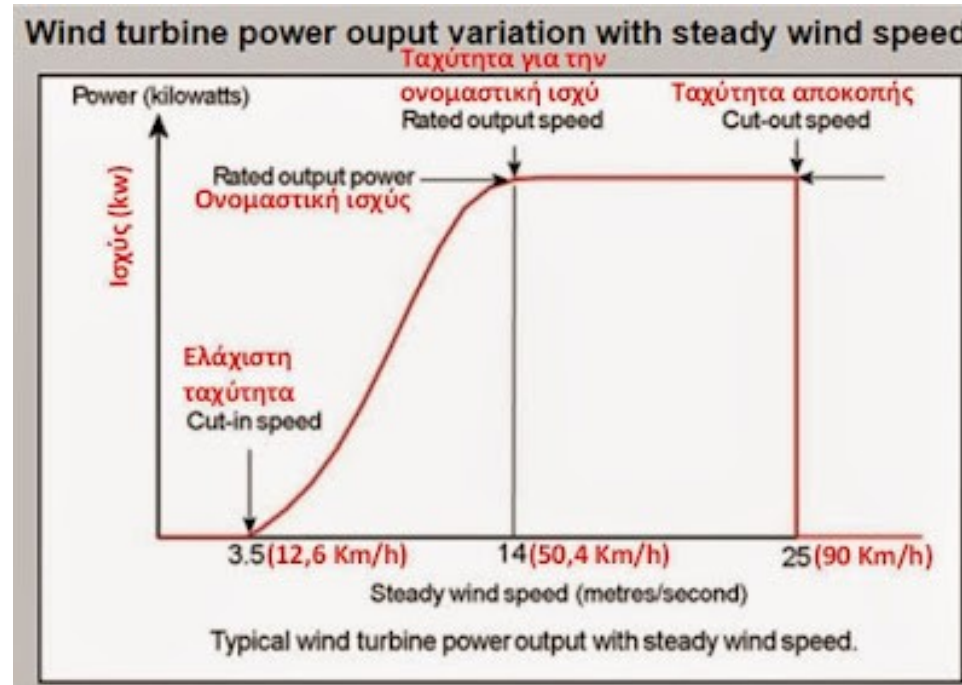
- ▶ Το ρευστό μετά τον δίσκο έχει μικρότερη ενέργεια από αυτή πριν από τον δίσκο και οριακά λίγο πριν και λίγο μετά παραμένει η ίδια για λόγους διατήρησης της μάζας
- ▶ Η στατική πίεση του ρευστού μετά τον δίσκο θα είναι μικρότερη από την στατική πίεση πριν από τον δίσκο



Καμπύλη Ισχύος (Power Curve)

Η καμπύλη ισχύος δείχνει τη σχέση μεταξύ ταχύτητας ανέμου και παραγόμενης ισχύος:

- ▶ $v < v_{\text{cut-in}}$ ($\approx 3 \text{ m/s}$): Μηδενική παραγωγή.
- ▶ $v_{\text{cut-in}} < v < v_{\text{nom}}$ ($\approx 12\text{-}13 \text{ m/s}$): Η ισχύς αυξάνει με v^3 .
- ▶ $v_{\text{nom}} < v < v_{\text{cut-out}}$ ($\approx 25 \text{ m/s}$): Σταθερή ονομαστική ισχύς.
- ▶ $v > v_{\text{cut-out}}$: Αυτόματη παύση για ασφάλεια.

