



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

## Ενότητα 5: Αιολική Ενέργεια

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Φυσικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

# Σκοποί ενότητας

- Γνωριμία με την αιολική ενέργεια, την εξέλιξη των ανεμογεννητριών και την έκταση της διείσδυσής τους στον παγκόσμιο ενεργειακό χάρτη, μέσω στατιστικών στοιχείων και κατάλληλου φωτογραφικού υλικού
- Εισαγωγή στις βασικές έννοιες και τις θεμελιώσεις αρχές της ρευστομηχανικής και της αεροδυναμικής.
- Εφαρμογή των παραπάνω εννοιών για την ανάλυση και κατανόηση της σχεδίασης των αεροτομών
- Παρουσίαση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ρευστών και του ρόλου τους στη διαμόρφωση του είδους της ροής γύρω από αεροτομές.
- Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών
- Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα
- Κινητήρια δύναμη: Άντωση
- Σχεδίαση μηχανών οριζόντιου αξονα
- Παρουσίαση της κίνησης του ανέμου ως ρευστό
- Παρουσίαση των μεθόδων μέτρησης των ιδιοτήτων του ανέμου (εξοπλισμός) και των χαρτών αποτύπωσης του αιολικού δυναμικού (τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμου)

# Περιεχόμενα ενότητας (1)

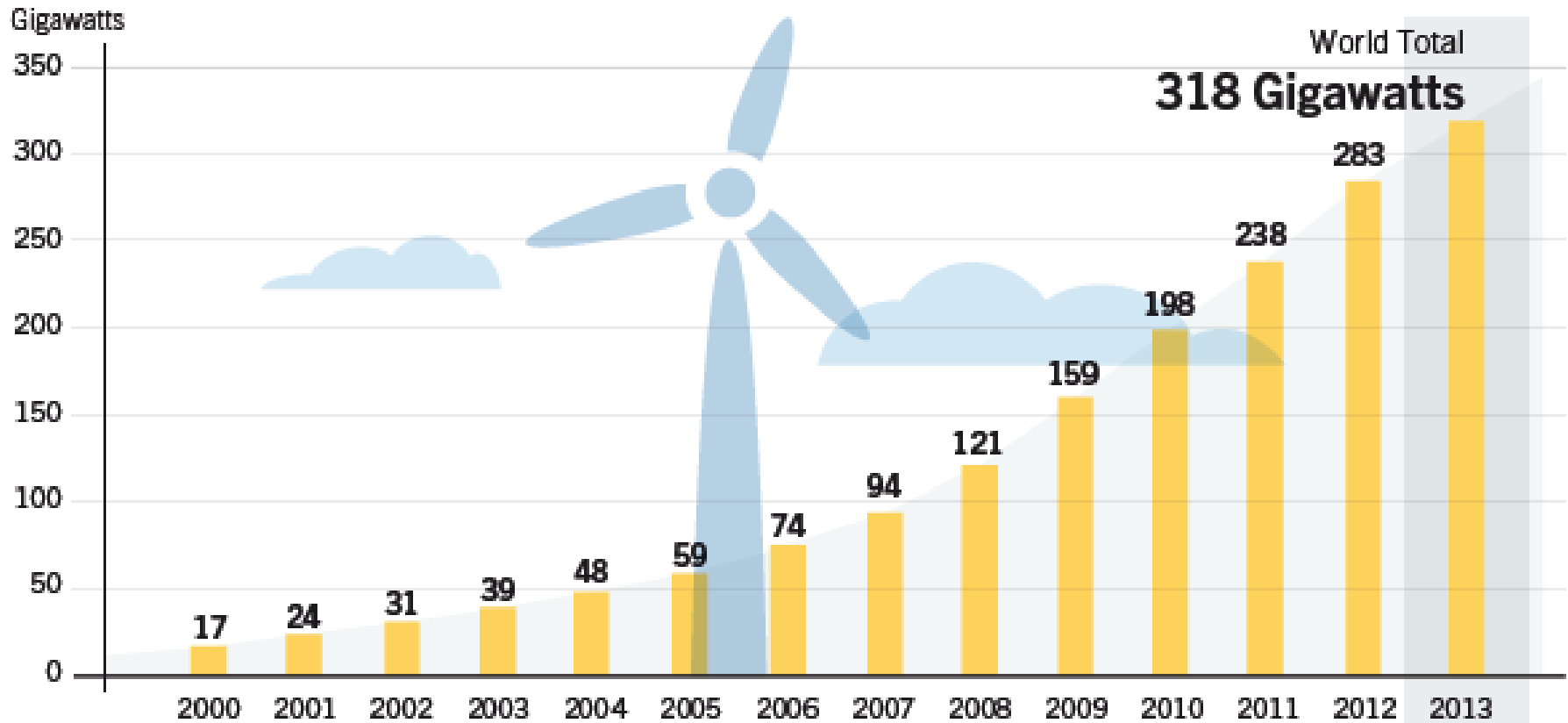
- Στατιστικά στοιχεία διεξόδου της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως
- Βασικοί τύποι και μέρη αιολικών μηχανών
- Τρέχοντα και μελλοντικά πεδία έρευνας στην αιολική ενέργεια
- Οφέλη και επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας
- Αιολικά πάρκα – εργασίες εγκατάστασης
- Φωτογραφικό υλικό αιολικού πάρκου του όρους Παναχαϊκού και άλλων πάρκων της Δ. Περιφέρειας Ελλάδος
- Η έννοια του «ιδανικού ρευστού»
- Θεμελιώδη στοιχεία αεροδυναμικής
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κατανομή πίεσης τυπικής αεροτομής
- Άντωση και οπισθέλκουσα
- Μετασχηματισμός αεροτομής σε κύλινδρο
- Γωνία προσβολής (απώλεια στήριξης)
- Αριθμός Reynolds
- Στρωτή και τυρβώδης ροή

# Περιεχόμενα ενότητας (2)

- Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών
- Κινητήρια δύναμη: Οπισθέλκουσα
- Κινητήρια δύναμη: Άντωση
- Σχεδίαση μηχανών οριζόντιου αξονα
- Κίνηση ανέμου
- Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα
- Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου
- Στατιστική περιγραφή του ανέμου
- Περιγραφή της κατεύθυνσης του ανέμου – Ροδόγραμμα
- Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου
- Αιολικό δυναμικό

# Η αιολική ενέργεια στον κόσμο (1)

- Παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς -

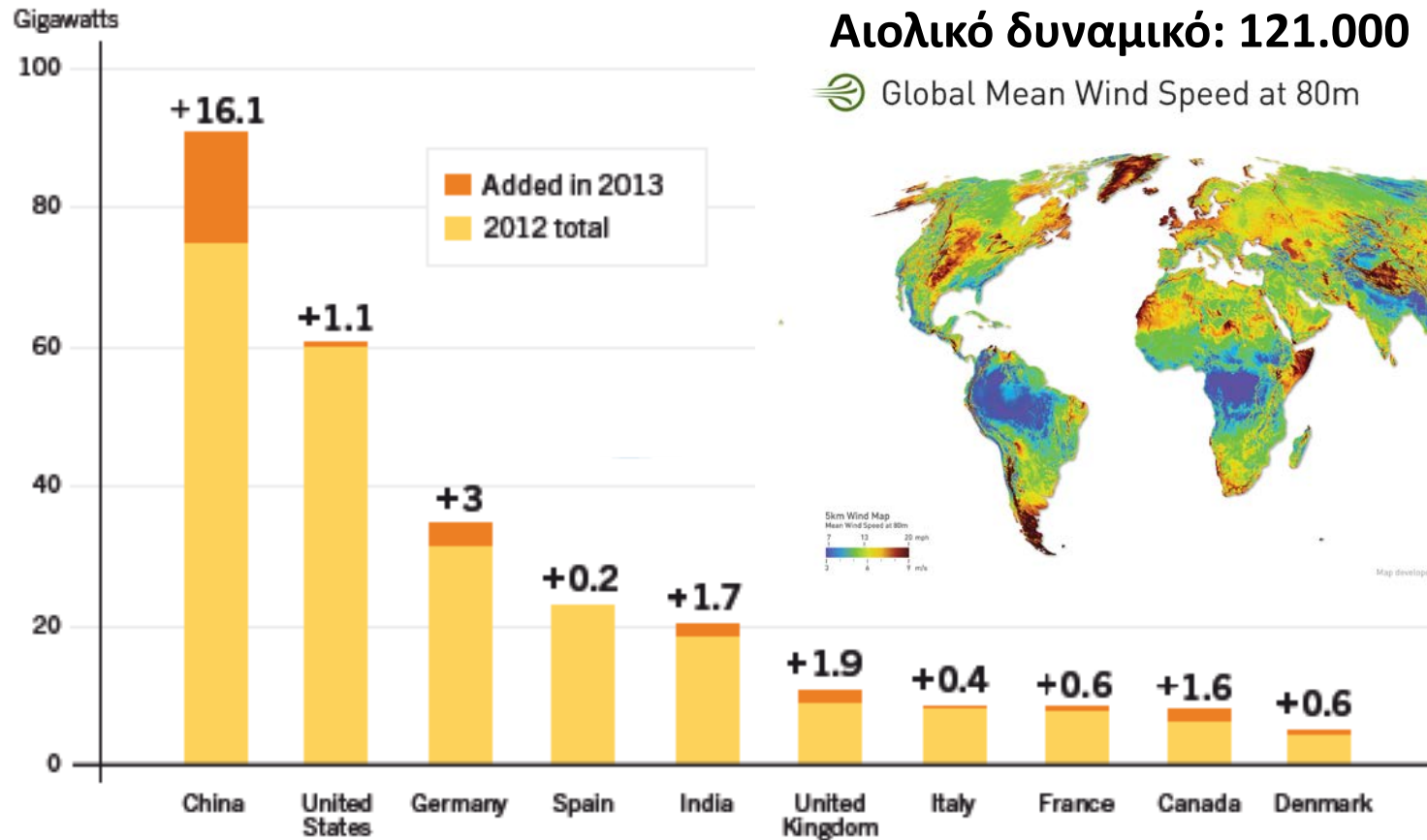


[1]

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: 20.000 TWh/yr

# Η αιολική ενέργεια στον κόσμο (2)

- 10 κορυφαίες χώρες παραγωγής -



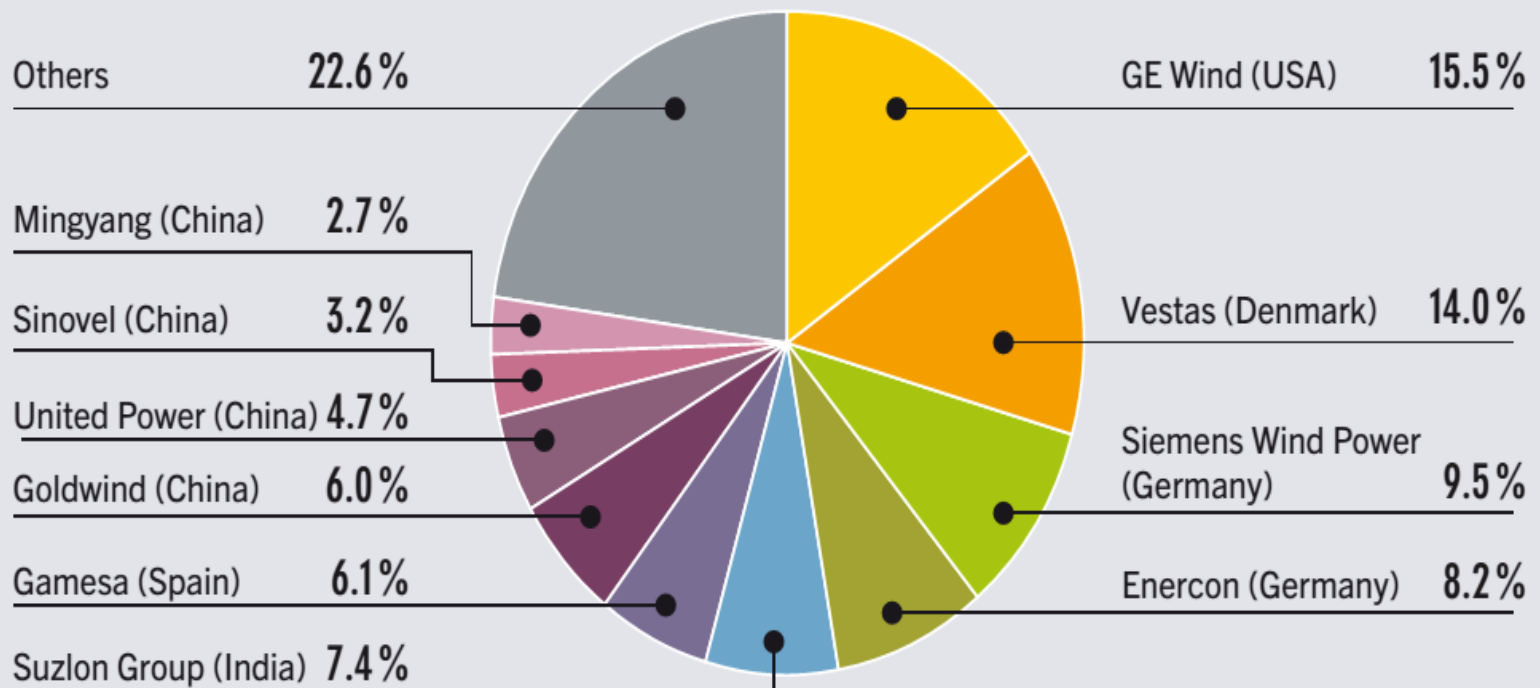
[1]

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: 20.000 TWh/yr

# Η αιολική ενέργεια στον κόσμο (3)

## - Κορυφαίοι Κατασκευαστές -

FIGURE 20. MARKET SHARES OF TOP 10 WIND TURBINE MANUFACTURERS, 2012



[1]

Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας: 20.000 TWh/yr

# Τύποι αιολικών μηχανών

## Κατακόρυφου άξονα



<http://commons.wikimedia.org>



<http://en.wikipedia.org>

## Οριζόντιου άξονα



[http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine_design)



<http://commons.wikimedia.org>



# Τύποι και χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών



## **ΡΟΤΟΡΑΣ- ΠΤΕΡΥΓΙΑ**

Μια τυπική ανεμογεννήτρια 2MW έχει ρότορα διαμέτρου 80-85m περιστρέφεται με 6 έως 20 rpm και ζυγίζει 35-40 t.

## **ΑΤΡΑΚΤΟΣ**

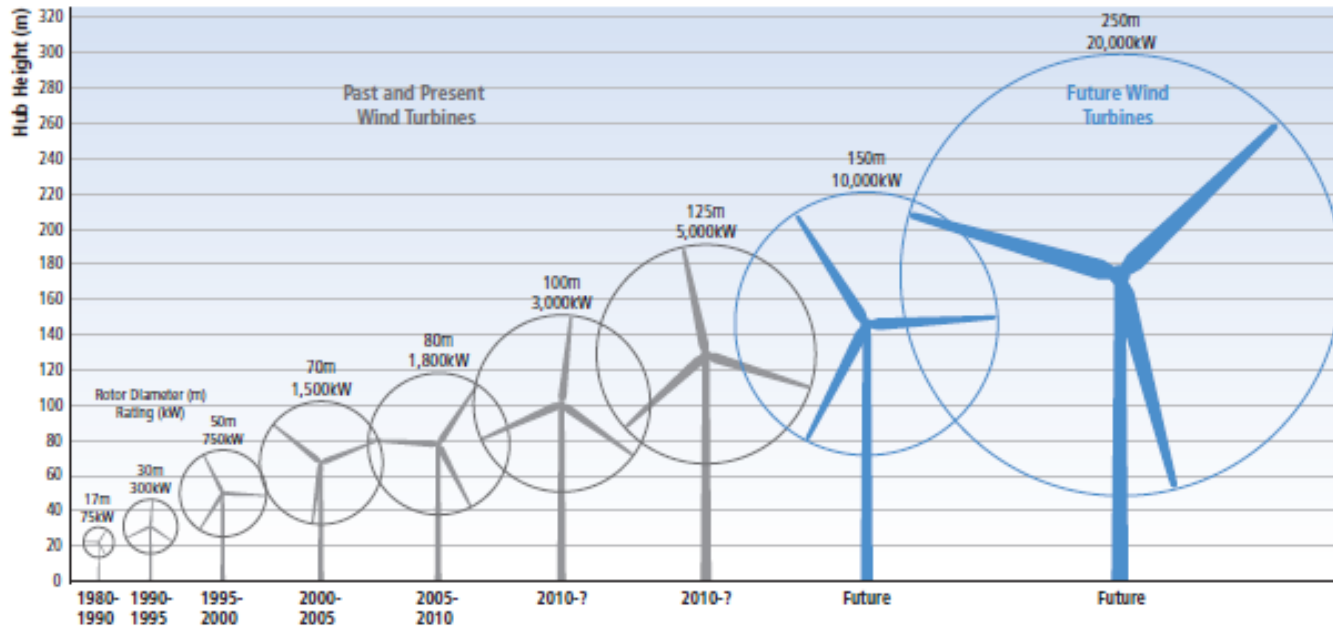
Περιλαμβάνει: Εφέδρανα- Κιβώτιο ταχυτήτων, Ηλεκτρογεννήτρια, Σύστημα ροσανατολισμού Φρένο, όργανα μέτρησης Η άτρακτος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας 2MW ζυγίζει 65-70 t.

