



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού

Ενότητα 4: Αιολικές Μηχανές

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σκοποί ενότητας

- Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών
- Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα
- Κινητήρια δύναμη: Άντωση
- Σχεδίαση μηχανών οριζόντιου αξονα
 - Το όριο Betz
 - Δύναμη thrust ενεργοποιητή δίσκου
 - Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου - στοιβαρότητα

Περιεχόμενα ενότητας

- Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών
- Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα
- Κινητήρια δύναμη: Άντωση
- Σχεδίαση μηχανών οριζόντιου αξονα
 - Το όριο Betz
 - Δύναμη thrust ενεργοποιητή δίσκου
 - Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου - στοιβαρότητα

Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών

Οι αιολικές μηχανές
χωρίζονται σε
διάφορες κατηγορίες,
ανάλογα με:

το είδος της δύναμης που τις κινεί

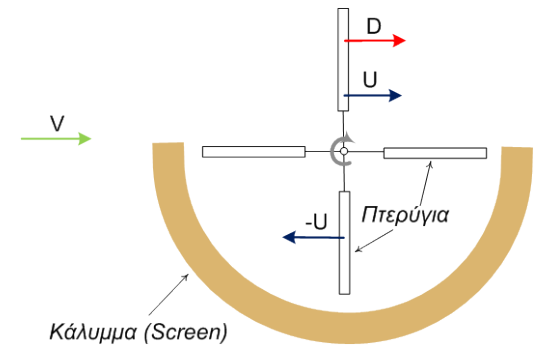
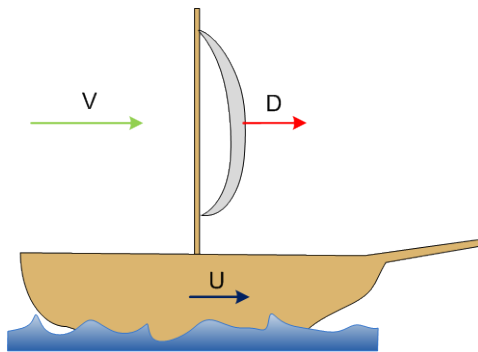
τον προσανατολισμό του άξονα
περιστροφής του ρότορά τους

το μέγεθός τους

τις τεχνικές ελέγχου της ενέργειας που
παράγουν.

Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα (1)

Στην κατηγορία αυτή εντάσσεται το **ιστιοφόρο πλοίο** καθώς και ο ανεμόμυλος «**περσικού τύπου**».



Ταχύτητα πλοίου: U , ταχύτητα του ανέμου: V , σχετική ταχύτητα του ανέμου ως προς το πλοίο: $W=V-U$, επιφάνεια των πανιών του ιστιοφόρου: S

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D W^2 S$$

Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα (2)

Η παραγόμενη ισχύς από τον άνεμο είναι: $P_{κλω} = \vec{D} \cdot \vec{U} = \frac{1}{2} \rho C_D ((V - U))^2 S U$

Απόδοση (η) του ιστιοφόρου: $\eta = \frac{P_{κλω}}{P} = \frac{\frac{1}{2} \rho C_D (V - U)^2 U S}{\frac{1}{2} \rho V^3 S} = \frac{C_D (V - U)^2 U}{V^3}$

Μέγιστη απόδοση του πλοίου. Θέτουμε $\xi = U/V$ και παίρνουμε:

$$\frac{d\eta}{d\xi} = 0 \Rightarrow C_D \left[-2\xi((1 - \xi)) + ((1 - \xi))^2 \right] = C_D \left[((1 - \xi))((1 - 3\xi)) \right] = 0$$

Λύση $U = V$, $\eta = 0$ (απορρίπτεται). Αποδεκτή λύση: $U = \frac{1}{3} V$ που δίνει:

$$\eta = \frac{4}{27} C_D$$

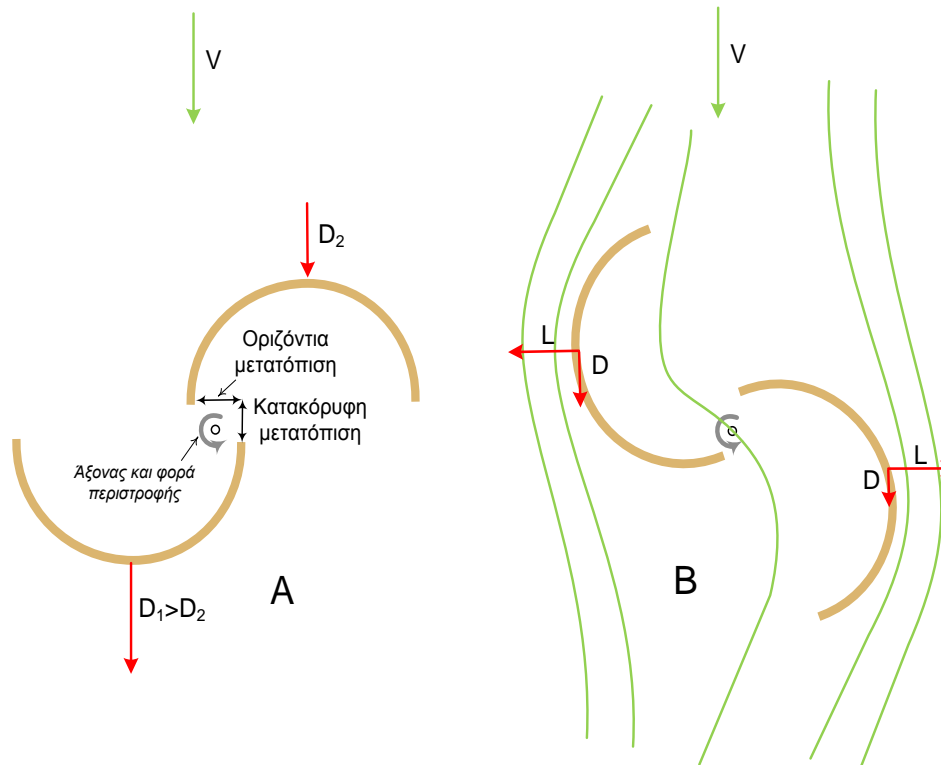
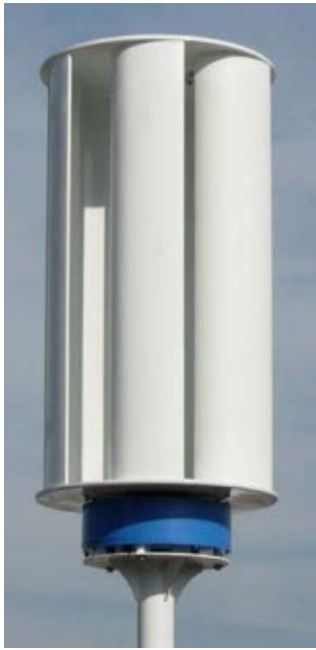
Οι τιμές της απόδοσης η κυμαίνονται από **0,15** έως **0,18**, ανάλογα με το C_D του πανιού (=1,2 για επίπεδη επιφάνεια).

Η ανάλυση αυτή ισχύει κατά προσέγγιση και για τον περσικό ανεμόμυλο.

Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα (3)

Αιολική μηχανή *Savonius*

Έχει πάρει το όνομά του από το Φινλανδό μηχανικό Sigurd J. Savonius που τον εφεύρε το 1922. Η απόδοση των μηχανών Savonius είναι γύρω στο 0,20, παρόμοια με αυτή του περσικού ανεμόμυλου.



