



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ

**ΔΙΑΛΕΞΗ 03:
Αιολικά Συστήματα Ι – Παραγωγή Ενέργειας από
Αιολικά Συστήματα**

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

Περιεχόμενα διάλεξης

- **Αιολικά Συστήματα Ι**
- **Παραγωγή ενέργειας από αιολικά συστήματα**
- Υπολογισμός διαθέσιμης αιολικής ενέργειας
- Θεωρία δίσκου, συντελεστής ισχύος, όριο του Bentz.
- Δυναμική συμπεριφορά ανεμογεννήτριας.
- Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας
- Χαρακτηριστικές ταχύτητες ανεμογεννητριών
- Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από ανεμογεννήτρια, Capacity Factor αιολικού πάρκου
- Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών
- Μετρήσεις αιολικού δυναμικού, Κατανομή ανέμου
- **Ασκήσεις - εφαρμογές**

Ορισμοί - έννοιες

- Η ολική ενέργεια ενός συστήματος ανά μονάδα μάζας

$$e = \frac{E}{m} \quad (\text{kJ/kg})$$

- Η κινητική ενέργεια ενός συστήματος

$$KE = m \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ})$$

ενώ ανά μονάδα μάζας δίνεται ως

$$ke = \frac{V^2}{2} \quad (\text{kJ/kg})$$

Ορισμοί - έννοιες

Ρυθμός ροής μάζας \dot{m} δίνεται ως

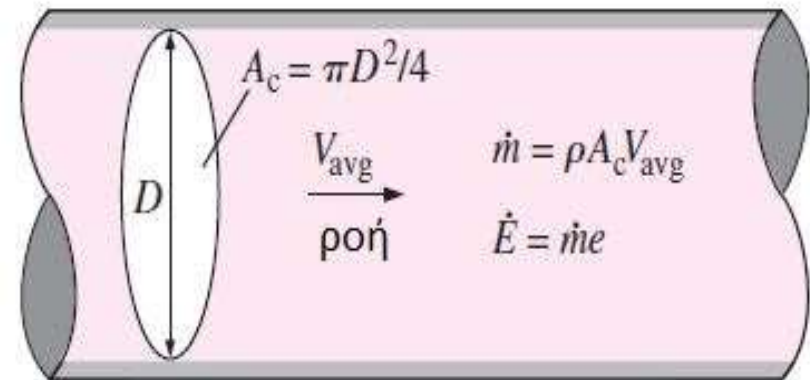
$$\dot{m} = \rho A_c V_{avg} \quad (\text{kg/s})$$

Το ποσό της μάζας που ρέει μέσα από μία διατομή στη μονάδα του χρόνου

- ❖ A_c = Επιφάνεια της διατομής ροϊκού σωλήνα
- ❖ V_{avg} = Μέση ταχύτητα της ροής (κάθετης στην A_c)
- ❖ ρ = Πυκνότητα του ρευστού
- ❖ D = Διάμετρος ροϊκού σωλήνα

- Ο ρυθμός ροής της ενέργειας που σχετίζεται με ένα ρευστό το οποίο ρέει με ρυθμό \dot{m} είναι

$$\dot{E} = \dot{m} e \quad (\text{kJ/s}) \quad (\text{kW})$$



Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

- 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

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

Θεωρώντας ότι ο αέρας διαπερνά κάθετα την επιφάνεια A με στιγμιαία ταχύτητα V ($V=S/t$)

$$m = \rho \cdot U = \rho \cdot A \cdot S = \rho \cdot A \cdot V \cdot t$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Επίδραση επιφάνειας σάρωσης \rightarrow ² Επίδραση ταχύτητας \rightarrow ³

Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

- Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε διαστήματα T :

$$V = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt$$

- Η στιγμιαία ταχύτητα σε σχέση με την διακύμανση γύρω από την μέση τιμή:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) = \bar{V} + \sigma_v$$

- Η μέση αιολική ισχύς σε χρόνο T είναι:

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 \Rightarrow P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [V(t)]^3 dt$$

Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

$$P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [\bar{V} + \sigma_v]^3 dt = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \left[\int_0^T \bar{V}^3 dt + \int_0^T \sigma_v^3 dt + 3 \cdot \int_0^T \bar{V}^2 \cdot \sigma_v dt + 3 \cdot \int_0^T \bar{V} \cdot \sigma_v^2 dt \right]$$

$$\bar{\sigma}_v = 0 \quad P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot \bar{V}^3 \cdot \left[1 + \frac{\bar{\sigma}^3}{\bar{V}^3} + \frac{3 \cdot \bar{\sigma}}{\bar{V}} + \frac{3 \cdot \bar{\sigma}^2}{\bar{V}^2} \right]$$

Αλλά $I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$ (Ένταση της ανατάραξης)

$$\left[\frac{\bar{\sigma}^3}{\bar{V}^3} \right] \approx 0$$

Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

$$\rightarrow P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot \bar{V}^3 \cdot [1 + 3 \cdot I^2]$$

Θεωρώντας ένα σύνολο μέσων ταχυτήτων του ανέμου για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (μήνας, χρόνος,...) η μέση ισχύς του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί με βάση την κατανομή των συχνοτήτων των ταχυτήτων στο διάστημα αυτό με V_{\max} την μέγιστη ταχύτητα του συνόλου των δεδομένων και $f(V_i)$ την συχνότητα εμφάνισης του V_i :

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \int_0^{V_{\max}} f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 d\bar{V} = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3$$

Ετήσια Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

Θεωρώντας ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου, τότε σε ένα χρόνο θα έχουμε $T=24 \cdot 365=8760$ μετρήσεις:

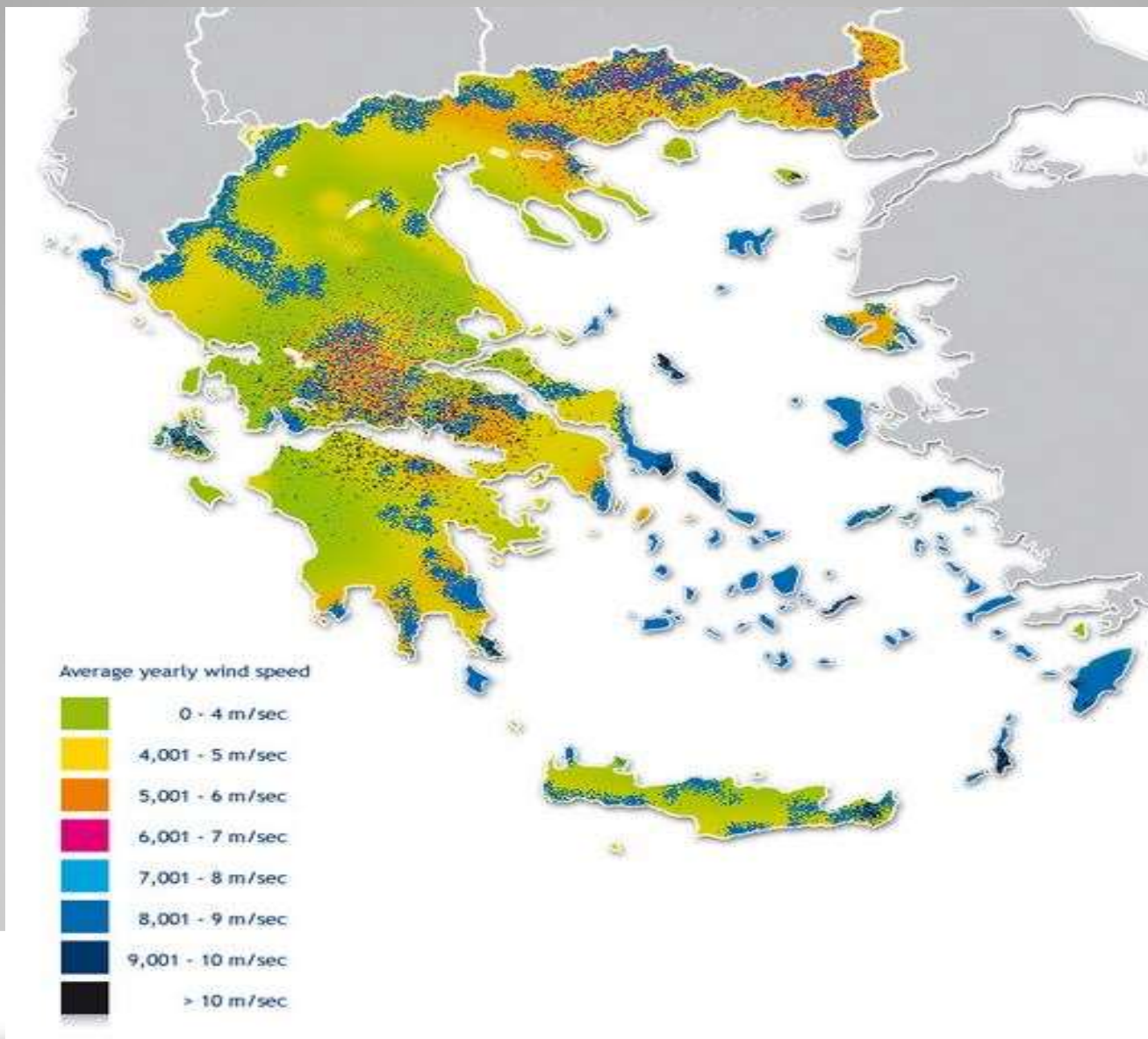
$$E_E = 4.38 \cdot A \cdot \rho \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 \quad \text{kWh/year}$$

Θεωρώντας $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ η ανά μονάδα σάρωσης διαθέσιμη αιολική ενέργεια είναι:

$$E_E = 5.366 \cdot [1 + 3 \cdot I^2] \cdot \sum_i f(\bar{V}_i) \cdot \bar{V}_i^3 \quad \text{kWh/m}^2 \text{ year}$$

...όμως μία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί όλη την αιολική ενέργεια...