## **ΠΥΡΓΟΣ**

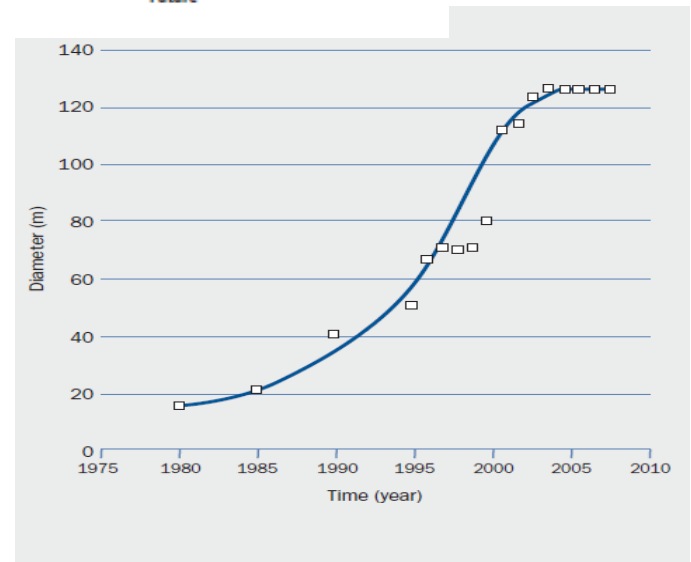
Αποτελείται από εξηλασμένα μεταλλικά φύλλα. Στη βάση του τοποθετείται ο μετασχηματιστής. Ο πύργος μιας τυπικής ανεμογεννήτριας 2MW έχει ύψος 60-100m και ζυγίζει 150-200 t.



# Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών



[2]



# Τομείς προτεραιότητας για μελλοντική έρευνα

- **Ανεμολογικά δεδομένα.** Μετεωρολογικά εργαλεία για επιλογή κατάλληλων θέσεων και βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της ταχύτητας ανέμου.
- **Ανεμογεννήτριες.** Βελτίωση αξιοπιστίας, μηχανές μεγάλου μεγέθους.
- **Ηλεκτρικά δίκτυα.** Ανάπτυξη «έξυπνων» δικτύων και μικροδικτύων.
- **Υπεράκτια- θαλάσσια αιολικά πάρκα.** Θεμελιώσεις σε μεγάλα βάθη, υποθαλάσσια δίκτυα, κατάλληλες μηχανές, ασφάλεια, περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

# Υπεράκτια Θαλάσσια αιολικά πάρκα

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ:

- Υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, σταθερότερα αιολικά πεδία, λιγότερη τύρβη.
- Σταθερότερη και αποδοτικότερη λειτουργία των ανεμογεννητριών.
- Λιγότερες αντιδράσεις, αυξημένα όρια θορύβου.
- Η Ευρώπη είναι πρωτοπόρος στην ανάπτυξη παράκτιων πάρκων. Μέχρι το 2015 σχεδιάζεται να έχουν εγκατασταθεί περί τα 37.500 MW.

# Οφέλη αιολικής ενέργειας

- **ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ.** 1MW αιολικής ενέργειας καλύπτει τις ανάγκες περίπου 350 οικιακών καταναλωτών ή 1000 ατόμων και εξοικονομεί περίπου 300 τόνους ισοδύναμου πετρελαίου.
- **ΜΕΙΩΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO<sub>2</sub>.** Μία γιγαβατώρα αιολικής ενέργειας εξοικονομεί 600 τόνους διοξειδίου του άνθρακα.
- **ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO<sub>2</sub>.** Η ποσότητα CO<sub>2</sub> που εκλύεται κατά την κατασκευή και εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας με χρόνο ζωής τα 20 έτη, "αποσβένεται" μέσα στους πρώτους 3 με 6 μήνες λειτουργίας της.
- **ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ.** Για κάθε MW αιολικής ενέργειας απαιτούνται 17 ανθρωποέτη στη φάση κατασκευής και 5 ανθρωποέτη στη φάση εγκατάστασης.
- **ΧΡΗΣΗ ΓΗΣ.** Τα αιολικά πάρκα απαιτούν μικρή επιφάνεια σε σχέση με άλλες μορφές ενέργειας, π.χ. ηλιακή. Παράλληλες δραστηριότητες (όπως βοσκή ή καλλιέργεια) είναι δυνατές.

# Επιπτώσεις αιολικής ενέργειας (1)

- **ΘΟΡΥΒΟΣ.** Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών προέρχεται από τα πτερύγια (αεροδυναμικός θόρυβος), τα ρουλεμάν και τη γεννήτρια. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες ακολουθούν αυστηρές προδιαγραφές όσον αφορά το θόρυβο:
  - Σε απόσταση 40 μέτρων από μία ανεμογεννήτρια η στάθμη θορύβου είναι 50-60 dB(A).
  - Σε απόσταση 200 μέτρων, μειώνεται στα 44 dB(A).
  - Συγκριτικά: θόρυβος στο εσωτερικό αυτοκινήτου: 80 dB(A), στο εσωτερικό οικίας: 50 dB(A)
- **ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΕΣ.** Τήρηση των αποστάσεων ασφαλείας από κατοικημένες περιοχές.

# Επιπτώσεις αιολικής ενέργειας (2)

- **ΟΡΝΙΘΟΠΑΝΙΔΑ.** Τραυματισμοί και θανατώσεις από προσκρούσεις. Τα ενδημικά είδη «συνηθίζουν» την παρουσία των μηχανών και τις αποφεύγουν σε αντίθεση με τα αποδημητικά.
  - Να μην κατασκευάζονται αιολικά πάρκα σε δρόμους μετανάστευσης των αποδημητικών όπου μετακινούνται μεγάλοι πληθυσμοί τη νύκτα.
  - Να χρησιμοποιούνται φανοί λευκού χρώματος στροβοσκοπικοί (όχι ερυθροί περιστροφικοί).
  - Η συχνότητα ατυχημάτων πουλιών με αυτοκίνητα στους δρόμους είναι πολύ μεγαλύτερη αυτής των ατυχημάτων σε αιολικά πάρκα.
  - Οι υπόλοιπες μορφές πανίδας δεν επηρεάζονται από τις ανεμογεννήτριες.

# Επιπτώσεις αιολικής ενέργειας (3)

- **ΟΠΤΙΚΗ ΟΧΛΗΣΗ.** Το κατά πόσο η παρουσία των αιολικών πάρκων σε μια περιοχή αποτελεί «οπτική ρύπανση» είναι θέμα υποκειμενικό.
  - Με κατάλληλη βαφή των αιολικών μηχανών είναι δυνατόν να αμβλύνονται οι όποιες άσχημες εντυπώσεις και τα αιολικά πάρκα να «δένουν» καλύτερα με το τοπίο.
  - Κατά τη χωροθέτηση των αιολικών πάρκων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο χαρακτήρας της περιοχής, π.χ. αρχαιολογικοί χώροι .



# Αιολικά πάρκα, εργασίες εγκατάστασης

➤ **ΟΔΟΠΟΙΙΑ.** Οι δρόμοι πρόσβασης στο χώρο εγκατάστασης πρέπει να επιτρέπουν τη διέλευση των φορτηγών που μεταφέρουν τα τμήματα των ανεμογεννητριών. Συνήθως, στις ορεινές περιοχές η οδοποιία περιορίζει και το μέγεθος των μηχανών που δεν μπορεί να υπερβεί το 1MW. Επίσης κατασκευάζεται εσωτερική οδοποιία από ανεμογεννήτρια σε ανεμογεννήτρια με τυπικό πλάτος 4 με 5 μέτρα.

➤ **«ΠΛΑΤΕΙΕΣ».** Στη βάση κάθε ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί μια «πλατεία» (περί το ένα στρέμμα) για τη συναρμολόγηση του ρότορα και την ανέγερση της μηχανής. Ο χώρος της πλατείας αποψιλώνεται και συμπυκνώνεται ώστε να είναι ασφαλής η χρήση των γερανών και των άλλων μηχανημάτων. Μετά την εγκατάσταση, το μεγαλύτερο μέρος της πλατείας μπορεί να αποκατασταθεί με επανατοποθέτηση της φυτικής γης που απομακρύνθηκε, φυτεύσεις κλπ.

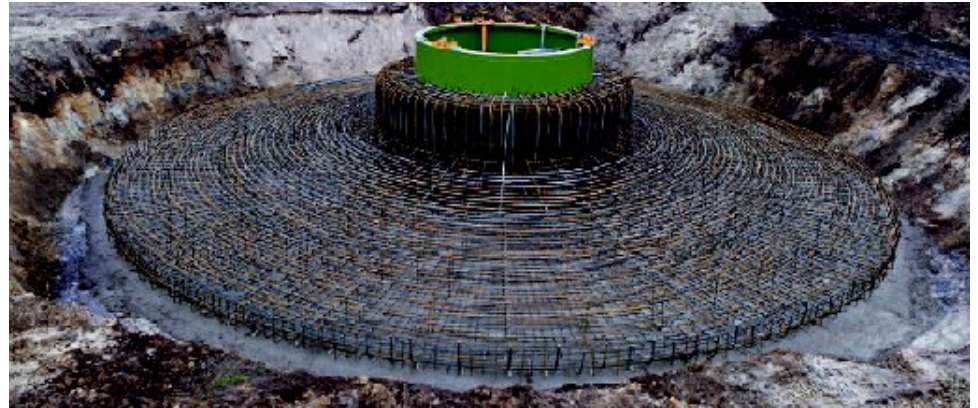
➤ **ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ.** Για τη σύνδεση των μηχανών με το κέντρο ελέγχου / υποσταθμό ανύψωσης τάσης κατασκευάζεται εσωτερικό δίκτυο μέσης τάσης (20.000 V). Το δίκτυο αυτό είναι υπόγειο και οδεύει κατά μήκος της εσωτερικής οδοποιίας. Για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάζεται εξωτερικό δίκτυο μέσης ή (συνήθως) υψηλής τάσης (140 KV) από τον υποσταθμό μέχρι τη γραμμή υψηλής τάσης της ΔΕΗ. Το δίκτυο αυτό είναι εναέριο.

# Οδοποιία, διαμόρφωση πλατείας





# Θεμελίωση ανεμογεννητριών (1)





# Μεταφορά ανεμογεννητριών



# Ανέγερση ανεμογεννητριών 850 kW

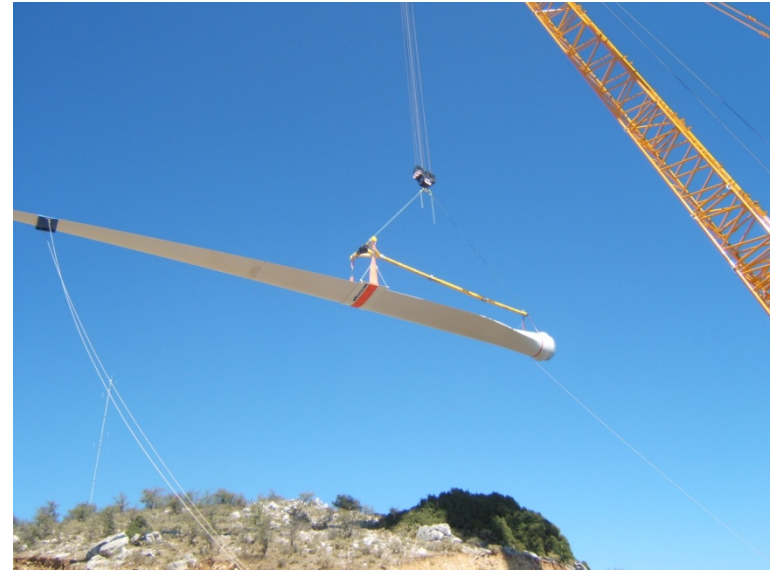




# Ανέγερση ανεμογεννητριών 2 MW (1)



# Ανέγερση ανεμογεννητριών 2 MW (2)



# Στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας





# Μετασχηματιστής, γειώσεις, υποσταθμός, αντικεραυνική προστασία

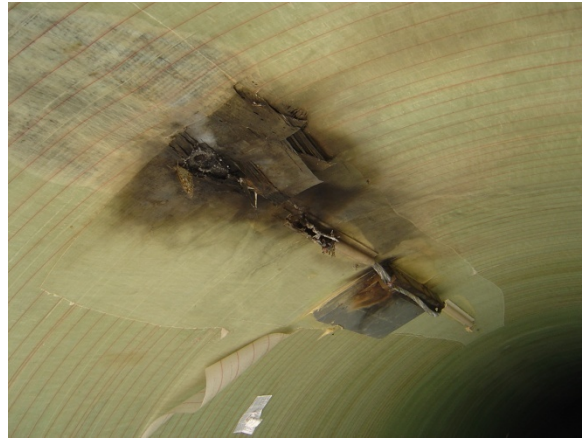


# Συνθήκες λειτουργίας, δυσχέρειες- προβλήματα





# Βλάβες πτερυγίων από κεραύνιο πλήγμα



# Αιολικά πάρκα Περιφέρειας Δ. Ελλάδας (1)

**«Πάνω Βρύση», Δ.Δ. Καλάνου, Δήμου Φαρρών, Νομού  
Αχαΐας**

## **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ**

**ΙΣΧΥΣ : 1,2 MW**

**2 Α/Γ ENERCON E-40**

**Ισχύς Α/Γ : 600kW**

**Πύργος : 46m**

**Διάμετρος : 44m**





# Αιολικά πάρκα Περιφέρειας Δ. Ελλάδας (2)

**«Τρανή Ρίζα-Βρωμονέρι-Σκατζοχέρι», Δήμου Ρίου, Νομού Αχαΐας**

## **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ**

**ΙΣΧΥΣ : 34,85 MW**

**41 Α/Γ VESTAS V52**

**Ισχύς Α/Γ : 850kW**

**Πύργος : 44m**

**Διάμετρος : 52m**



# Αιολικά πάρκα Περιφέρειας Δ. Ελλάδας (3)

**«Λούζες-Αγκαθάκι-Ρίγανη», Δήμου Ναυπάκτου, Νομού  
Αιτ/νίας**

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ

**ΙΣΧΥΣ : 24 MW**

**12 Α/Γ VESTAS V80**

**Ισχύς Α/Γ : 2 MW**

**Πύργος : 67m**

**Διάμετρος : 80m**





# Αιολικά πάρκα Περιφέρειας Δ. Ελλάδας (4)

**«Λίθος», Δήμου Καλαβρύτων, Νομού Αχαΐας**

## **ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΓΟΥ**

**ΙΣΧΥΣ : 18,9 MW**

**21 Α/Γ ENERCON E-44**

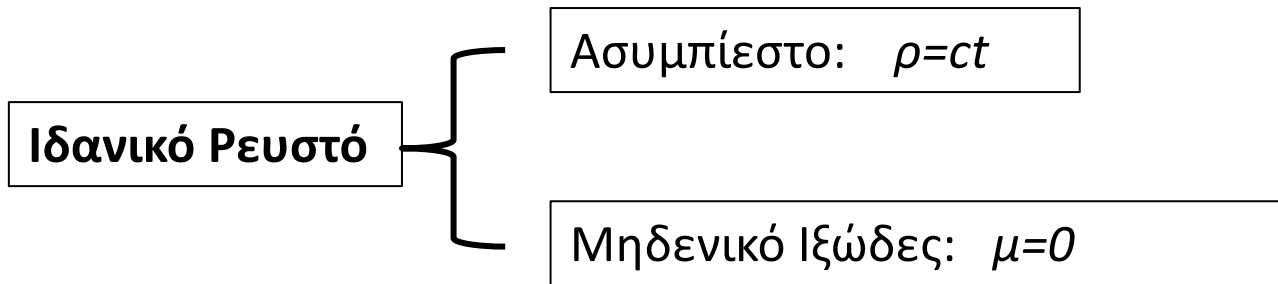
**Ισχύς Α/Γ : 900 kW**

**Πύργος : 55m**

**Διάμετρος : 44m**



# Η έννοια του «ιδανικού ρευστού» (1)



Ένα τέτοιο ρευστό έχει ορισμένες «**θαυμαστές**» ιδιότητες:

- Τα μόριά του δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ούτε και με τα στερεά που βρίσκονται εμβαπτισμένα μέσα στο ρευστό και «γλιστρούν» **χωρίς τριβή** επάνω στα τοιχώματα των στερεών.
- Το πεδίο ταχυτήτων  $V$  του ιδανικού ρευστού είναι:
  - **αστρόβιλο**  $\Rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{V} = 0$
  - **σωληνοειδές**  $\Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0$



# Η έννοια του «ιδανικού ρευστού» (2)

- Υπάρχει συνάρτηση  $\Phi(x,y,z)$  που ονομάζεται **δυναμικό ταχύτητας** και για την οποία ισχύει:

$$\vec{V} = \vec{\nabla}\Phi(x,y,z)$$

με  $V$  την ταχύτητα του ρευστού. Έτσι προκύπτει η εξίσωση **Laplace**:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla}\Phi) = \nabla^2\Phi = 0$$

- Το **πεδίο ροής** που περιγράφει την κατανομή ταχυτήτων του ρευστού σε κάθε του σημείο είναι **ανάλογο με το ηλεκτρικό πεδίο**

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}U(x,y,z)$$

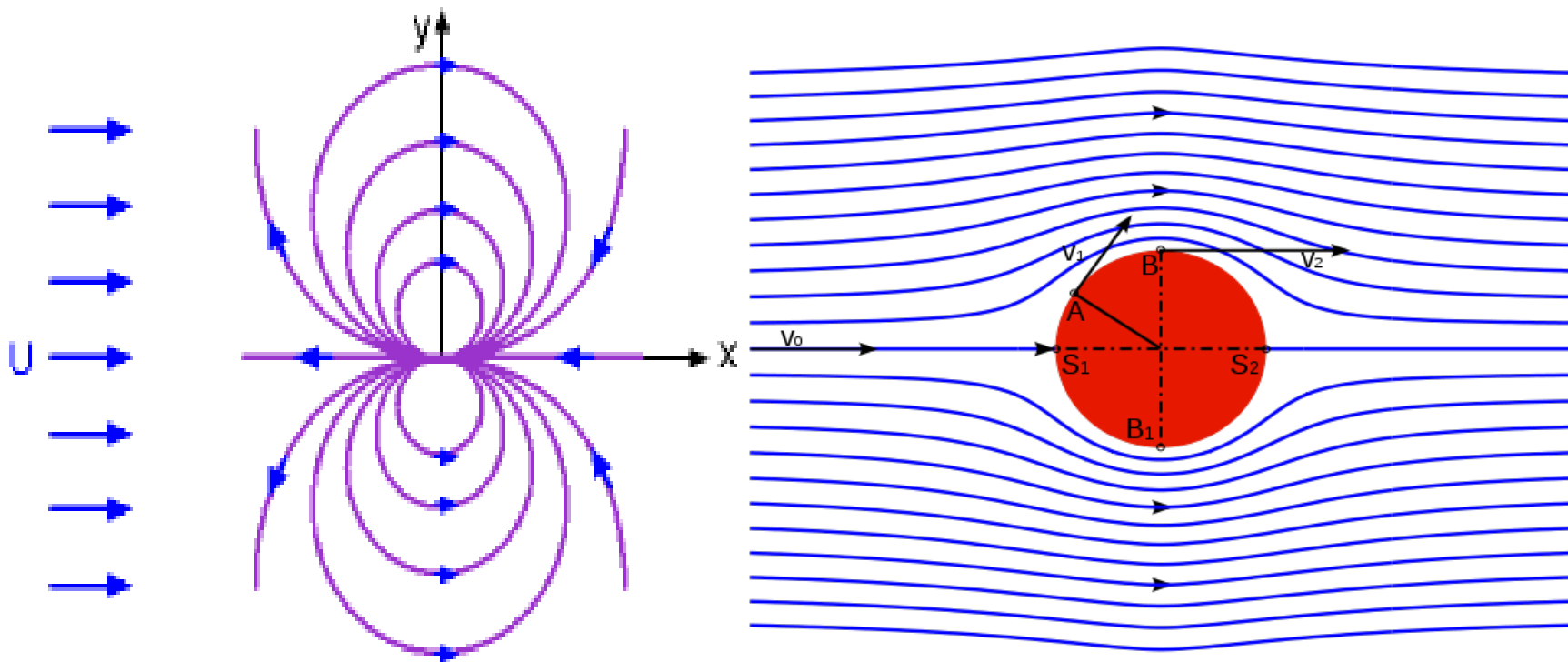
ορίζονται ρευματικές γραμμές, κλπ

- Αρχή της **υπέρθεσης των λύσεων της εξίσωσης Laplace**, δηλαδή ο συνδυασμός λύσεων απλών προβλημάτων μπορεί να δώσει λύσεις σε πιο **δύσκολα πεδία ροής**.