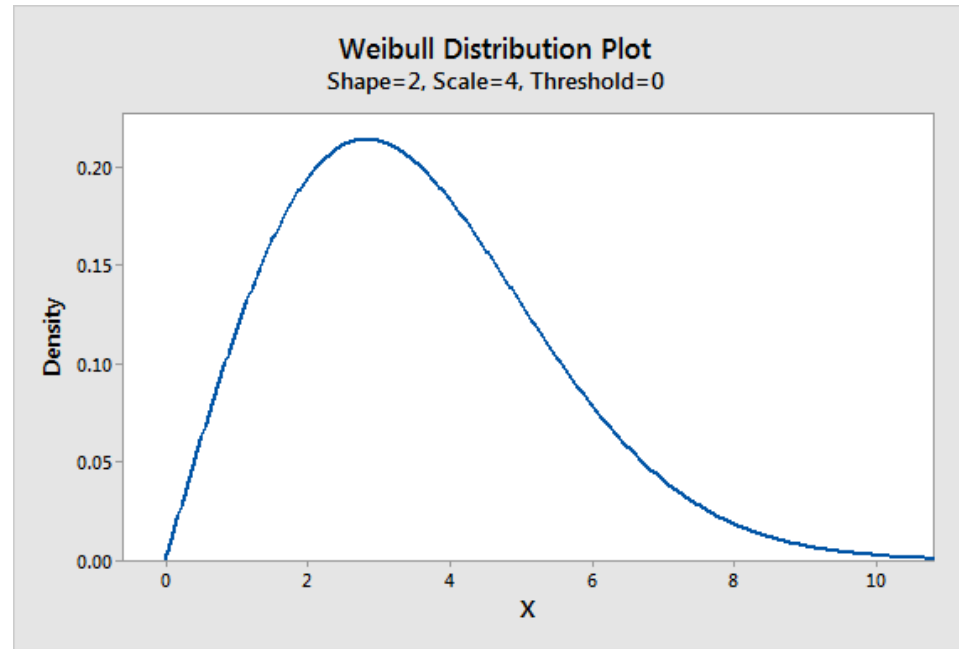


Αιολικό Δυναμικό & Κατανομή Weibull

- Η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί στατιστική κατανομή **Weibull**, με συντελεστές k (σχήματος) και c (κλίμακας).
Η μέση ισχύς του ανέμου σε μια θέση υπολογίζεται ως:

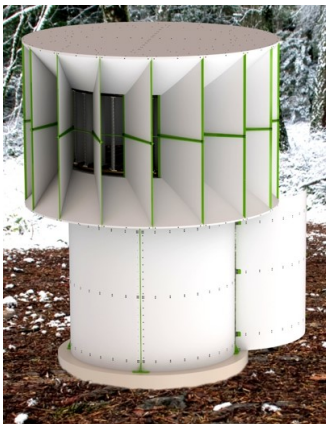
$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)$$

- Η γνώση των παραμέτρων Weibull είναι κρίσιμη για την εκτίμηση ετήσιας παραγωγής (ΑΕΡ).



Τύποι Ανεμογεννητριών

- ▶ **Οριζόντιου άξονα (HAWT):** Οι πιο διαδεδομένες, υψηλής απόδοσης, κατάλληλες για μεγάλα πάρκα.
- ▶ **Κατακόρυφου άξονα (VAWT):** Darrieus, Savonius· λειτουργούν με άνεμο οποιασδήποτε διεύθυνσης, χαμηλότερη απόδοση, χρήσιμες σε αστικά περιβάλλοντα.



Αεροδυναμική Πτερυγίων

- ▶ Τα πτερύγια δρουν ως ανεστραμμένα φτερά αεροπλάνου.
- ▶ Δημιουργούν δύναμη άντωσης (Lift) και αντίστασης (Drag).
- ▶ Η αναλογία L/D καθορίζει την απόδοση του πτερυγίου.
- ▶ Η γωνία προσβολής (angle of attack, α) πρέπει να διατηρείται σε τιμές 6-10° για μέγιστη απόδοση.

Δυναμική Συμπεριφορά Αιολικής Μηχανής



- ▶ Η απόδοση μιας αιολικής μηχανής επηρεάζεται από την απόσταση μεταξύ των πτερυγίων για δεδομένες ταχύτητες ανέμου.
- ▶ Η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων πρέπει να προσαρμόζεται με την ταχύτητα του ανέμου.

Συντελεστής Απόδοσης Ισχύος $C_p(\lambda, \beta)$

Ο C_p εξαρτάται από το λόγο ταχύτητας ακροπερυγίου (λ) και τη γωνία πέδησης β :

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}$$

- ▶ $C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{-C_5/\lambda_i} + C_6\lambda$
- ▶ Η παράμετρος $\lambda_i = \frac{1}{(1/(\lambda+0.08\beta)) - 0.035/(\beta^3+1)}$.
- ▶ Πειραματικές σταθερές C_1-C_6 προσαρμόζονται σε κάθε τύπο Α/Γ.