Χάρτης Αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα (www.rae.gr/geo/)



Εκμεταλλεύσιμη αιολική ισχύς

- Το πιο απλό μοντέλο που εξηγεί τον τρόπο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα είναι αυτό του δίσκου ενέργειας (Rankine, 1865) το οποίο το εφήρμοσε ο Betz* (1920) ώστε να αποδείξει **ο,τι μόνο το 59,3% της διαθέσιμης ισχύος μιας αέριας μάζας μπορεί να μετατραπεί σε εκμεταλλεύσιμη μηχανική ισχύ από ένα σύστημα μετατροπής αιολικής ενέργειας (wind energy conversion system,wecs).**

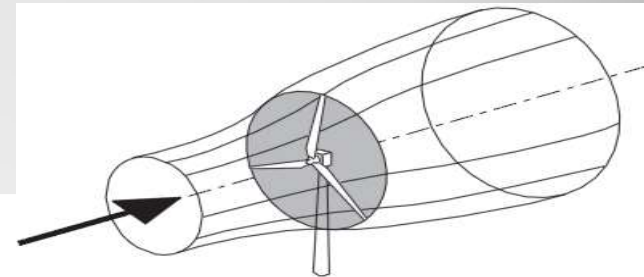
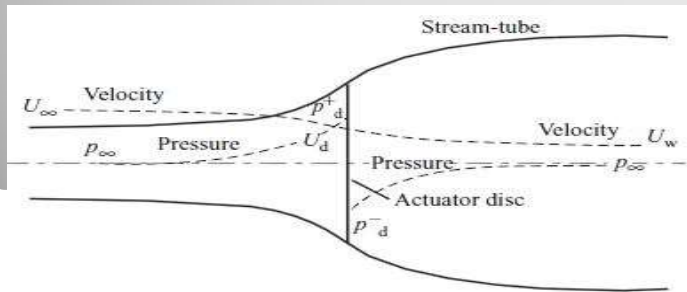
Συντελεστής ισχύος:

μέγιστο ποσοστό κινητικής ενέργειας που μπορεί να δεσμεύσει μια ΑΜ

- Καμία αιολική μηχανή δεν έχει προσεγγίσει αυτή την τιμή (συνήθως επιτυγχάνεται ~40%)

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Παραδοχή: ιδανική πτερωτή
 - Χωρίς μηχανισμό
 - Απεριόριστος αριθμός πτερυγίων χωρίς αντίσταση στον αέρα και η ώση είναι ομοιογενής παντού στον δίσκο
- Θεώρηση:
 - Ιδανική ροή με ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την περιοχή σάρωσης
 - Ταχύτητα παντού αξονική
 - Δεν υπάρχουν τριβές με $V_1 > V_2$
 - Ο αέρας είναι ασυμπίεστος
 - Οι συνθήκες πίεσης στα προσήνεμα και στα υπήνεμα παραμένουν ίδιες και δεν υπάρχει μεταφορά θερμότητας
 - Ισχύει ο Νόμος Bernoulli $p + p_i = p + 0.5\rho V_i^2 = \text{σταθ.}$

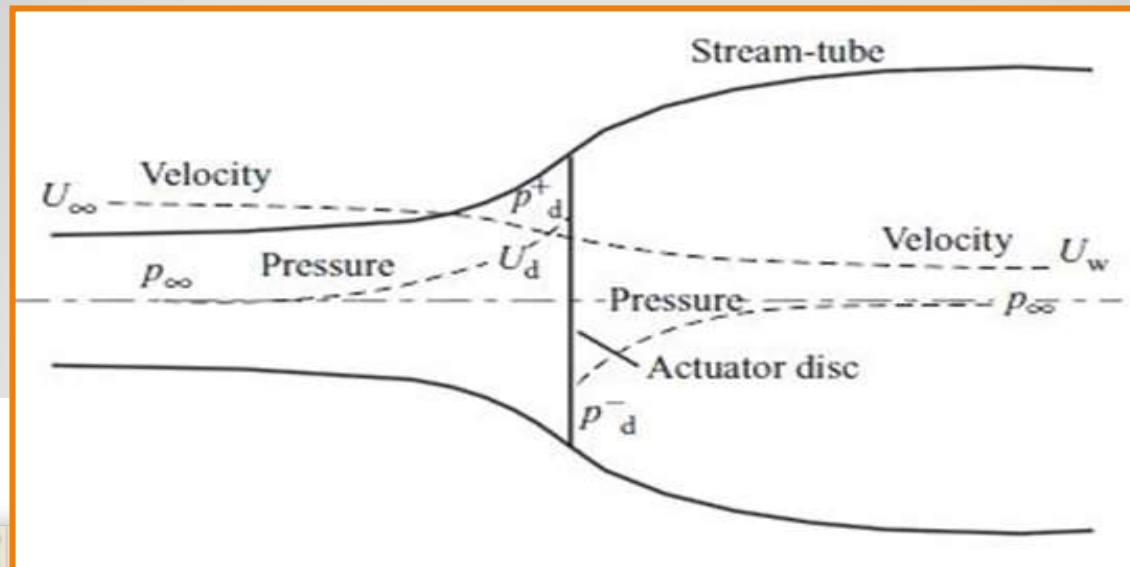


Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Έστω μια ασυμπίεστη και οριζόντια ροή.
- Η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται κατά μήκος του όγκου ελέγχου οπότε η διάμετρός του αυξάνει (εξίσωση συνέχειας)

$$\dot{m} = \rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w$$

- Ο ρυθμός μεταβολής της ορμής $T = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_d$
Ισος με την **ώση T (ώθηση)** $T = (U_{\infty} - U_w) \rho A_d U_d$



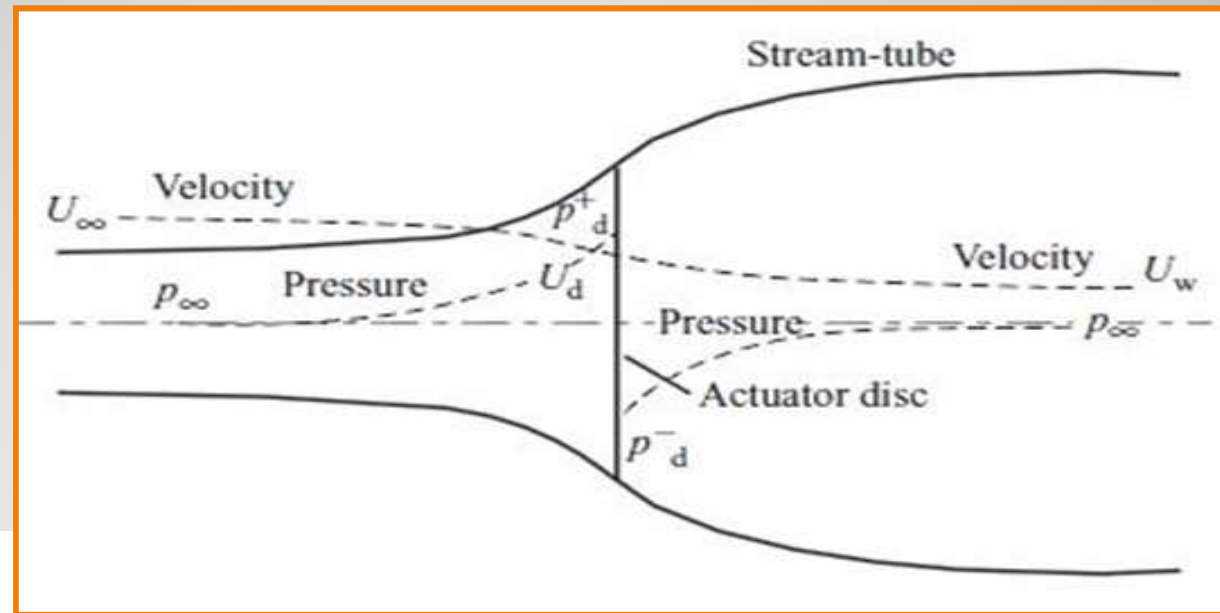
Δίσκος Ενέργειας Actuator disc

- Η μεταβολή της ορμής οφείλεται στην διαφορά της πίεσης στον δίσκο ενέργειας.

$$(p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_d \quad \left. \vphantom{(p_d^+ - p_d^-)A_d} \right\} (p_d^+ - p_d^-)A_d = (U_\infty - U_w)\rho A_d U_\infty (1-a)$$

$$U_d = U_\infty (1-a)$$

- **Συντελεστής αξονικής επαγωγής a** εκφράζει την ποσοστιαία επιβράδυνση του αέρα πάνω στο δίσκο



Δίσκος ενέργειας Εφαρμογή Bernoulli

- Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli τόσο ανάντι όσο και κατόντι του ανέμου

$$\left. \begin{aligned} (p_d^+ - p_d^-) &= \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_w^2) \\ (p_d^+ - p_d^-) A_d &= (U_\infty - U_w) \rho A_d U_\infty (1-a) \end{aligned} \right\} U_w = (1-2a)U_\infty$$

Η ώστική δύναμη που ασκείται στον δίσκο

$$T = (p_d^+ - p_d^-) A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1-a)$$

Η ισχύς που δεσμεύεται από την ανεμογεννήτρια είναι ίση με την ώση που το ρευστό εξασκεί πάνω στον δρομέα επί την ταχύτητα του επί του δίσκου ή διαφορετικά με τον ρυθμό που παράγει έργο η δύναμη T

$$Power = P = T U_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1-a)^2$$

Δίσκος ενέργειας όριο Betz

- Η διαθέσιμη αιολική ισχύς είναι

$$P_{av} = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3$$

- Ο λόγος της ισχύος που δεσμεύει ο δίσκος ενέργειας (ο δρομέας μίας ανεμογεννήτριας) προς την διαθέσιμη ενέργεια του ανέμου ονομάζεται **συντελεστής ισχύος C_p**

$$C_p = \frac{P}{P_{av} = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3} = 4a(1-a)^2$$

- Μεγιστοποιείται όταν $\frac{dC_p}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0$ δηλ. $a = 1/3$

- Συνεπώς $C_{p\max} = \frac{16}{27} = 0.593$ ΤΟ **όριο του Betz**

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Τελικά η ισχύς την οποία μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα μπορεί να εκμεταλλευθεί από τον άνεμο ισούται με:

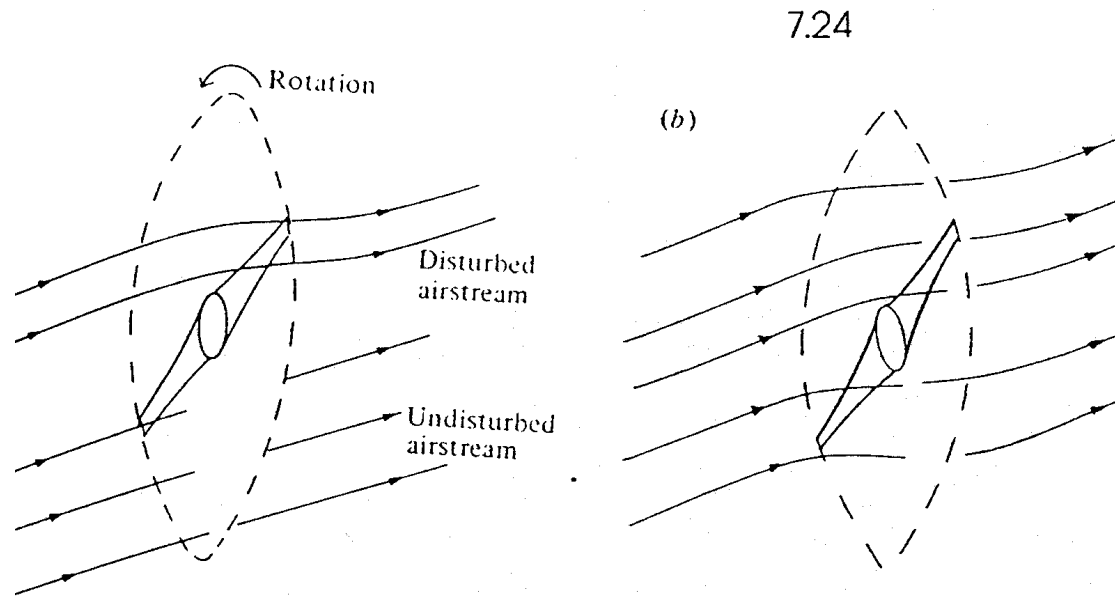
$$P_{out} = \frac{1}{2} \rho A_d U_{\infty}^3 C_p$$