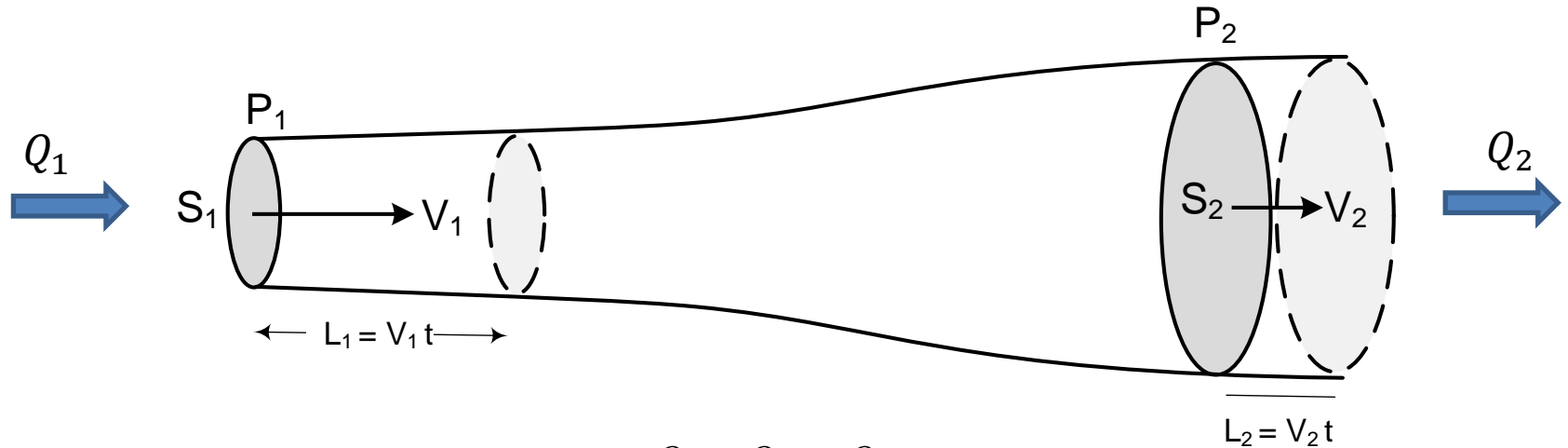
# Θεμελιώδη στοιχεία αεροδυναμικής

- Ομογενές πεδίο ( $V=ct$ ),
- Σημειακή πηγή ( $V \sim 1/r$  για δύο διαστάσεις),
- Καταβόθρα (επίσης  $V \sim 1/r$  για δύο διαστάσεις),
- Σημειακός στρόβιλος που προκαλεί περιστροφική κίνηση με  $V \sim 1/r$ , διπολική πηγή που είναι συνδυασμός σημειακής πηγής και καταβόθρας.

# Παράδειγμα δισδιάστατης ροής ιδανικού ρευστού γύρω από κύλινδρο.



# Εξίσωση συνέχειας Νόμος Bernoulli (1)



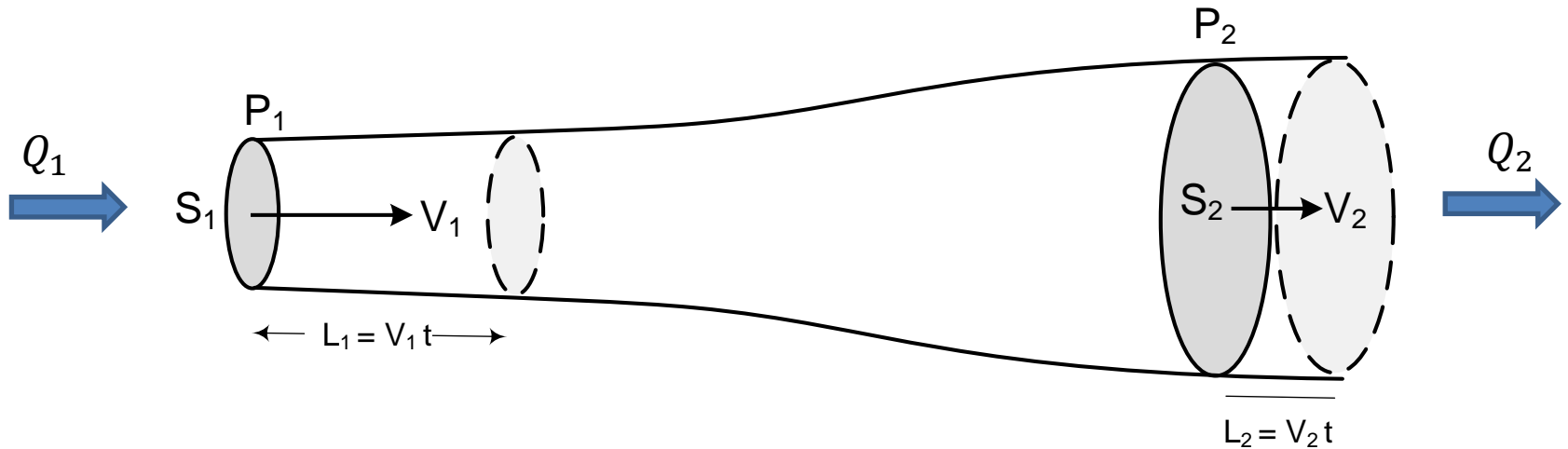
$$Q = Q_1 = Q_2$$

$$S_1 L_1 = S_2 L_2 \Rightarrow S_1 V_1 t = S_2 V_2 t \Rightarrow S_1 V_1 = S_2 V_2 \quad \text{ή} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

**Αρχή διατήρησης της ενέργειας:**

$$W + E_{κιν} = ct \quad ( W = \vec{F} \cdot \vec{L} , \quad F = P \cdot S , \quad m = \rho Q = \rho SL )$$

# Εξίσωση συνέχειας Νόμος Bernoulli (2)



$$F_1 L_1 + \frac{1}{2} m V_1^2 = F_2 L_2 + \frac{1}{2} m V_2^2 \Rightarrow P_1 S_1 V_1 t + \frac{1}{2} \rho S_1 V_1 t V_1^2 = P_2 S_2 V_2 t + \frac{1}{2} \rho S_2 V_2 t V_2^2$$

Από την **εξίσωση συνέχειας** προκύπτει ότι

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_{ολικό}$$

$P_{ολικό}$  : «ολική πίεση»

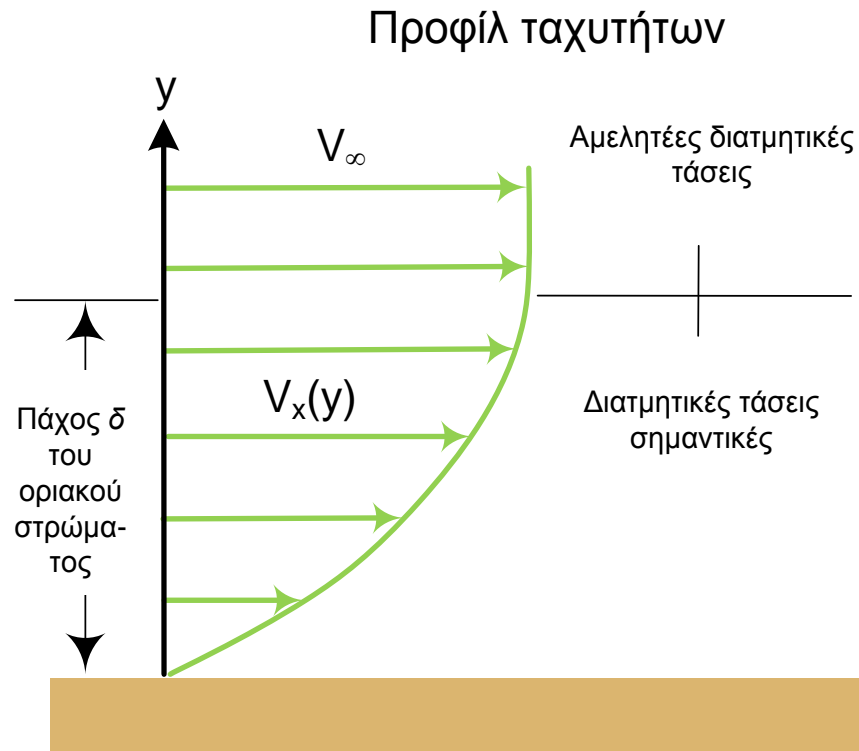
$P_1, P_2$  : «στατική πίεση»

$\frac{1}{2} \rho V^2$  : «δυναμική πίεση»

# Διατμητικές τάσεις, οριακό στρώμα (1)

Τα συνήθη ρευστά (π.χ. αέρας, νερό) συμπεριφέρονται με καλή προσέγγιση ως «ιδανικά» εκτός από περιοχές του πεδίου ροής όπου εμφανίζονται μεγάλες και απότομες **βαθμίδες ταχύτητας** κάθετες στην κατεύθυνση της ροής:  $dV_x/dy$

Στα σημεία αυτά αναπτύσσονται **διατμητικές τάσεις**  $\tau_{xy} = \mu dV_x/dy$  (μεταφορά ορμής στα αέρια / **δυνάμεις συνοχής και συνάφειας** στα υγρά)

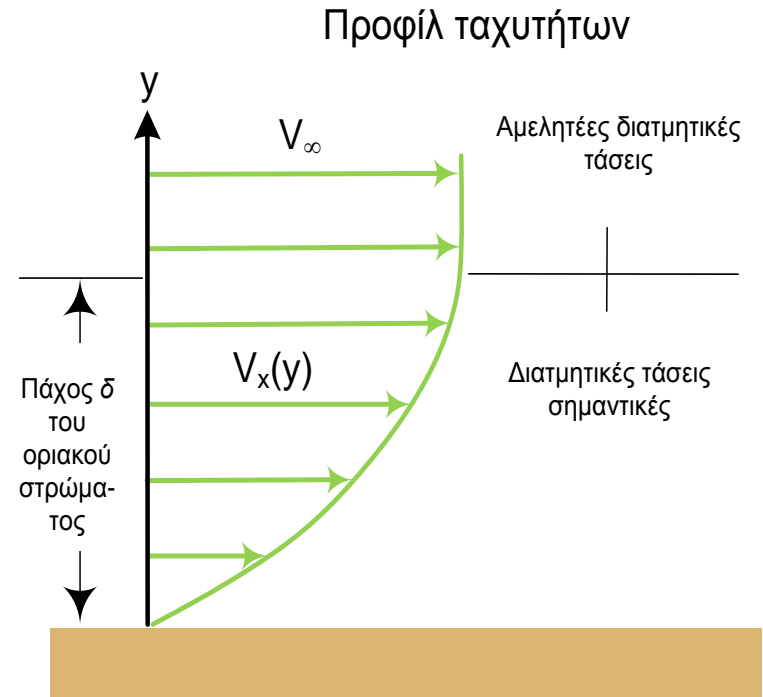


# Διατμητικές τάσεις, οριακό στρώμα (2)

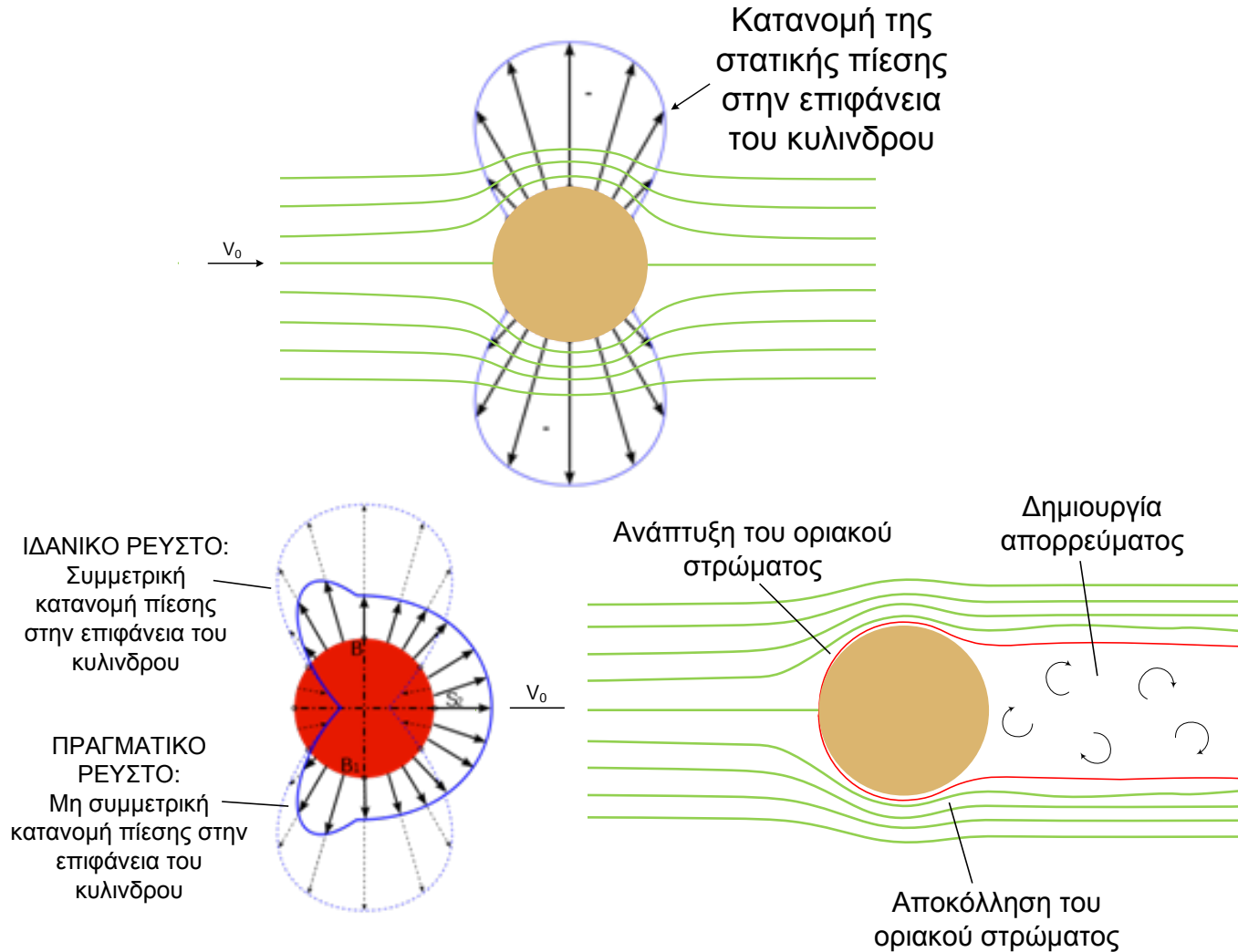
**Αποτέλεσμα: Εμφάνιση «οριακού στρώματος» και «οπισθέλκουσας D»:**

Ακριβώς στην επιφάνεια  $V_x=0$  για  $y=0$ , αρχή της μη ολίσθησης. Λίγο πιο πάνω από τη στερεή επιφάνεια το ρευστό κινείται με ταχύτητα  $V_x(y)$ . Σε **άπειρη απόσταση** πάνω από την επιφάνεια γίνεται  $V_\infty$  (ταχύτητα του αδιατάρακτου υστού).

Το **πάχος** του οριακού στρώματος ( $\delta$ ) ορίζεται ως η απόσταση  $y_\delta$  στην οποία ισχύει  $V_x(y_\delta) = 0,99 V_\infty$ . Συνεχής **μεταφορά ορμής** από το ρευστό στο σώμα, εμφάνιση **οπισθέλκουσας δύναμης** ( $D_{\text{τριβής}}$ ).