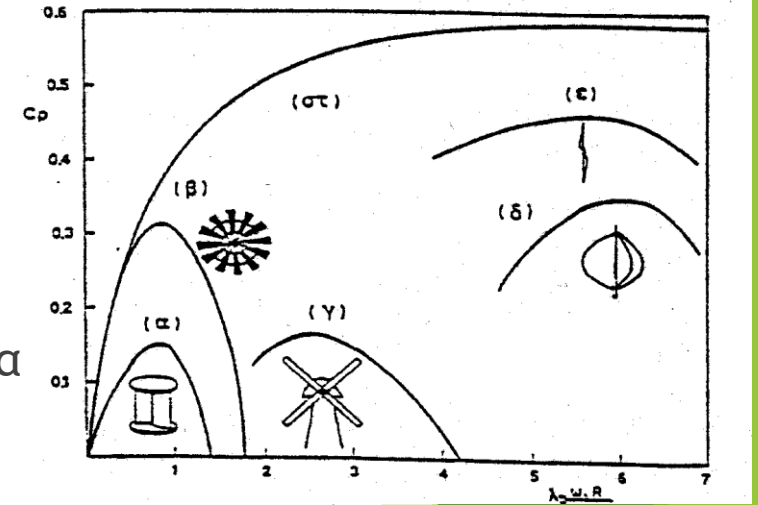
Λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου

Ο συντελεστής απόδοσης μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται από:

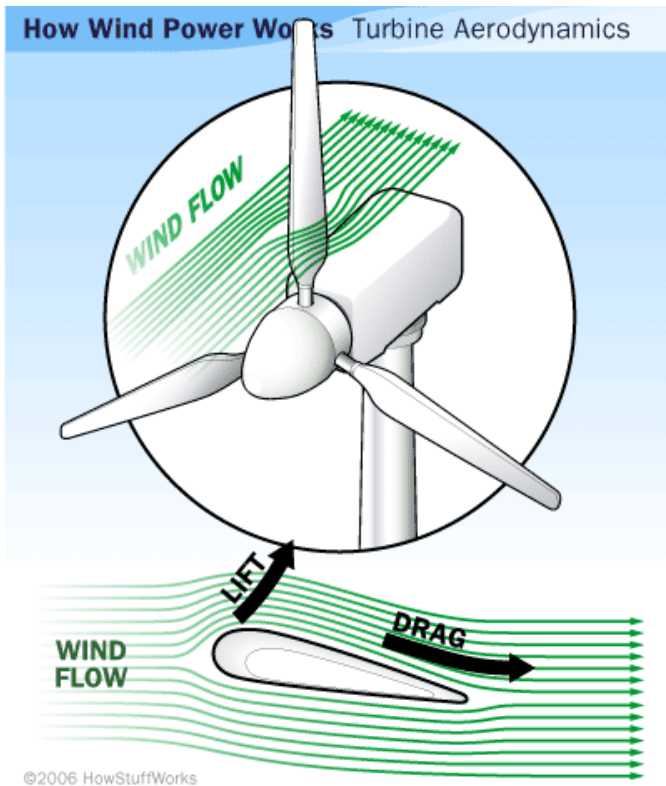
- ▶ Λόγος της ταχύτητας ακροπτερυγίου λ : $\lambda = \text{ταχύτητα άκρου} / \text{ταχύτητα ανέμου} = R\omega / u$
- ▶ Για μέγιστη ισχύ έχουμε: $\lambda = 2\pi R / nd = 2\pi / kn$

όπου n ο αριθμός των ακροπτερυγίων, d το πλάτος του ακροπτερυγίου και $k=d/R$

- ▶ Όταν $k=1/2$ το λ γίνεται μέγιστο, οπότε για μια αιολική μηχανή με n πτερύγια έχουμε: $\lambda_0 = 4\pi / n$
- ▶ Η ιδανική καμπύλη ισχύος τείνει ασυμπτωτικά στο όριο Betz.
- ▶ Μεγάλες διαφορές στις διάφορες μηχανές :
 - πολύπτερη αιολική μηχανή: μεγάλη διακύμανση του συντελεστή ισχύος και το C_p λαμβάνει μικρές τιμές
 - γρήγορη αιολική μηχανή με 2πτερύγια: μικρή διακύμανση και μεγάλες τιμές



Δυναμική Συμπεριφορά Αιολικής Μηχανής



► Δύο είναι οι βασικές δυνάμεις :

- Ανωστική δύναμη
- Οπισθέλκουσα δύναμη

Η ανωστική δύναμη είναι κάθετη στην οπισθέλκουσα, η οποία εμποδίζει την περιστροφή

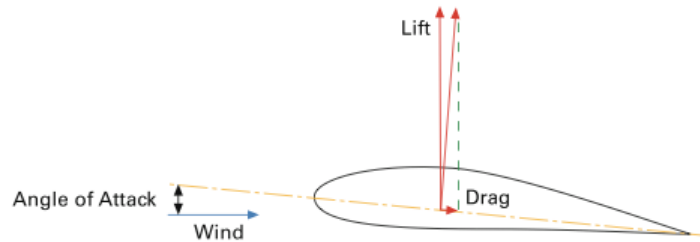
► Ένας από τους βασικούς στόχους του αεροδυναμικού σχεδιασμού της πτερωτής είναι η κατασκευή πτερυγίων με υψηλό λόγο ανωστικής προς οπισθέλκουσα