Σχόλια

- Ταχύτητα ανέμου παίζει κυρίαρχο ρόλο
- Σημαντική αύξηση της παραγόμενης ενέργειας εάν αυξηθεί η επιφάνεια σάρωσης
- Μικρότερη συνεισφορά η βελτίωση του συντελεστή ισχύος
- Το οριο του Betz αναφέρεται σε ιδανικές συνθήκες

Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής (1)

- 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



Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής (2)

Ο συντελεστής απόδοσης μιας αιολικής μηχανής εξαρτάται από:

- **Λόγος της ταχύτητας ακροπερυγίου λ :**

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα ακρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{R\omega}{u}$$

- **Για μέγιστη ισχύ έχουμε:**

$$\lambda = \frac{2\pi R}{nd} = \frac{2\pi}{kn}$$

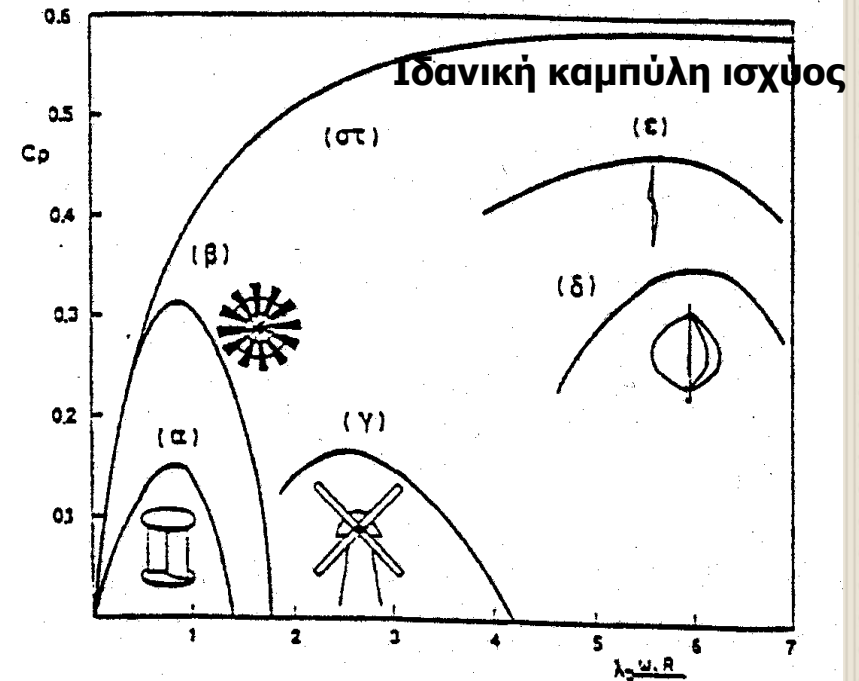
όπου n ο αριθμός των ακροπερυγίων, d το πλάτος του ακροπερυγίου και $k=d/R$

- Όταν $k=1/2$ το λ γίνεται μέγιστο, οπότε για μια αιολική μηχανή με n πτερύγια έχουμε: $\lambda_0 = 4 \cdot n/n$



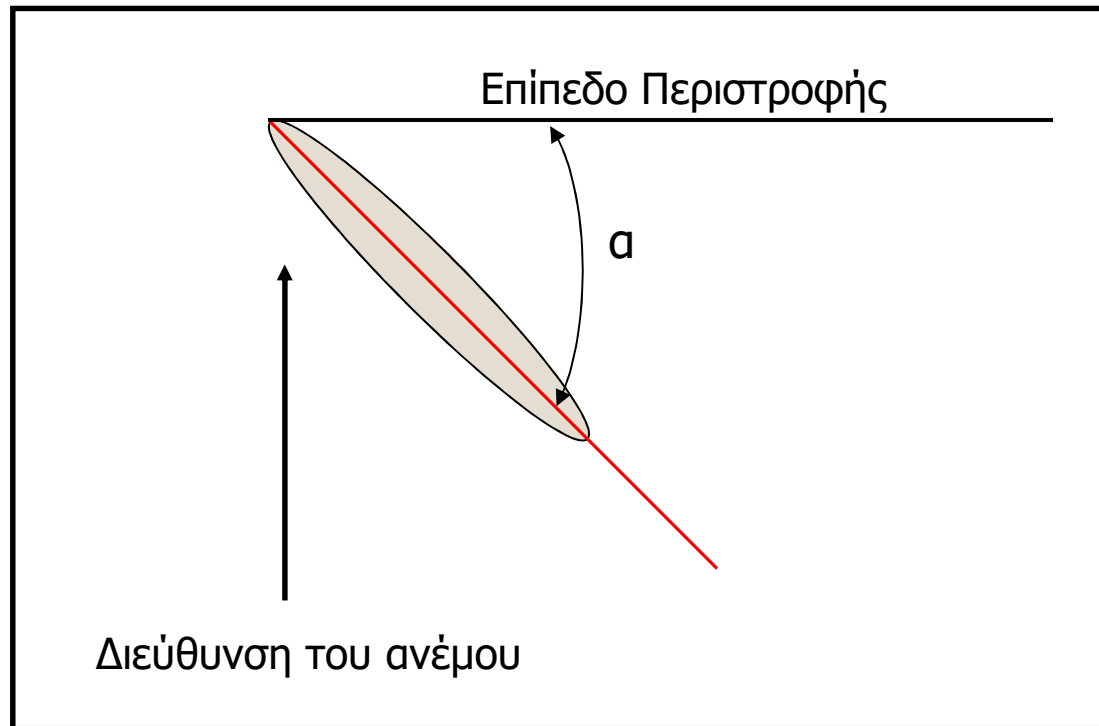
Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής (4)

- Η ιδανική καμπύλη ισχύος τείνει ασυμπτωτικά στο όριο Betz
- Μεγάλες διαφορές στις διάφορες μηχανές:
 - (β) πολύπτερη αιολική μηχανή → μεγάλη διακύμανση του συντελεστή ισχύος και το C_p λαμβάνει μικρές τιμές
 - (ε) γρήγορη αιολική μηχανή με 2 πτερύγια → μικρή διακύμανση και μεγάλες τιμές



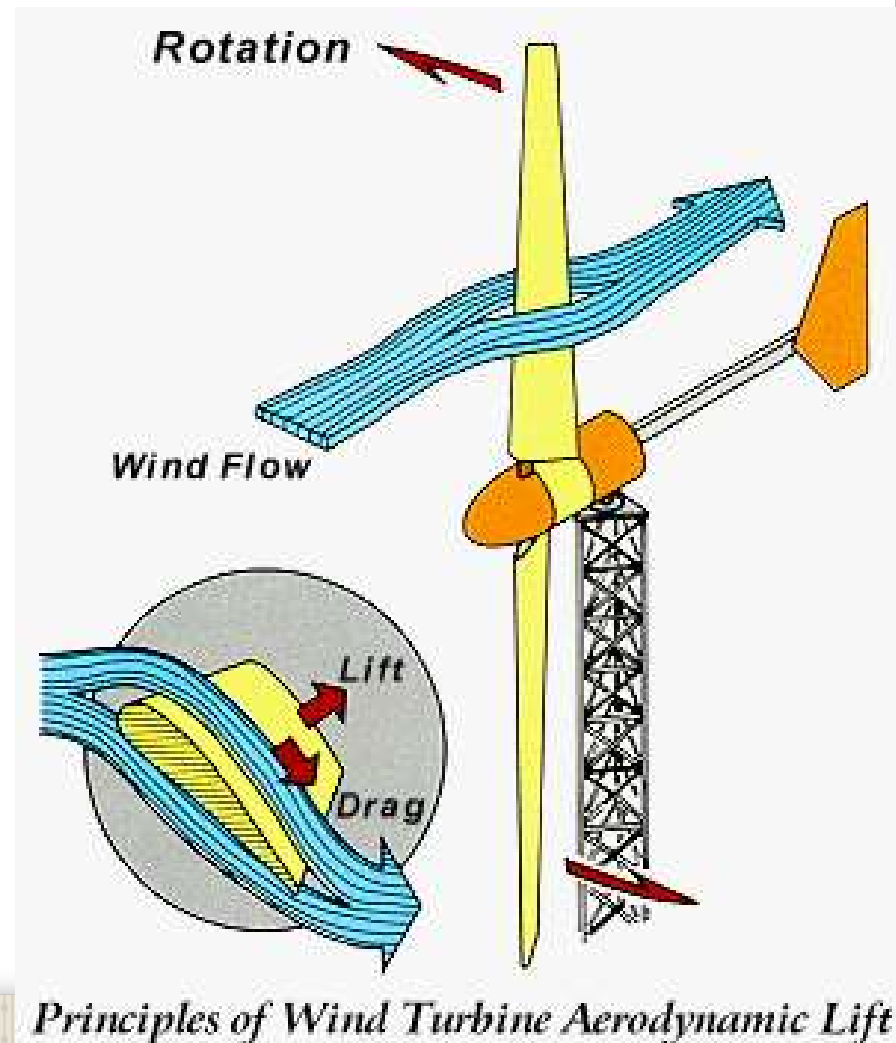
Δυναμική συμπεριφορά αεροδυναμικής μηχανής

- Η γωνία πρόσπτωσης α η οποία ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου (μήκος πτερυγίου) και του επιπέδου στροφής του πτερυγίου



Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής (6)

- 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



Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ

- Η μέγιστη αιολική ενέργεια που δεσμεύει μια ιδανική αιολική μηχανή είναι ένα τμήμα της κινητικής ενέργειας του ανέμου και ισούται με:

$$E_{\max} = C_p * E_{\text{wind}}, \text{ όπου } C_p = 0.59 \text{ το όριο του Betz}$$

- Η ηλεκτρική ισχύς που παίρνουμε από την αιολική μηχανή είναι:

$$P_{\text{electric}} = C_p \eta_{\text{gearbox}} \eta_{\text{generator}} \eta_{\text{accumulator}} P_{\text{wind}}$$