# Ροή γύρω από κύλινδρο δύο διαστάσεων

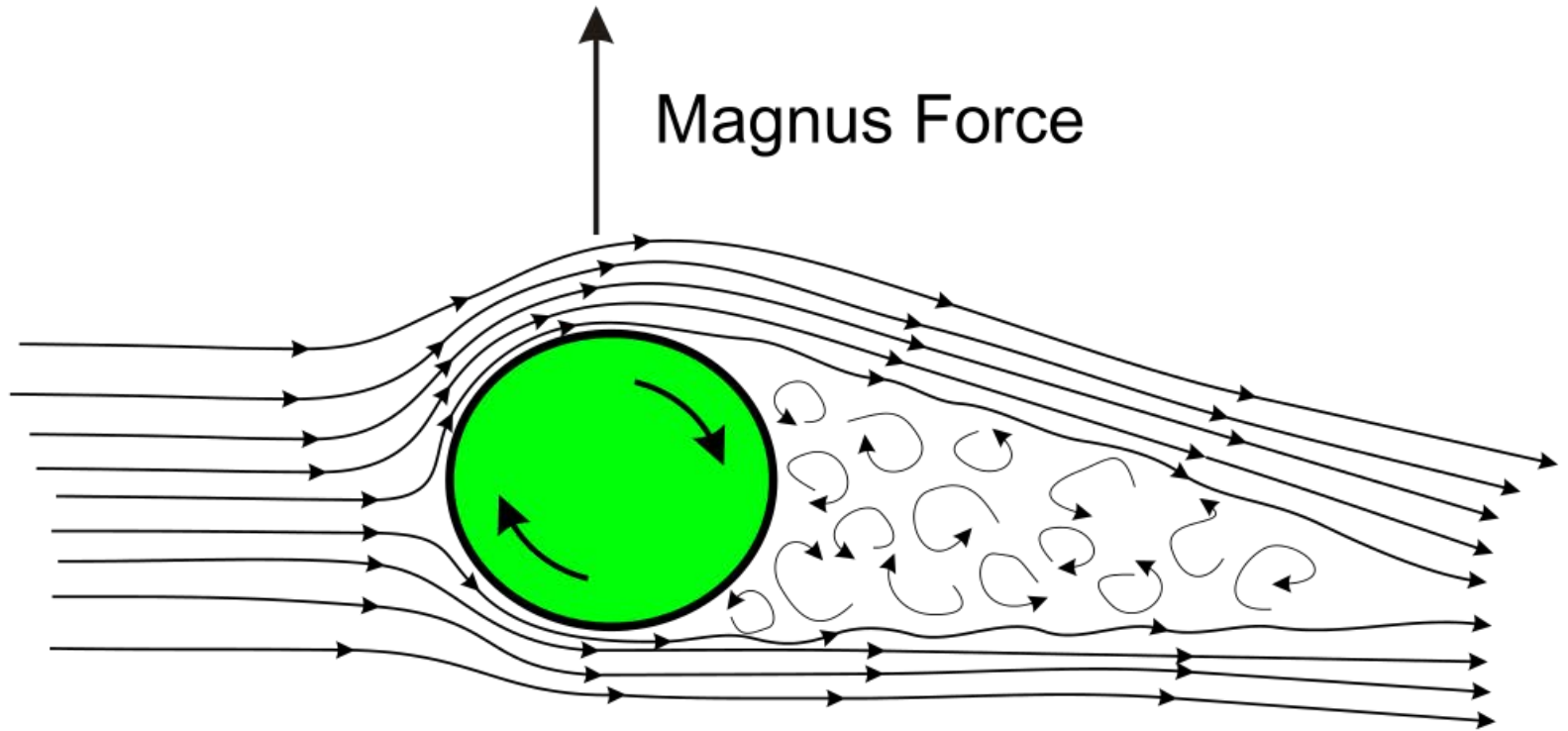


**Αποτέλεσμα: εμφάνιση επιπλέον οπισθέλκουσας ( $D_{\text{μορφής}}$ ):**

$$D_{\text{ολική}} = D_{\text{τριβής}} + D_{\text{μορφής}}$$



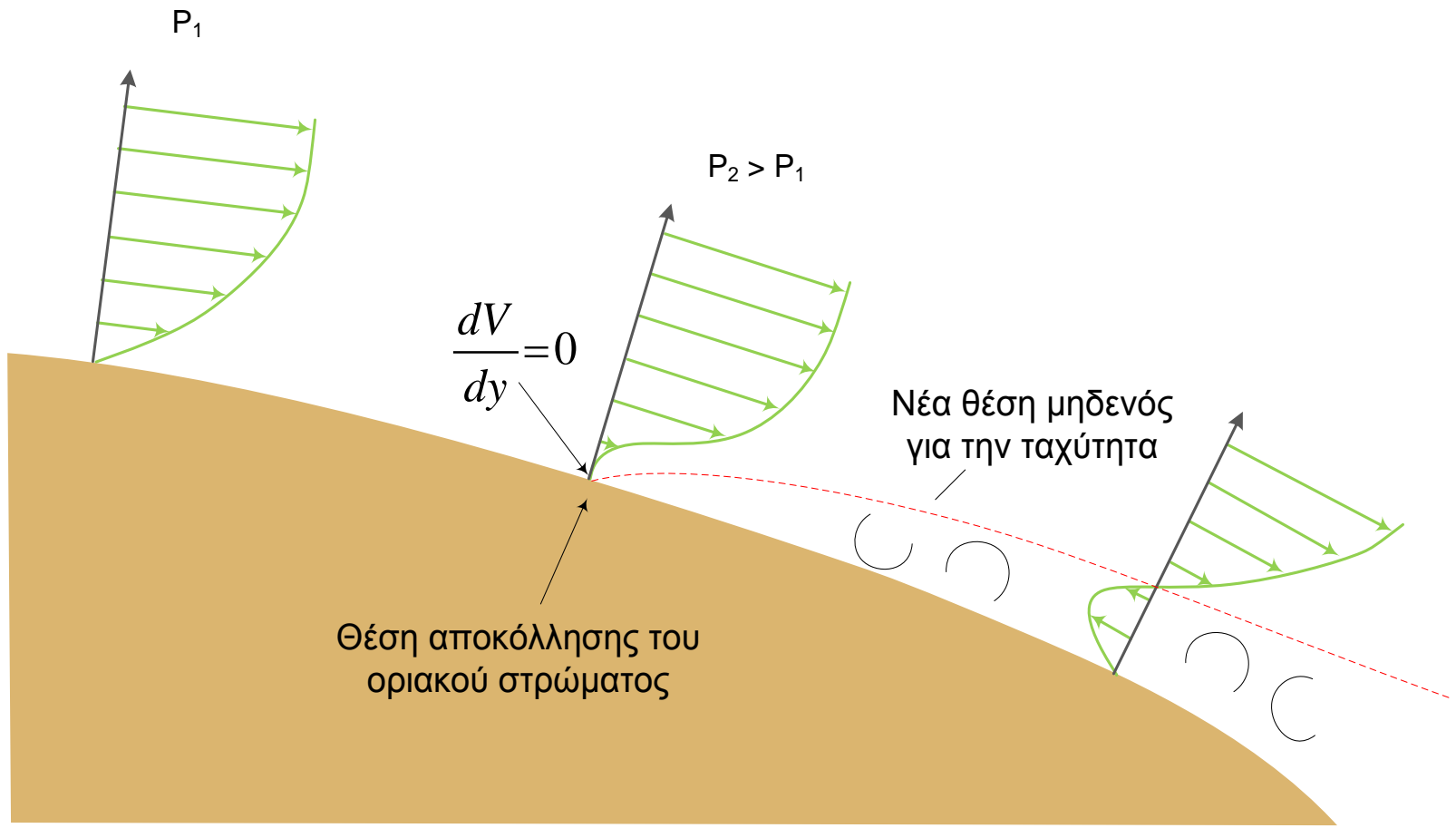
# Περιστρεφόμενος κύλινδρος ή σφαίρα (φαινόμενο Magnus)



by Rdurkacz

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sketch\\_of\\_Magnus\\_effect\\_with\\_streamlines\\_and\\_turbulent\\_wake.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sketch_of_Magnus_effect_with_streamlines_and_turbulent_wake.svg)

# Αποκόλληση (ή διαχωρισμός) του οριακού στρώματος

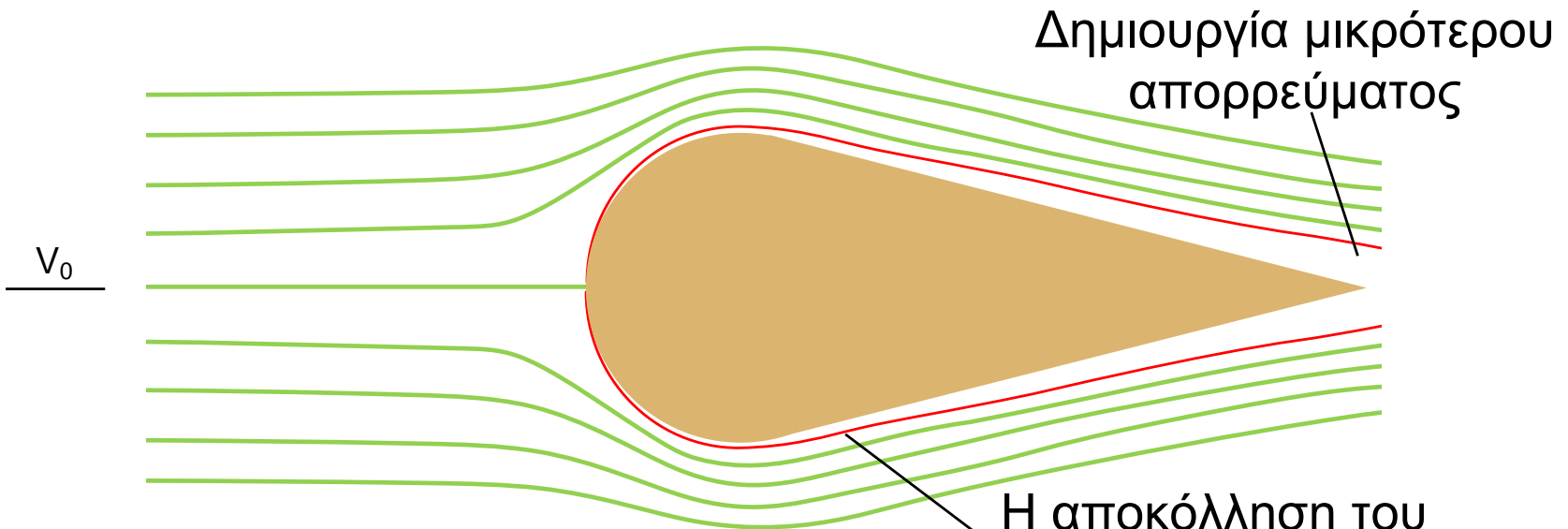


Θέση αποκόλλησης του οριακού στρώματος

Νέα θέση μηδενός για την ταχύτητα

Ανασχετική βαθμίδα πίεσης  
Ανάκτηση πίεσης

# Αεροδυναμικό σχήμα αεροτομής

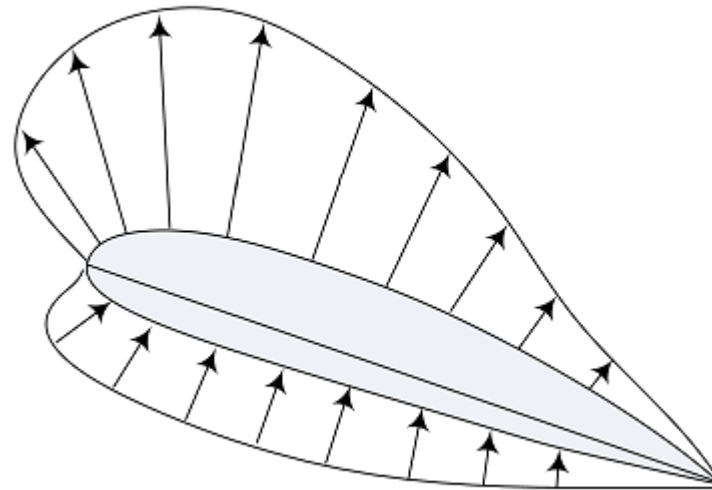
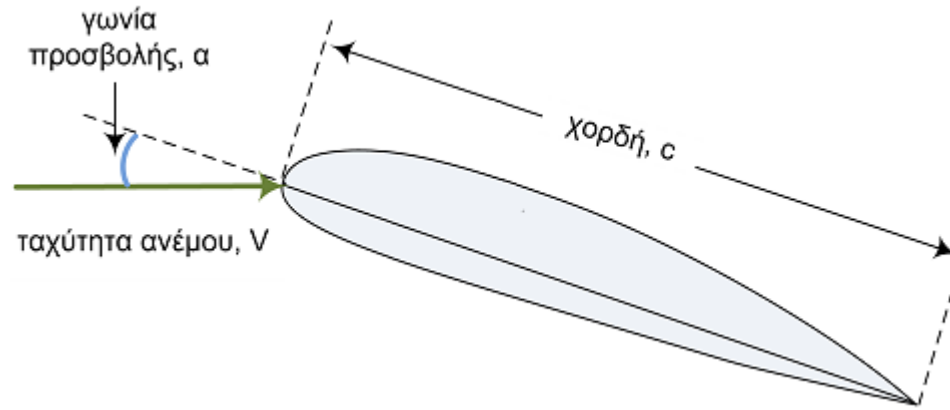


Δημιουργία μικρότερου απορρεύματος

Η αποκόλληση του οριακού στρώματος καθυστερεί

**Μείωση της οπισθέλκουσας με «αεροδυναμικό» σχήμα**

# Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κατανομή πίεσης τυπικής αεροτομής



# Αντωση και οπισθέλκουσα (1)

- Η **οπισθέλκουσα (Drag)** είναι παράλληλη στο διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού.

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 C_D c \left[ \frac{N}{m} \right]$$

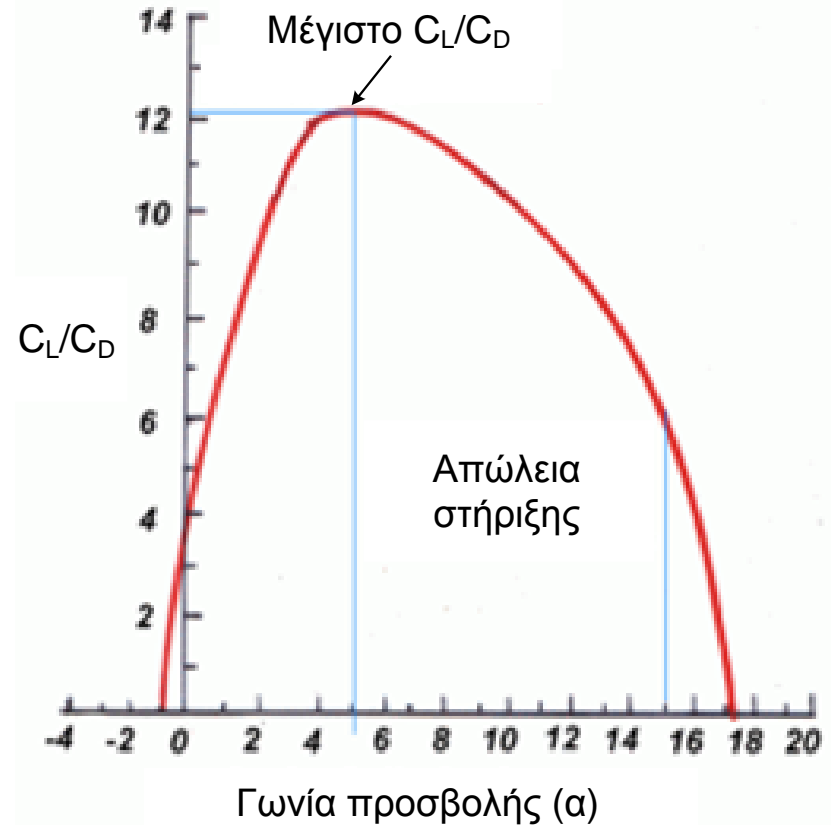
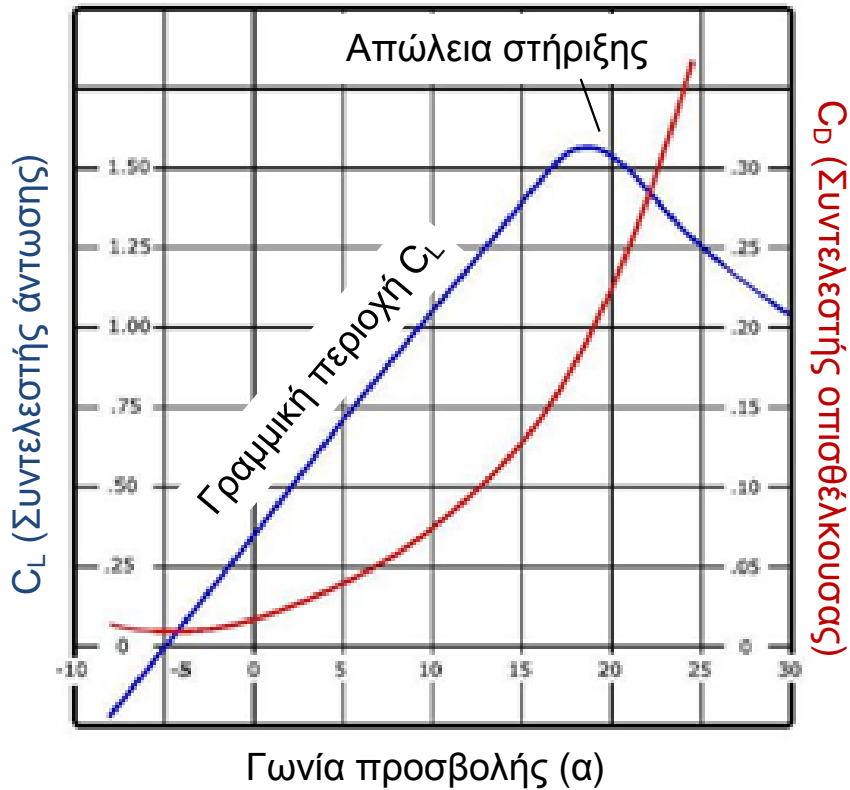
- Η «**δυναμική άνωση (Lift)**» ή «**άντωση**» είναι κάθετη στο διάνυσμα της ταχύτητας ροής.

