



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

# **Σχεδιασμός και Λειτουργία Συστημάτων ΑΠΕ**

**ΔΙΑΛΕΞΗ 04:  
Αιολικά Συστήματα ΙΙ**

Δρ. Τριανταφυλλιά Νικολάου

## Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση
- Ρευστό σε κίνηση: καθορισμός του διανύσματος της ταχύτητας:
  - Μέτρο (ένταση ανέμου)
  - Φορά (διεύθυνση ανέμου)
- Εξάρτηση της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου από:
  - Ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης, ...)
  - Τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο περιοχής, ύπαρξη θάλασσας, ...)
- Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης

## Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων (διαφορετική ακτινοβολία) → Συνεχή κίνηση αερίων μαζών από τους πόλους προς τον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες) και αντίστροφα (θερμές μάζες)
- Η περιστροφή της Γης → κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών προς Δυτικά και θερμών μαζών σε μεγαλύτερο ύψος προς Ανατολικά
- Ανομοιομορφία θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας – ανομοιόμορφη ψύξη → ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας → πεδία στατικής πίεσης

# Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

Ο συνδυασμός της προσλαμβανόμενης από την ατμόσφαιρα και την γη ηλιακή ακτινοβολία με την ανομοιομορφία του γήινου ανάγλυφου και την περιστροφή της γης γύρω από το άξονά της έχει ως συνέπεια την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

- Δύναμη βαροβαθμίδας
- Δύναμη Coriolis
- Δύναμη τριβής

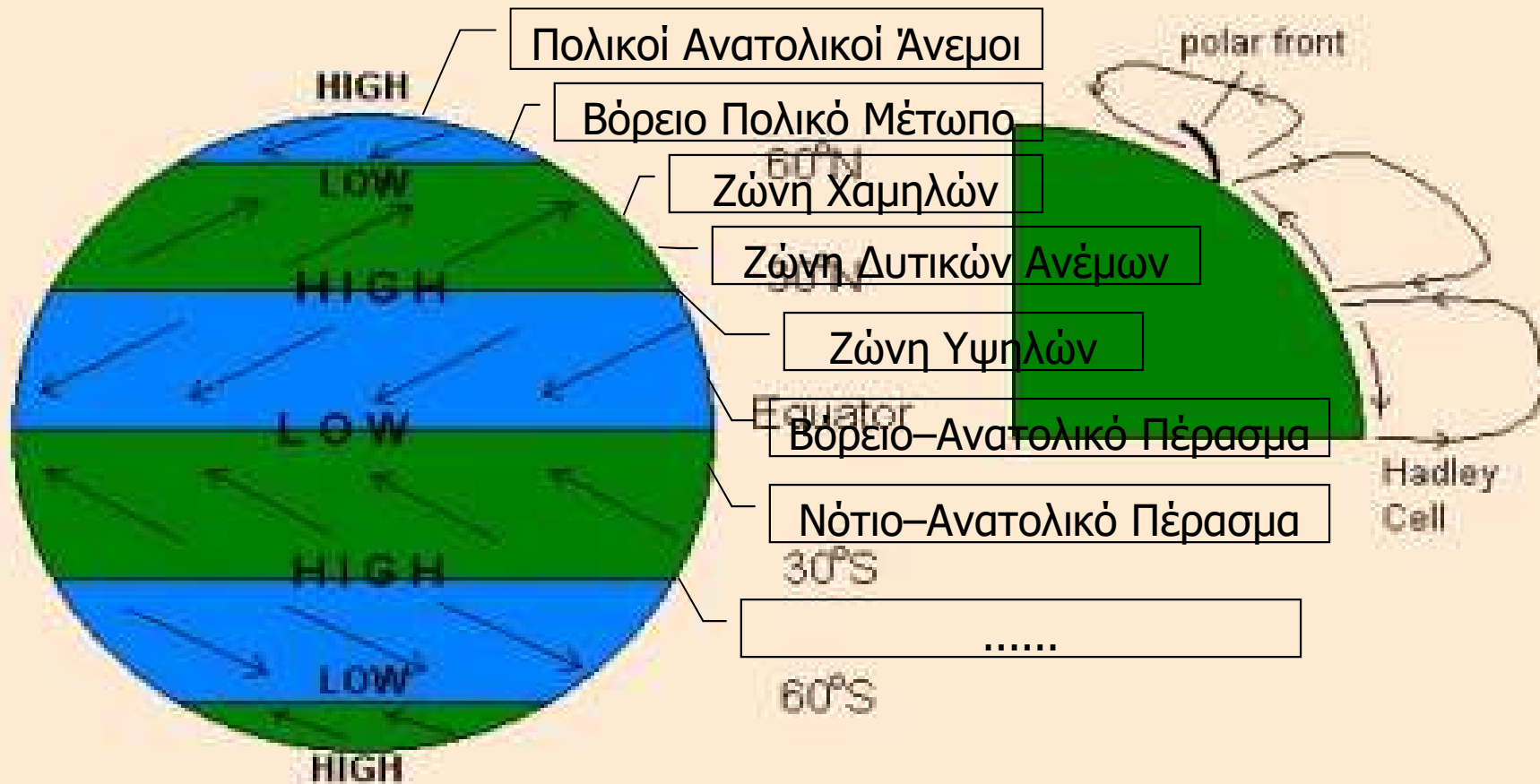
## Coriolis



# ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία



## Χαρακτηριστικές Παράμετροι του Ανέμου

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει ο άνεμος. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης Αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- Την ταχύτητα του ανέμου
- Την διεύθυνση του ανέμου
- Την επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη
- Τον στροβιλισμό του ανέμου
- Την μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου)

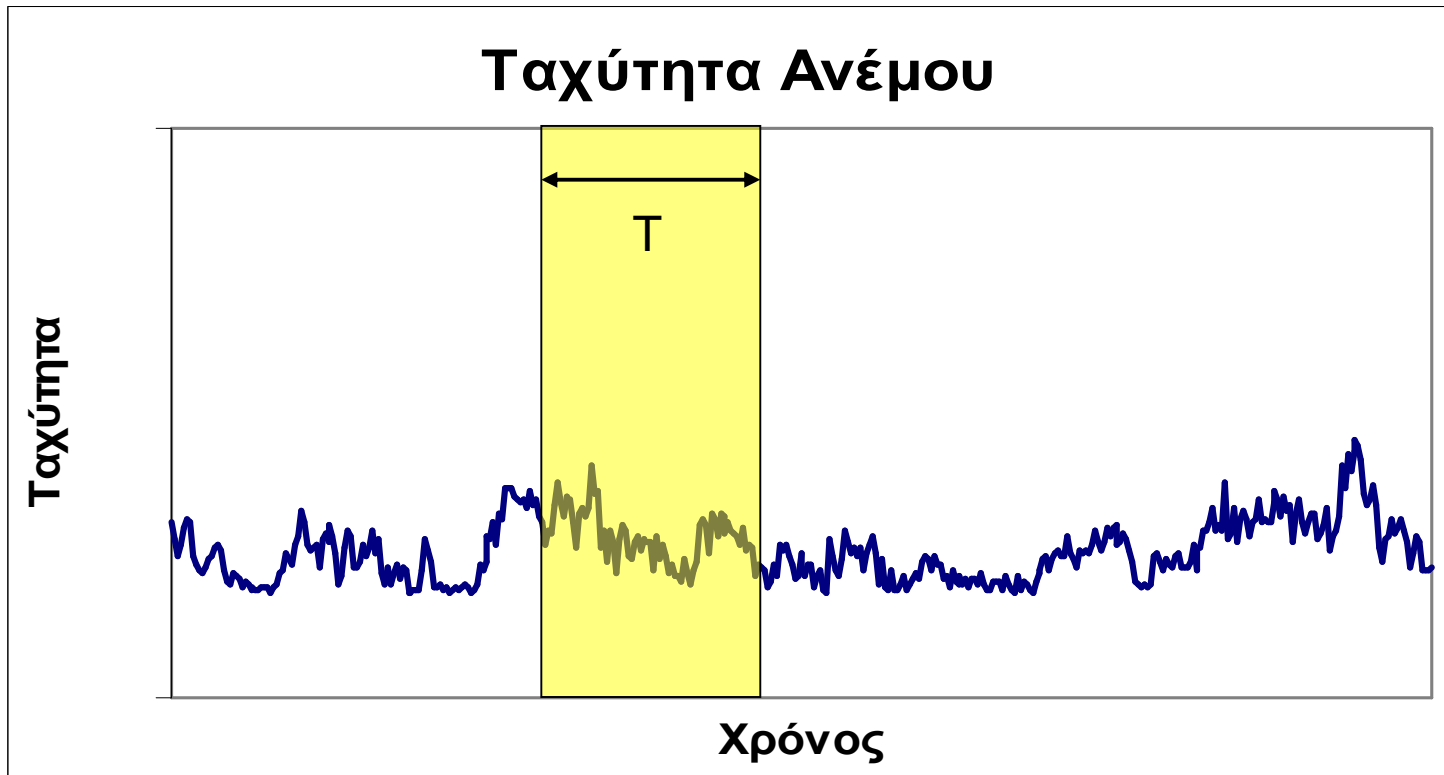
## Μέση ταχύτητα του Ανέμου

- Ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος
- Σημαντικές μεταβολές μέσα σε χρονικό διάστημα (sec → h)
- Οι διακυμάνσεις μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες
- Σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του εδάφους
- Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από την μέση τιμή:

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

## Μέση ταχύτητα του Ανέμου

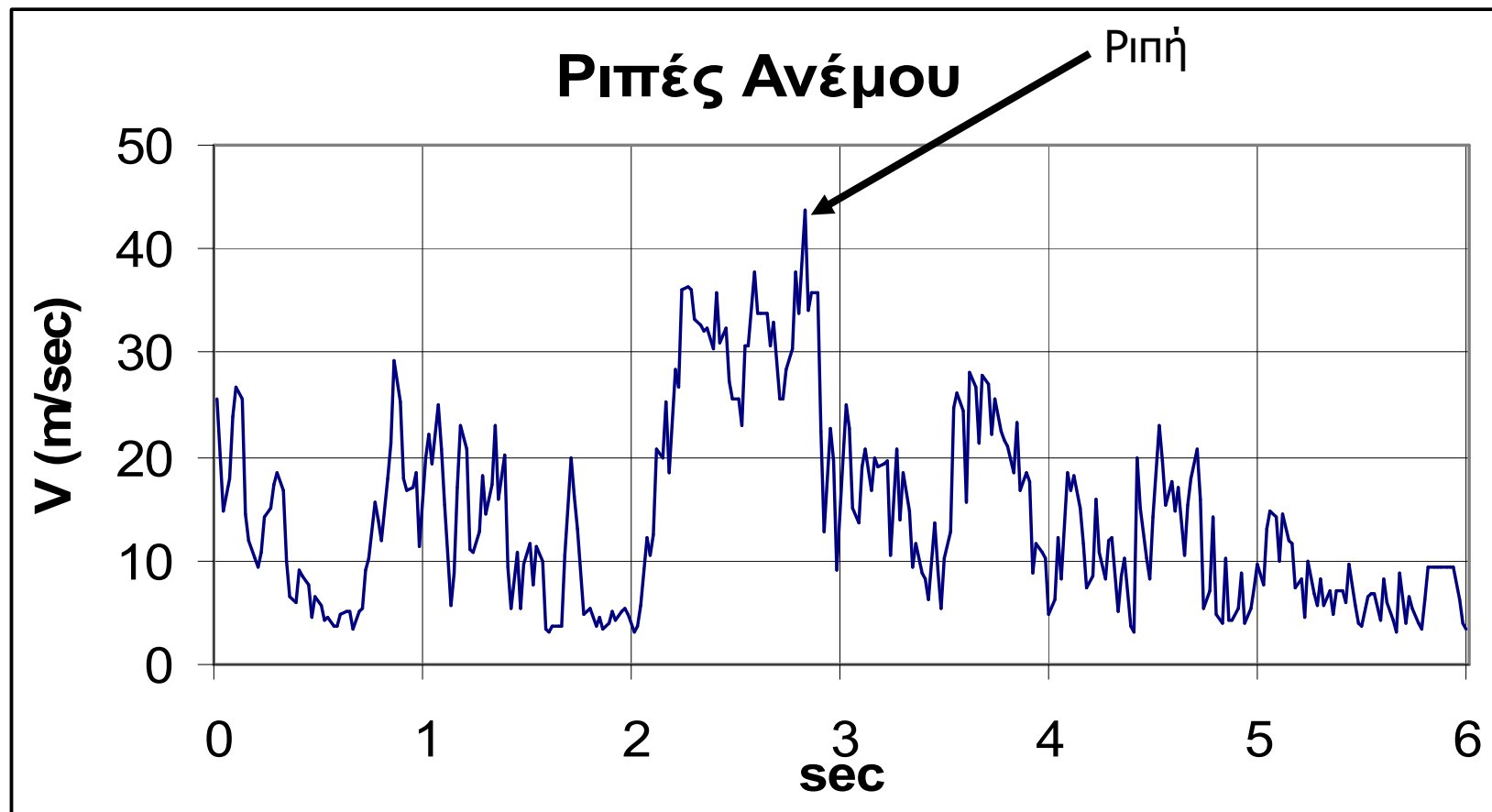
$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad \text{Για } T=10\text{min} \quad V'(t) = 0$$