όπου: η_{gearbox} η απόδοση του πολλαπλασιαστή στροφών

$\eta_{\text{generator}}$ Η απόδοση της γεννήτριας

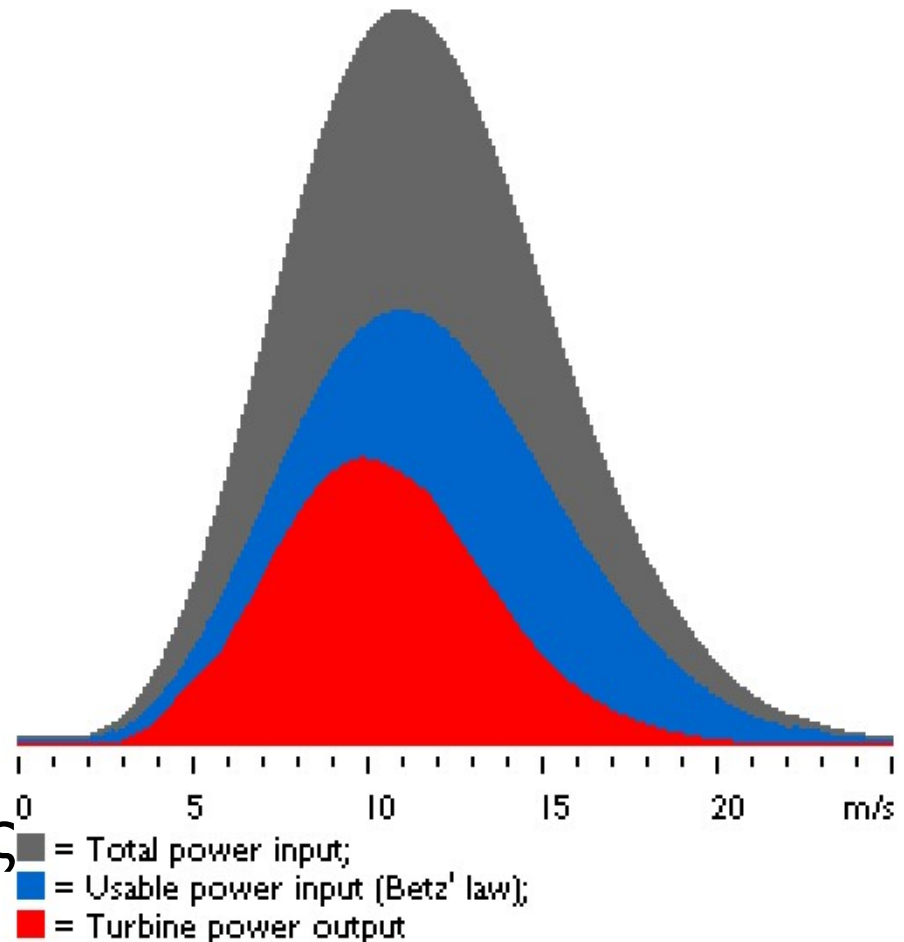
$\eta_{\text{accumulator}}$ η απόδοση των συσσωρευτών

- Η ετήσια αιολική ενέργεια είναι: $E_{\text{electric}} = P_{\text{electric}} T$
όπου T ένα έτος

Ενέργεια από τον άνεμο

- Με βάση την κατανομή Weibull υπολογίζεται η συνολική διαθέσιμη αιολική ισχύ σε W/sqm (γκρι περιοχή)
- Με βάση το όριο του Betz ($=0.59$) υπολογίζεται η μέγιστη ισχύς του ανέμου που θεωρητικά μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική (μπλε περιοχή)
- Με βάση την συνολική απόδοση της εκάστοτε Α/Γ υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται

Power of the Wind



Ενέργεια από τον άνεμο

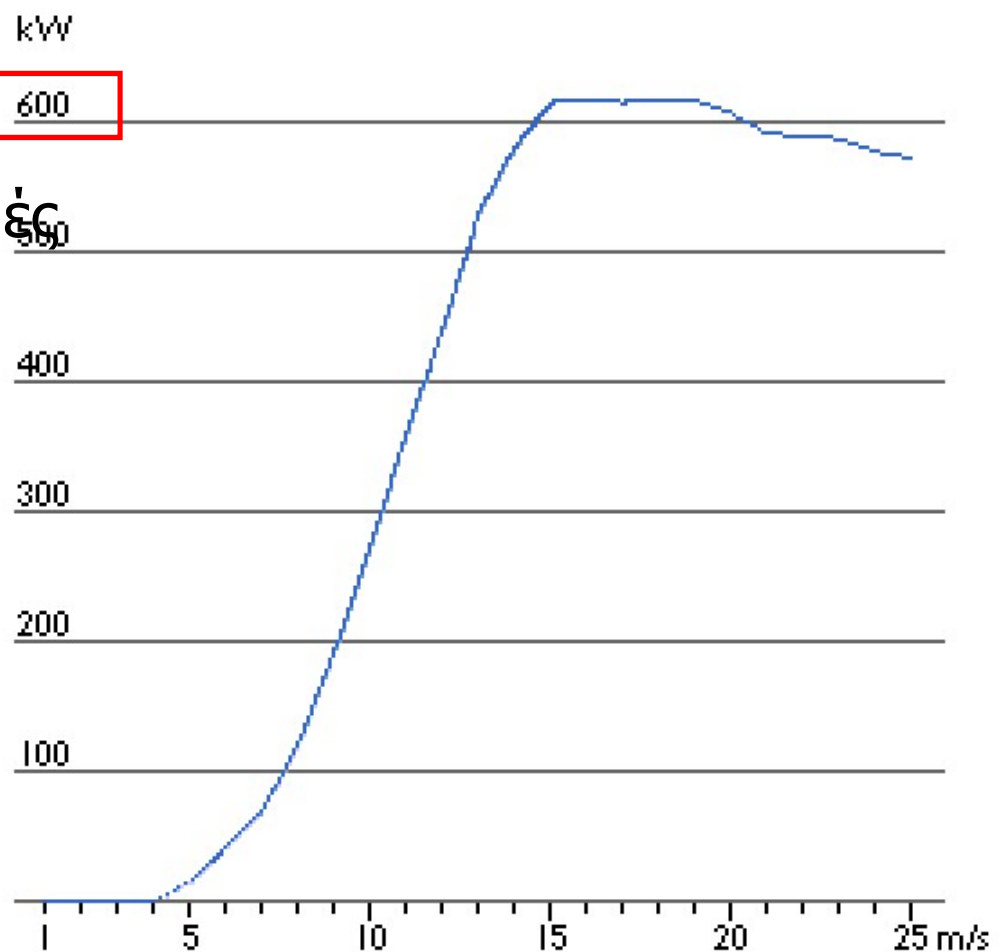
- Αυτό που είναι σημαντικό είναι το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης αιολικής ενέργεια βρίσκεται για ταχύτητες **μεγαλύτερες από την μέση ταχύτητα του ανέμου** του τόπου όπου είναι εγκατεστημένη η Α/Γ.
- Αυτό συμβαίνει γιατί οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου έχουν πολύ μεγαλύτερο ενεργειακό «περιεχόμενο» σε σχέση με τις χαμηλές ταχύτητες του ανέμου
- Η χρήση της μέσης ταχύτητας για τον υπολογισμό της ενέργειας που μπορεί να παράγει μια Α/Γ γενικά οδηγεί σε υποτίμηση των ενεργειακών μεγεθών

Ενέργεια από τον άνεμο

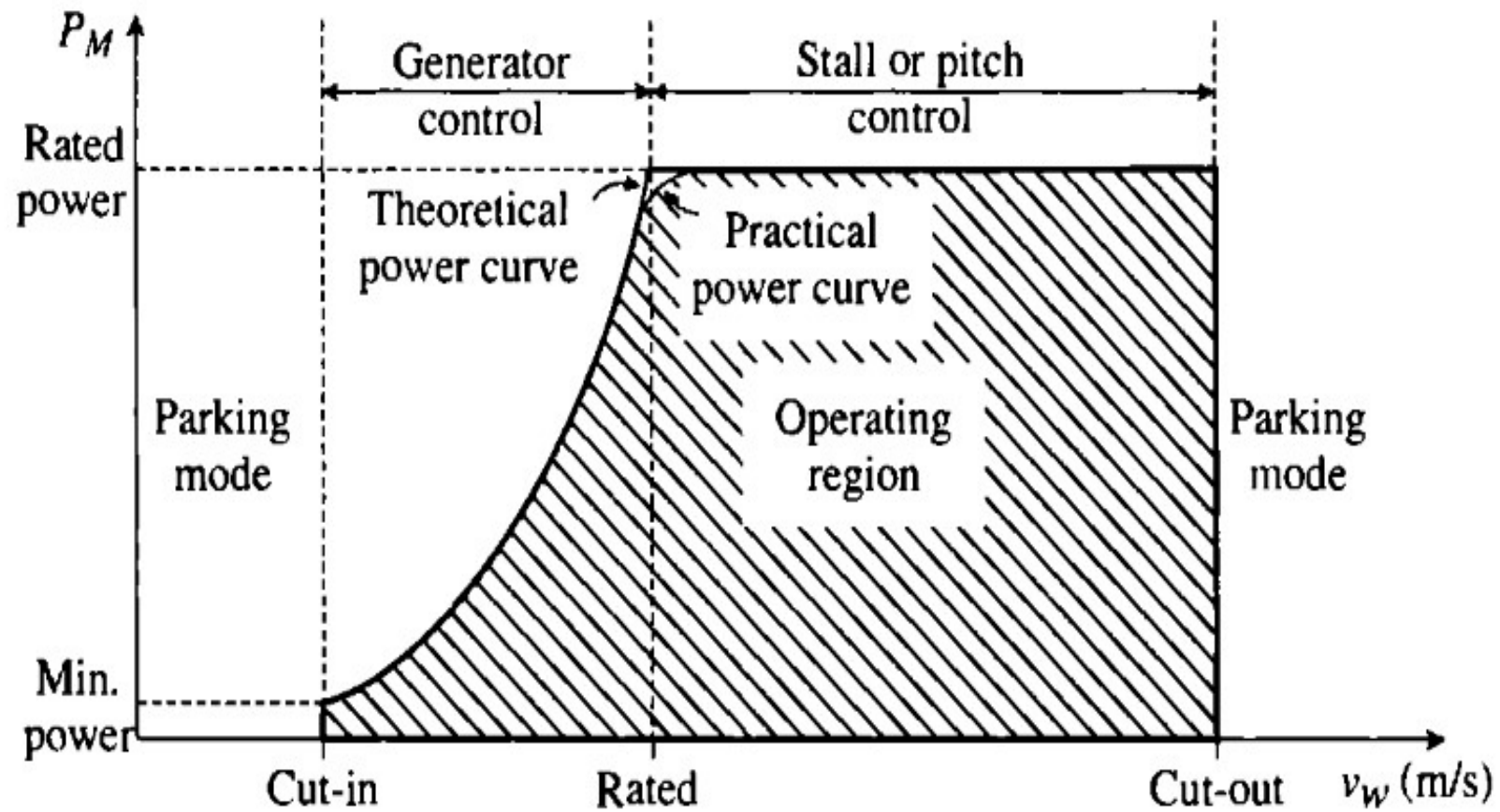
- Η καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ δείχνει πως μεταβάλλεται παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ της μηχανής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου.