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 C_L c \left[ \frac{N}{m} \right]$$

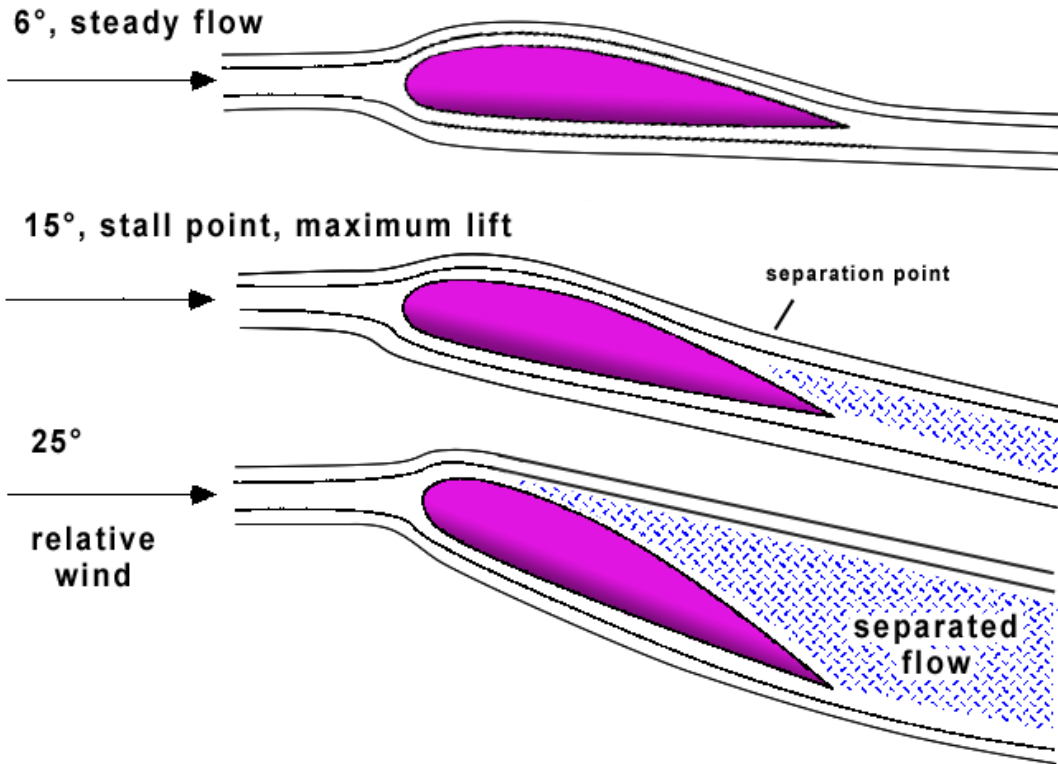
(\*Οι αδιάστατοι συντελεστές  $C_L$  και  $C_D$  εξαρτώνται από τη γωνία προσβολής  $\alpha$ )

# Άντωση και οπισθέλκουσα (2)

ΑΕΡΟΤΟΜΗ: CLARCK Y

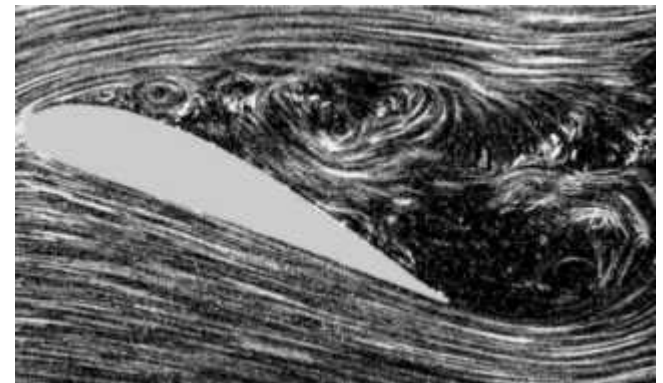


# Γωνία προσβολής



[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/Stall\\_Formation.gif](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5b/Stall_Formation.gif)

## Απώλεια στήριξης (stall)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Stall\\_%28fluid\\_mechanics%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Stall_%28fluid_mechanics%29)

# Αριθμός Reynolds

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

$\rho$  πυκνότητα του ρευστού,

$V$  χαρακτηριστική ταχύτητα της ροής,

$L$  χαρακτηριστικό μήκος των εμβαπτισμένων στερεών,

$\mu$  συντελεστής «**δυναμικού**» ιξώδους

$\nu (= \mu/\rho)$  συντελεστής «**κινηματικού**» ιξώδους.

Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των **δυνάμεων αδράνειας** της ροής ( $\sim \rho V^2$ ) προς τις **δυνάμεις ιξώδους** ( $\sim \mu V/L$ ).



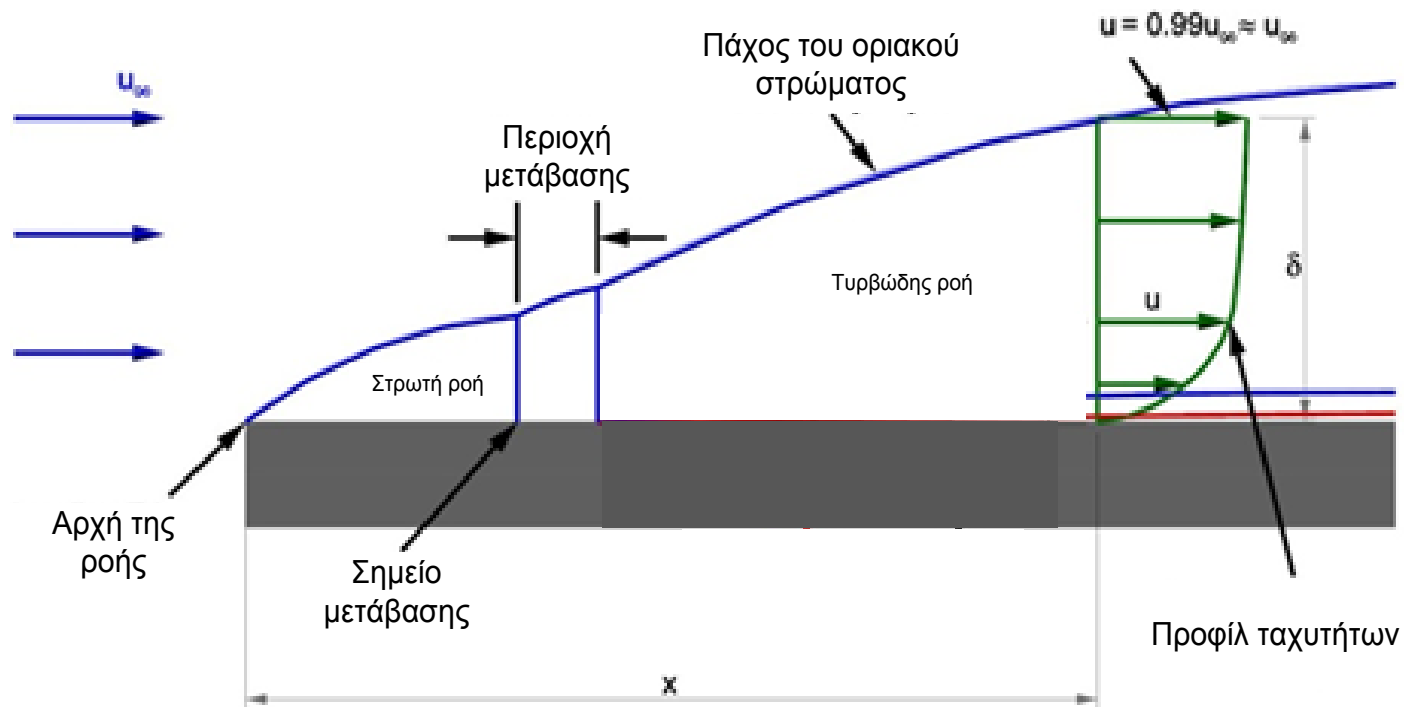
# Στρωτή και τυρβώδης ροή (1)

- **Μικροί Re: Στρωτή ροή.** Μοιάζει δηλαδή το ρευστό να κινείται σε «στρώσεις», που η μία ολισθαίνει πάνω στην άλλη. Οι δυνάμεις ιξώδους συγκρατούν τις διάφορες «στρώσεις» και αυτές έχουν παραπλήσιες ταχύτητες. **Μέλι, λάδι.**
- **Μεγάλοι Re: Τυρβώδης ροή.** Υπερτερούν οι δυνάμεις αδράνειας, οπότε, είναι δυνατόν περιοχές του ρευστού με μεγάλη ταχύτητα να «ξεφεύγουν» και να δημιουργούνται «ριπές» με σημαντικές διακυμάνσεις στο χρόνο τόσο του μέτρου όσο και της κατεύθυνσης της ταχύτητας του ρευστού. **Άνεμος.**

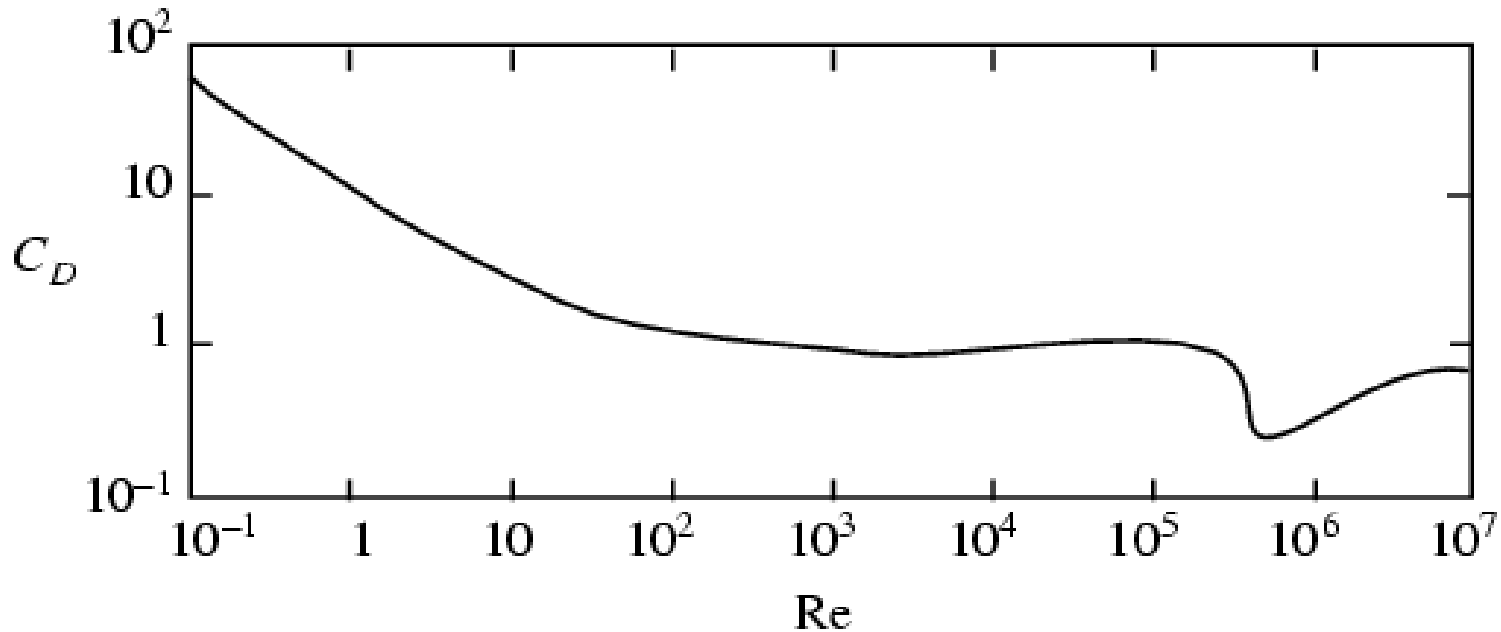
# Στρωτή και τυρβώδης ροή (2)

«Κρίσιμος»  $Re$ : Ασταθής στρωτή ροή.

Μια μικρή διακύμανση της ταχύτητας (εξαιτίας θορύβου, κραδασμών, ανωμαλιών της επιφάνειας, κλπ), προκαλεί μετάπτωση στην τυρβώδη ροή.



# Στρωτή και τυρβώδης ροή (3)



Συντελεστής οπισθέλκουσας για ροή ανέμου γύρω από κύλινδρο με λεία τοιχώματα.

$$\text{Re}_{\text{critical}} = 3 \times 10^5.$$

**Μεταβολή της οπισθέλκουσας με την ταχύτητα.**

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 C_D c \left[ \frac{N}{m} \right]$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

Για μικρά Re (<100, έρπουσα ροή):  $C_D \sim (1/\text{Re}) \Rightarrow C_D \sim (1/V)$ , επομένως  $D \sim V$  (Νόμος του Stokes).

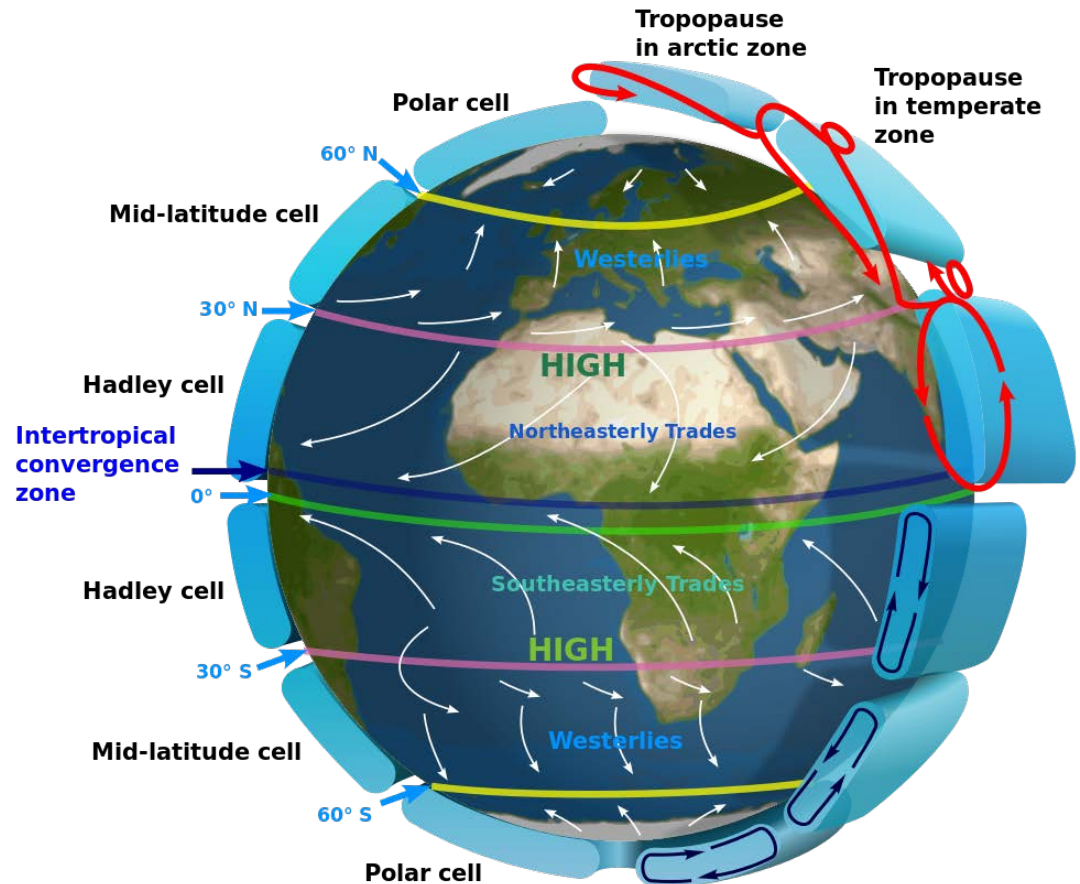
Για μεγαλύτερα Re:  $C_D \approx ct \Rightarrow C_D \approx ct$ , επομένως  $D \sim V^2$ .

# Η φύση του ανέμου

Η εμφάνιση του ανέμου οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους:

- Στη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο (η οποία διαφέρει στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη) και
- στην περιστροφή της.

Εκτός από την παγκόσμια κυκλοφορία, σε κάθε περιοχή επικρατούν και τοπικά φαινόμενα που έχουν να κάνουν με τη μορφολογία, το κλίμα της κλπ.