<http://commons.wikimedia.org>

http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine

Κινητήρια δύναμη: Άντωση

- Μηχανές κατακόρυφου άξονα -

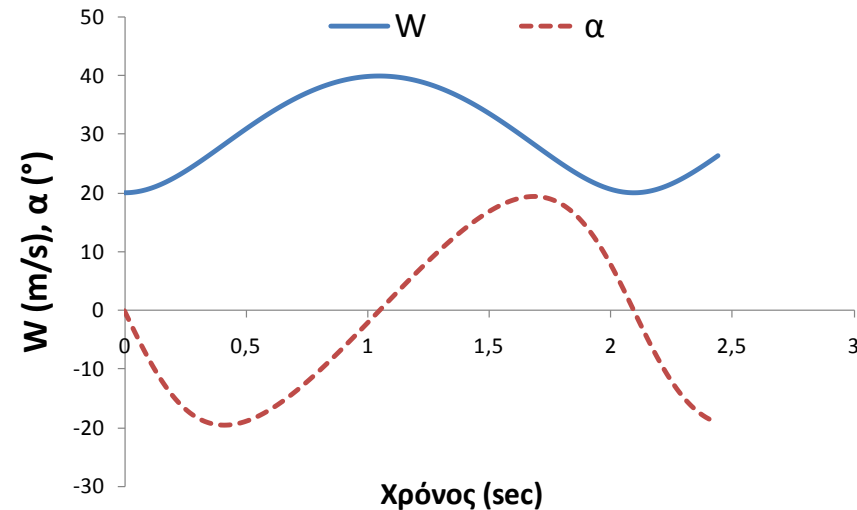
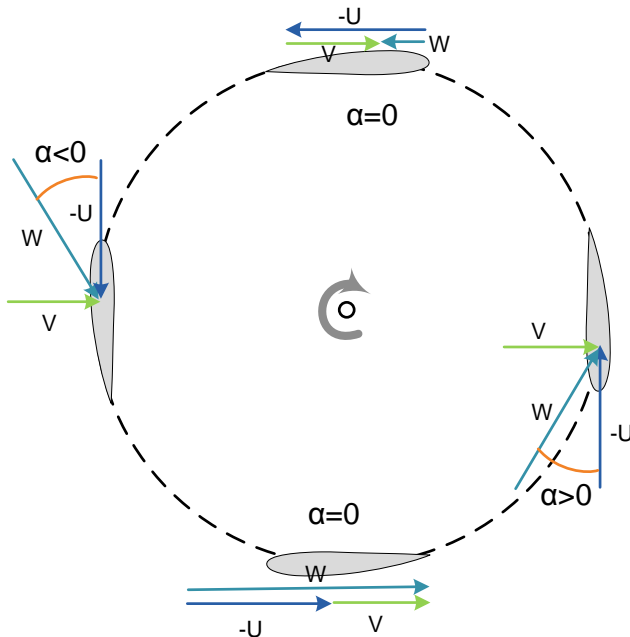
Πλεονεκτήματα:

- Η λειτουργία τους δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση του ανέμου και έτσι δεν είναι απαραίτητο να έχουν μηχανισμό προσανεμισμού.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια και τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος

Μειονεκτήματα:

- Δεν μπορούν να εκκινήσουν από μόνες τους, χωρίς εξωτερική βοήθεια.
- Μεταβαλλόμενα αεροδυναμικά φορτία.

**Darrieus,
H-turbine
ή
Musgrove**



Κινητήρια δύναμη: Άντωση - Μηχανές οριζόντιου άξονα -

Έχουν δοκιμαστεί διάφορες εναλλακτικές λύσεις:

- *Μείωση των πτερυγίων από τρία σε δύο ή και ένα, για μείωση του κόστους.*
- *Τοποθέτηση του ρότορα κατάντη του πύργου. Με αυτή τη διάταξη, ο ρότορας έχει την ιδιότητα να προσανεμίζεται παθητικά.*

Οι μηχανές που έχουν επικρατήσει σήμερα είναι οριζόντιου άξονα, με τρία πτερύγια, με το ρότορα ανάντη.

Μηχανές οριζόντιου άξονα - Παραδοσιακοί Ανεμόμυλοι -

Αρχαία χρόνια: περσικός ανεμόμυλος.

Ελλάδα: νησιά του Αιγαίου, οροπέδιο Λασιθίου, πιο ελαφριάς κατασκευής.

Ευρώπη: «κάτω χώρες», Βρετανία- Ισπανία, κυρίως το Μεσαίωνα.

ΗΠΑ: «αμερικάνικος» ανεμόμυλος.