- Συχνά η καμπύλη δημιουργείται από επί τόπου μετρήσεις και χρήση ανεμόμετρων

- Λόγω της διακύμανσης του ανέμου συχνά υπάρχει αβεβαιότητα στις μετρήσεις (π.χ. $\pm 3\%$ σφάλμα στην ταχύτητα του ανέμου $\rightarrow \pm 9\%$ στην αιολική ενέργεια)

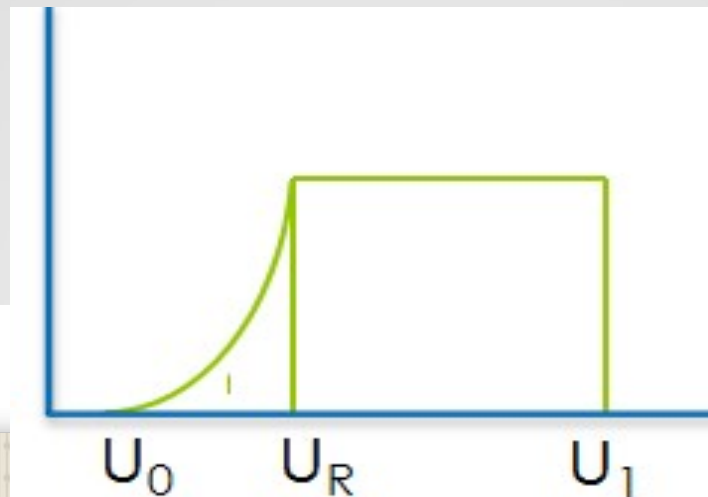


Καμπύλη ισχύος



Καμπύλη ισχύος

- Απόδοση αιολικής μηχανής είναι μικρή
 - Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες οι ΑΜ δεν λειτουργούν
 - Σε ένα πεδίο ταχυτήτων η ΑΜ εκμεταλλεύεται μέρος μόνο της κινητικής ενέργειας του ανέμου
 - Σε πολύ υψηλές ταχύτητες οι ΑΜ τίθενται εκτός λειτουργίας ή ελαττώνεται η επιφάνεια σάρωσης
- 3 χαρακτηριστικές ταχύτητες από τις οποίες εξαρτάται η παρεχόμενη ισχύς



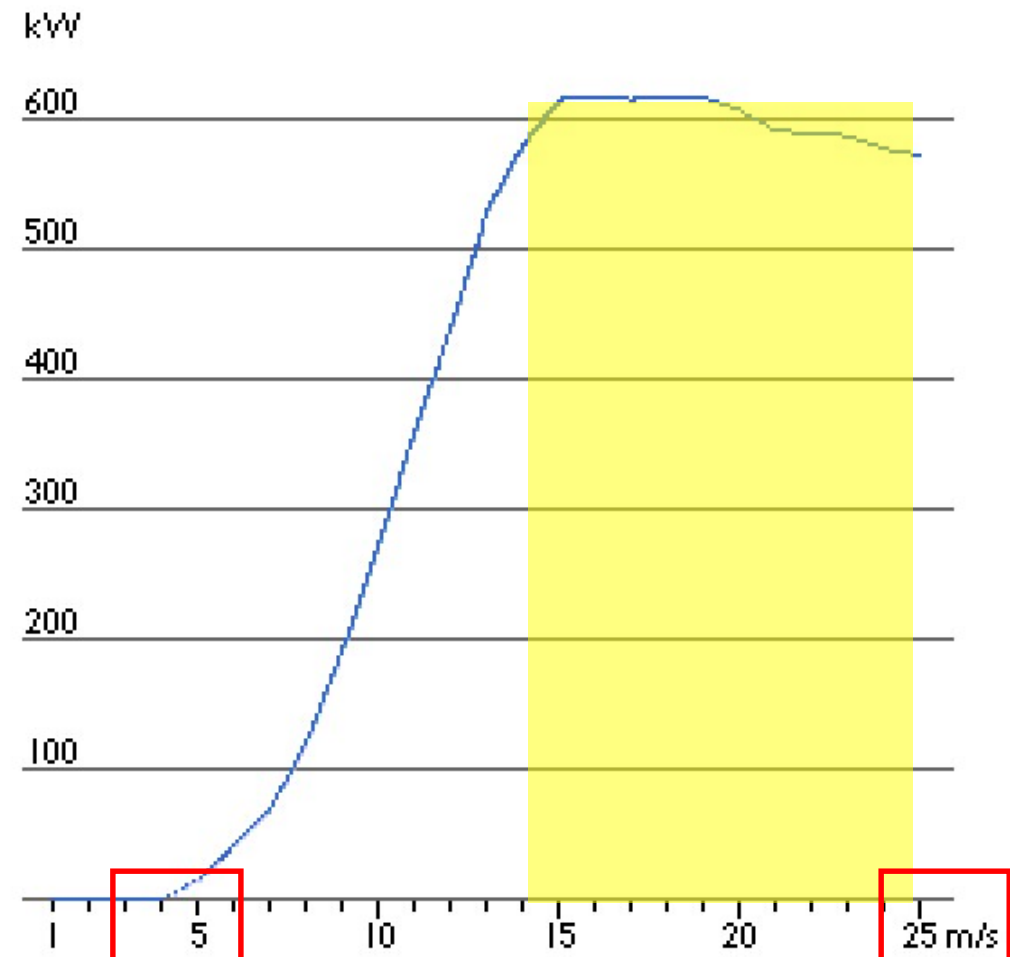
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Χαρακτηριστικές ταχύτητες

Υπάρχουν τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες που διαμορφώνουν την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ

- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{in})
- Η ονομαστική ταχύτητα (V_R)
- Η ταχύτητα εξόδου (V_{out})



Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας U_0 (cut-in speed)

Για $U < U_0$ η ΑΜ δεν αποδίδει ισχύ λόγω τριβών

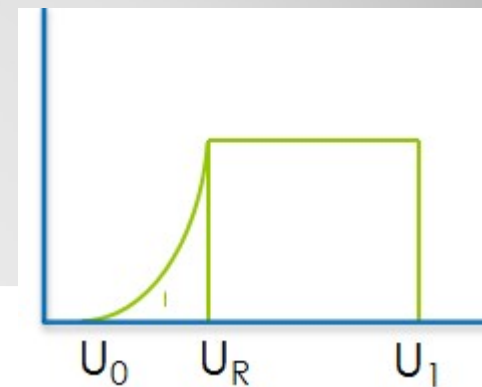
Ισχύς του ανέμου που χάνεται για $U < U_0$

Ονομαστική Ισχύς της ΑΜ

$$U_0 = \left[\frac{8 \cdot \frac{P_0}{P_R} \cdot P_R}{\rho \cdot \pi \cdot c_P \cdot D^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Εμπειρικά $\frac{P_0}{P_R} \cong 0.10$

Μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος = 0.593



Χαρακτηριστικές ταχύτητες

- Η ονομαστική ταχύτητα (V_R)

Για τιμές μεγαλύτερες της V_{in} αυξανόμενης της ταχύτητας του ανέμου έχουμε αύξηση της ωφέλιμης ισχύος μέχρι μια ταχύτητα V_R πέρα από την οποία υπάρχει σύστημα που διατηρεί σχεδόν σταθερή την παραγόμενη ισχύ (ονομαστική ισχύς). Έτσι θα πρέπει να βρεθεί για κάθε θέση εγκατάστασης της αιολικής μηχανής η καλύτερη σχέση μεταξύ των παρατηρούμενων ταχυτήτων του ανέμου και της ονομαστικής ταχύτητας της μηχανής.

$$V_R = 1.9\bar{V}$$

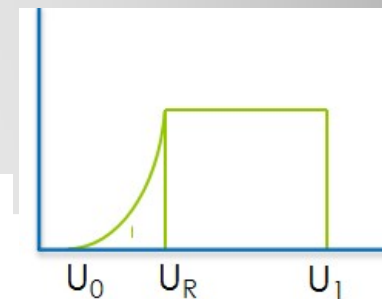
όπου $\langle V \rangle$ η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στη θέση εγκατάστασης

Ονομαστική ταχύτητα U_R (rated speed)

- Για $U > U_0$ και όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου -> παράλληλη αύξηση της ωφέλιμης ισχύος της ΑΜ μέχρι ταχύτητα U_R (σταθερή παραγόμενη ισχύς)
- Για $U > U_R$ -> απώλεια εκμεταλλεύσιμης ισχύος ανέμου
- Η καλύτερη δυνατή σχέση μεταξύ παρατηρούμενων ταχυτήτων ανέμου και ονομαστικής ισχύος της ΑΜ

$$U_R = 1.9 \cdot \bar{U}$$

Μέση
ετήσια
ταχύτητ
α



Χαρακτηριστικές ταχύτητες

- Η ταχύτητα εξόδου (V_{out}) [22-28m/sec]

Για πολύ υψηλές ταχύτητες του ανέμου πρέπει η αιολική μηχανή να τίθεται εκτός λειτουργίας για λόγους ασφάλειας.

Σήμερα βέβαια στις μεγάλες αιολικές μηχανές γίνεται προσπάθεια να λειτουργούν σε οποιοσδήποτε ταχύτητες ανέμου.

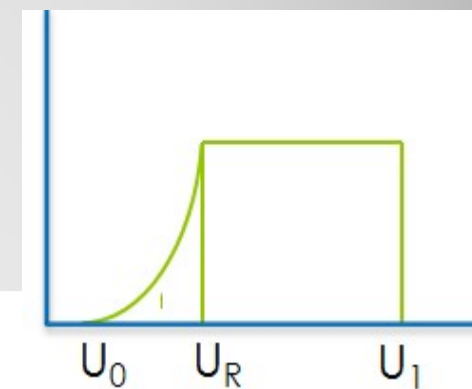
Η ταχύτητα εξόδου συνδέεται και με το κόστος κατασκευής του συστήματος.

Ταχύτητα εξόδου (furling speed ή cut-out speed)

- Η ταχύτητα του ανέμου πέραν από την οποία η ΑΜ τίθεται εκτός λειτουργίας (U_1)
- Κυμαίνεται από 22 έως 28 m/s
- Εναλλακτικά υπάρχει σύστημα μείωσης της επιφάνειας σάρωσης