## Ριπή του Ανέμου

- Ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας (~20sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα
- Εμπειρικός κανόνας: Η ριπή συνήθως ξεπερνά τα 9m/sec και διαφέρει από τα συνήθη επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec
- Καθορίζει την κόπωση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας
- Αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30 sec θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη η αιολική μηχανή να τεθεί εκτός λειτουργίας

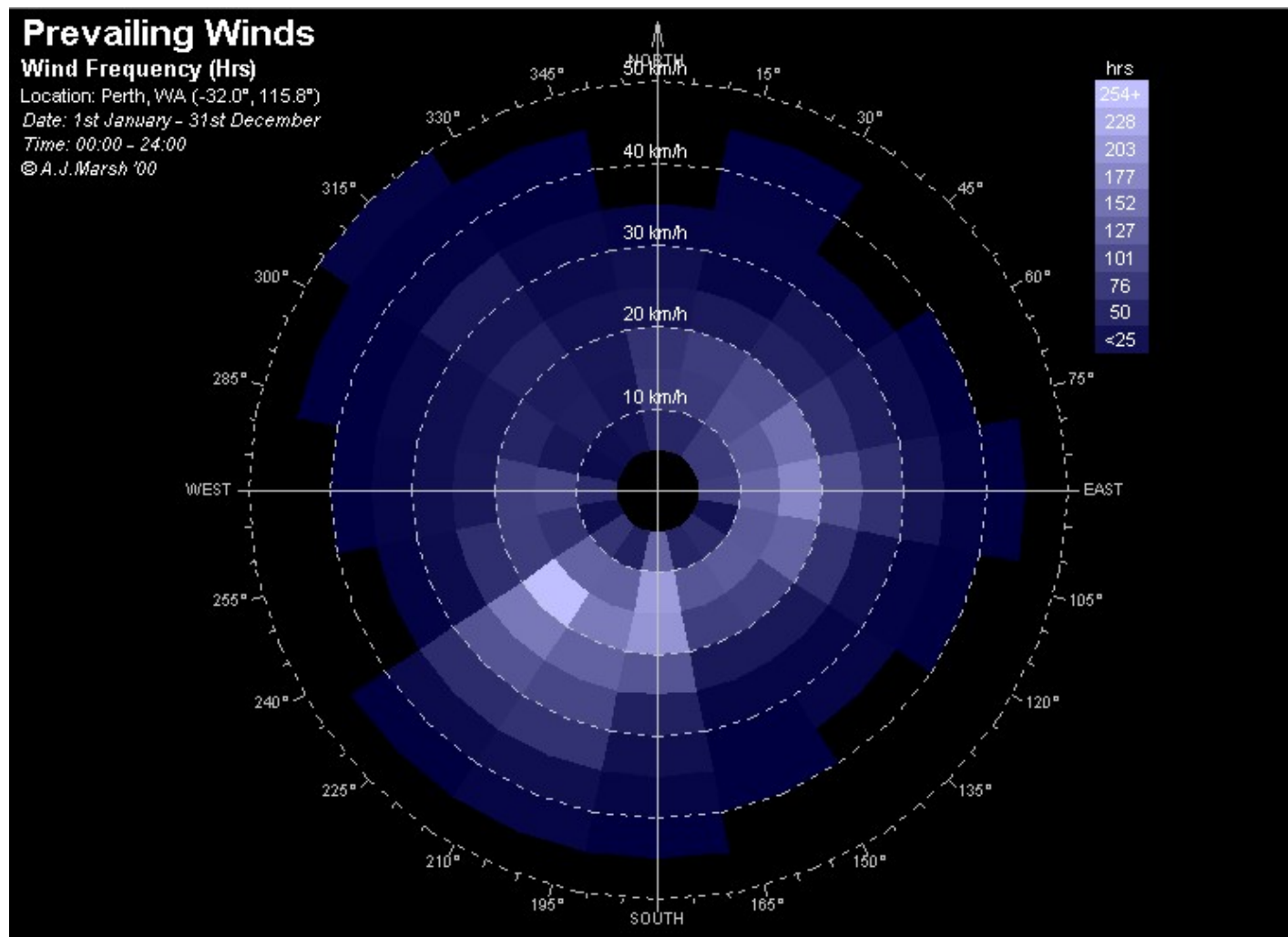
# Ριπές του Ανέμου



## Διεύθυνση του Ανέμου

- Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσά ο άνεμος σε σχέση με την θέση στην οποία μετράμε
- Η διεύθυνση του ανέμου «ταλαντώνεται» συνεχώς γύρω από μία μέση θέση εμφανίζοντας όμως μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα του ανέμου
- Κύριες διευθύνσεις του ανέμου:
  - Οι διευθύνσεις του ανέμου που συνεισφέρουν τουλάχιστον 10% στην συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια
  - Εξαρτώνται από τους προσανατολισμούς των τοποθεσιών, από την βλάστηση και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (λόφοι, βουνά, κοιλάδες, κτίρια,...)

# Διεύθυνση του Ανέμου - Ροδόγραμμα



## Διεύθυνση του Ανέμου – Τραχύτητα εδάφους

- Ο ρόλος της διεύθυνσης του ανέμου στην επιλογή μιας θέσης για εγκατάσταση είναι σημαντικός για το καθορισμό της τραχύτητας του εδάφους
- Κατά την διάρκεια της επιλογής θα πρέπει να προσδιοριστεί η τραχύτητα του εδάφους σε σχέση με τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου και στην συνέχεια να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό της θέσης

## Τραχύτητα εδάφους

- Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους
- Τα μεγέθη που εκφράζουν την τραχύτητα του εδάφους είναι το μήκος τραχύτητας  $z_0$  και η κλάση (κατηγορία) τραχύτητας
- Το μήκος τραχύτητας μπορεί να αλλάζει με τις εποχές (εποχές, συγκομιδή, ...)
- Το μήκος τραχύτητας ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών

## Τραχύτητα εδάφους

• Για επίπεδη περιοχή με τα στοιχεία τραχύτητας να καταλαμβάνουν 10-20% το  $z_0$  συνδέεται με το μέσο ύψος ( $h$ ) των στοιχείων τραχύτητας με την σχέση:

$$z_0 = 0.15h$$

• Αν  $z_0 \leq 0.03$

$$\rightarrow \text{Κλάση} = 1.699823015 + \ln(z_0) / \ln(150)$$

• Αν  $z_0 > 0.03$

$$\rightarrow \text{Κλάση} = 3.912489289 + \ln(z_0) / \ln(3.33333333)$$

# Τραχύτητα εδάφους

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος εδάφους	Zo(m)
0	Πηλώδες έδαφος, Πάγος	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
0	Ήρεμη θάλασσα	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
0	Αμμώδες έδαφος	$10^{-4} - 10^{-3}$
0	Χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	$4.9 \cdot 10^{-3}$
1	Χέρσο έδαφος	$10^{-3} - 0.01$
1	Χλοερό έδαφος	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο έδαφος	0.021
2	Χαμηλή βλάστηση, Στέπα	0.032
2	Υψηλά χόρτα	0.039
2	Σποβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1-0.3
2	Δάση με χαμηλά δένδρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δένδρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

## Τραχύτητα εδάφους

- **Κατηγορία τραχύτητας 1:** Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις. Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι
- **Κατηγορία τραχύτητας 2:** Καλλιεργημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000m μεταξύ τους και μερικά σπίτια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή κυματώδες με δέντρα και σπίτια
- **Κατηγορία τραχύτητας 3:** Συνδυασμός δάσους και καλλιεργημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περίχωρα της πόλης. Τα εμπόδια είναι κοντά μεταξύ τους σε αποστάσεις μικρότερες από μερικές εκατοντάδες μέτρα

## Ανατάραξη του αέρα

- Η διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή:

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt$$

Για  $T=10\text{min}$

- Η ένταση  $I$  της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως (σν η τυπική απόκλιση):

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$

## Ανατάραξη του αέρα

- Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος τραχύτητας  $z_0$ :

$$I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}}$$

Για  $z_0 \leq 0.20\text{m}$

$$I = \frac{-0.14 \ln z_0 + 0.78}{\ln \frac{z}{z_0}}$$

Για  $z_0 > 0.20\text{m}$

## Ανατάραξη του αέρα

- Η ένταση της ανατάραξης είναι ένα από τα βασικά μεγέθη τα οποία πρέπει να γνωρίζει κανείς όταν πρόκειται να εγκαταστήσει μια αιολική μηχανή, γιατί δεν επιδρά μόνο στην συλλεγόμενη ισχύ, αλλά και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος

## Στροβιλισμός του αέρα

- Η ανατάραξη του αέρα δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα λόγω της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους
- Τα εμπόδια στο έδαφος συχνά δημιουργούν οργανωμένους στροβίλους
- Οι οργανωμένοι στρόβιλοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την όλη εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής

## Εκθετικός Νόμος Κατανομής του Ανέμου

Ο εκθετικός νόμος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{V(z)}{V(z_1)} = \left( \frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$

- Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εκτιμήσεις της τιμής του  $\alpha$

– Σχέση Justus και Mikhail:

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln[V(z_1)]}{1 - 0.088 \ln\left(\frac{z_1}{10}\right)}$$

– Οι ίδιοι ερευνητές για γρήγορους υπολογισμούς προτείνουν  $\alpha = 0.23 \pm 0.03$

– Άλλοι ερευνητές:

– όταν το ύψος αναφοράς

$$z_o = 15.25 \exp\left(-\frac{1}{\alpha}\right)$$

όπου  $z_o$ : μήκος τραχύτητας  $z_1 \neq 10m$

$$\alpha = 0.04 \ln z_o + 0.003 (\ln z_o)^2 + 0.24$$

- Εμφανίζει καλή ακρίβεια σε περιπτώσεις που η διαφορά ύψους είναι περισσότερο από 30-50 m. Η ακρίβεια όμως ελαττώνεται πολύ για μεγάλες διαφορές υψών.

## Εκθετικός Νόμος Κατανομής του Ανέμου

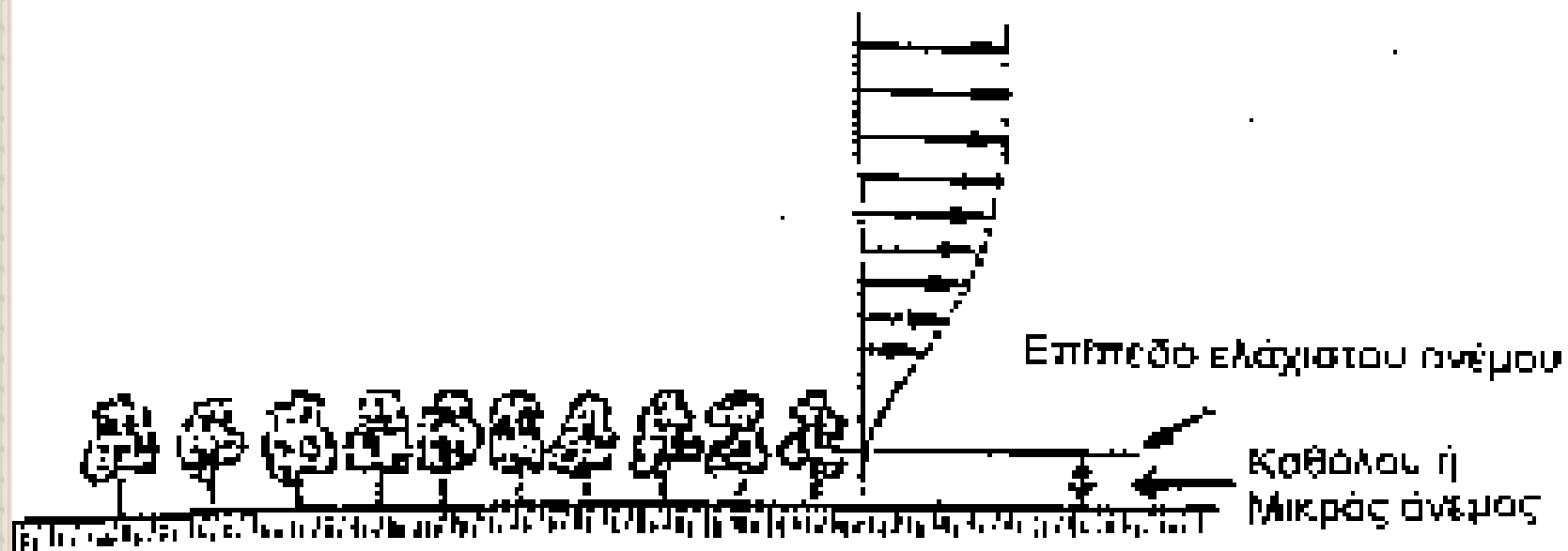
Για ύψος αναφοράς  $z_1 = 10\text{m}$  οι τιμές δίνονται από πίνακες:

Κατηγορία τραχύτητα $\zeta$	Είδος εδάφους	$Z_0$ (m)	$\alpha$
0	Εξομαλυσμένο (θάλασσα, χιόνι, άμμος)	0.001-0.002	0.10-0.13
1	Μέτρια τραχύτητα (χαμηλή βλάστηση και καλλιέργειες, αγροτικές περιοχές)	0.02-0.30	0.13-0.20
2	Τραχύ έδαφος (Δάση, προάστια πόλεων)	0.30-2.0	0.20-0.27
3	Πολύ τραχύ έδαφος (αστικές περιοχές, ψηλά κτίρια)	2.0-10.0	0.27-0.40

## Μήκος Τραχύτητας

- Το μήκος τραχύτητας  $z_0$  εκφράζει το μέσο ύψος των στοιχείων μιας επιφάνειας.
  - Ομοιογενές πεδίο: μήκος τραχύτητας μικρό σε σχέση με το ύψος της αιολικής μηχανής
  - Ανομοιογενές πεδίο: μήκος τραχύτητας μεγάλο
- Οι τιμές του  $z_0$  κυμαίνονται από 0.01m (πάγος) ως 10 m (αστικές περιοχές)
- Σημαντικό για το αιολικό δυναμικό της περιοχής
- Το  $z_0$  αλλάζει με τις εποχές (φθινόπωρο, άνοιξη, εποχές συγκομιδής, ... ).
- Το  $z_0$  εξαρτάται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών

# Μήκος Τραχύτητας

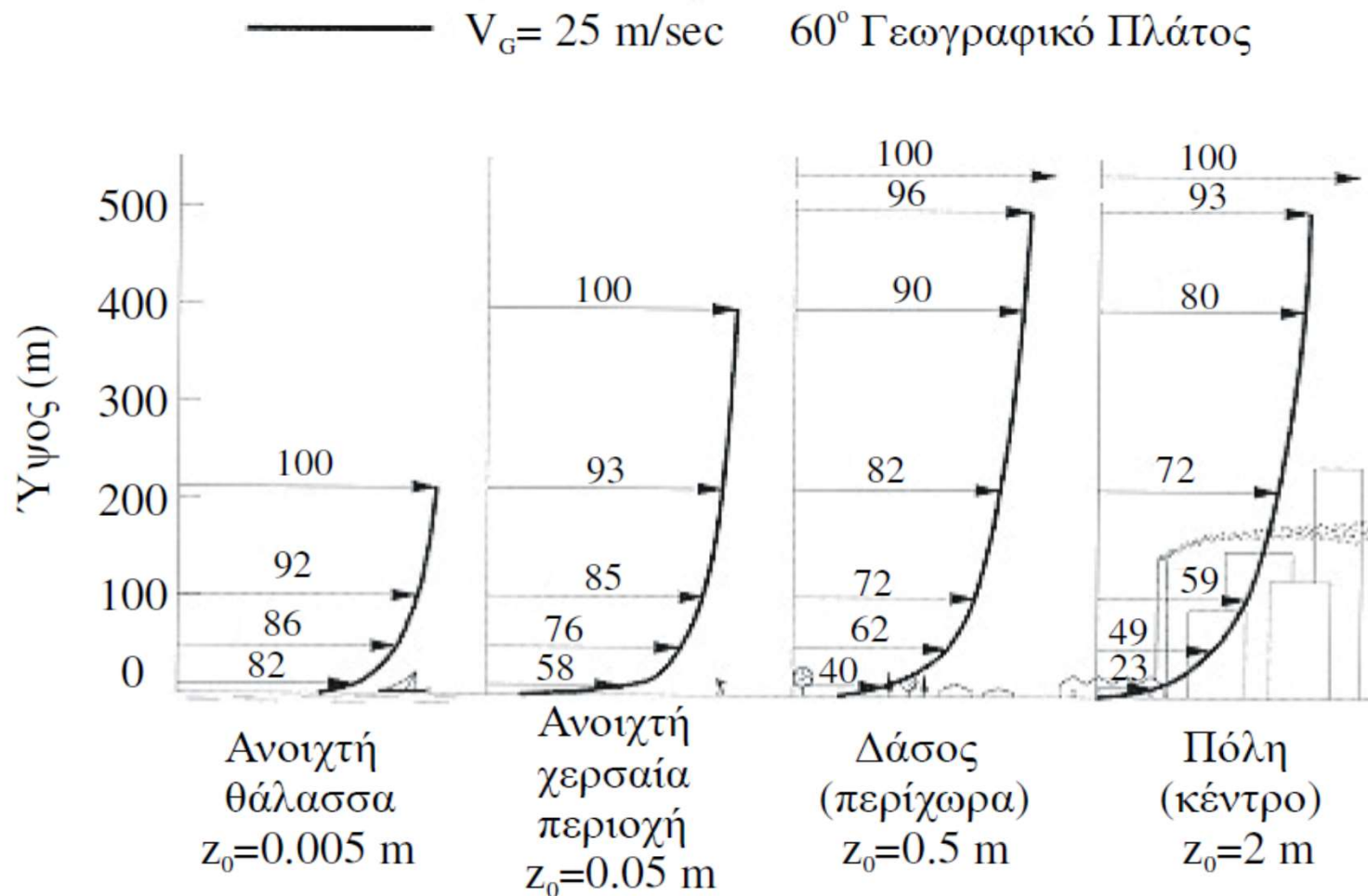


## Όριο Τραχύτητας

Η διαχωριστική γραμμή μεταξύ δύο γειτονικών περιοχών διαφορετικής τραχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία του ορίου τραχύτητας

- Η μεταβολή αυτή του μήκους τραχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την διαδοχική μεταβολή του κατανομής του ανέμου λόγω του σχηματισμού διαδοχικών εσωτερικών οριακών στρωμάτων
- Απαιτείται προσεκτική διαστασιολόγηση του πύργου της αιολικής μηχανής ώστε η πτερωτή της μηχανής να μην βρίσκεται σε ζώνη σημαντικών «αναταράξεων».

# Όριο Τραχύτητας



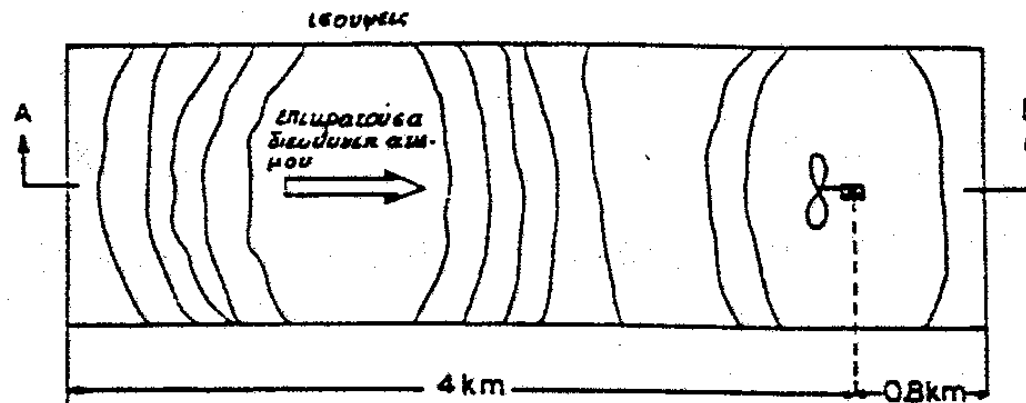
## Επίπεδο πεδίο

Ένα πεδίο θεωρείται επίπεδο αν:

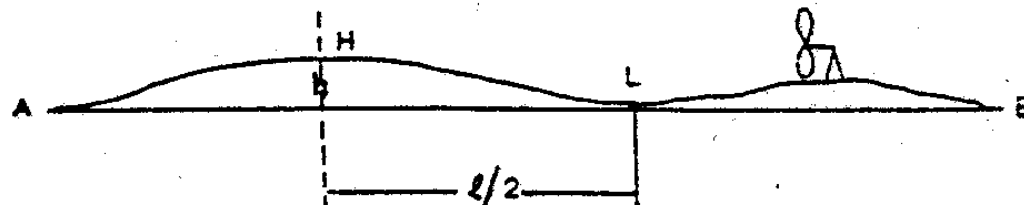
- Η διαφορά ύψους της θέσης μεταξύ της θέσης όπου πρόκειται να τοποθετηθεί η αιολική μηχανή και του περιβάλλοντος χώρου σε μια ακτίνα 6km είναι μικρότερη από 60m.
- Ο λόγος  $h/l$  μικρότερος του 0.02, όπου  $h$  το μέγιστο ύψος της περιοχής στα προσήνεμα της αιολικής μηχανής και  $l$  το διπλάσιο της απόστασης μεταξύ χαμηλότερου και ψηλότερου σημείου

## Επίπεδο πεδίο

Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να έχουμε μία απόσταση «επίπεδη» τουλάχιστον 4km στα προσήνεμα της θέσης της αιολικής μηχανής και 0.8km στα υπήνεμα

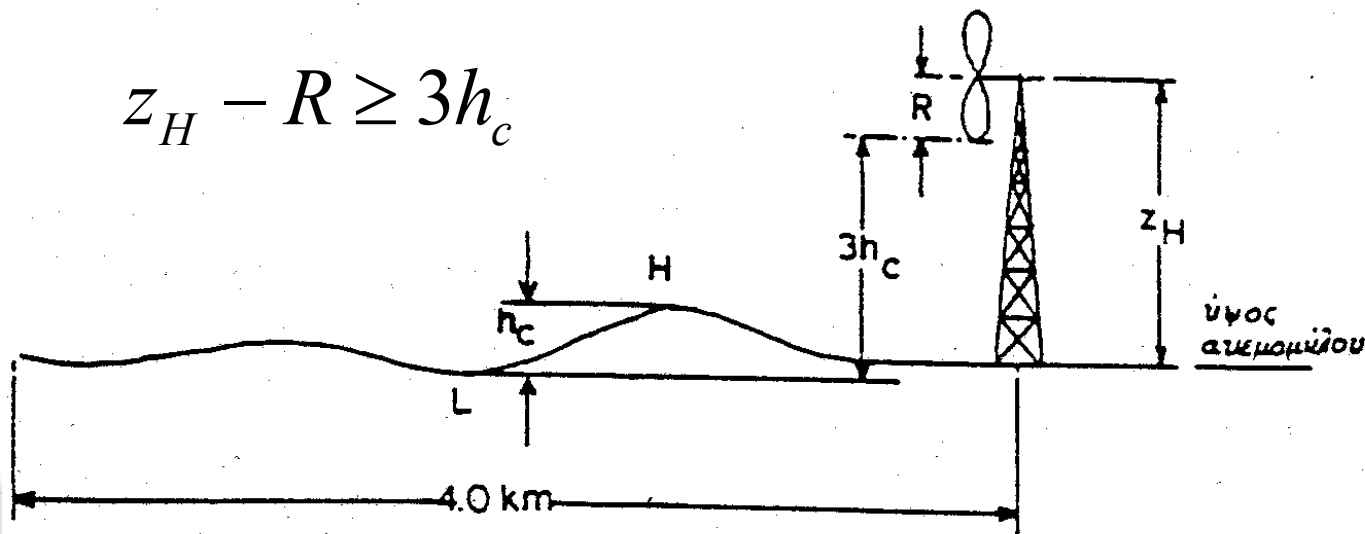


Διατομή Α-Β



## Επίπεδο πεδίο

- Το έδαφος θεωρείται επίπεδο αν το ύψος της πτερωτής ( $Z_H - R$ ) [ $Z_H$ : ύψος άξονα πτερωτής και  $R$ : ακτίνα] από τα χαμηλότερο σημείο  $L$  του πεδίου στα προσήνεμα της μηχανής ( $\sim 4\text{km}$ ) είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερο από την διαφορά ( $h_c$ ) μεταξύ του ψηλότερου ( $H$ ) και του χαμηλότερου ( $L$ ) σημείου :



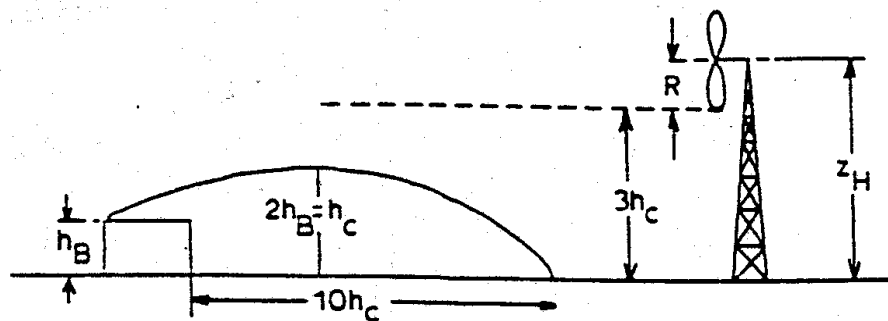
## Μη ομοιογενές πεδίο

Όταν τα εδαφικά χαρακτηριστικά δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα ή/και το μέγεθός τους είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την αιολική μηχανή τότε το πεδίο δεν είναι ομοιογενές και δεν μιλάμε για μήκος τραχύτητας, αλλά για εμπόδια στη ροή του ανέμου.