Λασιίθι



Ολλανδία



Αμερική



Ουαλία



<http://en.wikipedia.org/wiki/Windmill>

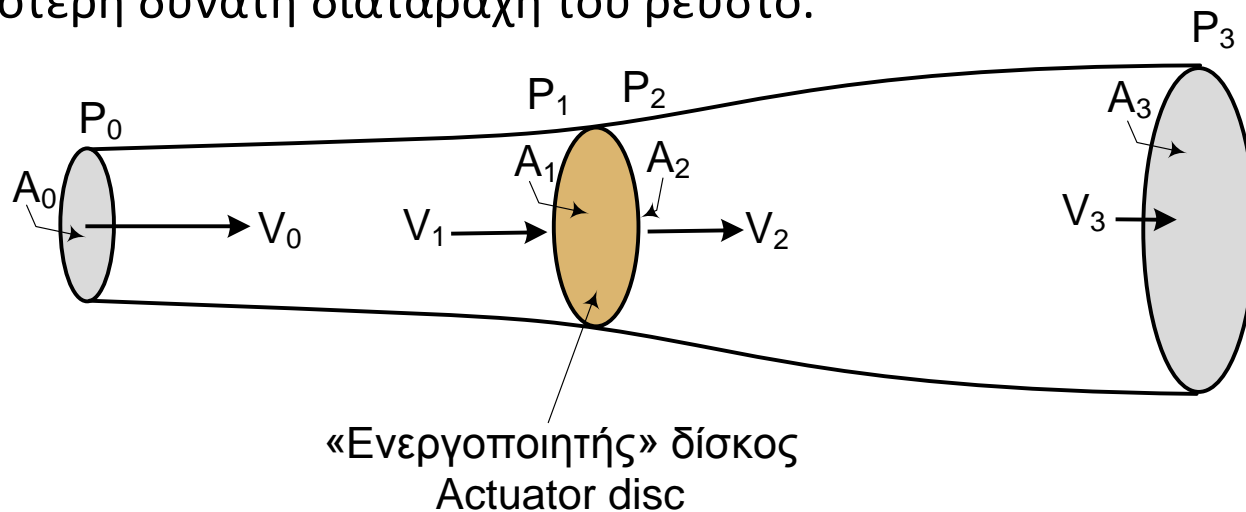
Σχεδίαση μηχανών οριζόντιου αξονα

Το όριο Betz (1)

Το όριο Betz

Η θεωρία που θα παρουσιαστεί παρακάτω αναπτύχθηκε μεταξύ 1919 και 1926 από το Γερμανό φυσικό Albert Betz και δίδει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει μια αιολική μηχανή οριζόντιου άξονα.

Έννοια του «ενεργοποιητή δίσκου» (actuator disc) ο οποίος έχει άπειρα πτερύγια απειροστού πάχους και περιστρέφεται με απειροστή ταχύτητα. Πρόκειται για μια διάταξη που απορροφά την κινητική ενέργεια του ανέμου με τη μικρότερη δυνατή διαταραχή του ρευστού.

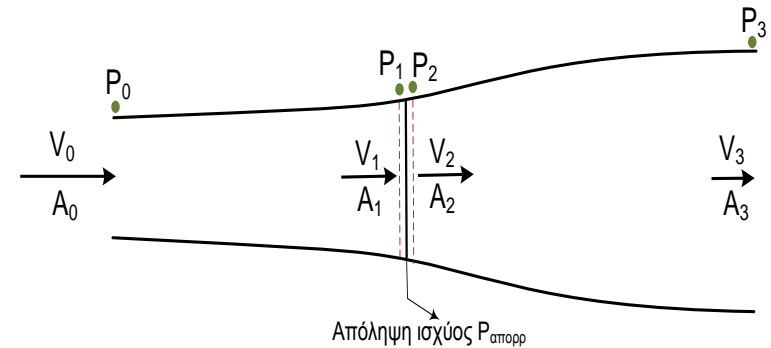


$A_3 > A_1 > A_0$ διότι καθώς ο δίσκος απορροφά την κινητική ενέργεια του ανέμου η ταχύτητά του μειώνεται και σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας, αυξάνεται η διατομή.

Το όριο Betz (2)

$$V_1 = V_2 \text{ αφού } A_1 = A_2$$

$$P_0 = P_3 = P_{Atm}$$



$P_1 > P_0$ (αφού $V_1 < V_0$) από «μπλοκάρισμα» (blockage) του δίσκου. στον άνεμο.
 $P_3 > P_2$ (αφού $V_3 < V_2$).

Επομένως, παρατηρείται ασυνέχεια στην πίεση ($P_1 > P_2$).