Ανωστική Δύναμη(L)

- ▶ Ο αέρας ολισθαίνει κατά μήκος της άνω επιφάνειας του πτερυγίου με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι στην κάτω επιφάνεια. Αυτό σημαίνει ότι η πίεση είναι μικρότερη στην άνω επιφάνεια του πτερυγίου από ότι στην κάτω με συνέπεια να ασκείται μία ανωστική δύναμη από κάτω προς τα πάνω .
- ▶ Η ανωστική δύναμη είναι κάθετη στην διεύθυνση του ανέμου

$$C_L = \frac{L}{1/2 \rho u^2 S}$$

όπου :u ταχύτητα του ανέμου ως προς την αεροτομή και S επιφάνεια προβολής της αεροτομής στον άνεμο

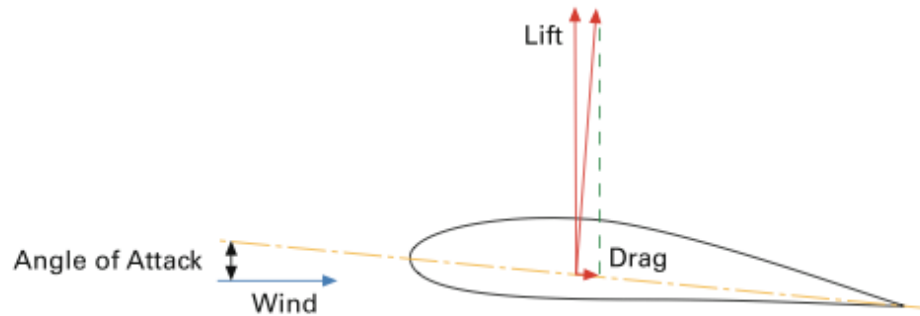


Οπισθέλκουσα Δύναμη (D)

Ουσιαστικά είναι η αντίσταση που εμφανίζει αεροτομή στον αέρα που προσπέφτει στην πτερωτή . Η οπισθέλκουσα αυξάνει με την αύξηση της επιφάνειας προσβολής. Είναι εξίσου σημαντική για τον αεροδυναμικό σχεδιασμό .

Αντίστοιχα υπάρχει και ο συντελεστής οπισθέλκουσας ο οποίος είναι αδιάστατος:

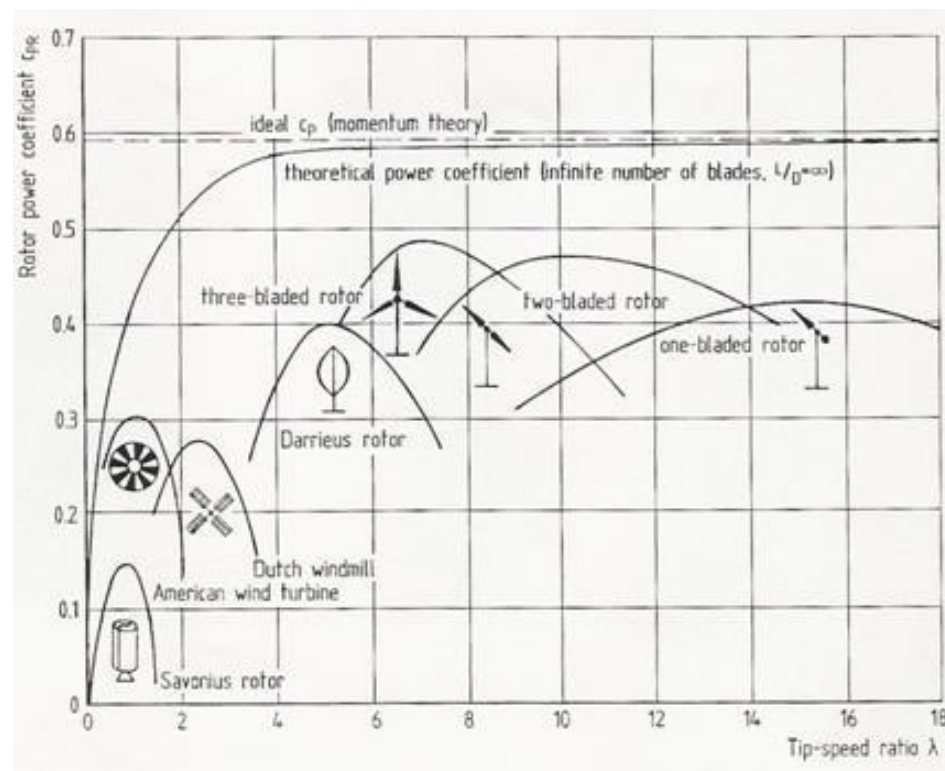
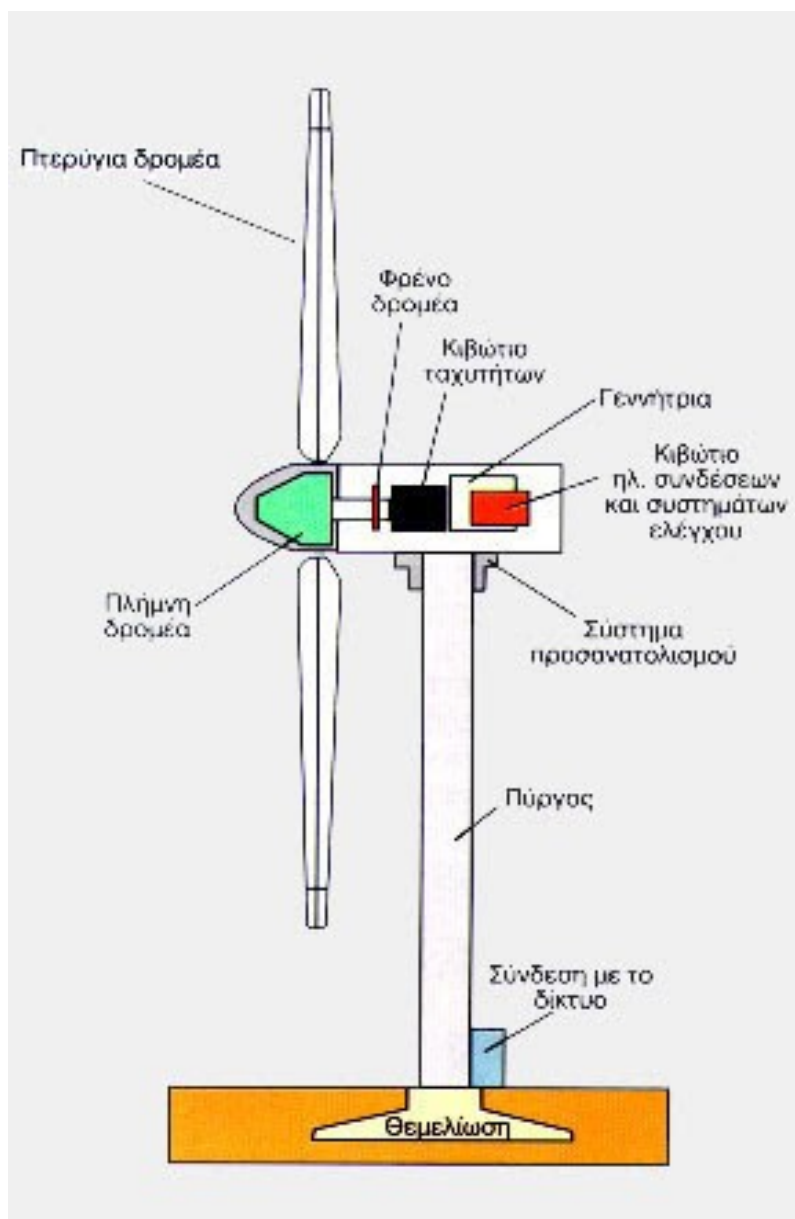
$$c_D = \frac{D}{1/2 \rho u^2 S}$$



Μηχανικά μέρη Ανεμογεννήτριας

Βασικά δομικά τμήματα:

- ▶ **Δρομέας (Rotor):** Πτερύγια + άτρακτος· μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε περιστροφική.
- ▶ **Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox):** Αυξάνει τις στροφές από ~15 rpm σε ~1500 rpm.
- ▶ **Γεννήτρια (Generator):** Συνήθως επαγωγική ή σύγχρονη με μόνιμους μαγνήτες.
- ▶ **Πύργος (Tower):** Στήριξη σε ύψος 60-150 m· μειώνει την τυρβώδη ροή.
- ▶ **Νασελά (Nacelle):** Περιλαμβάνει μηχανισμό yaw, brake, έλεγχο και αισθητήρες.