• Θεωρούμε ότι υπάρχει εμπόδιο στα προσήνεμα μιας αιολικής μηχανής αν:

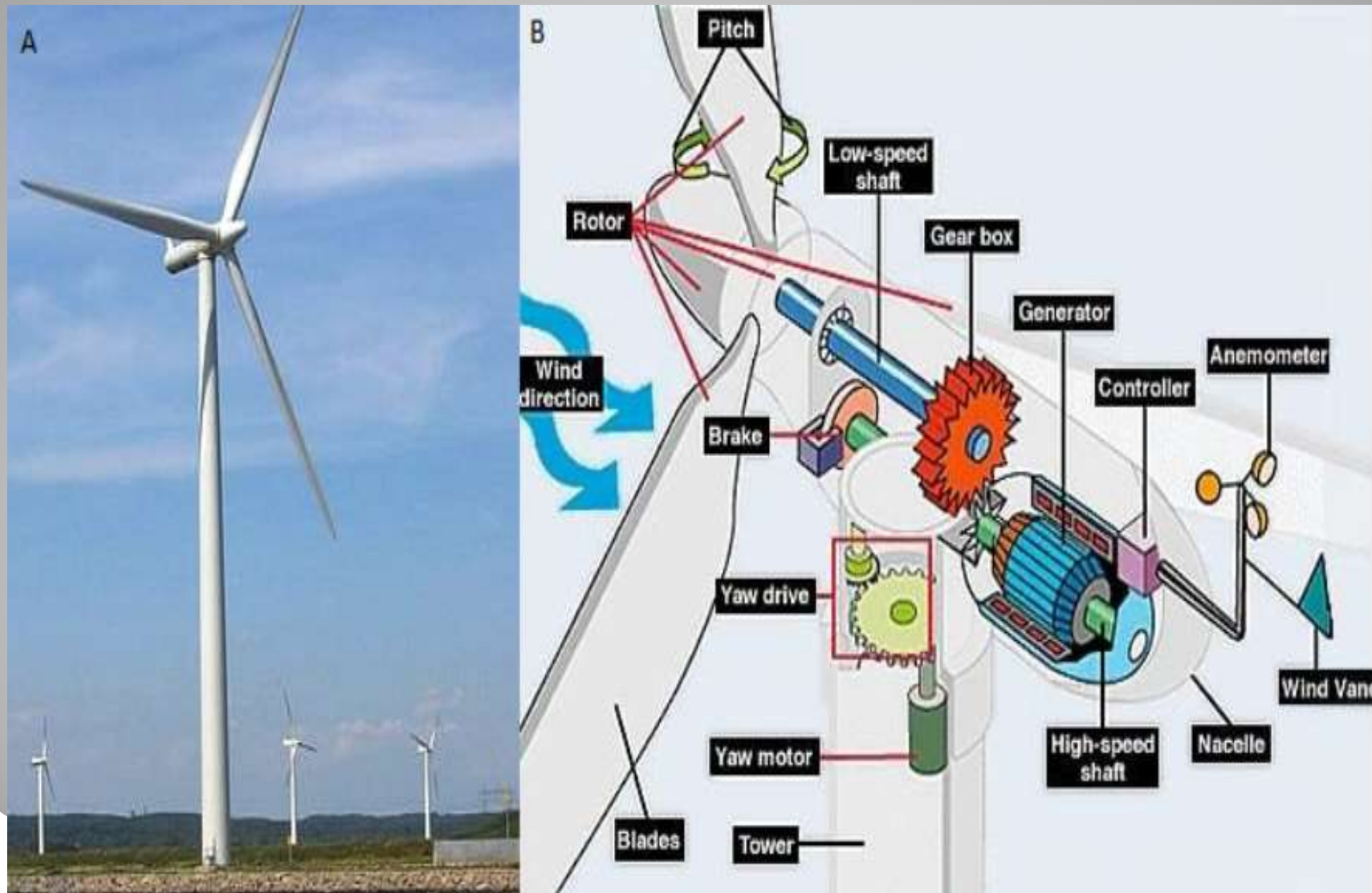
$$\frac{h_c}{z_H} - R \geq 0.75$$


• Η αιολική μηχανή θα πρέπει να τοποθετηθεί σε απόσταση  $10h_c$  από το εμπόδιο



# Αιολικές μηχανές

- Οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριες



- 
- Υπάρχουν πολλών ειδών ανεμογεννήτριες οι οποίες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες :
  - **Οριζοντίου άξονα**, των οποίων ο δρομέας είναι τύπου έλικα και βρίσκεται συνεχώς παράλληλος με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους
  - **Κατακόρυφου άξονα**, ο οποίος παραμένει σταθερός και είναι κάθετος προς την επιφάνεια του εδάφους
  - Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της και την ταχύτητα του ανέμου . Το μέγεθος είναι συνάρτηση των αναγκών που καλείται να εξυπηρετήσει και ποικίλει από μερικές εκατοντάδες μέχρι μερικά εκατομμύρια Watt.
  - Οι τυπικές διαστάσεις μιας ανεμογεννήτριας 500 kW είναι : Διάμετρος δρομέα, 40 μέτρα και ύψος 40-50 μέτρα , ενώ αυτής των τριών MW οι διαστάσεις είναι 80 και 80-100 μέτρα αντίστοιχα.

# Είδη ανεμογεννητριών

- **Οριζοντίου άξονα**, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνήθως παράλληλα προς τον άνεμο.



- **Κατακόρυφου/κάθετου άξονα**, όπου ο άξονας παραμένει σταθερός.



# Είδη ανεμογεννητριών

- **Δίπτερες**  
Αυτές που έχουν δύο πτερύγια

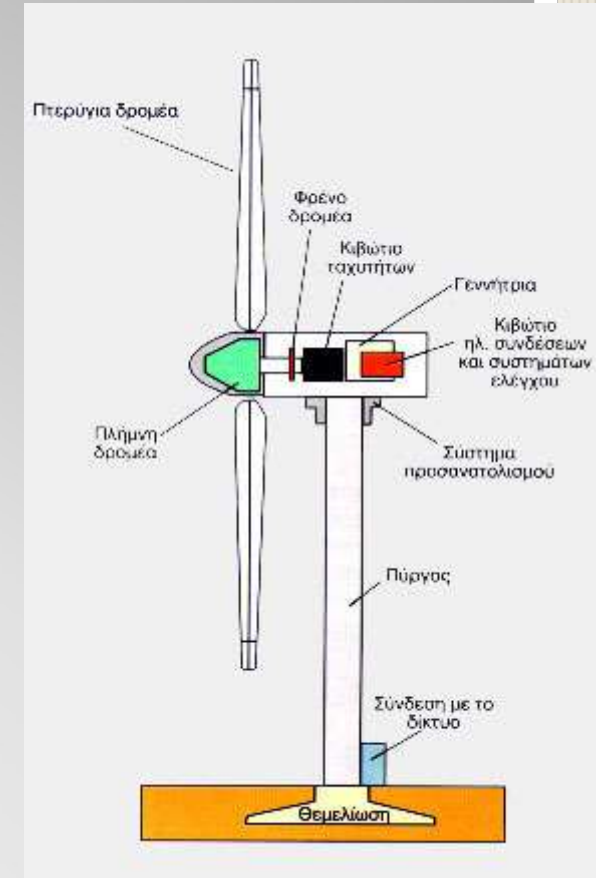


- **Τρίπτερες**  
Αυτές που έχουν τρία πτερύγια



# Τυπική α/γ οριζοντίου άξονα

- **Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείται από τα εξής μέρη :**
- **το δρομέα**, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα . Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά , είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα
- **το σύστημα μετάδοσης της κίνησης**, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών , το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής
- **την ηλεκτρική γεννήτρια**, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας . Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας
- **το σύστημα προσανατολισμού**, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου
- **τον πύργο**, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση . Ο πύργος είναι συνήθως σωληνωτός ή δικτυωτός και σπανίως από οπλισμένο σκυρόδεμα
- **τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου** , οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου . Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί , συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας , φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



# Μέρη Α/Γ οριζόντιου άξονα



## Tip speed ratio

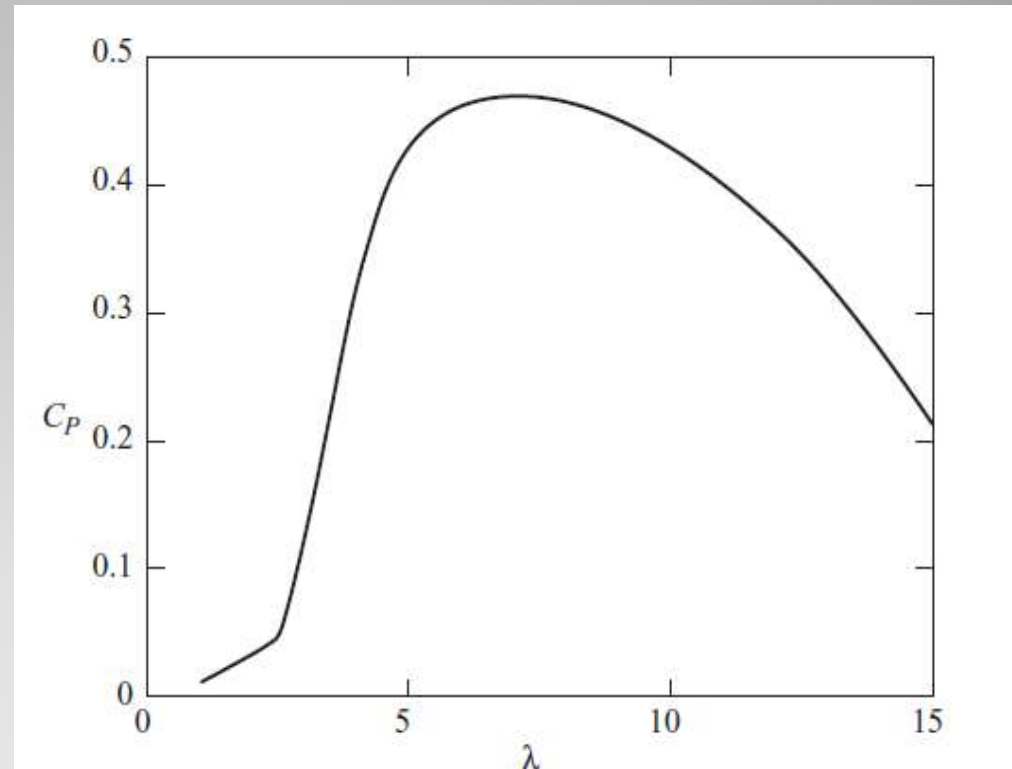
Παρεχόμενη  
ισχύς

$$c_P = \frac{P_g}{P} = \frac{2P_g}{\rho A V^3} < 0.593$$

$$c_P = f(\lambda)$$

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

Λόγος  
ταχύτητας  
ακροπτερυγίου  
 $\omega \cdot R$  η  
ταχύτητα του  
ακροπτερυγίου  
και  $V$  η  
ταχύτητα του  
ανέμου



$\lambda=1$  αντιστοιχεί σε αιολική μηχανή με 8-24 πτερύγια

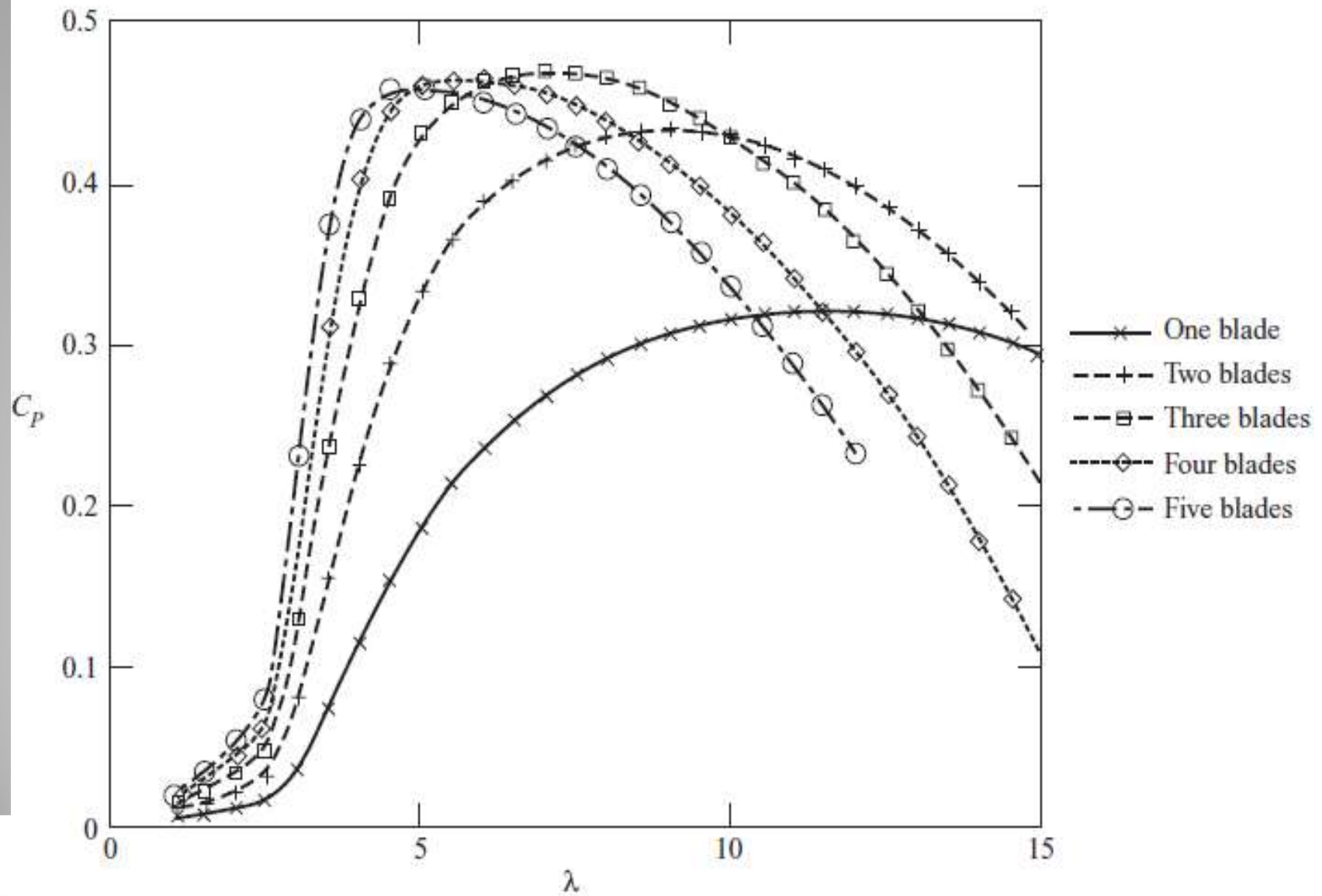
$\lambda=2$  αντιστοιχεί σε αιολική μηχανή με 6-12 πτερύγια