Με αυτά τα δεδομένα, μπορούμε να πάρουμε από την εξίσωση της συνέχειας:

$$A_0 V_0 = A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3$$

και από την εξίσωση Bernoulli:

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \Rightarrow P_1 - P_0 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (1)$$

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \Rightarrow P_3 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_3^2) \quad (2)$$

Το όριο Betz (3)

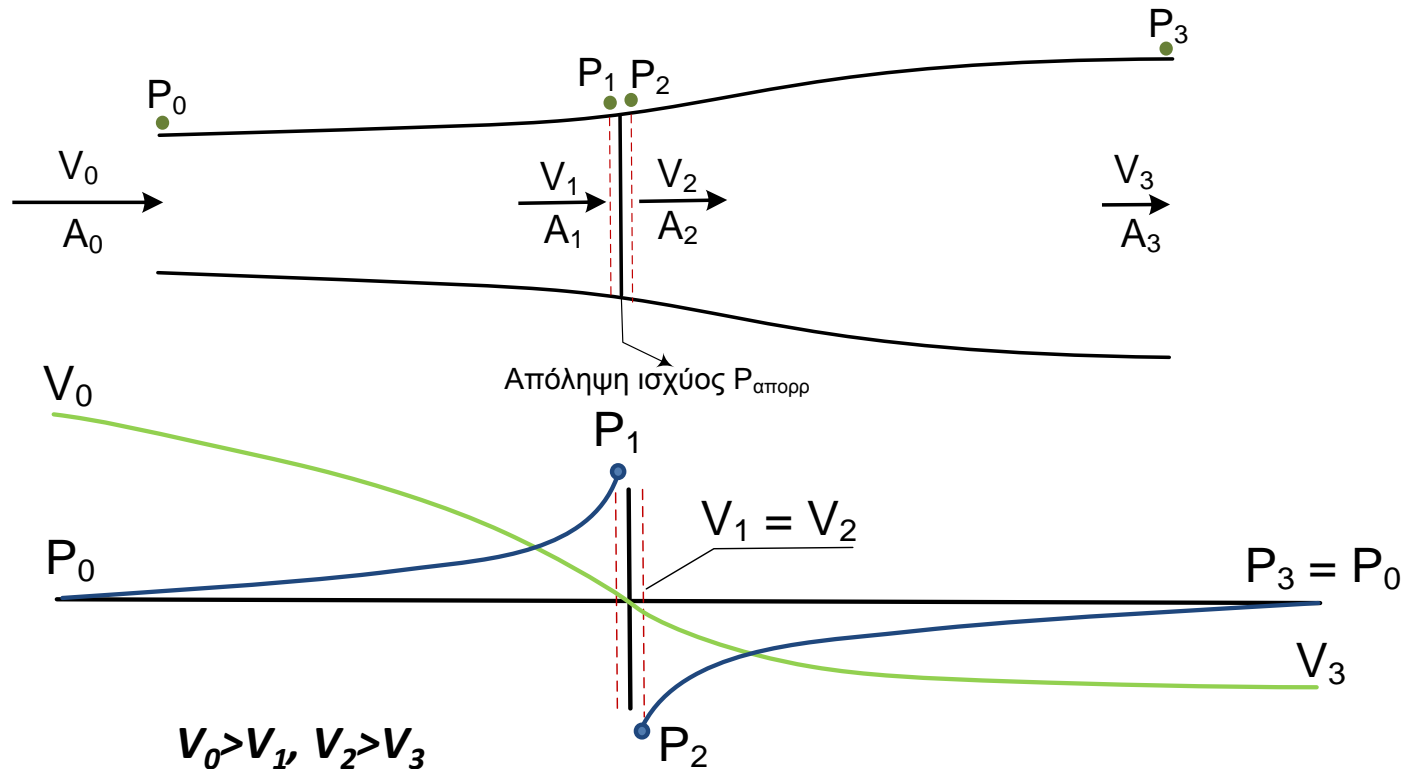
Για να αναλύσουμε τις συνθήκες ροής γύρω από το δίσκο, χρησιμοποιούμε τέσσερις θέσεις:

τη θέση **-0-**, πολύ πριν το δίσκο, όπου το ρευστό είναι «αδιατάρακτο»,

τη θέση **-1-** ακριβώς ανάντη του δίσκου,

τη θέση **-2-** ακριβώς κατάντη του δίσκου και

τη θέση **-3-** πολύ κατάντη του δίσκου όπου και πάλι το ρευστό είναι «αδιατάρακτο».