Τύποι Γεννητριών

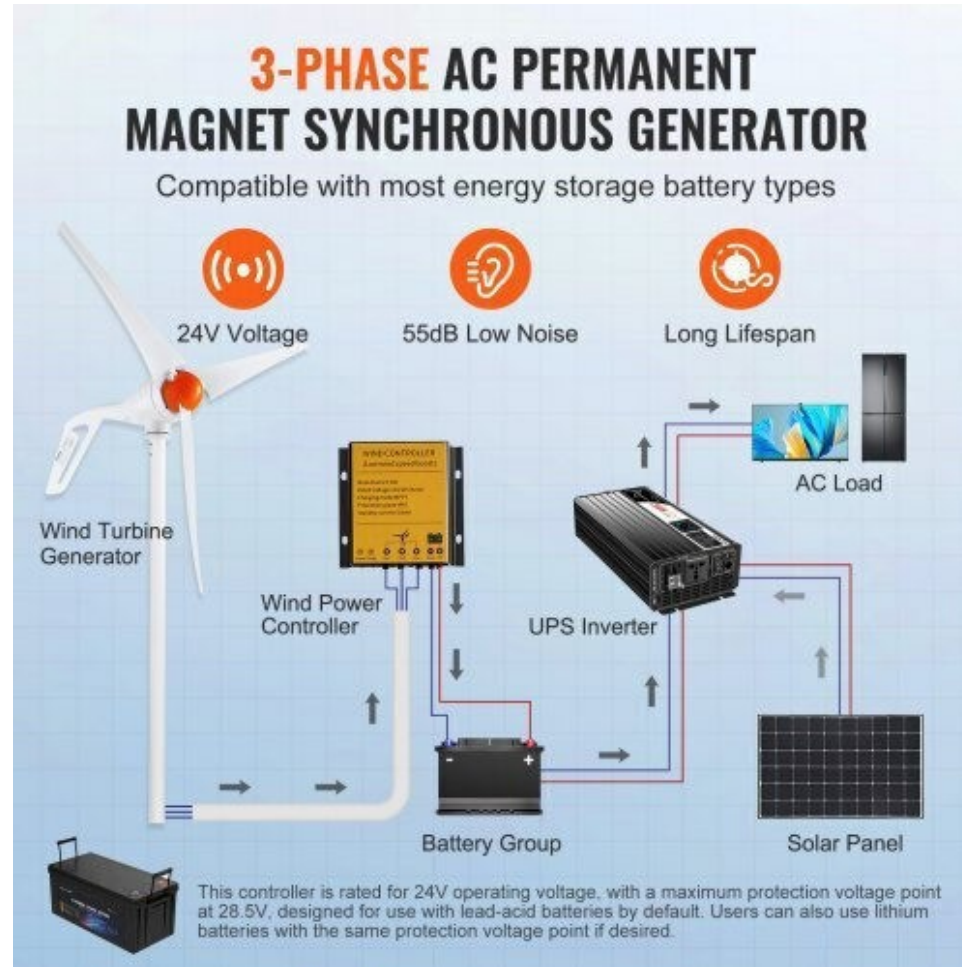
- ▶ **Επαγωγική γεννήτρια με διπλή τροφοδότηση (DFIG):**
 - Μεταβλητή ταχύτητα, έλεγχος ενεργού & άεργου ισχύος.
 - Χρησιμοποιεί μετατροπέα στο δρομέα (~30 % της ισχύος).
- ▶ **Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών (PMSG):**
 - Υψηλή απόδοση, χωρίς slip rings, ιδανική για direct-drive.
- ▶ **Επαγωγική (SCIG):**
 - Απλή, αξιόπιστη, αλλά απαιτεί σταθερή συχνότητα και εξωτερική διέγερση.



Ηλεκτρονικά Ισχύος και Έλεγχος

Ο μετατροπέας AC/DC/AC επιτρέπει μεταβλητή ταχύτητα και σταθερή συχνότητα δικτύου (50 Hz). Ο έλεγχος περιλαμβάνει:

- **Pitch control:** Ρύθμιση γωνίας πτερυγίων ώστε να διατηρείται σταθερή ισχύς πάνω από την ονομαστική ταχύτητα.
- **Yaw control:** Περιστροφή της νασελάς ώστε το επίπεδο δρομέα να ευθυγραμμίζεται με τη διεύθυνση του ανέμου.
- **Torque control:** Ρύθμιση ροπής για βέλτιστο $C_p(\lambda)$.



Σύστημα Μετατροπής Ενέργειας (Block Diagram)

Διάγραμμα ροής:

Αέρας → Δρομέας → Άξονας → Γεννήτρια → Μετατροπέας →
Μετασχηματιστής → Δίκτυο.