$\lambda=3$  αντιστοιχεί σε αιολική μηχανή με 3-6 πτερύγια

$\lambda=4$  αντιστοιχεί σε αιολική μηχανή με 2-4 πτερύγια

$\lambda=5$  αντιστοιχεί σε αιολική μηχανή με 2-3 πτερύγια

# στερεότητα



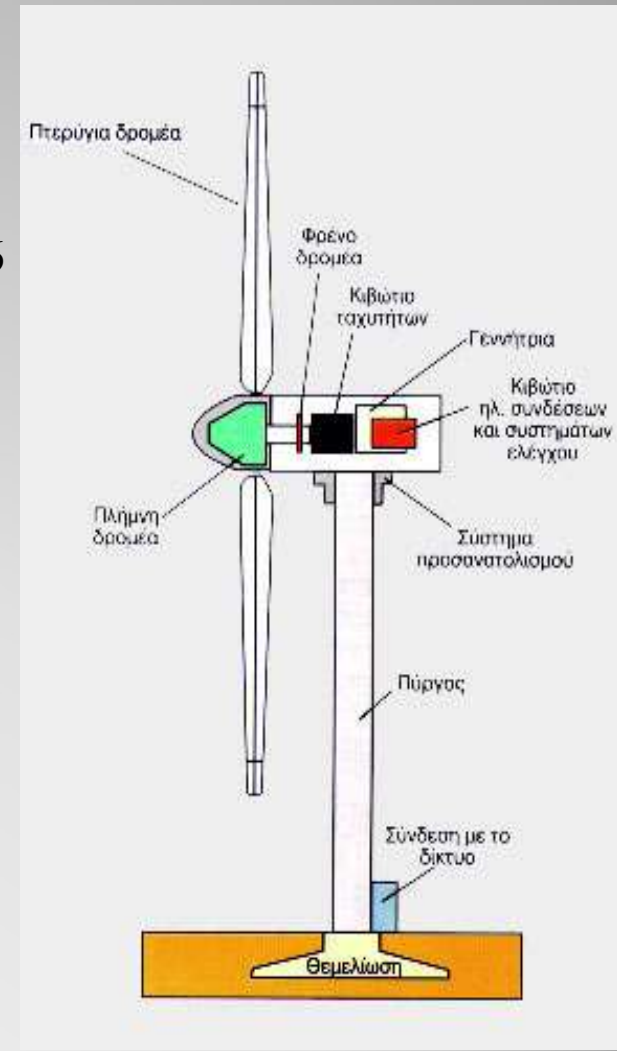
## Αιολικές Μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής

- Αργή αιολική μηχανή: (12-24 πτερύγια, χαμηλές ταχύτητες, μεγάλο βάρος, άντληση νερού)
  - **$D=6-8m$**
  - μεγαλύτερη απόδοση:  **$\lambda = 1$**
  - **$c_p \approx 0.3$**
- Παραδοσιακός ανεμόμυλος
  - μεγαλύτερη απόδοση:  **$2 > \lambda > 3$**
  - **$c_p \approx 0.3$**



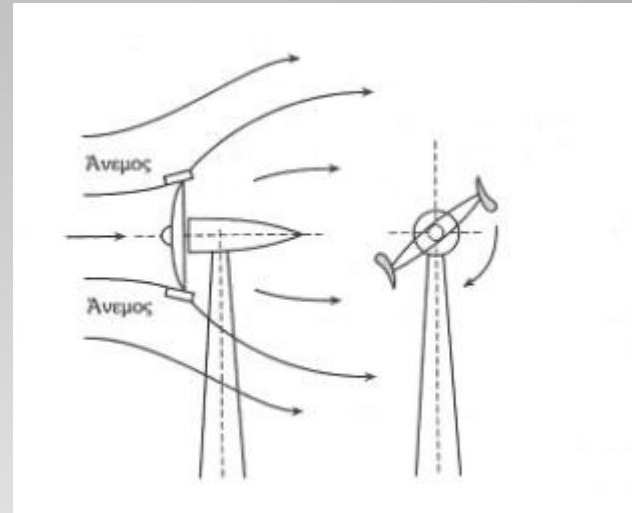
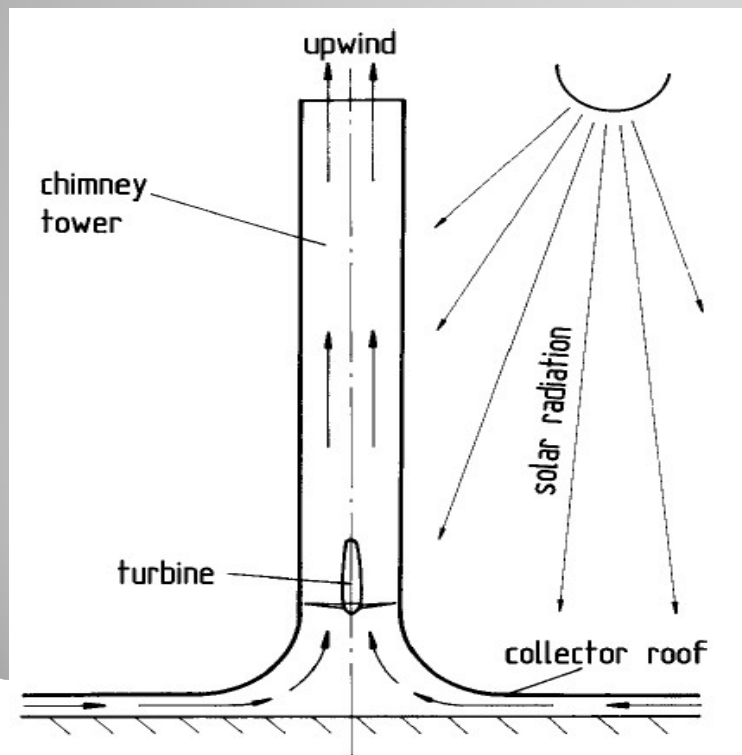
## Αιολικές Μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής

- Γρήγορη αιολική μηχανή (2-4 πτερύγια, υψηλές ταχύτητες ανέμου) -  **$cp \approx 0.4$** 
  - μεγαλύτερη απόδοση  $\lambda = \frac{\pi \cdot 2R \cdot \omega}{60V} \cong 6$
  - Μέγιστη παραγόμενη ισχύς
- **2-4 πτερύγια** → μικρό βάρος  
→ μικρό κόστος
- **Μικρότερη κόπωση**

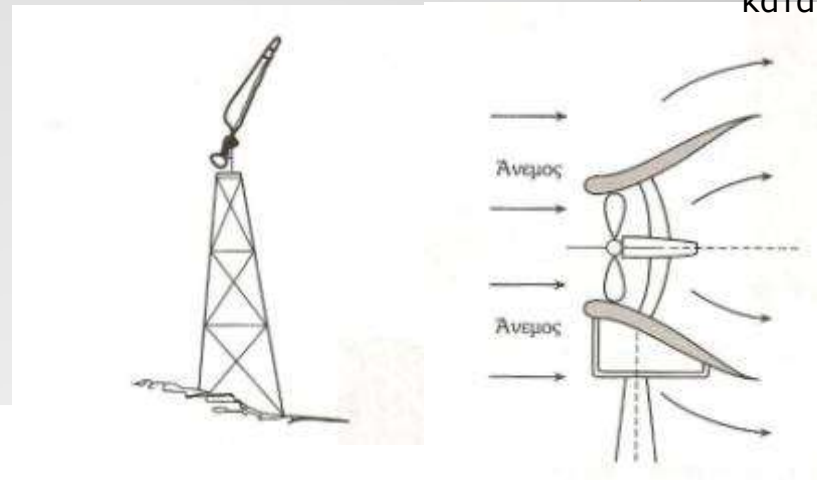


## Αιολικές Μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής

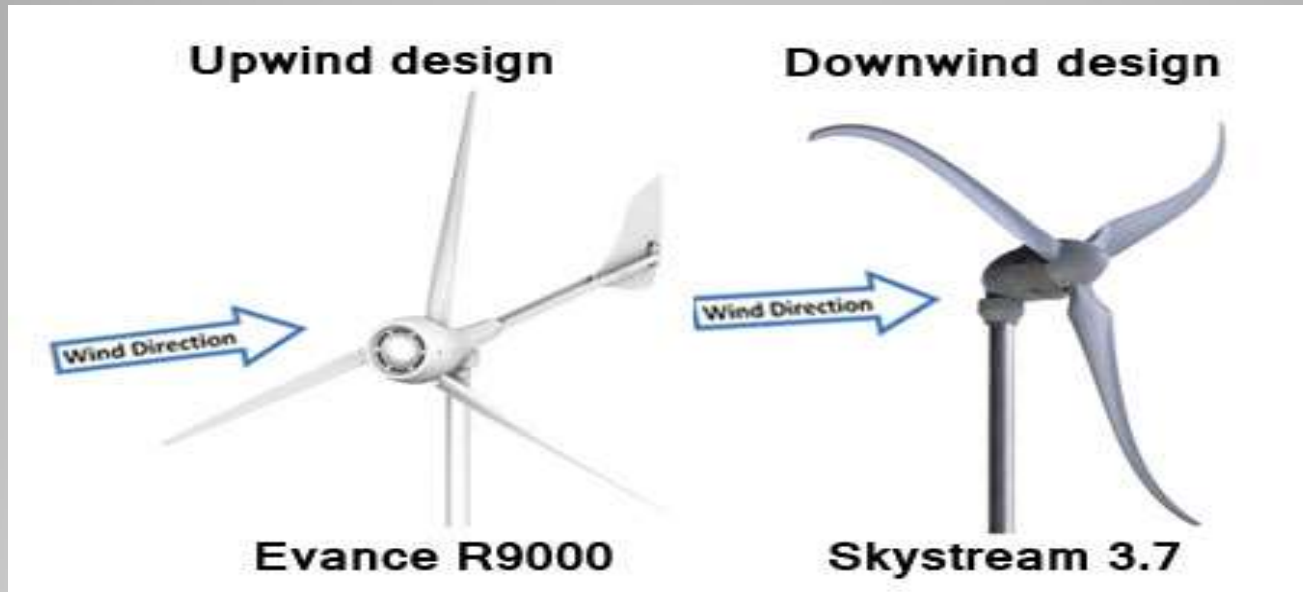
Άλλοι τύποι αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα περιστροφής (μονόπτερη, ηθμό διάχυσης, με εγκάρσιες επιφάνειες στα άκρα των πτερυγίων)



Αύξηση  
της  
ταχύτητας  
κατά 50%



## Αιολικές Μηχανές οριζόντιου άξονα περιστροφής



- Προσανατολισμός προς τον πνέοντα άνεμο
  - Ανάντη - Upwind (με βοήθεια ανεμοδείκτη)
  - Κατάντη - Downwind (με βοήθεια ηλεκτρονικού συστήματος)