Το όριο Betz (4)

Προσθέτοντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) και με δεδομένο ότι:

$$V_1 = V_2, P_0 = P_3 \quad (3)$$

έχουμε:
$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_3^2)$$

Δύναμη T (Thrust) με την οποία «πιέζει» ο άνεμος τον δίσκο

$$T = (P_1 - P_2)A_1 = \frac{1}{2} \rho A_1 (V_0^2 - V_3^2) \quad (4)$$

Η ίδια δύναμη μπορεί να υπολογιστεί και από τη μεταβολή της ορμής του ανέμου. Αρχικά μια μάζα m του ρευστού έχει ορμή mV_0 και αφού περάσει από το δίσκο η ορμή της γίνεται mV_3 οπότε:

$$T = \frac{m}{t} (V_0 - V_3) \xrightarrow{\frac{m}{t} = \rho V_1 A_1} T = \rho V_1 A_1 (V_0 - V_3) \quad (5)$$

(4,5)



$$\frac{1}{2} (V_0^2 - V_3^2) = V_1 (V_0 - V_3)$$

(...)



Θεώρημα Rankine-Froude

$$V_1 = \frac{1}{2} (V_0 + V_3)$$

(6)

Το όριο Betz (5)

Ισχύς που απορροφάται από το δίσκο: $P = \vec{F} \cdot \vec{V}$

όπου \vec{F} η δύναμη με την οποία πιέζει ο δίσκος τον άνεμο (δηλαδή η αντίδραση της Thrust) και \vec{V} η ταχύτητα του ρευστού στην περιοχή του δίσκου:

$$P = TV_1 \xrightarrow{(4): T = \frac{1}{2}\rho A_1 (V_0^2 - V_3^2)} P = \frac{1}{2}\rho A_1 ((V_0^2 - V_3^2))V_1$$

$$\xrightarrow{(6): V_1 = \frac{1}{2}(V_0 + V_3)} P = \frac{1}{2}\rho A_1 ((V_0^2 - V_3^2))\frac{1}{2}(V_0 + V_3)$$

Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου είναι:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 V_0^3 \quad \text{ΠΡΟΣΟΧΗ!! } V_0^3 \text{ και όχι } V_1^3!!!$$

Φέρνοντας την παραπάνω παράσταση σε αντίστοιχη μορφή και θέτοντας $\xi = \frac{V_3}{V_0}$

$$\Rightarrow P = \frac{1}{2}\rho A_1 V_0^3 \left[\frac{1}{2}((1 + \xi))((1 - \xi^2)) \right] \quad (7)$$

Το όριο Betz (6)

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3 \left[\frac{1}{2} ((1 + \xi)) ((1 - \xi^2)) \right] \quad (7)$$

Η παράσταση μέσα στις αγκύλες ονομάζεται και συντελεστής ισχύος (power coefficient, C_p) και ισούται **με το λόγο της ισχύος που απορροφάται από το δίσκο προς τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου:**

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3} \quad , \quad P = \frac{1}{2} \rho C_p V_0^3 A_1$$

Ο συντελεστής ισχύος C_p εκφράζει την **αεροδυναμική απόδοση** μιας αιολικής μηχανής που αφορά στη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική (περιστροφή του ρότορα). Η **συνολική απόδοση η** της μηχανής μπορεί να βρεθεί αν ληφθούν υπόψη οι απώλειες του συστήματος περιστροφής (εφέδρανα, κιβώτιο ταχυτήτων) και οι απώλειες κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Η απορροφούμενη ισχύς μεγιστοποιείται όταν:

Το όριο Betz (7)

Η απορροφούμενη ισχύς μεγιστοποιείται όταν:

$$\frac{dC_p}{d\xi} = 0 \Rightarrow ((1 - \xi^2)) \frac{d((1 + \xi))}{d\xi} + ((1 + \xi)) \frac{d((1 - \xi^2))}{d\xi} = 0 \Rightarrow ((1 + \xi))((1 - 3\xi)) = 0$$

Η λύση $\xi = -1$ απορρίπτεται καθώς δεν έχει φυσικό περιεχόμενο.

Η λύση $\xi = 1/3$ για την οποία η δεύτερη παράγωγος είναι < 0 .

Από αυτή και την εξίσωση (6) παίρνουμε:

$$V_3 = \frac{1}{3} V_0, \quad V_1 = \frac{2}{3} V_0$$

Και φυσικά, από τις εξισώσεις (7) και (8) καταλήγουμε στο «**όριο του Betz**»:

$$C_p = \frac{16}{27} = 0,5925\dots$$

Αυτό είναι και το μέγιστο της απόδοσης που μπορεί να παραχθεί από μια αερολογική μηχανή οριζόντιου άξονα.