Κάθε υποσύστημα έχει βαθμό απόδοσης η_i .

Η συνολική απόδοση:

$$\eta_{total} = \eta_{aero} \cdot \eta_{gear} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{conv} \cdot \eta_{trans}$$

► Τυπικά: $\eta_{total} \approx 0.35-0.45$.

Συνδεσμολογία και Συστήματα Ελέγχου Πάρκου

Στα μεγάλα αιολικά πάρκα:

- ▶ Υπάρχει **SCADA** (Supervisory Control and Data Acquisition).
- ▶ Παρακολουθούνται ροπές, θερμοκρασίες, τάσεις, άεργος ισχύς.
- ▶ Γίνεται έλεγχος ροής ενέργειας προς τον υποσταθμό 33 kV / 150 kV.

Θέση και Υψόμετρο

Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος:

$$v(z) = v_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha$$

όπου

α = εκθέτης τραχύτητας (~0.14 για πεδινά, 0.20-0.30 για αστικά).

Η αύξηση από 10 m σε 100 m μπορεί να διπλασιάσει την ισχύ λόγω της εξάρτησης v^3 .

Επιλογή Θέσης Εγκατάστασης

Παράγοντες:

- ▶ Μέση ετήσια ταχύτητα $> 6 \text{ m/s}$ (σε 80-100 m ύψος).
- ▶ Απόσταση $> 500 \text{ m}$ από κατοικίες (λόγοι θορύβου).
- ▶ Μη ύπαρξη εμποδίων (λόγος σκίασης < 0.2).
- ▶ Εγγύτητα σε δίκτυο ΜΤ ή ΥΤ.
Εργαλεία: **WindPRO**, **WAsP**, **GIS** ανάλυση και χάρτες ΡΑΕ.

Αιολικό Δυναμικό Ελλάδας

Η Ελλάδα διαθέτει ένα από τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά της Ευρώπης:

- ▶ Νησιά Αιγαίου: μέση ταχύτητα > 8 m/s.
- ▶ Ηπειρωτική Ελλάδα: 6-7 m/s σε ορεινές περιοχές.
Το 2024 η εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε τα **5.8 GW** (πηγή: ΔΑΠΕΕΠ 2024).
- ▶ (Εικόνα: χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας - ΚΑΠΕ ή WindAtlas.)

Ενεργειακή Παραγωγή και Συντελεστής Φορτίου

Ο συντελεστής φορτίου (Capacity Factor):

$$CF = \frac{E_{annual}}{P_{rated} \times 8760}$$

Στην Ελλάδα κυμαίνεται μεταξύ **0.28-0.38** ανάλογα με την περιοχή.

Η ετήσια παραγωγή μιας Α/Γ 3 MW με $CF = 0.33$ είναι:

$$E = 3 \times 0.33 \times 8760 = 8.67 GWh/έτος$$

Αιολικά Πάρκα στην Ελλάδα

- ▶ Περισσότερα από 480 πάρκα > 1 MW.
- ▶ Κύριες περιοχές: Εύβοια, Κρήτη, Λακωνία, Ροδόπη, Κυκλάδες.
- ▶ Μεγάλα έργα: Καφηρέας (330 MW), Ρόδος (90 MW).
- ▶ Υπό ανάπτυξη υπεράκτια (offshore) > 1 GW έως 2030.

Υπεράκτια Αιολικά (Offshore Wind)

Πλεονεκτήματα: υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, χαμηλή τυρβώδης ροή.
Τεχνολογίες:

- ▶ **Fixed-bottom:** θεμελίωση σε βάθη < 60 m.
- ▶ **Floating:** πλωτές πλατφόρμες, βάθη > 100 m.

Σχεδιαζόμενα έργα στην Ελλάδα: Κάρπαθος, Λήμνος, Σκύρος.

Περιβαλλοντικές Επιδράσεις

- ▶ **Θόρυβος:** < 45 dB σε 500 m απόσταση.
- ▶ **Οπτική όχληση:** εξαρτάται από γωνία θέασης και χρωματισμό πύργου.
- ▶ **Ορνιθοπανίδα:** μέτρα αποφυγής (συστήματα ανίχνευσης πτήσης, αποστάσεις μεταναστευτικών διαδρομών).
- ▶ **Ανακύκλωση περυγίων:** νέα σύνθετα υλικά (thermoplastic composites).

Οικονομική Ανάλυση

Το κόστος εγκατάστασης: ~1 000 €/kW.

Ετήσιο O&M = 2-3 % του CAPEX.