## Χαρακτηριστικά AM οριζόντιου άξονα περιστροφής

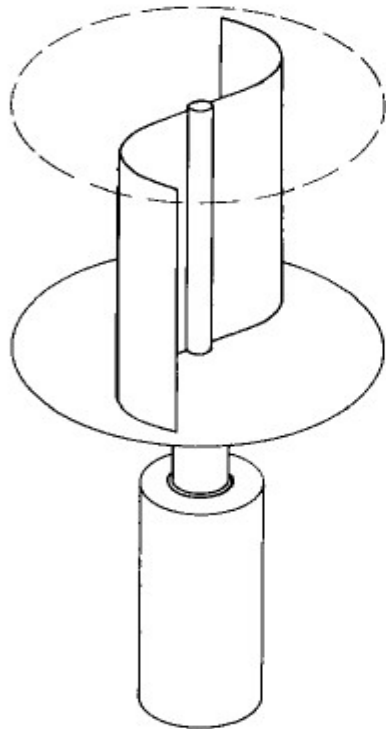
- Πρέπει να μελετηθούν τα εξής
  - Σχεδιασμός πτερωτής
    - I. αριθμός πτερυγίων
    - II. Πλάτος πτερυγίων
    - III. Αεροτομή
    - IV. Συστροφή (twist)
    - V. Βήμα (Pitch) (Stall regulated)
  - Συμπεριφορά της μηχανής στην εκκίνηση, επιβράδυνση κλπ
  - Ρύθμιση βήματος των πτερυγίων (pitch regulated)
    1. Έλεγχος & περιορισμός ισχύος για μεγαλύτερες της ονομαστικής ταχυτητες
    2. Διατήρηση σταθερών στροφών
    3. Για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης σε διάφορες ταχύτητες
    4. Καθορισμός βήματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή

- Μελέτη αυτοματισμών σε σχέση με την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και την ταχύτητα εξόδου
- Προσανατολισμός πτερωτής
  1. Yaw system-
  2. Καθοδηγητικό πτερυγιο
- Αντοχή των υλικών κατασκευής των πτερυγίων
  1. Καταλληλα υλικά και μελέτη τάσεων & ταλαντώσεων
- Προσδιορισμός του ύψους από το έδαφος του άξονα της πτερωτής
- Οσο ψηλότερα τοσο ο ανεμος είναι αδιαταραχτος
  1. Τραχύτητα,εμπόδια αυξάνουν το υψος του πυργου και μαζι το κοστος
- Κατασκευή και θεμελίωση του πύργου στήριξης
  1. Αεροδυναμική,σταθερότητα,αντοχή πυργου
- Επίδραση του πύργου στήριξης στη ροή του αέρα
- Μορφή του πεδίου ροής πίσω από την πτερωτή
  1. Επίδραση της Α/Γ στο περιβάλλον και στις υπόλοιπες Α/Γ
- Δυνατότητα τοποθέτησης πολλών ΑΜ σε σειρές

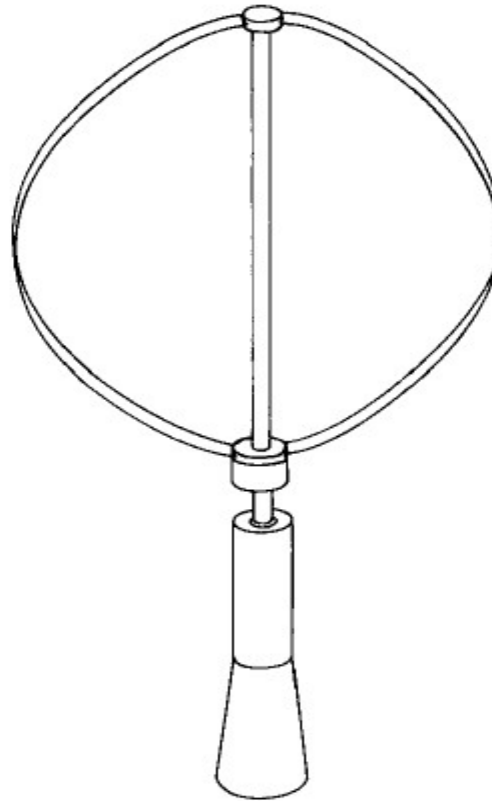
## Αιολικές Μηχανές

- Κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες

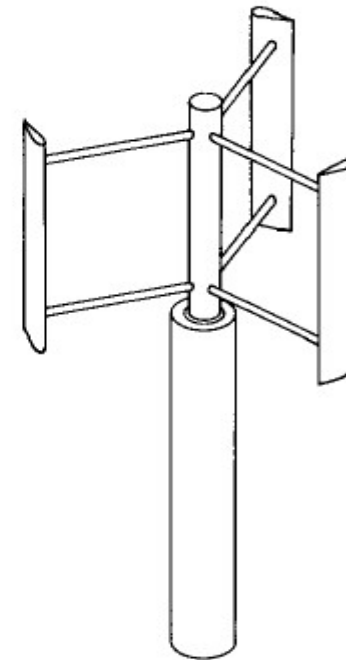
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor



H-Rotor



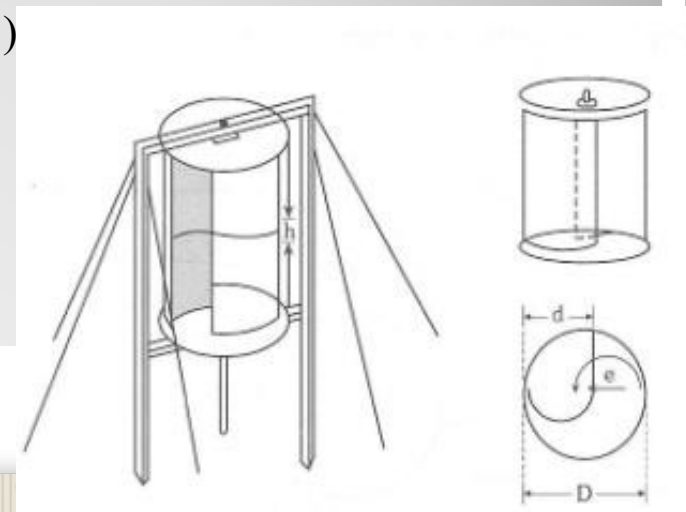
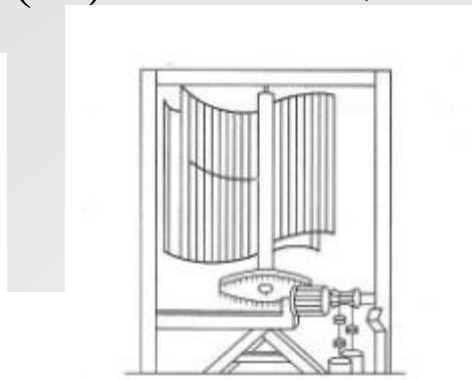
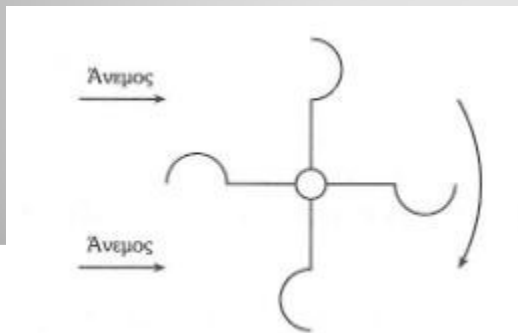
## Drag types

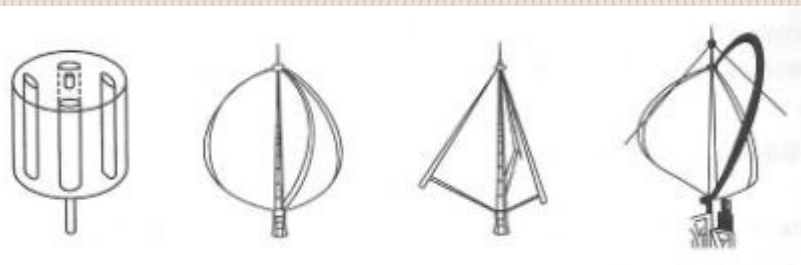
- i) Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο**
  - $0.3 < \lambda < 0.9$   $c_p < 0.35$
- ii) Πανεμόνιο (αργόστροφη μηχανή)**
  - $c_p = \text{μικρό}$
- iii) Μηχανή του LAFOND**
  - $0.4 < \lambda < 0.9$   $c_p = \text{μικρό}$
- iv) Μηχανή Τύπου SAVONIUS**
  - $0.9 < \lambda < 1$   $c_p = 0.25$
  - Μέγιστη παραγόμενη ισχύς



$V_0 =$

$$P = 0.16 \cdot S \cdot V^3 (W) \quad S = h \cdot (2d - e)$$





## Lift type

### 1. Μηχανές σταθερών πτερυγίων (DARRIEUS)

1.  $C_p = c_m \lambda$ ,  $c_m =$  συντελεστής ροπής του συστήματος

2.  $c_p \approx 0.42$

$$P = 0.16 \cdot S \cdot V^3 (W)$$

3. Μέγιστη παραγόμενη ισχύς

$$\lambda = \sqrt{\frac{5R}{b \cdot l}}$$

b: σύνθετη συνάρτηση εξαρτώμενη από τη γεωμετρία του συστήματος  
 l: μήκος χορδής πτερυγίων  
 R: μέγιστη απόσταση του πτερυγίου από το κέντρο του συστήματος, κάθετα στον κατακόρυφο άξονα

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Απλότητα και οικονομία κατασκευής
2. Σύστημα ελαφρό δεν χρειάζεται μεγάλο πύργο
3. Δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού
4. Δεν χρειάζεται ρύθμιση περιορισμού ισχύος
5. Τοποθέτηση κοντά στο έδαφος

### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1. Χαμηλή απόδοση
2. Έλλειψη ροπής εκκίνησης



# Πού τοποθετούμε τις ανεμογεννήτριες και γιατί;

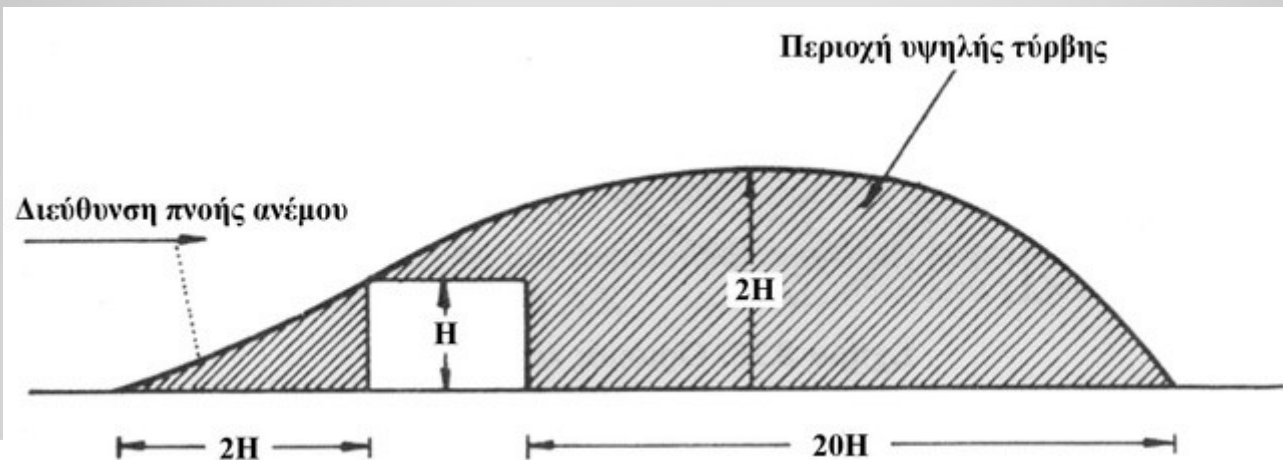
- ⦿ Στα **χερσαία** αιολικά πάρκα
- ⦿ Στα **υπεράκτια** αιολικά πάρκα



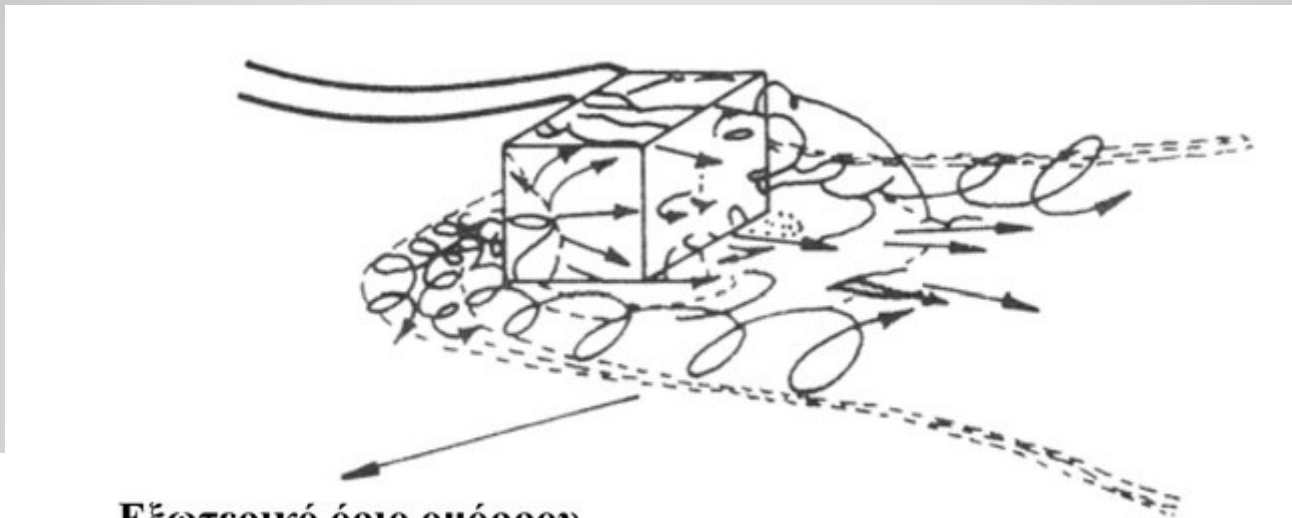
# Χωροθέτηση αιολικών πάρκων

Η αιολική ισχύς μειώνεται από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, όπως δέντρα, κτήρια κλπ. Η επίδραση ενός εμποδίου που παρεμβάλλεται στη ροή του ανέμου στην αιολική ισχύ μπορεί να επεκταθεί καθ' ύψος έως δύο φορές το ύψος του εμποδίου και κατά μήκος έως είκοσι φορές το ύψος του εμποδίου κατά την κατεύθυνση πνοής του ανέμου (βλέπε σχήμα 1).