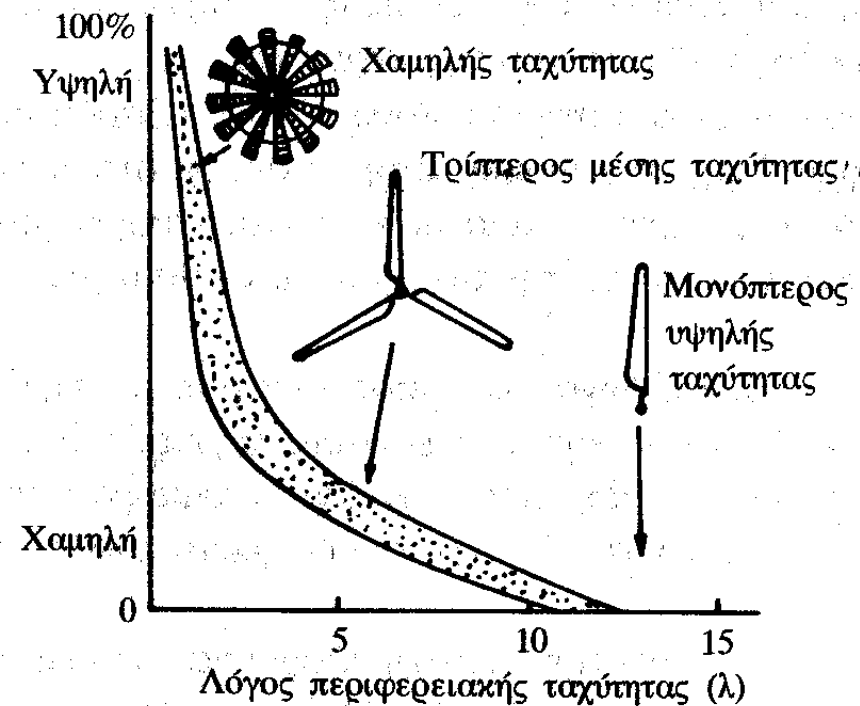


Απώλεια διαθέσιμης ισχύος



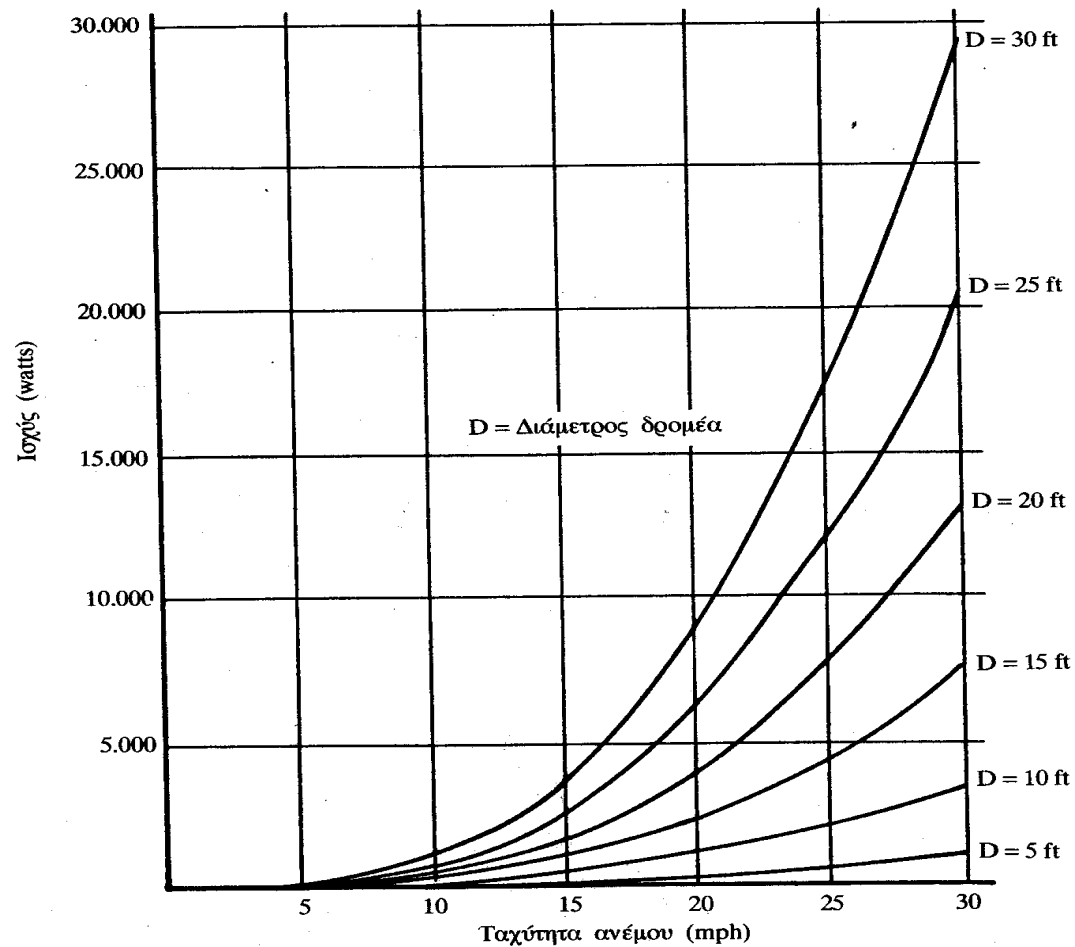
Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών

- Εκτίμηση ενεργειακών αναγκών
- Εκτίμηση διαστάσεων αιολικής μηχανής
- Ισχύς



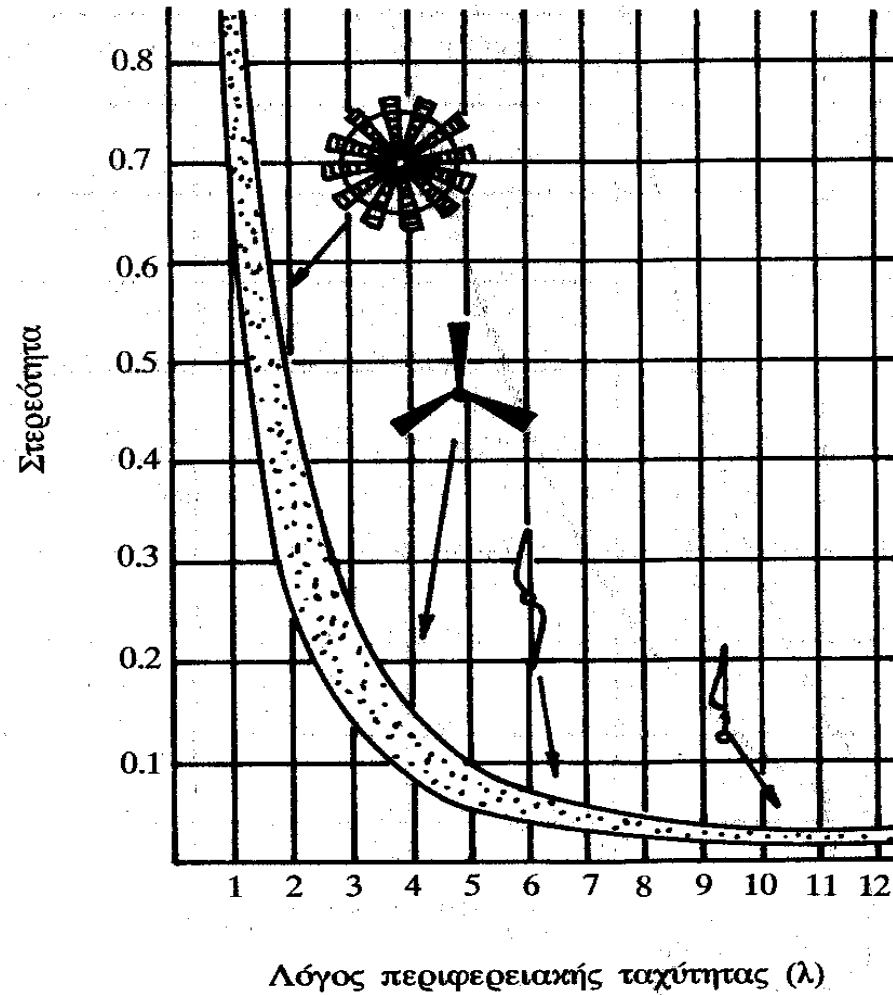
Σχήμα 10.1: Σχετική ροπή εκκίνησης.

Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών

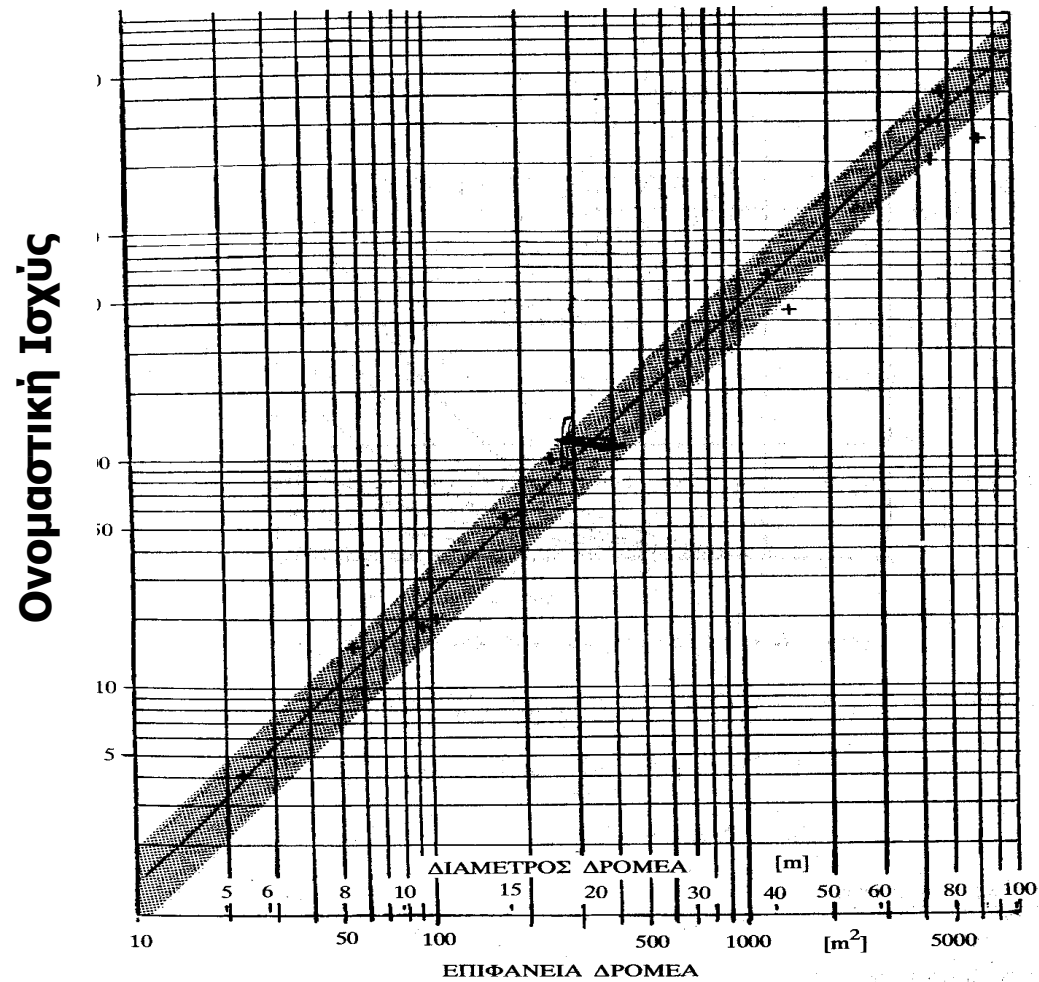


Σχήμα 10.3: Σχέση ισχύος A/K και ταχύτητας ανέμου.

Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών



Πρακτικά στοιχεία επιλογής ανεμογεννητριών



Σχήμα 10.4: Στατιστικά στοιχεία σχέσης ισχύος Α/Κ και επιφάνειας δρομέα.