Επίπεδο Κόστους Ενέργειας (LCOE):

- ▶ Για σύγχρονα πάρκα: **45-60 €/MWh** (WindEurope 2025).
- ▶ $LCOE = \frac{\sum_t ((I_t + O_t) / (1+r)^t)}{\sum_t E_t / (1+r)^t}$

Ενεργειακή Απόδοση και Ενσωμάτωση στο Δίκτυο

Τα αιολικά συστήματα απαιτούν ευέλικτη διαχείριση φορτίου λόγω στοχαστικότητας.

Τεχνικές:

- ▶ Forecasting (ARIMA, LSTM μοντέλα).
- ▶ Συνδυασμός με BESS (energy storage).
- ▶ Εικονικά αιολικά πάρκα - συντονισμένος έλεγχος (Virtual Power Plant).

Σύγχρονες Τεχνολογικές Τάσεις

- ▶ Αυξανόμενη διάμετρος ρότορα > 160 m.
- ▶ Ανεμογεννήτριες > 10 MW. Direct-drive χωρίς gearbox.
- ▶ Χρήση CFD για αεροδυναμική βελτιστοποίηση.
- ▶ Δομική υγεία (Structural Health Monitoring) με αισθητήρες οπτικών ινών.

Ερευνητικές Κατευθύνσεις

- ▶ Υβριδικά συστήματα αιολικής + φωτοβολταϊκής + αποθήκευσης.
- ▶ Offshore με κυματική ενέργεια (Wind-Wave Hybrid).
- ▶ Προηγμένοι αλγόριθμοι pitch control (ML methods).
- ▶ 3D-εκτύπωση πτερυγίων & ανακυκλώσιμα υλικά.

Παράδειγμα Εφαρμογής

Πάρκο Καφηρέας (Εύβοια):

- ▶ 67 Α/Γ Siemens Gamesa 4.3 MW, συνολικά 284 MW.
- ▶ Μέση ετήσια παραγωγή ≈ 840 GWh.
- ▶ Εξοικονόμηση $\approx 800\,000$ t CO₂/έτος.

Άσκηση

Ζητείται: Να υπολογιστεί η παραγόμενη ισχύς μιας Α/Γ με $R = 40 \text{ m}$, $C_p = 0.44$, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ και $v = 10 \text{ m/s}$.

Λύση (βήμα-βήμα):

❶ Εμβαδόν σάρωσης: $A = \pi R^2 = 3.1416 \times 40^2 = 5027 \text{ m}^2$

❷ Ισχύς ανέμου: $P_{wind} = 0.5 \times \rho \times A \times v^3 = 0.5 \times 1.225 \times 5027 \times 1000 = 3.08 \times 10^6 \text{ W}$

❸ Παραγόμενη μηχανική ισχύς: $P_t = C_p \times P_{wind} = 0.44 \times 3.08 \text{ MW} = 1.36 \text{ MW}$

❹ Θεωρώντας απόδοση γεννήτριας & μετατροπέα 0.93:
 $P_{el} = 1.36 \times 0.93 = 1.26 \text{ MW}$.

✓ **Απάντηση:** Η Α/Γ παράγει ~1.26 MW σε άνεμο 10 m/s.

Κύρια Συμπεράσματα

- ▶ Η παραγόμενη ισχύς εξαρτάται από v^3 , R^2 και C_p .
- ▶ Το θεωρητικό όριο απόδοσης είναι 59.3 %.
- ▶ Οι σύγχρονες Α/Γ προσεγγίζουν απόδοση 45 %.
- ▶ Η Ελλάδα διαθέτει υψηλό αιολικό δυναμικό με $CF \sim 0.35$.
- ▶ Η αιολική ενέργεια είναι κρίσιμο στοιχείο του μείγματος RES 2030+.

Βιβλιογραφία

- ▶ Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L. (2010). Wind Energy Explained, Wiley.
- ▶ Burton T. et al. (2022). Wind Energy Handbook,
- ▶ Wiley.Hau E. (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer.
- ▶ IRENA (2024). Renewable Energy Statistics.
- ▶ WindEurope (2024). European Wind Energy Report.
- ▶ ΔΑΠΕΕΠ (2024). Ετήσια Έκθεση ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ.
- ▶ ΚΑΠΕ (2023). Χάρτες Αιολικού Δυναμικού Ελλάδας.
- ▶ REN21 (2023). Global Status Report.
- ▶ Papadopoulos A. et al. (2022). “Wind Potential Assessment in Greek Islands”, Energies.
- ▶ Tsoutsos T., Frangou M. (2024). “Offshore Wind in the Mediterranean”, Renew. Energy Rev.