Αν μία ανεμογεννήτρια βρίσκεται εντός της περιοχής στην οποία η ροή του ανέμου επηρεάζεται από ένα εμπόδιο, η διαθέσιμη προς αξιοποίηση αιολική ισχύς θα είναι μειωμένη, σε σχέση με την ισχύ του ανέμου πριν το εμπόδιο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αεροδυναμική σκίαση ανεμογεννητριών, ή απλά σκίαση ανεμογεννητριών. Η περιοχή μειωμένης αιολικής ισχύος πίσω από το εμπόδιο ονομάζεται ομόρρους.

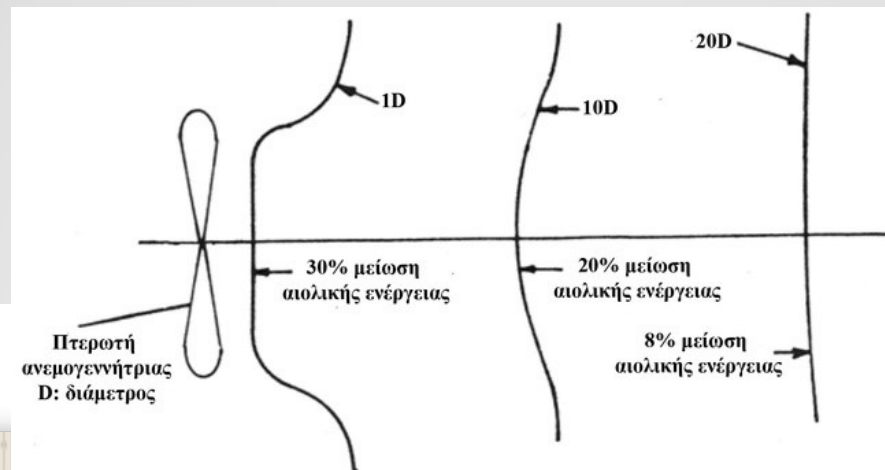


- Εντός του ομόρρου ενός εμποδίου η ροή του ανέμου εμφανίζει υψηλή τύρβη και μειωμένη κινητική ενέργεια (βλέπε σχήμα 2). Εκτός από τη μειωμένη αιολική ισχύ εντός του ομόρρου, η έντονη τυρβώδης ροή δύναται να προκαλέσει ισχυρή καταπόνηση λόγω κόπωσης στα φτερά μιας ανεγερμοννήτριας, που μακροπρόθεσμα μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική αστοχία.
- Η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή ο ακριβής καθορισμός των θέσεων εγκατάστασης των ανεμογεννητριών εντός των ορίων του γηπέδου εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, θα πρέπει να εκτελεστεί λαμβάνοντας υπόψη όλα τα υφιστάμενα εμπόδια στην ευρύτερη περιοχή, ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο της σκίασης.



**Εξωτερικό όριο ομόρρου**

- Η **αεροδυναμική σκίαση** σε μία ανεμογεννήτρια μπορεί να προκύψει και από άλλες ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου. Η πτερωτή μιας ανεμογεννήτριας δεσμεύει μέρος από την κινητική ενέργεια του πνέοντος ανέμου και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική.
- **Πίσω από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας η κινητική ενέργεια του ανέμου εμφανίζεται μειωμένη κατά το 1/3 περίπου σε σχέση με αυτήν μπροστά από την πτερωτή.** Η περιοχή πίσω από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας, στην οποία η κινητική ενέργεια του ανέμου είναι μειωμένη, ονομάζεται περιοχή σκίασης της ανεμογεννήτριας.
- **Το πλάτος της περιοχής σκίασης μιας ανεμογεννήτριας αυξάνεται με την απόσταση από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας.** Η ταχύτητα του ανέμου εντός της περιοχής σκίασης αυξάνεται σταδιακά επίσης με την απόσταση από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας. **Η κινητική ενέργεια του ανέμου αποκαθίσταται πλήρως σε απόσταση κατά την κατεύθυνση πνοής του ανέμου περίπου ίση με είκοσι φορές τη διάμετρο της πτερωτής (βλέπε σχήμα 3).**



## Απώλειες σκίασης

- Το ποσοστό της μείωσης της αιολικής ενέργειας που δέχεται μία ανεμογεννήτρια λόγω του ότι βρίσκεται εντός της περιοχής σκίασης μιας άλλης ανεμογεννήτριας **ονομάζεται απώλειες σκίασης.**
- Ένας συνολικός συντελεστής απωλειών σκίασης ίσος με 5% σε ένα αιολικό πάρκο σημαίνει ότι η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύνολο των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου θα ισούται με το 95% της συνολικής παραγωγής των ανεμογεννητριών, που θα προέκυπτε αν δεν υπήρχε σκίαση μεταξύ των ανεμογεννητριών ή από εξωτερική εμπόδια. **Οι απώλειες σκίασης σε ένα αιολικό πάρκο εξαρτώνται από:**
  - τις αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών
  - τις σχετικές θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών
  - τις κύριες διευθύνσεις πνοής του ανέμου και τη συχνότητα με την οποία εμφανίζονται.

## Η σωστή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών

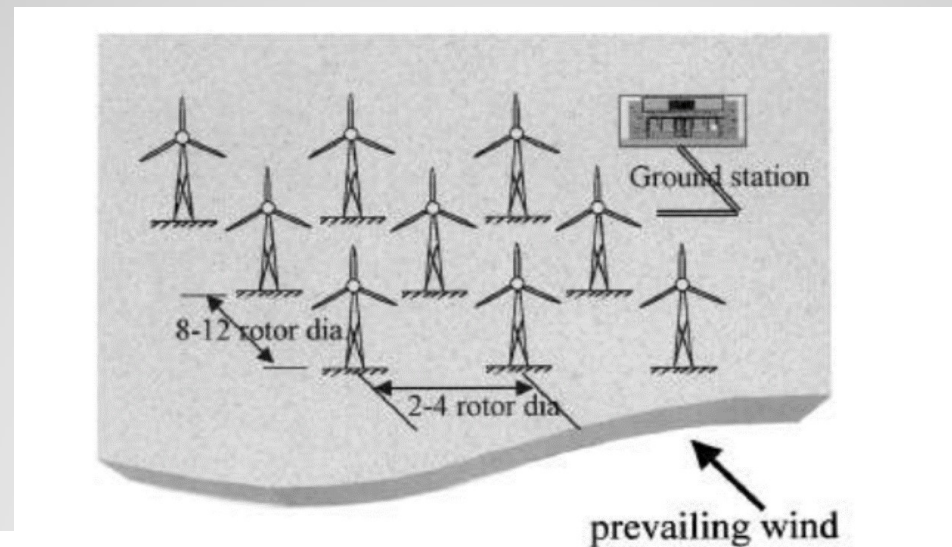
- Η σωστή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις ανωτέρω τρεις παραμέτρους και να στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των απωλειών σκίασης σε όλες τις ανεμογεννήτριες και συνολικά στο αιολικό πάρκο.
- Πριν από τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών θα πρέπει πάνω στο χάρτη αιολικού δυναμικού να εντοπιστούν οι δυνητικές θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών με το υψηλότερο αιολικό δυναμικό. Είναι προφανές ότι, ανεξάρτητα από τη συνολική διαθέσιμη έκταση του γηπέδου του αιολικού πάρκου, οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε συγκεκριμένες θέσεις που εμφανίζουν ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό, κατά προτίμηση το υψηλότερο διαθέσιμο, ώστε να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αυτές.
- Το κατώτατο αποδεκτό όριο αιολικού δυναμικού για εγκατάσταση ανεμογεννητριών καθορίζεται με βάση τις προσδοκίες και τις απαιτήσεις του επενδυτή.
- Αφού καθοριστούν οι αποδεκτές θέσεις για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών εντός των ορίων του συνολικού διαθέσιμου γηπέδου εγκατάστασης, ξεκινά η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών.

## Ελάχιστες αποστάσεις

- Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο ανεμογεννητριών χωροθετημένων σε άξονα παράλληλο με την κύρια κατεύθυνση πνοής του ανέμου θα πρέπει να τηρείται τουλάχιστον ίση με  $7 \cdot D$
- Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανεμογεννητριών χωροθετημένων σε άξονα κάθετο με την κύρια κατεύθυνση πνοής του ανέμου θα πρέπει να καθορίζεται τουλάχιστον ίση με  $2,5-3 \cdot 0 \cdot D$ , όπου  $D$  είναι η διάμετρος της πτερωτής των ανεμογεννητριών.

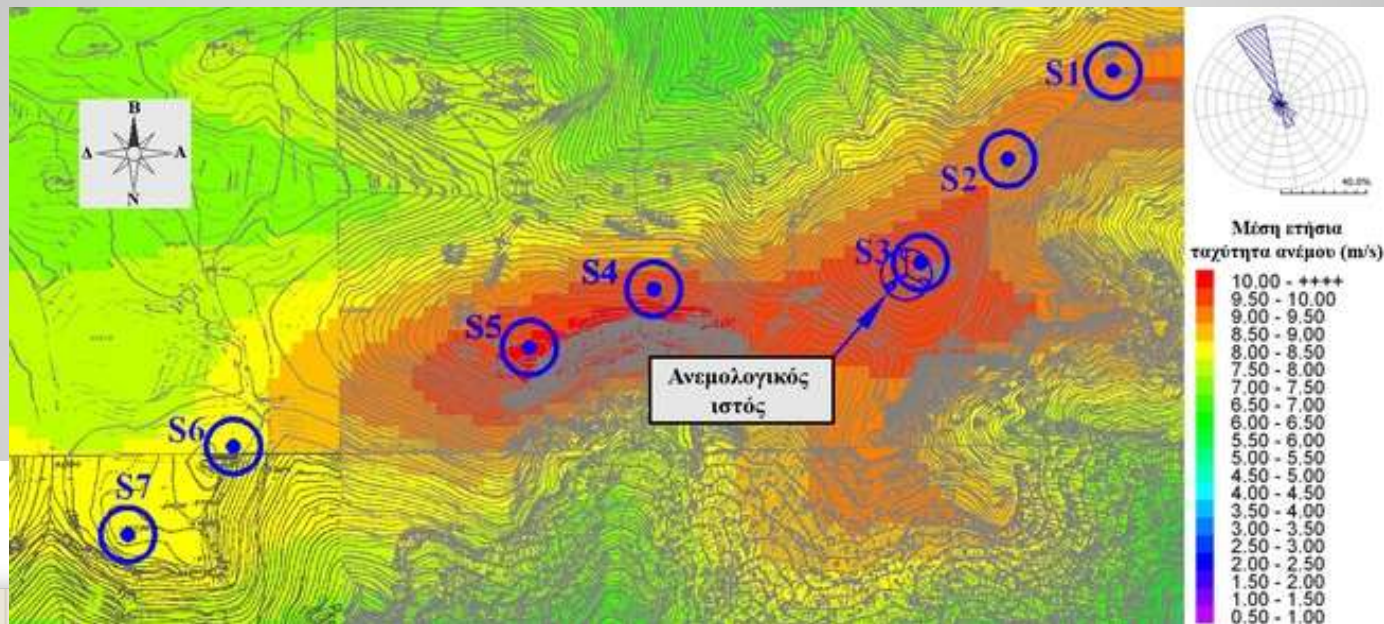
## Βέλτιστες αποστάσεις

- Οι βέλτιστες αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ έχει βρεθεί να κυμαίνονται:
- από **8 έως 12 διαμέτρους πτερυγίων** στην κατεύθυνση του ανέμου και
- **2 έως 4 διαμέτρους πτερυγίων**, στην κάθετη διεύθυνση ως προς αυτή του ανέμου