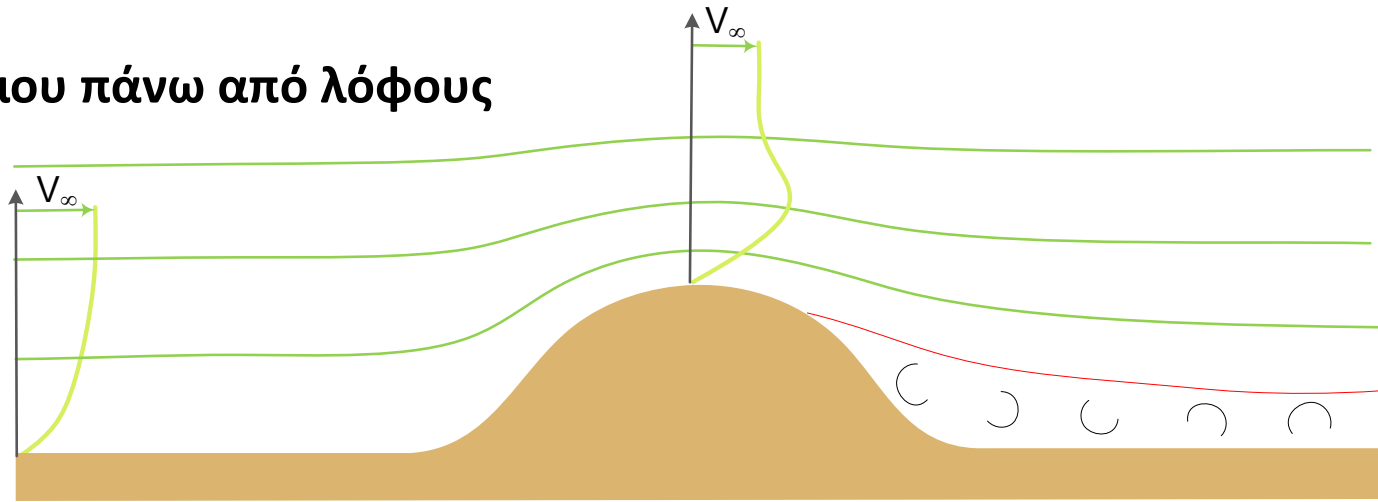


[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Earth\\_Global\\_Circulation\\_-\\_en.svg/1000px-Earth\\_Global\\_Circulation\\_-\\_en.svg.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Earth_Global_Circulation_-_en.svg/1000px-Earth_Global_Circulation_-_en.svg.png)



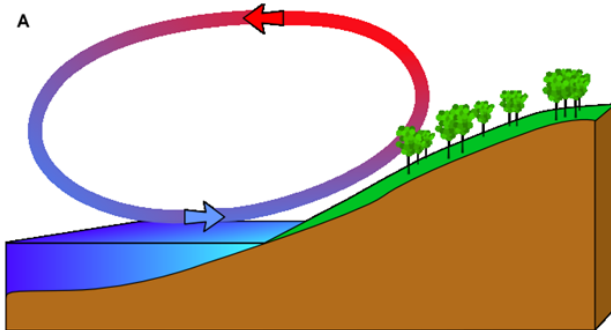
# Χαρακτηριστικές κινήσεις ανέμου

Ροή ανέμου πάνω από λόφους

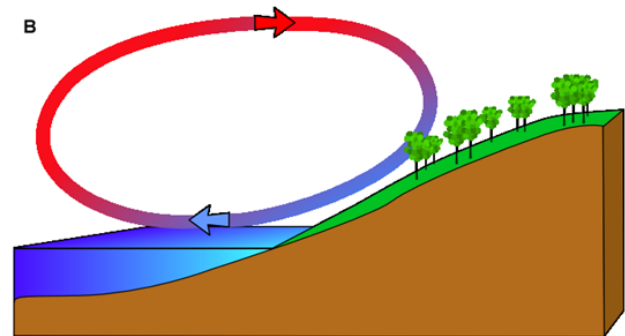


Θαλάσσια Αύρα

Πρωινές ώρες



Βραδυνές ώρες



# Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (1)

Η ροή οποιοδήποτε ρευστού πάνω από στερεή επιφάνεια προκαλεί τη δημιουργία οριακού στρώματος. Έτσι και η ροή του ανέμου προκαλεί το «ατμοσφαιρικό» οριακό στρώμα. Αυτό έχει πάχος από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι μερικά χιλιόμετρα και είναι κατά κανόνα τυρβώδες.

Η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος. Για εφαρμογές αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ο Νόμος της δύναμης του 1/7 (one seventh power law):

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{7}}$$

όπου  $V$ ,  $V_0$  οι ταχύτητες σε ύψη  $y$  και  $y_0$  αντίστοιχα.

# Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (2)

Γενικότερη σχέση:

$$\frac{V}{V_0} = \left( \frac{y}{y_0} \right)^n \quad 0,1 < n < 0,4$$

όπου ο συντελεστής  $n$  εξαρτάται από την «**τραχύτητα**» του εδάφους, δηλαδή το μέσο ύψος  $z_0$  των εμποδίων που συναντά ο άνεμος. Μία **εμπειρική σχέση** που συνδέει τα  $n$  και  $z_0$  είναι:

$$n = 0,04 \ln(z_0) + 0,003 \left( \ln(z_0) \right)^2 + 0,24$$

ΕΙΔΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	$z_0$ (m)	n
ΘΑΛΑΣΣΑ-ΑΜΜΟΥΔΙΑ-ΧΙΟΝΙ	0,001-0,02	0,10-0,13
ΓΡΑΣΙΔΙ-ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΙΤΗΡΩΝ	0,02-0,3	0,13-0,20
ΔΑΣΗ-ΠΕΡΙΒΟΛΙΑ	0,3-2,0	0,20-0,27
ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2,0-10,0	0,27-0,40

# Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (1)

**Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο.** Έχει συνήθως τρία κύπελλα ημισφαιρικού ή κωνικού σχήματος. Η κυρτή πλευρά του κυπέλλου έχει μεγαλύτερο συντελεστή οπισθέλκουσας από την κοίλη ( $C_{D,κυρτης}=1,33$  και  $C_{D,κοιλης}=0,33$ , για ημισφαιρικό σχήμα). Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των κυπέλλων είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου γεγονός που διευκολύνει τις μετρήσεις. Για το λόγο αυτό το ανεμόμετρο συνδέεται με ταχύμετρο ή παλμική γεννήτρια.



[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Anemometer\\_2745.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Anemometer_2745.JPG)



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cup-Anemometer.jpg>

# Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (2)

Το **ανεμούριο (wind vane)** ή «**ουρά του κόκκορα**», (**weathercock**) αποτελείται από μια περιστρεφόμενη ουρά που συνδέεται στο δρομέα μιας μεταβλητής αντίστασης με κυκλικό σχήμα. Έτσι, για κάθε θέση της ουράς, αντιστοιχεί μία τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία συσχετίζεται με την αντίστοιχη κατεύθυνση (Β, ΒΔ, κλπ). Τα ανεμούρια χρησιμοποιούνται μαζί με τα κυπελοφόρα ανεμόμετρα για συνδυασμένες μετρήσεις ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου.



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Girouette\\_-\\_Wind\\_vane.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Girouette_-_Wind_vane.png)



# Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (3)

**Ανεμόμετρο υπερήχων.** Περιέχει δύο (τουλάχιστον) ζευγάρια πομπού-δέκτη υπερήχων. Ο ήχος στον αέρα έχει ταχύτητα  $c$  ( $\approx 320\text{m/s}$  στους  $20^\circ\text{C}$ ). Ο πομπός στέλνει παλμούς υπερήχων στο δέκτη.



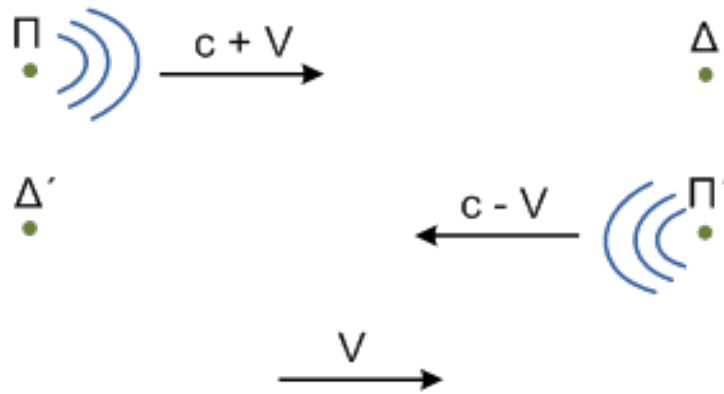
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acoustic\\_Resonance\\_Wind\\_Sensor.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acoustic_Resonance_Wind_Sensor.jpg)



[http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy\\_covariance](http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_covariance)

# Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (4)

Κατά τη διάδοση των υπερήχων, η ταχύτητα του **ανέμου**  $V$  προστίθεται διανυσματικά στην  $c$  και η σχετική ταχύτητα γίνεται  $c+V$  στη μία διαδρομή και  $c-V$  στην άλλη



Η απόσταση πομπού-δέκτη είναι  $l$  και διανύεται από τον ήχο σε χρόνους  $t_1$  και  $t_2$  για κάθε διαδρομή. Έτσι:

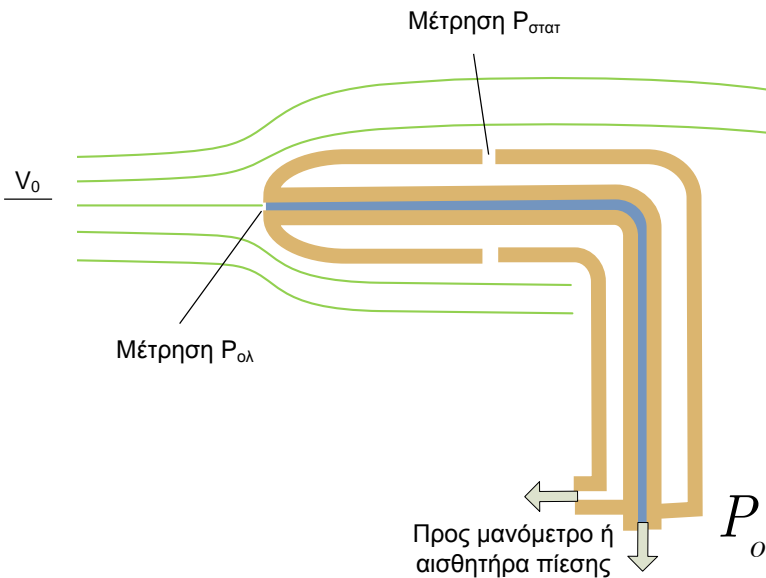
$$t_1 = \frac{l}{c+V}, \quad t_2 = \frac{l}{c-V}$$

οπότε:

$$V = \frac{l}{2} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

# Σωλήνας Pitot

Είναι ένας κούφιος, διπλός σωλήνας με μία κεντρική οπή και 5-6 περιφερειακές. Εισάγεται παράλληλα στη ροή ώστε στην κεντρική οπή να καταλήγει ρευματική γραμμή (σημείο τερματισμού) και να μετράται η ολική πίεση  $P_{ολ}$ , ενώ οι περιφερειακές είναι παράλληλες στη ροή και με αυτές μετράται η στατική πίεση  $P_{στατ}$ . Το όργανο συνδέεται σε μανόμετρο που περιέχει υγρό με πυκνότητα  $\rho_v$  και εμφανίζει διαφορά ύψους  $H$  ανάμεσα στα δύο σκέλη, προκύπτει από το νόμο Bernoulli



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

$$P_{ολ} = P_{στατ} + \frac{1}{2} \rho V_0^2 \Rightarrow P_{ολ} - P_{στατ} = \frac{1}{2} \rho V_0^2 = \rho_v gH$$

$$V_0 = \sqrt{2 \frac{\rho_v}{\rho} gH}$$

# Ανεμόμετρο θερμού σύρματος

Αποτελείται από πολύ λεπτό σύρμα **βολφραμίου ή λευκόχρυσου** μικρού μήκους (2-3 mm) το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Όταν εκτίθεται στον άνεμο ψύχεται λόγω εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας και αλλάζει η ωμική του αντίσταση. Το ηλεκτρικό κύκλωμα παρέχει περισσότερη ισχύ ώστε να διατηρήσει σταθερή τη θερμοκρασία του σύρματος, μέσω μιας διάταξης του τύπου γέφυρας Whitstone ή με χρήση άλλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τότε ισχύει για την τάση  $U$  που εφαρμόζεται στο σύρμα:

$$U^2 [Volt] = A + B V^{\frac{1}{2}} [m / s]$$

όπου  $V$  η ταχύτητα του ανέμου. Έχει εξαιρετικά μεγάλη ευαισθησία ( $U^2 \sim V^{1/2}$ ) και προσφέρεται για τη μέτρηση πολύ μικρών μεταβολών της ταχύτητας. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των επιπέδων τύρβης του ανέμου.

# Στατιστική περιγραφή του ανέμου (1)

Για να αποδοθεί στατιστικά το αιολικό δυναμικό σε μια περιοχή, είναι απαραίτητο να γίνει η ακόλουθη επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων:

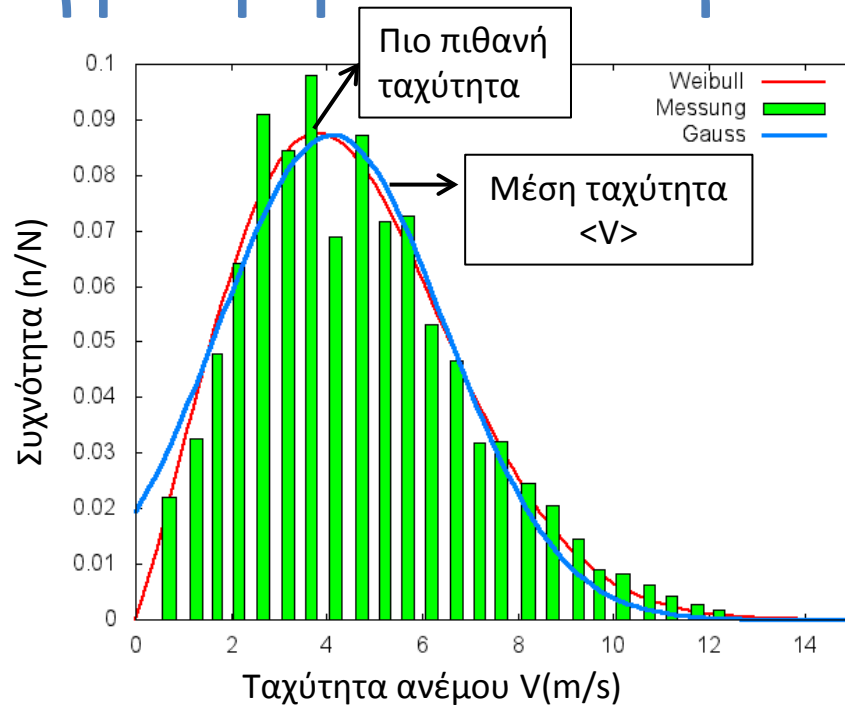
- Πρώτα υπολογίζονται **οι μέσοι όροι** ταχυτήτων για ένα μικρό χρονικό διάστημα (πχ λεπτό ή δεκάλεπτο).
- Στη συνέχεια, ανάλογα με τον αριθμό των μετρήσεων και την επιθυμητή ακρίβεια, **επιλέγεται κατάλληλο διάστημα  $\Delta V$**  το οποίο χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση των μετρήσεων.
- Η κλίμακα ταχυτήτων **χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα  $(V_i, V_i+\Delta V)$**  και **αθροίζεται ο αριθμός των φορών  $n$**  (λέγεται και συχνότητα εμφάνισης) που η ταχύτητα του ανέμου εμφάνισε τιμές μέσα στο κάθε τμήμα.
- Έτσι κατασκευάζεται διάγραμμα  $n/N=f(V)$ , όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.



# Στατιστική περιγραφή του ανέμου (2)

Τυπική κατανομή συχνότητας εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου με  $\langle V \rangle = 10 \text{ m/s}$ ,  $\Delta V = 1 \text{ m/s}$  και η αντίστοιχη κατανομή Weibull ( $k=1,8$ ,  $c=11,2 \text{ m/s}$ ). Η κατανομή **Weibull** ορίζεται ως εξής:

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



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windvertln.png>

**$f(V)$**  η πιθανότητα εμφάνισης της ταχύτητας με τιμή  $V$ ,  **$k$**  αδιάστατος συντελεστής, «συντελεστής σχήματος, shape coefficient»  **$c$**  «συντελεστής κλίμακας, scale coefficient» με διαστάσεις ταχύτητας.

# Στατιστική περιγραφή του ανέμου (3)

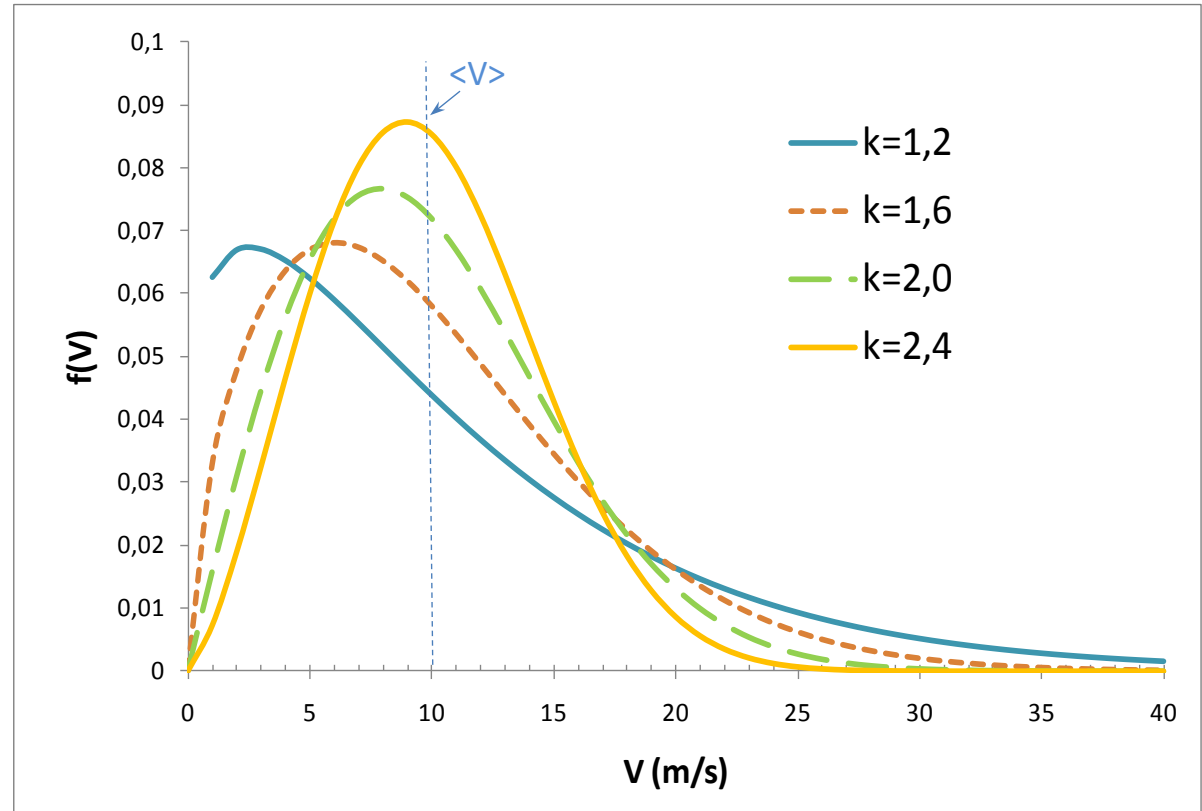
Η κατανομή είναι κανονικοποιημένη, ισχύει δηλαδή:

$$\int_0^{\infty} f(V) dV = 1$$

Η επίδραση του  $k$  στο σχήμα της κατανομής Weibull ( $\langle V \rangle = 10 \text{ m/s}$ ,  $c = 11,2 \text{ m/s}$ ).