Μέτρηση του ανέμου

- Ο άνεμος μετράται με ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες ανα 10 λεπτά στην επιλεγμένη θέση*
- Διάρκεια μετρήσεων
 - ❖ Θεωρητικά για πολλά χρόνια (ιδανικά 10-20) ώστε να προσδιοριστεί η χρονική μεταβλητότητα του ανέμου σε μεγάλες περιόδους: Εξαιτίας αυτής της μεταβλητότητας μπορεί να γίνει δύσκολο να γίνουν ακριβείς προβλέψεις οικονομικής βιωσιμότητας αιολικών πάρκων
 - ❖ Πρακτικά τουλάχιστον 1 έτος μετρήσεων
- Συχνότητα μετρήσεων
 - ❖ ("Data shall be collected continuously at a sampling rate of 1 Hz or faster." IEC 61400-12-1&2)

❖ Από τις 600μετρήσεις (1x10x60sec) προκύπτει η μέση τιμή, η μέγιστη, η ελάχιστη & η τυπική απόκλιση για το δεκάλεπτο που διαβάζουμε

I. Μέση τιμή δίνει αιολικό δυναμικό

II. Μεγιστη τιμή δίνει πληροφορίες για μέγιστα φορτία που οδηγούν σε μηχανολογική αστοχία

III. Ελάχιστη τιμή δεν έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον

IV. Τυπική απόκλιση δίνει πληροφορίες για την τύρβη-δείκτης μεταβαλλόμενων φορτίων πάνω στην Α/Γ που οδηγούν στη γήρανση της

Στατιστική ανάλυση

Με τα δεδομένα που ελήφθησαν κατασκευάζεται το ιστόγραμμα

- Οι ταχύτητες του ανέμου χωρίζονται σε κλάσεις w_j του 1m/s {π.χ [0-1), [1,2) κτλ}
- Σημειώνεται το κέντρο της κλάσης m_j {π.χ 0.5, 1.5 κτλ}
- Σημειώνεται η συχνότητα εμφάνισης f_j
- **Βρίσκεται μέση τιμή του ανέμου**

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_B} m_j f_j$$

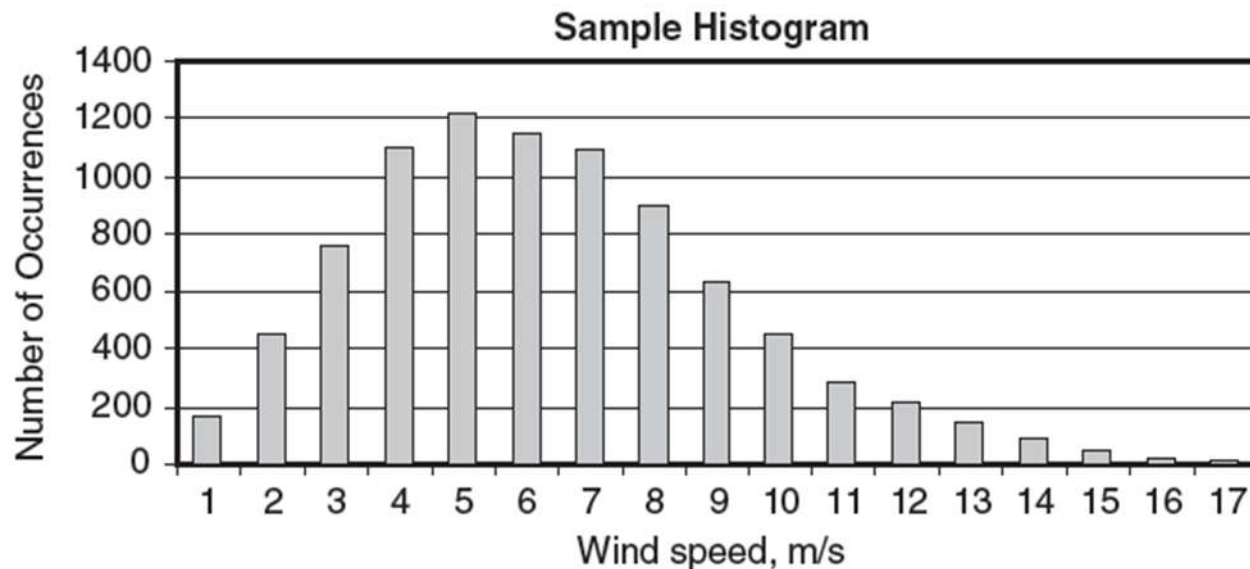
Και η τυπική απόκλιση

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N(\bar{U})^2 \right\}}$$

Ιστόγραμμα

- Μετρήσεις 1 έτους ($365 \times 24 \times 6 = 52560$ μετρήσεις)

Και από αυτές δημιουργείται ένα ιστόγραμμα σαν το παρακάτω



Κατανομές

- Αν υπάρχουν ικανοποιητικές χρονοσειρές μετρήσεων από επιτόπιες μετρήσεις στην τοποθεσία ενδιαφέροντος τότε τα παραπάνω συχνά αρκούν
- Αν όμως δεν υπάρχουν μετρήσεις από τις συγκεκριμένες περιοχές αλλά από γειτονικές ή οι μετρήσεις είναι συνοπτικές τότε γίνεται χρήση στατιστικών κατανομών όπως η κατανομή Rayleigh και η κατανομή Weibull
- Η συχνότητα εμφάνισης ταχύτητας U περιγράφεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p(U)$

Η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται μεταξύ U_a & U_b

Είναι
$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU$$

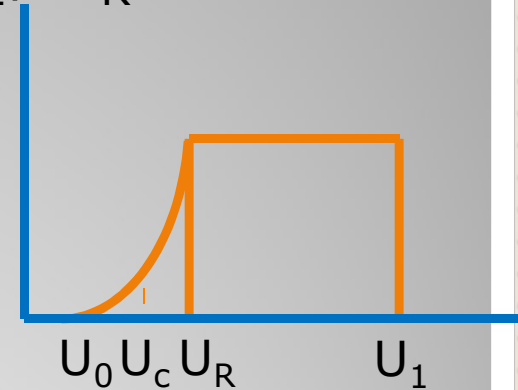
Η μέση ταχύτητα δίνεται από
$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U p(U) dU$$

Η τυπική απόκλιση
$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU}$$

Υπολογισμός παρεχόμενης ισχύος AM

- Αν ληφθούν υπόψη: κατανομή ταχυτήτων + χαρακτηριστικές ταχύτητες AM U_0, U_1, U_R

$$P_g = \int_{U_{\min}}^{U_{\max}} P(U) \cdot p(U) dU$$



$$P(U)=0$$

για $U \leq U_0$

$$P(U)=A+BU+CU^2$$

για $U_0 \leq U < U_R$

$$P(U)=P_R$$

για $U_R \leq U < U_1$

$$P(U)=0$$

για $U > U_1$

- Λύση συστήματος

$$A+BU_0+CU_0^2=0$$

$$A+BU_R+CU_R^2= P_R$$

$$U_c = (U_0+U_R)/2$$

$$A+BU_c+CU_c^2= P_R (U_c/U_R)^3$$

Υπολογισμός αιολικής ισχύος (παραμέτρους Weibull)

- Μη διαθέσιμες μετρήσεις ταχύτητας ανέμου
- Γνωρίζοντας k, c

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

$$P_g = \int_{U_0}^{U_R} (A + BU + CU^2) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] dU + P_R [p(U \leq U_1) - p(U \leq U_R)]$$

Κατανομή Weibull

- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την κατανομή Weibull δίνεται από τη σχέση

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

Η παράμετρος k ονομάζεται παράμετρος μορφής και είναι αδιάστατο μέγεθος ενώ η παράμετρος c ονομάζεται βαθμωτή παράμετρος και έχει μονάδες m/s . Καθώς το k αυξάνει η διαθέσιμη αιολική ενέργεια λιγοστεύει

- Μέση ταχύτητα μπορεί να υπολογιστεί γρήγορα από την **εμπειρική** σχέση (lysen 1983)

$$\bar{U} = c \left(0.568 + \frac{0.434}{k} \right)^{1/k}$$

Κατανομή Weibull

- Στηρίζεται στον υπολογισμό 2 παραμέτρων (k: παράμετρος μορφής, c: βαθμωτή παράμετρος) -> ακρίβεια για μεταβολή 100m από το έδαφος

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]}$$

- Ισοδύναμη αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας:

$$p(U \leq U_x) = \int_0^{U_x} p(U) dU = 1 - e^{\left[-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k\right]}$$

- Διαδοχικές λογαριθμήσεις :

$$\ln\left\{-\ln\left[1 - p(U \leq U_x)\right]\right\} = -k \cdot \ln c + k \cdot \ln U_x$$

- Ορίζοντας:

$$\left. \begin{array}{l} \psi = \ln\left\{-\ln\left[1 - p(U \leq U_x)\right]\right\} \\ x = \ln(U_x) \end{array} \right\} \psi = -k \cdot \ln c + k \cdot x$$

Κατανομή Weibull

$$\psi = a + bx$$

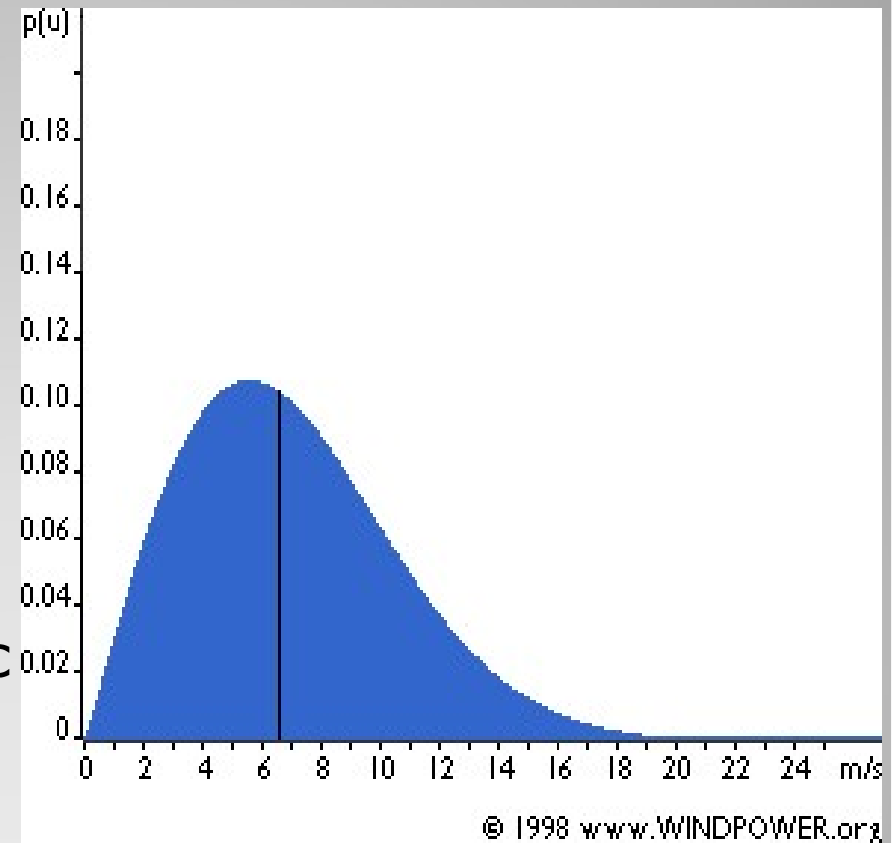
- Με την ευθεία παλινδρόμηση:

$$b = k \quad \text{και} \quad a = -k \cdot \ln c \Rightarrow c = e^{\left(\frac{a}{b}\right)}$$

- Η αναγωγή των τιμών της παραμέτρου c σε διάφορα ύψη μπορεί να γίνει με βάση το μοντέλο κατανομής του ανέμου το οποίο χρησιμοποιούμε για την συγκεκριμένη περιοχή της μελέτης.
- Η μεταβολή της παραμέτρου k καθ' ύψος υπολογίζεται από νομόγραμμα το οποίο δίνει την μεταβολή της καθ' ύψος