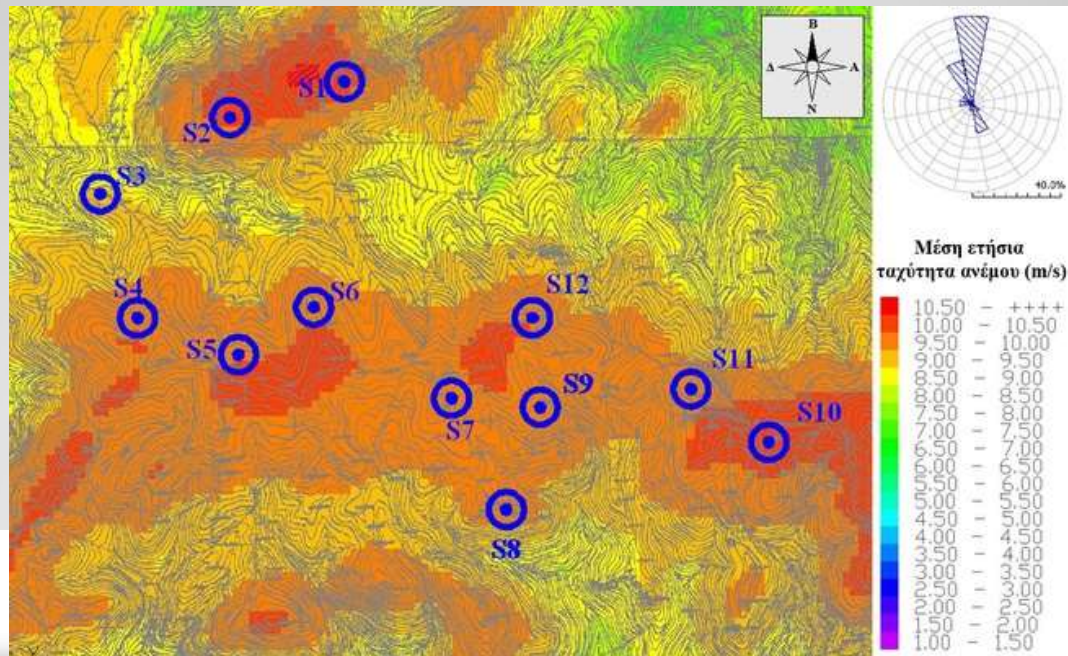
# Παραδείγματα χωροθέτησης α/γ

- Στο σχήμα παρουσιάζεται η τελική χωροθέτηση 7 ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ 3.000kW και διάμετρο πτερωτής 90m, σε κορυφογραμμή στη νότια Κρήτη.
- Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται το ροδόγραμμα πνοής ανέμου με βάση μετρήσεις αιολικού δυναμικού.
- Οι ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί σε θέσεις με μέσες ετήσιες ταχύτητες ανέμου υψηλότερες των 8m/s.
- Η μορφολογία της κορυφογραμμής επιτρέπει τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε άξονα κάθετο με την κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου.
- Οι ευνοϊκές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή και ο μικρός αριθμός ανεμογεννητριών επιτρέπουν τη χωροθέτησή τους κατά τρόπο που συνεπάγεται ελαχιστοποίηση των ετήσιων απωλειών σκίασης σε κάθε ανεμογεννήτρια σε ποσοστά μικρότερα του 1%.



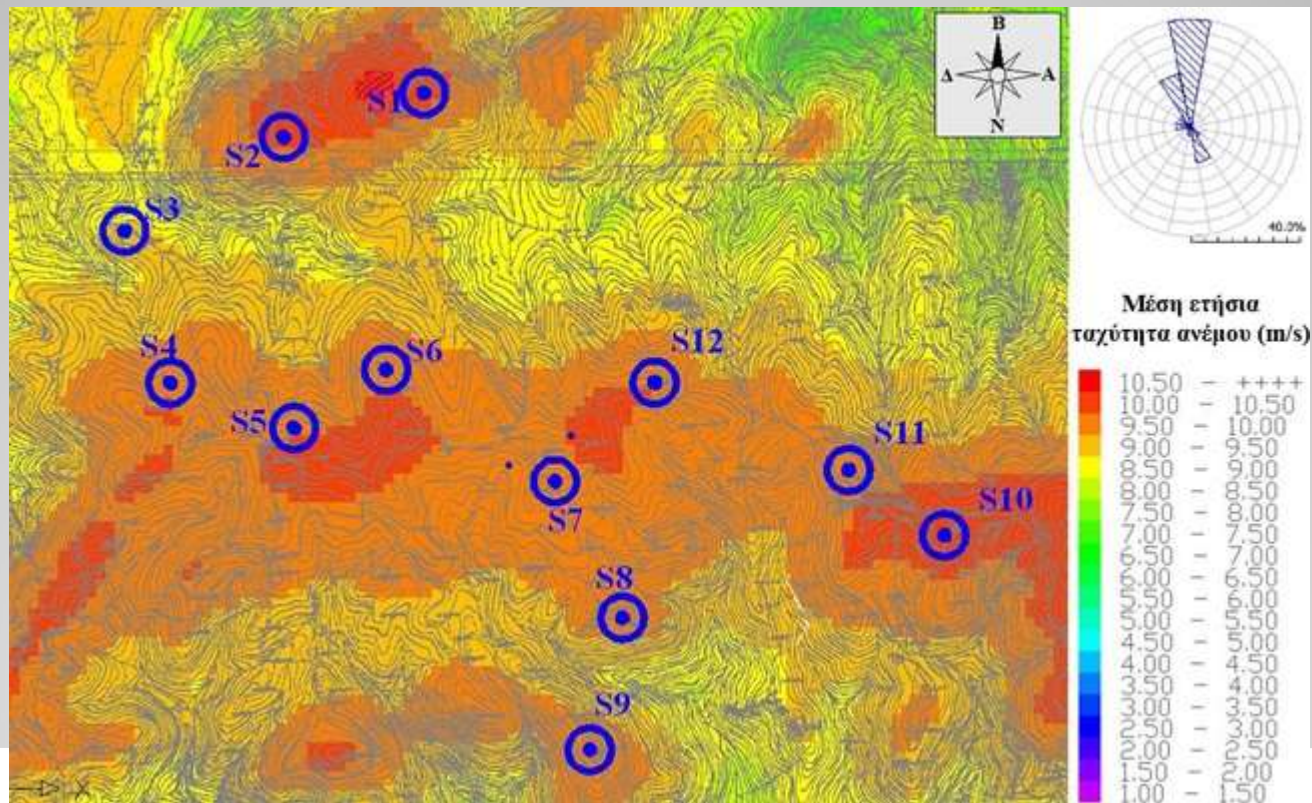
# Παραδείγματα χωροθέτησης α/γ

- Στα σχήματα παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές χωροθετήσεις αιολικού πάρκου δώδεκα ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ 3MW και διάμετρο πτερωρής 90m. Στα ίδια σχήματα παρουσιάζονται τα ροδογράμματα πνοής ανέμου με βάση ετήσιες μετρήσεις αιολικού δυναμικού.
- Ο αριθμός των ανεμογεννητριών και η χαμηλή διαθεσιμότητα της έκτασης του γηπέδου εγκατάστασης περιορίζουν τις δυνατότητες για βέλτιστη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου.
- Με την πρώτη χωροθέτηση, η ανεμογεννήτρια S9 χωροθετείται στον ομόρρο του ανεμογεννήτριας S12 και η ανεμογεννήτρια S8 χωροθετείται στους ομόρρους των ανεμογεννητριών S7 και S9, αναφορικά με την κύρια κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες S8 και S9 εμφανίζουν ετήσιες απώλειες σκίασης 12,32% και 13,97% αντίστοιχα.

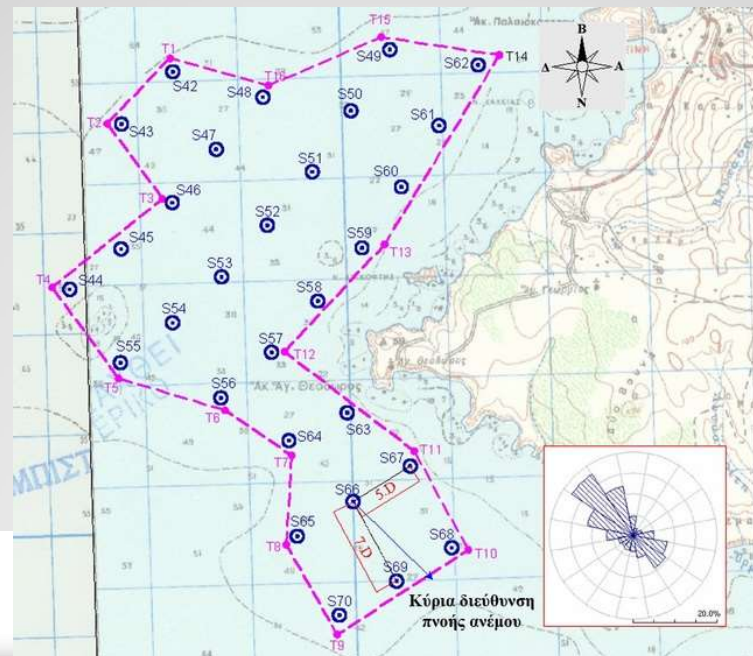


# Παραδείγματα χωροθέτησης α/γ

- Με τη δεύτερη εναλλακτική χωροθέτηση η ανεμογεννήτρια S9 χωροθετείται σε διαφορετική θέση. Οι ετήσιες απώλειες σκίασης των ανεμογεννητριών S8 και S9 μειώνονται αντίστοιχα σε 11,18% και 10,30%.
- Και με τις δύο χωροθετήσεις οι ανεμογεννήτριες χωροθετούνται σε θέσεις με μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 9m/s.



- Τέλος παρουσιάζεται η χωροθέτηση ενός μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ 5MW και διάμετρο πτερωτής 105m σε υπεράκτιο αιολικό πάρκο νοτιοδυτικά της Καρπάθου. Οι ανεμογεννήτριες χωροθετήθηκαν σε γραμμές κάθετες στην κύρια κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Επιπλέον, κάθε ανεμογεννήτρια χωροθετείται στο διάκενο που σχηματίζεται μεταξύ δύο γειτονικών ανεμογεννητριών της σειράς που βρίσκεται μπροστά από αυτή, αναφορικά με την κύρια κατεύθυνση πνοής του ανέμου. Η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ανεμογεννητριών στην ίδια γραμμή διατηρείται ίση με 5 D. Η απόσταση μεταξύ δύο γραμμών χωροθέτησης κάθετων στην κύρια κατεύθυνση πνοής διατηρείται ίση με 7 D. Με αυτές τις βασικές αρχές χωροθέτησης, επιτυγχάνονται ετήσια ποσοστά απωλειών σκίασης στις ανεμογεννήτριες μεταξύ 2,33% και 8,50%.



## Στοιχεία κόστους αιολικών συστημάτων

- Το αρχικό κόστος μίας αιολικής εγκατάστασης (ενός αιολικού πάρκου) διακρίνεται στο:
- κόστος των Α/Γ και
- στο κόστος των περιφερειακών συστημάτων και των εργασιών εγκατάστασης
- (θεμελίωσης και ανέγερσης των πύργων, διασύνδεση με το δίκτυο,
- διαμόρφωση του χώρου, οδοποιία, διαμόρφωση χώρου, αντικεραυνική
- προστασία, μελέτη και επίβλεψη κ.α.)

- Το κόστος των Α/Γ είναι συνάρτηση της ισχύος τους και υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$K_{AG} = \frac{870000}{621 + P_n^{2,05}} + 740 \text{ [€/kW]}$$

- όπου  $K_{AG}$  το **ειδικό κόστος** Α/Γ [€/kW] και  $P_n$  η ονομαστική δυναμικότητα της ΑΓ [kW] (η ονομαστική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα). Έτσι το **κόστος** μίας Α/Γ είναι:

$$K_{AG} = K_{AG} \times P_n \text{ [€]}$$

- Λαμβάνοντας υπόψη και τα κόστη των περιφερειακών συστημάτων (επιμερισμένα ανά Α/Γ) και τα κόστη εγκατάστασης, το **ολικό ειδικό κόστος** μίας Α/Γ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{ΑΓ,ολ.} = K_{ΑΓ} \times 3,971 \times P_n^{-0,14} \text{ [€/kW]}$$

- και το **ολικό κόστος** μίας Α/Γ, από τη σχέση:

$$K_{ΑΓ,ολ.} = K_{ΑΓ,ολ.} \times P_n \text{ [€]}$$

- ενώ το **αρχικό κόστος του αιολικού πάρκου** από τη σχέση:

$$K_{ΑΠ} = V \times K_{ΑΓ,ολ.}$$

- *Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι για τις αιολικές μηχανές*
  - Ατμοσφαιρικές αναταράξεις
    - Ελάττωση της συλλεγόμενης αιολικής ισχύος
    - Ταλαντώσεις στο σύστημα και άνισες πιέσεις στην πτερωτή, ελαττώνουν το χρόνο ζωής
  - Διατμητικός άνεμος
  - Μέγιστες ταχύτητες ανέμου (πτερωτή και πύργο στήριξης)
  - Καταιγίδες (ισχυροί άνεμοι, δυνατή βροχή, χαλάζι κλπ.)
  - Πλημμύρες/Κατολισθήσεις
  - Ακραίες θερμοκρασίες του αέρα
  - Αλάτι και σκόνη

- *Περιβαλλοντικοί κίνδυνοι από τις αιολικές μηχανές*

- Αλληλεπίδραση αιολικών μηχανών
- Αλλοίωση της αισθητικής του περιβάλλοντος χώρου
- Κλιματολογικές αλλοιώσεις (?)
- Επίδραση στην πανίδα
- Ηχορύπανση
- Ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις
- Απαλλοτρίωση ή αγορά γης
- Ασφάλεια του πληθυσμού
- Διαστήματα σκίασης