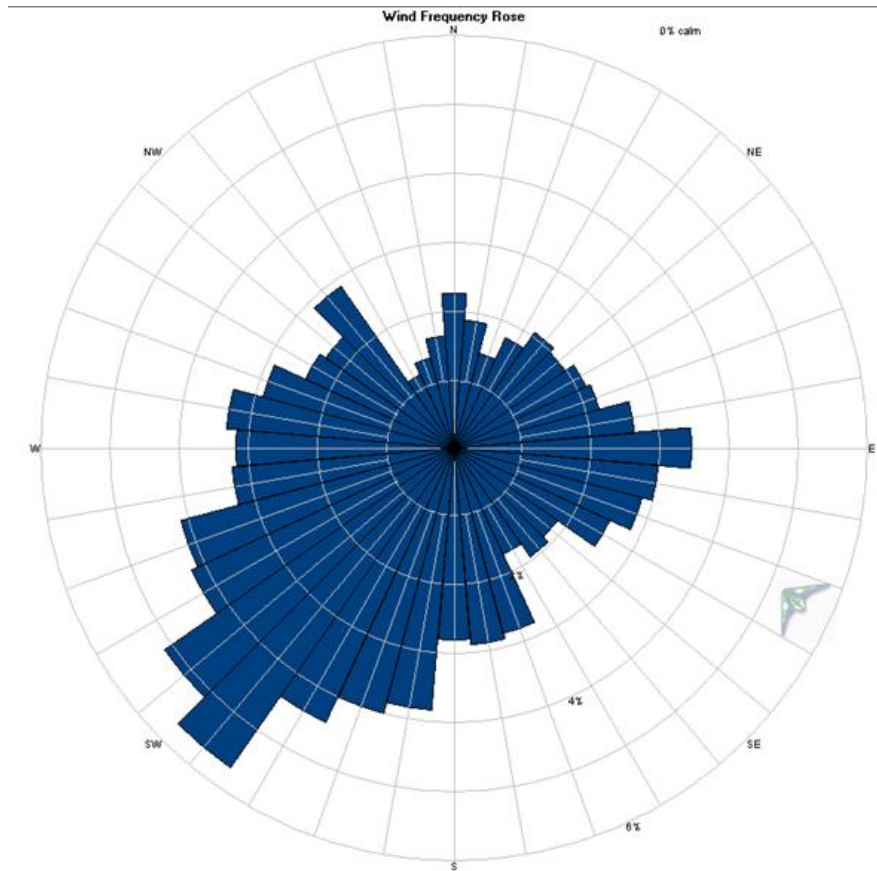
Ο συντελεστής κλίμακας μεταθέτει ολόκληρη την καμπύλη στον άξονα των  $x$ .

$$c = 1,12 \langle V \rangle \quad (1,5 \leq k \leq 3,0)$$



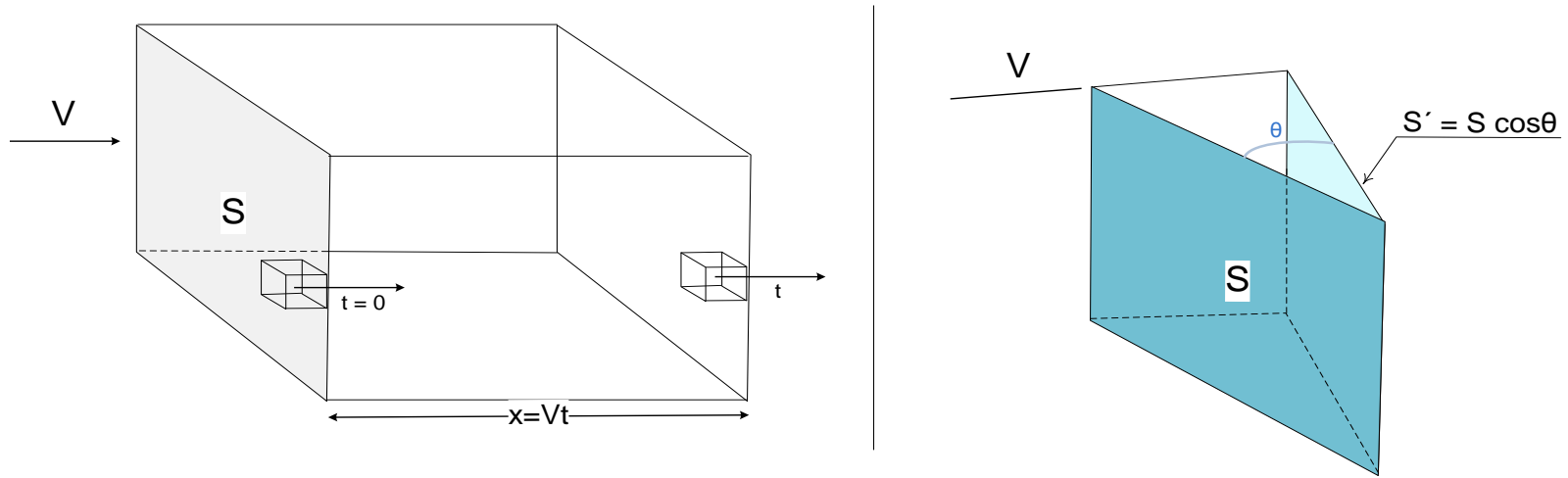
Όσο πιο μεγάλες τιμές παίρνουν οι συντελεστές  $k$  και  $c$ , τόσο καλύτερο είναι το μετρούμενο πεδίο από άποψη αιολικού δυναμικού.

# Περιγραφή της κατεύθυνσης του ανέμου - Ροδόγραμμα



[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore\\_wind\\_rose\\_sample.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore_wind_rose_sample.JPG)

# Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου (1)



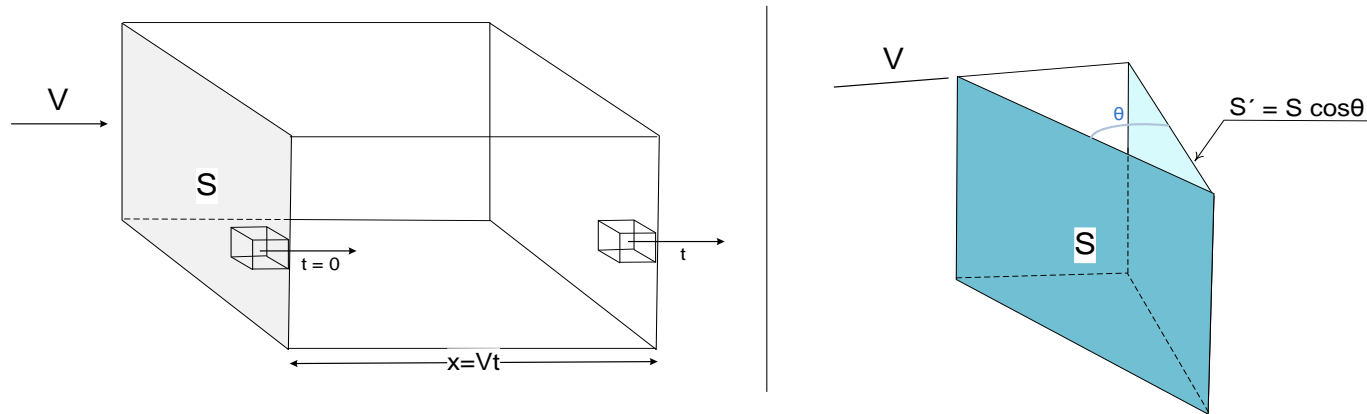
Έστω επιφάνεια  $S$  στην οποία προσπίπτει κάθετα ο άνεμος με ταχύτητα  $V$ .  
Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου που προσπίπτει στην επιφάνεια  $S$  είναι:

$$P = \frac{E_{\text{κινητική}}}{t} = \frac{\frac{1}{2} m V^2}{t} \qquad \frac{m}{t} = \frac{\rho S x}{t} = \rho S V$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και έτσι προκύπτει:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

# Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου (2)



Για πλάγια πρόσπτωση του ανέμου υπό γωνία  $\theta$ , η «ενεργός» επιφάνεια μειώνεται σε  $S' = S \cos\theta$  και η διαθέσιμη ισχύς γίνεται:

$$P' = \frac{1}{2} \rho S V^3 \cos \theta$$

$P \sim V^3$ : Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου εξαρτάται ισχυρά από την ταχύτητα.

$P \sim S$  δηλαδή  $P \sim D^2$ : Από εδώ προκύπτει ότι ο διπλασιασμός της διαμέτρου  $D$  μίας ανεμογεννήτριας, τετραπλασιάζει τη διαθέσιμη ισχύ.

$P \sim \rho$ : Η πυκνότητα του ανέμου μειώνεται σε μεγάλα υψόμετρα.

$P \sim \cos\theta$ : Είναι απαραίτητος ο προσανατολισμός –ή «προσανεμισμός»- των ανεμογεννητριών.

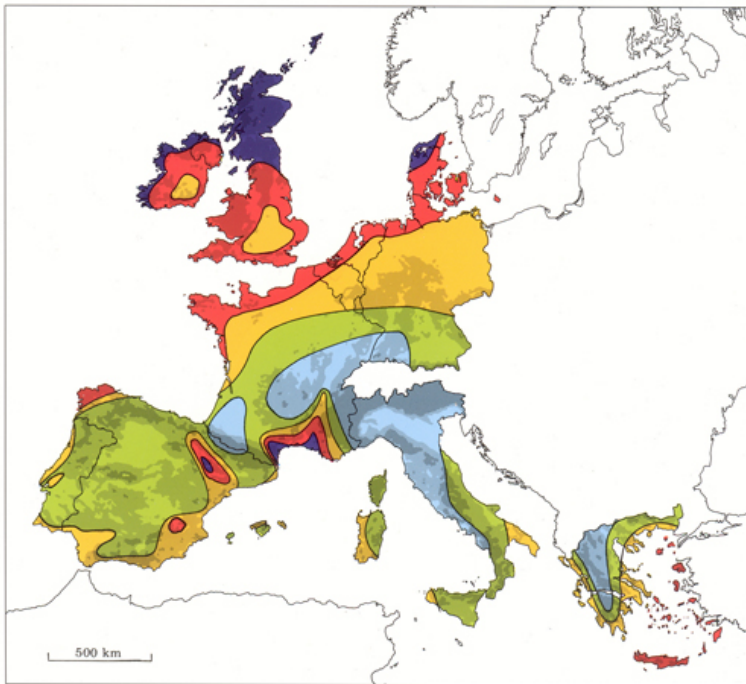


# Αιολικό δυναμικό

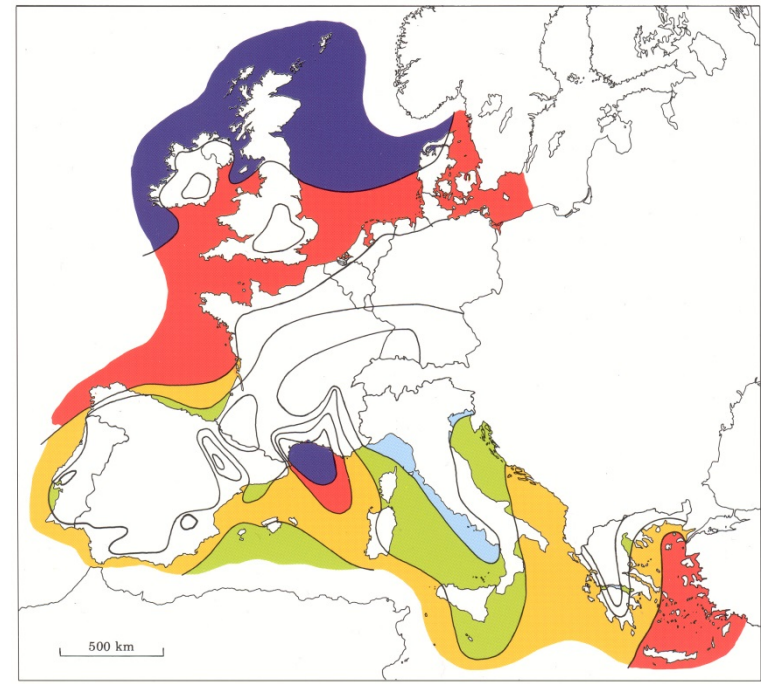
- **Διαθέσιμο αιολικό δυναμικό.** Για την εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή, χρησιμοποιούνται επιτόπιες μετρήσεις, μετεωρολογικά στοιχεία και προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics, CFD), που προβλέπουν τις μεταβολές της μέσης ταχύτητας του ανέμου, ανάλογα με τη διαμόρφωση του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται χάρτες όπως αυτοί που παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.
- **Τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό.** Είναι προφανές, ότι δεν είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούμε ολόκληρο το διαθέσιμο δυναμικό για παραγωγή ενέργειας. Και αυτό γιατί υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί στη χρήση του, όπως απαγορευτικές χρήσεις γης (κατοικημένες περιοχές, δάση ή εθνικοί δρυμοί, αρχαιολογικοί χώροι, κλπ), ασθενή ή ανύπαρκτα ηλεκτρικά δίκτυα, δύσκολη ή αδύνατη πρόσβαση,
- **Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό.** Σε περιοχές με τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό αλλά με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα η παραγωγή αιολικής ενέργειας. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό εξαρτάται από παράγοντες όπως η τιμή της kWh, οι επιδοτήσεις που προσφέρονται για την εγκατάσταση των αιολικών, κλπ.

# Ευρωπαϊκός αιολικός άτλας

Μετά την αποτύπωση των τεχνικών και οικονομικών περιορισμών στους χάρτες του διαθέσιμου δυναμικού, προκύπτουν νέοι χάρτες με το τεχνικά (και οικονομικά) εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό.



Wind resources <sup>1</sup> at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain <sup>2</sup>		Open plain <sup>3</sup>		At a sea coast <sup>4</sup>		Open sea <sup>5</sup>		Hills and ridges <sup>6</sup>	
$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$
> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights									
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$	$m s^{-1}$	$Wm^{-2}$
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

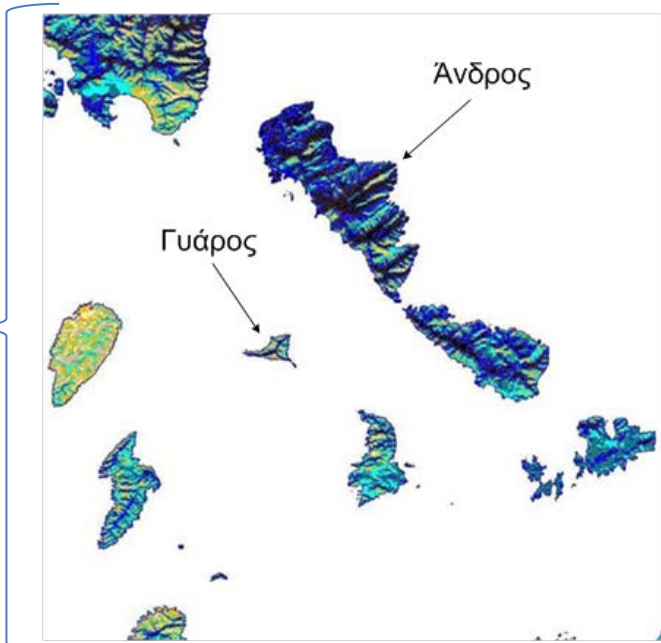
<http://www.wind-energy-the-facts.org/wind-atlases.html>

Troen, I. and E.L. Petersen (1989)

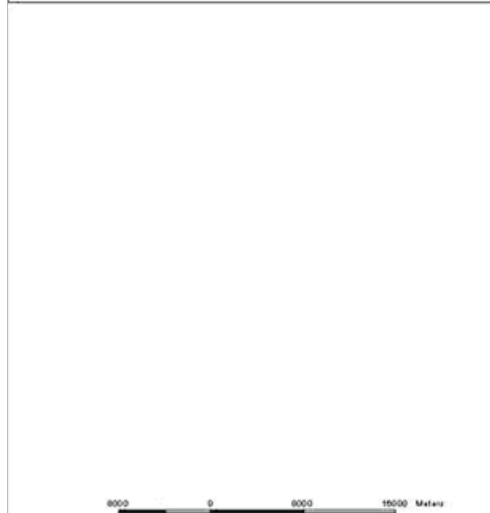
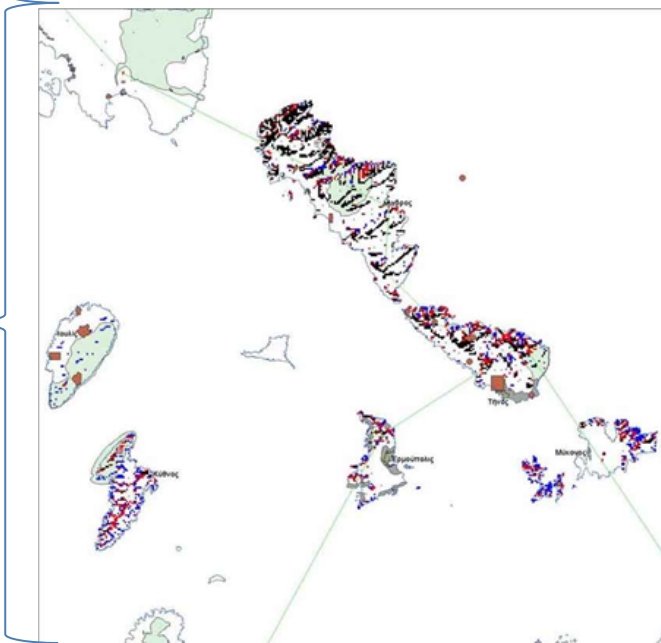
<http://www.risoe.dk/vea/projects/nimo/ewa.htm>