Δύναμη thrust ενεργοποιητή δίσκου

Η δύναμη T που «ωθεί» τον ενεργοποιητή δίσκο:

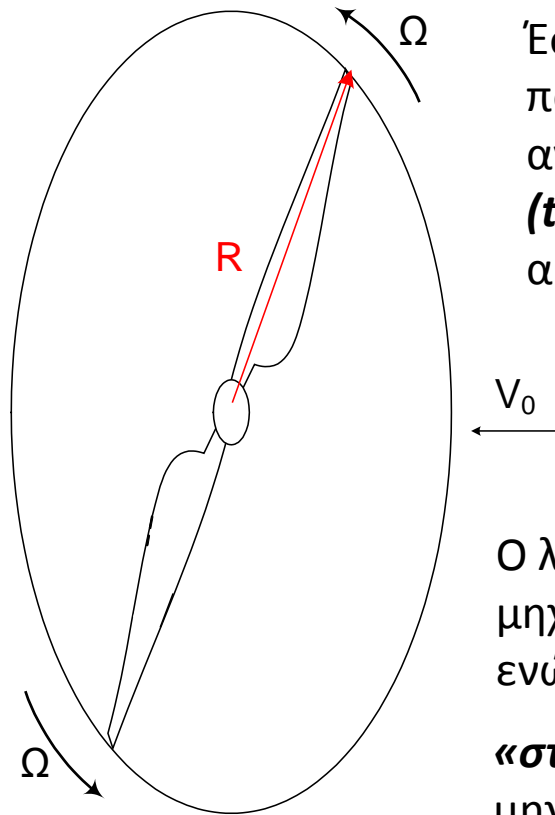
$$T = \frac{1}{2} \rho A_1 (V_0^2 - V_3^2) = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^2 \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_0} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^2 [1 - \xi^2]$$

Και πάλι η παράσταση μέσα στις αγκύλες ονομάζεται συντελεστής ωθούσας δύναμης (thrust coefficient, C_T) σε αντιστοιχία με τις εξισώσεις των δυνάμεων Lift, Drag.

Στο **όριο Betz ($\xi=1/3$)**, έχουμε $C_T = \frac{8}{9} = 0,888\dots$

Η τιμή αυτή είναι **μικρότερη** από το συντελεστή οπισθέλκουσας συμπαγούς δίσκου ($C_D=1,11$) λόγω του ότι ο «ενεργοποιητής δίσκος» δεν είναι συμπαγής, αλλά επιτρέπει τη ροή του ανέμου από μέσα του.

Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου - στοιβαρότητα



Έστω ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με πτερύγια ακτίνας R , που περιστρέφεται με **γωνιακή ταχύτητα Ω** , ενώ η ταχύτητα του ανέμου είναι V_0 . Ορίζουμε ως «**λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου**» (**tip speed ratio**) λ το λόγο της γραμμικής ταχύτητας του ακροπτερυγίου (tip), προς την ταχύτητα του ανέμου:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου \Rightarrow «**σημείο λειτουργίας**» της μηχανής. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι είναι αργόστροφοι με $\lambda=1$, ενώ οι σύγχρονοι είναι πολύστροφοι, **με λ από 4 έως 6**.

«**στοιβαρότητα**» (**solidity**) σ : ποσοστό του δίσκου μιας αιολικής μηχανής καλύπτεται από πτερύγια

$$\sigma = \frac{N \bar{c} R}{\pi R^2} = \frac{N \bar{c}}{\pi R}$$

όπου N ο αριθμός των πτερυγίων και

$$\bar{c} = \frac{1}{R} \int_0^R c(r) dr$$

η μέση τιμή της χορδής.

Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.



Σημείωμα Αναφοράς

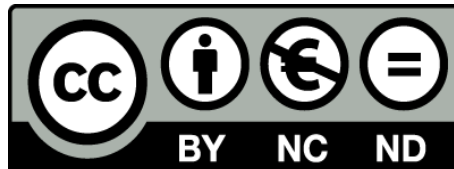
Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015**. «**Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού, Ενότητα: Αιολικές μηχανές**» Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1954&id=4288>



Σημείωμα Αδειοδότησης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