Κατανομή Weibull

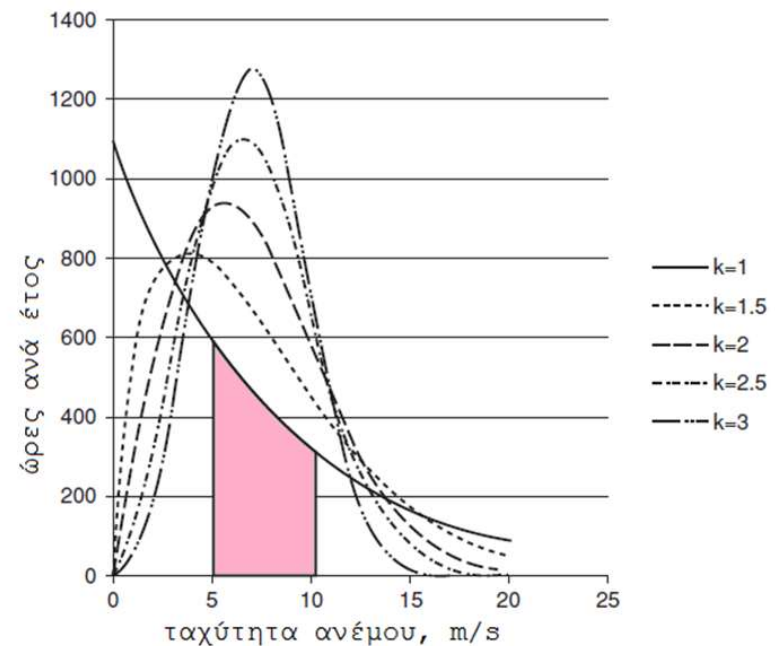
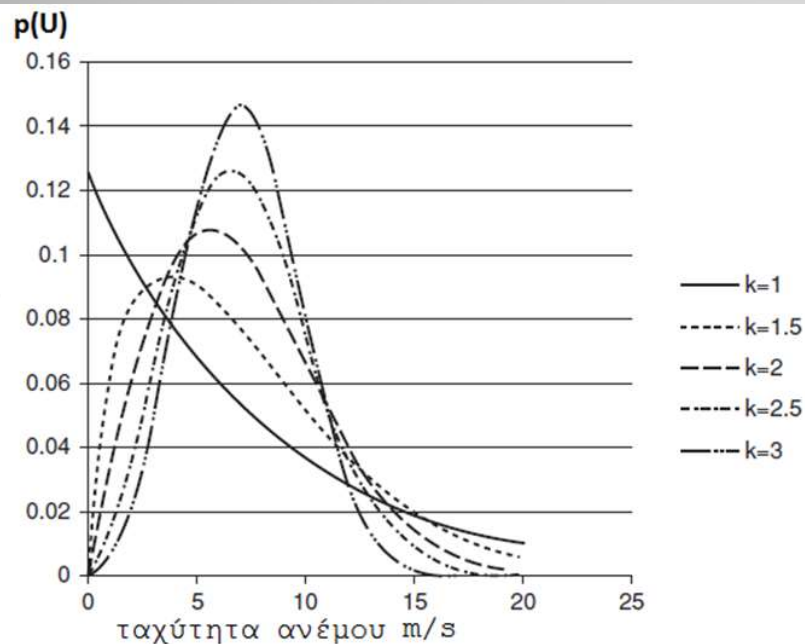
- Κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας
- Συνολική επιφάνεια=1
- Ο μέσος της κατανομής=6.6m/sec (ίσα εμβαδά)→ Τον μισό χρόνο η ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή μικρότερη από 6.6m/sec και τον άλλο μισό μεγαλύτερη από 6.6m/sec
- Μέση τιμή ανέμου: 7m/sec
- Η συχνότερη τιμή: 5.5m/sec



Η μορφή της κατανομής διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο του εδάφους, ...

Κατανομή Weibull

- Πολλές φορές, αντί για την πιθανότητα στην κατανομή Weibull συνηθίζεται να εκφράζεται ο χρόνος, σε ώρες ανά έτος, που εμφανίζεται μία τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Πολλαπλασιάζοντας με το 8760 (ώρες του χρόνου) την πιθανότητα $p(U)$ το γράφημα 1.2 μετασχηματίζεται και πλέον εκφράζει πόσες ώρες ανά έτος πιθανώς ο άνεμος να έχει ορισμένη ταχύτητα. Αυτό φαίνεται στο γράφημα & θα μας βοηθήσει στην αξιολόγηση μιας θεσης



Κατανομή Rayleigh

- Η απλούστερη κατανομή για την οποία απαιτείται μόνο η γνώση της μέσης ταχύτητας του ανέμου
- Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι

$$p(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right]$$

Δεν είναι όμως τόσο ακριβής όσο η weibull

Site classification

Αφού λοιπόν μετρήθηκε ο άνεμος και επεξεργάστηκαν τα δεδομένα τώρα πρέπει να αξιολογηθεί η τοποθεσία. Έτσι φτιάχνονται οι παρακάτω πίνακες

Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Πιθανότητα Weibull (%)	Αριθμός ωρών ετησίως	Καμπύλη ισχύος Δ/Γ (kW)	Παραγωγή ενέργειας (kWh)
0	0,00%	0	0,0	0
1	3,20%	280	0,0	0
2	5,30%	464	0,0	0
3	6,80%	596	0,0	0
4	7,70%	675	27,0	18.212
5	8,30%	727	70,4	51.186
6	8,40%	736	130,0	95.659
7	8,30%	727	211,0	153.414
8	7,80%	683	314,0	214.550
...
14	3,40%	298	837,0	249.292
15	2,80%	245	846,0	207.507
16	2,20%	193	849,0	163.619
17	1,70%	149	850,0	126.582
...
25	0,10%	9	850,0	7.446
Σύνολα	100,00%	8.760		3.183.184

Το άθροισμα είναι η **ετήσια παραγωγή ενέργειας Έαππο**

Site classification

Table 3.3 Annual energy yield

v (m/s)	$p(v)$ (% m/s)	h_i (1/m/s)	$h_i T$	$P(v) = P_i$ (kW)	$h_i T P_i$ (kWh)
0.5	2.24	0.0224	196.5	0.00	0
1.5	6.43	0.0643	562.6	0.00	0
2.5	9.80	0.0980	858.2	0.70	601
3.5	11.98	0.1198	1049.4	5.40	5667
4.5	12.86	0.1286	1126.4	13.60	15,319
5.5	12.54	0.1254	1098.7	26.40	29,005
6.5	11.31	0.1131	990.5	45.20	44,769
7.5	9.51	0.0951	833.3	71.10	59,248
8.5	7.51	0.0751	658.2	103.70	68,260
9.5	5.60	0.0560	490.1	142.60	69,894
10.5	3.94	0.0394	345.0	176.50	60,892
11.5	2.63	0.0263	230.0	196.50	45,198
12.5	1.66	0.0166	145.5	205.30	29,867
13.5	1.00	0.0100	87.4	208.00	18,178
14.5	0.57	0.0057	49.9	208.00	10,380
15.5	0.31	0.0031	27.1	208.00	5639
16.5	0.16	0.0016	14.0	208.00	2916
17.5	0.08	0.0008	6.9	208.00	1436
18.5	0.04	0.0004	3.2	208.00	674
19.5	0.02	0.0002	1.4	208.00	301
20.5	0.01	0.0001	0.6	208.00	129
21.5	0.003	0.0000	0.3	208.00	52
22.5	0.001	0.0000	0.1	208.00	20
23.5	0.0004	0.0000	0.04	208.00	7
24.5	0.0001	0.0000	0.01	208.00	3
25.5	0.00005	0.0000	0.004	0.00	0
Total	100.2	1.002	8776.5		468,457

Site classification

Annual energy
per wind velocity interval (v-bin)
Standardised (on maximum bin row)
for $v_{\text{lateral}} = 5.9 \text{ m/s}$ (function after Rayleigh)

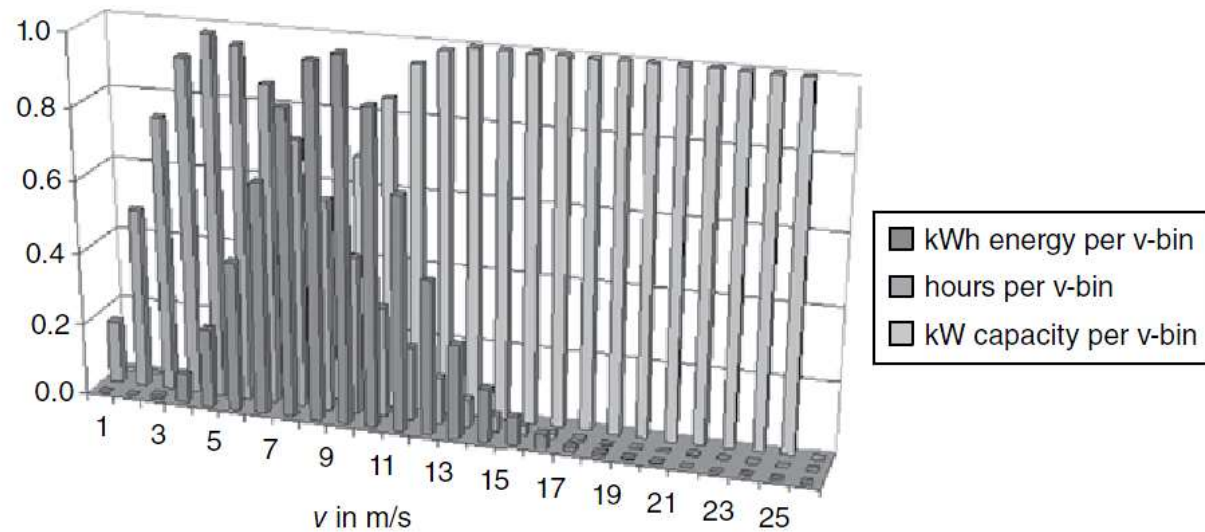


Figure 3.20 Annual energy in kWh is the total of the products of capacity in kW times hours, typically with a maximum in the partial load region below the nominal velocity

Full load hours

- Ένα μέγεθος που μας βοηθά να συγκρίνουμε αν η Α/Γ που επιλέχθηκε ταιριάζει στην αντίστοιχη περιοχή είναι ο λόγος

$\frac{E_{anno}}{P_{nom}}$ όπου στον παρανομαστή είναι η ονομαστική ισχύς της Α/Γ

Εναλλακτικά δίνεται ο συντελεστής χωρητικότητας

$$Capacity.Factor = \frac{Full.Load.Hours}{8760h} = \frac{E_{anno}}{8760h P_{nom}} = \frac{\bar{P}}{P_{nom}}$$

Από όπου μπορεί να εξαχθεί η ετήσια μέση ισχύς της ανεμογεννήτριας

Full Load Hours

- Για το λόγο $\frac{E_{anno}}{P_{nom}}$ ικανοποιητικές τιμές είναι λίγο πάνω από τις 2000 ώρες
- Αυτό αντιστοιχεί σε συντελεστή χωρητικότητας της Α/Γ $\frac{1}{4}$ δηλαδή προσφέρεται από την Α/Γ κατά μέσο όρο σε ένα χρόνο το $\frac{1}{4}$ της ονομαστικής της ισχύος **αρα είναι καλής σχεδίασης και κατασκευής**

Εάν ωστόσο πέσει κάτω από 1500 ώρες η μονάδα είναι οικονομικά ασύμφορη*

Εάν επιτευχθεί τιμή άνω των 3000 ωρών τότε ίσως θα πρέπει να επιλεγθεί Α/Γ με άλλα χαρακτηριστικά ισχύος (άρα και μεγέθους πτερωτής) ώστε να μειωθεί ο λόγος των full load hours οπότε η μονάδα θα γίνει ακόμα πιο οικονομική (ολιγοδάπανη)