# Αιολικό δυναμικό Κυκλάδων

Διαθέσιμο  
δυναμικό



Τεχνικά  
εκμεταλλεύσιμο  
δυναμικό



# Κατηγοριοποίηση αιολικών μηχανών

Οι αιολικές μηχανές  
χωρίζονται σε  
διάφορες κατηγορίες,  
ανάλογα με:

το είδος της δύναμης που τις κινεί

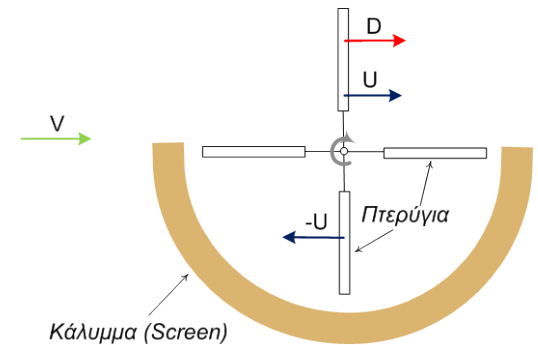
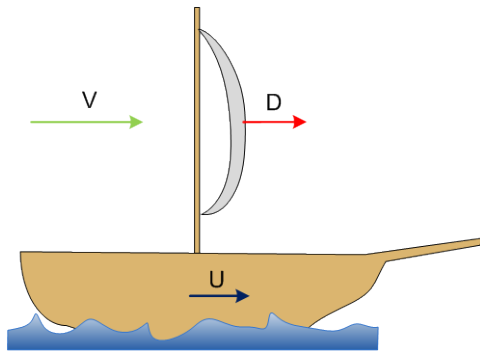
τον προσανατολισμό του άξονα  
περιστροφής του ρότορά τους

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 ( $\eta$ ) 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:

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

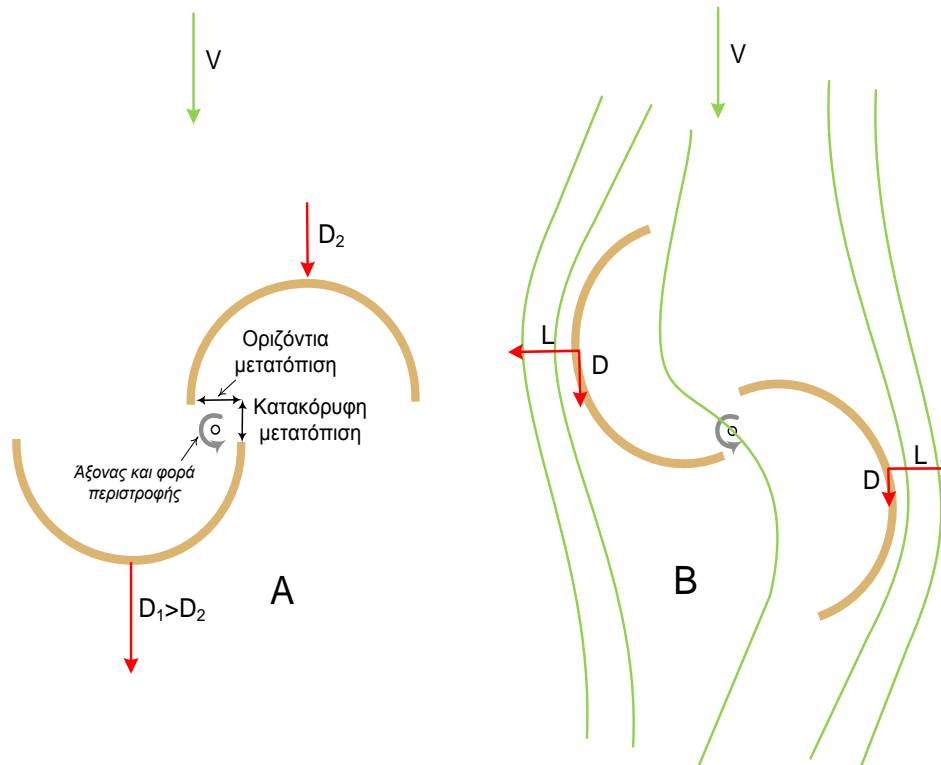
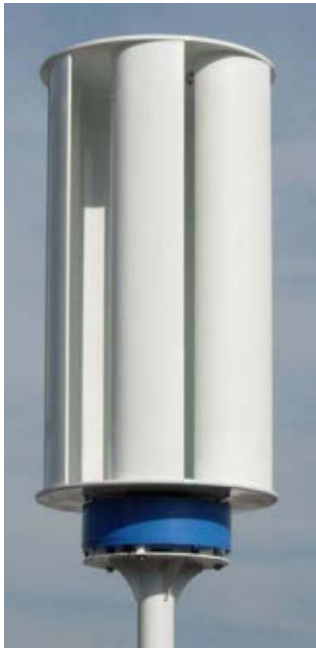
Οι τιμές της απόδοσης  $\eta$  κυμαίνονται από **0,15** έως **0,18**, ανάλογα με το  $C_D$  του πανιού (=1,2 για επίπεδη επιφάνεια).

**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](http://en.wikipedia.org/wiki/Savonius_wind_turbine)

# Κινητήρια δύναμη: Άντωση

## - Μηχανές κατακόρυφου άξονα -

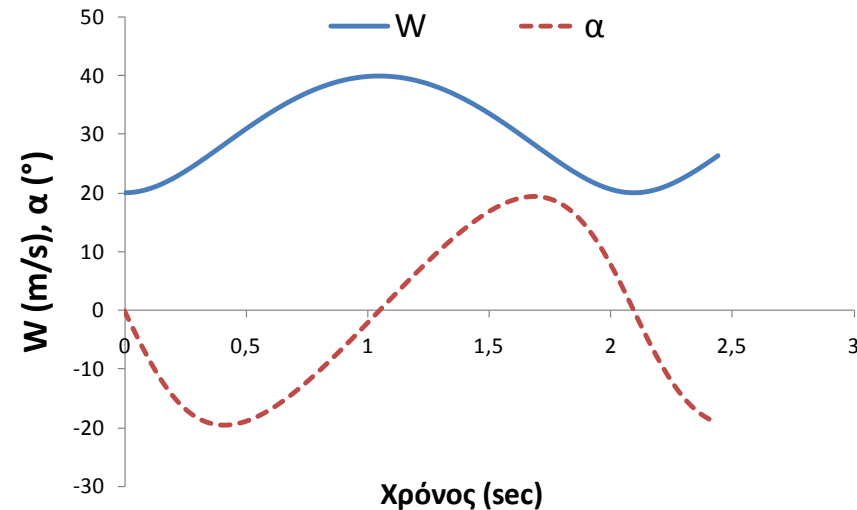
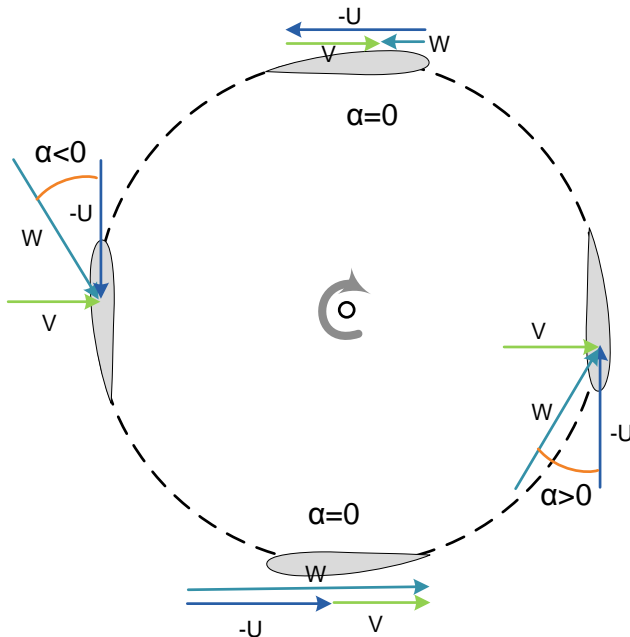
### Πλεονεκτήματα:

- 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

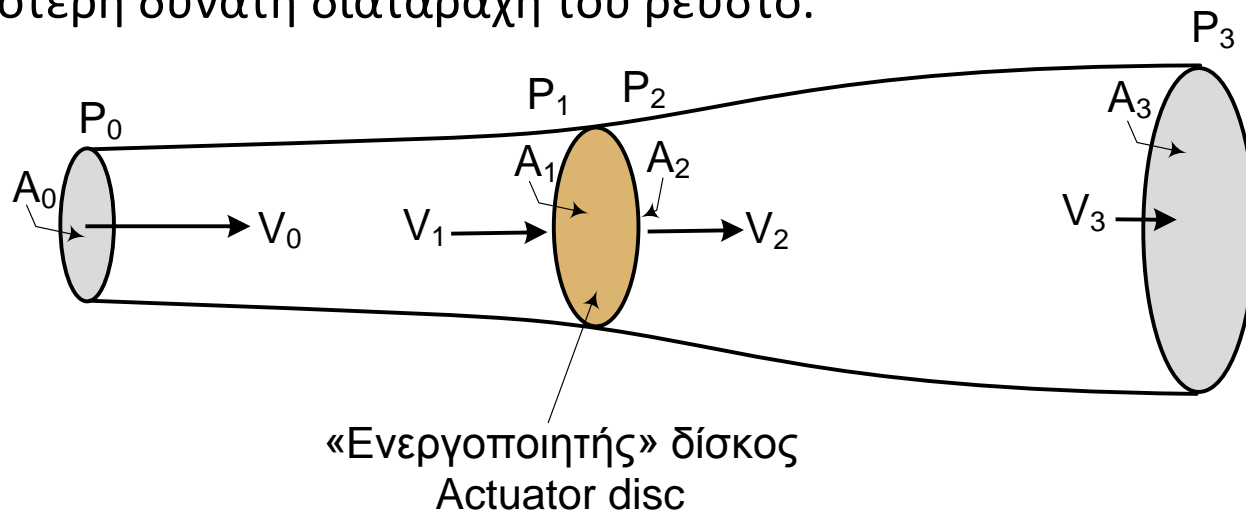


# Το όριο Betz (1)

## 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.

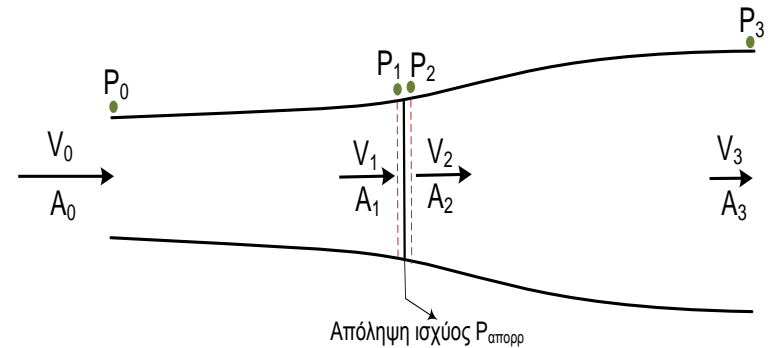


$A_3 > A_1 > A_0$  διότι καθώς ο δίσκος απορροφά την κινητική ενέργεια του ανέμου η ταχύτητά του μειώνεται και σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας, αυξάνεται η διατομή.

# 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)

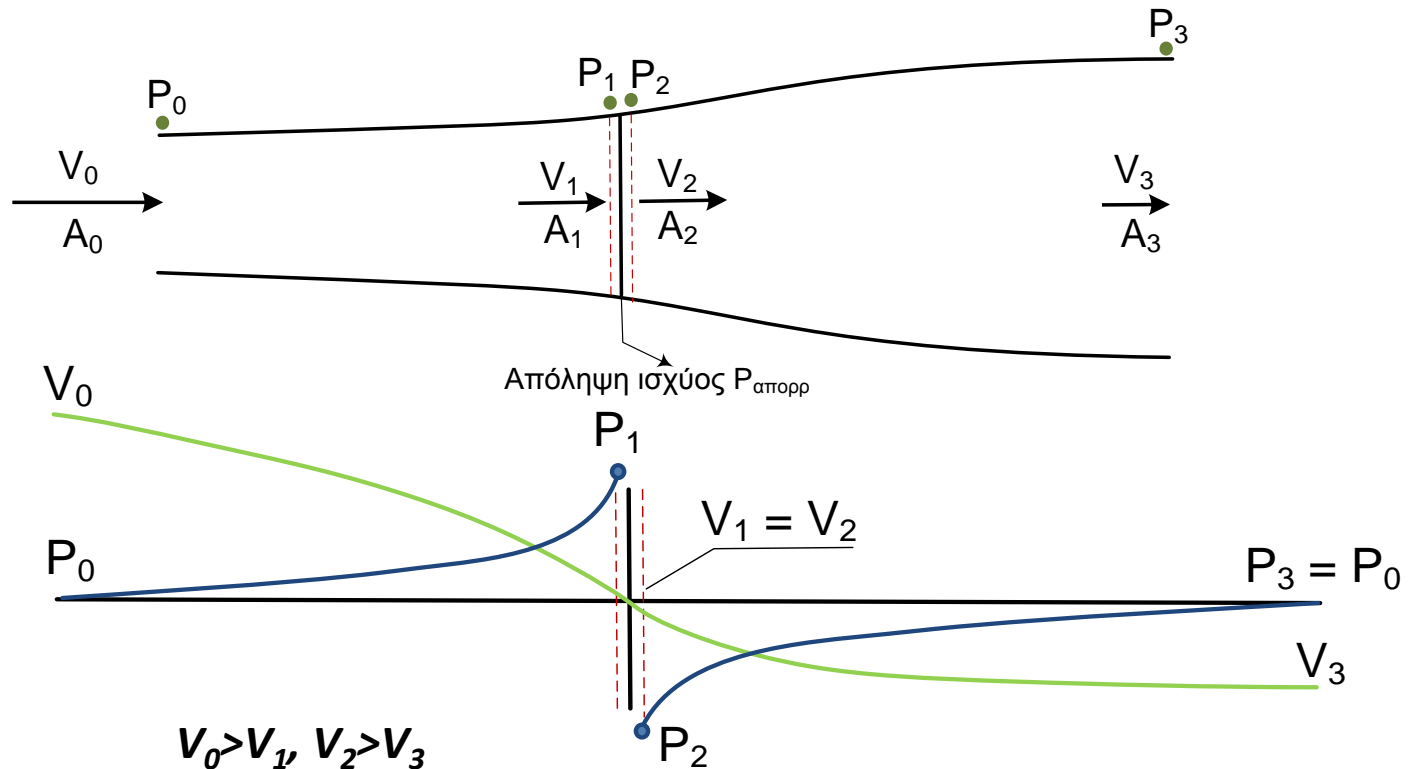
Για να αναλύσουμε τις συνθήκες ροής γύρω από το δίσκο, χρησιμοποιούμε τέσσερις θέσεις:

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

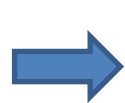
**Δύναμη  $T$  (Thrust)** με την οποία «πιέζει» ο άνεμος τον δίσκο

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

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  $\eta$**  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:

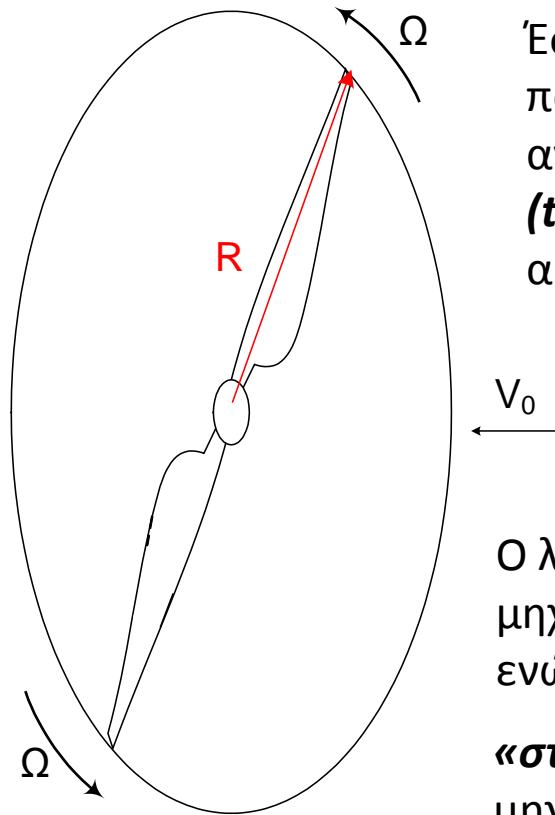
$$T = \frac{1}{2} \rho A_1 (V_0^2 - V_3^2) = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^2 \left[ 1 - \left( \frac{V_3}{V_0} \right)^2 \right] = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^2 [1 - \xi^2]$$

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  $\Omega$** , ενώ η ταχύτητα του ανέμου είναι  $V_0$ . Ορίζουμε ως «**λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου**» (**tip speed ratio**)  $\lambda$  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  $\lambda$  από 4 έως 6**.

«**στοιβαρότητα**» (**solidity**)  $\sigma$ : 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



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. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Ενότητα: Αιολική Ενέργεια**» Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015.

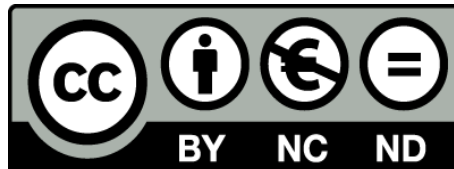
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

*<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1953&id=4383>*



# 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:

- [1] REN21 – Renewable Policy Network for the 21st Century: Renewables 2012 – Global Status Report, [www.ren21.net](http://www.ren21.net)
- [2] <http://srren.ipcc-wg3.de/report> - Intergovernmental Panel on Climate Change, Special Report on Renewable Energy Sources.
- [3] <http://www.wind-energy-the-facts.org/wind-atlases.html>
- [4] <http://www.risoe.dk/vea/projects/nimo/ewa.htm>
- [5] <http://www.cres.gr> (ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ & ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΚΑΠΕ)



*\*Όλοι οι διαδικτυακοί ιστότοποι που αναφέρονται ως πηγές εικόνων είναι ενεργοί στις 28/2/2015*