

# Υδρομετεωρολογία

## Αιολική ενέργεια



Νίκος Μαμάσης και Δημήτρης Κουτσογιάννης  
Τομέας Υδατικών Πόρων – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010

# ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ

- **ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ**
- **ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ**
- **ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ**
- **ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**
- **ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**
- **ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αιολική ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου

- Χρησιμοποιείται από την αρχαιότητα στη ναυσιπλοΐα
- Πρόκειται για ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με ανεξάντλητη και χωρίς κόστος πρώτη ύλη που δεν ρυπαίνει το περιβάλλον
- Αξιοποιείται στην παραγωγή μηχανικής (αλευρόμυλοι, άντληση υπόγειων νερών, αποστράγγιση) και ηλεκτρικής (ανεμογεννήτριες) ενέργειας

Το όνομα προέρχεται από την ελληνική μυθολογία. Ο Αίολος είχε οριστεί από τον Δία κλειδοκράτορας των ανέμων και τους προκαλούσε ή τους σταματούσε κατά βούληση. Οι οκτώ άνεμοι ήταν: Βορέας, Καικίας, Απηλιώτης, Εύρος, Νότος, Λιψ, Ζέφυρος, Σκίρων

*‘Κατόπιν φτάσαμε σε ένα νησί, την Αιολία, ένα νησί που ζούσε ο Αίολος, γιός του Ιπποτάδη, φίλος των αθάνατων θεών. Το νησί ήταν πλωτό ζωσμένο από άρρηκτα χάλκινα τείχη, που υψώνονταν κατακόρυφα στα βράχια’ (Οδύσσεια 10.1)*

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- Η πρώτη χρήση αιολικής ενέργειας έγινε στη ναυσιπλοΐα, ενώ οι πρώτοι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού.
- Οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) κατασκευάστηκαν στην Περσία τον 6<sup>ο</sup> έως τον 9<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ., ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13<sup>ο</sup> αιώνα μ.Χ.
- Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλου (οριζόντιου άξονα) από τον 13<sup>ο</sup> αιώνα και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους
- Το 17<sup>ο</sup> αιώνα η ‘τεχνολογία’ μεταφέρεται στην Αμερική όπου οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για άντληση νερού
- Στην Ελλάδα (ειδικότερα στο Αιγαίο) η χρήση ανεμομύλων χρονολογείται από το 13ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν 10000 ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, 2500 στην υπόλοιπη Κρήτη, και 600 στη Ρόδο
- Ο πρώτος ανεμόμυλος για παραγωγή ηλεκτρισμού κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio. Είχε διάμετρο πτερωτής 17 μέτρα και ισχύ 12 kW
- Σήμερα η Δανία χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό έχει τα πρωτεία στην κατασκευή αλλά και στην χρήση ανεμογεννητριών
- Πριν 30 χρόνια, μια τυπική ανεμογεννήτρια ήταν της τάξης των 25 kW. Σήμερα, οι αιολικές μηχανές που κατασκευάζονται είναι της τάξης των 750-2 500 kW

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας

- Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα (δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέριους ρύπους, παρέχει προστασία έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων)
- Ιδιαίτερα φιλική στο περιβάλλον με αμελητέες επιδράσεις στη πανίδα και ελάχιστες απαιτήσεις γης
- Τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική, γρήγορη και τυποποιημένη συναρμολόγηση και εγκατάσταση
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Ελεύθερη, άφθονη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας απώλειες μεταφοράς ενέργειας
- Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία κάθε χώρας
- Δημιουργεί θέσεις απασχόλησης στην περιφέρεια
- Σύστημα παραγωγής ενέργειας με μικρές απώλειες
- Ανεξάρτητη από κεντρικά δίκτυα διανομής

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας

- Ο εκπεμπόμενος **θόρυβος** προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα και από την περιστροφή των πτερυγίων. Εκτιμάται σε περίπου 44 db σε απόσταση 200 m για ταχύτητα ανέμου 8 m/s
- Η **οπτική όχληση** είναι κάτι υποκειμενικό αλλά κάποιος που είναι ευνοϊκά διακείμενος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται οπτικά τις ανεμογεννήτριες. Δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές από απόσταση, πρέπει να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης τους στο τοπίο.
- Η **επίδραση στις γεωργικές και κτηνοτροφικές** δραστηριότητες. Το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις.
- Το ποσοστό των **πουλιών που σκοτώνονται** ετησίως από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες είναι ασήμαντο (0.5%) σχετικά με το αυτό που οφείλεται σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (60%). Πάντως θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση τυχόν προστατευόμενες περιοχές και να εξετάζεται η τοποθέτηση συστήματος υπερήχων
- Η απρόβλεπτη **διακύμανση ενέργειας** που δίνουν οι αιολικές μηχανές
- Σχετικά **υψηλό κόστος** έρευνας του αιολικού δυναμικού και εγκατάστασης της μηχανής

# ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

## Πύργος των Ανέμων

Το επίσημο όνομα είναι **Ωρολόγιο του Κυρρήστου**, (το κατασκεύασε ο Ανδρόνικος ο Κύρρηστος τον 1<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ.). Είχε ανεμοδείκτη, ηλιακό ρολόι και ίσως υδραυλικό ρολόι)



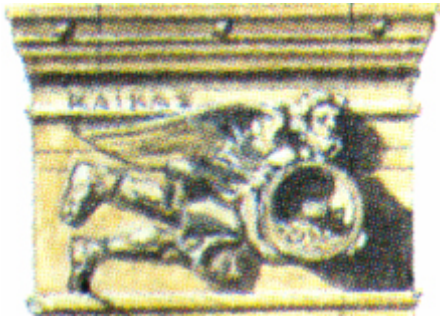
Αναπαράσταση του Πύργου των Ανέμων (J. Stuart & N.Revett)



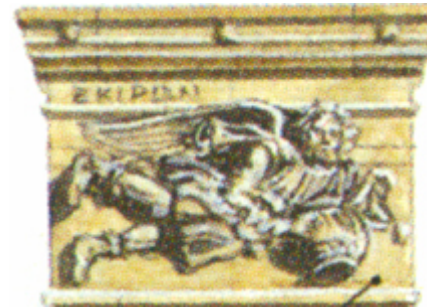
# ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Βορέας (Τραμουντάνα)

Σκίρων (Μαΐστρος)



Καικίας (Γραίγος)



Ζέφυρος (Πουνέντες)



Οι οκτώ βοηθοί του Αιόλου απεικονίζονται στον πύργο των Αέρηδων (κτίσμα του 1<sup>ου</sup> π.Χ. αιώνα) στην Πλάκα.

Απηλιώτης (Λεβάντες)



Λιψ (Γαρμπής)



Νότος (Οστρια)



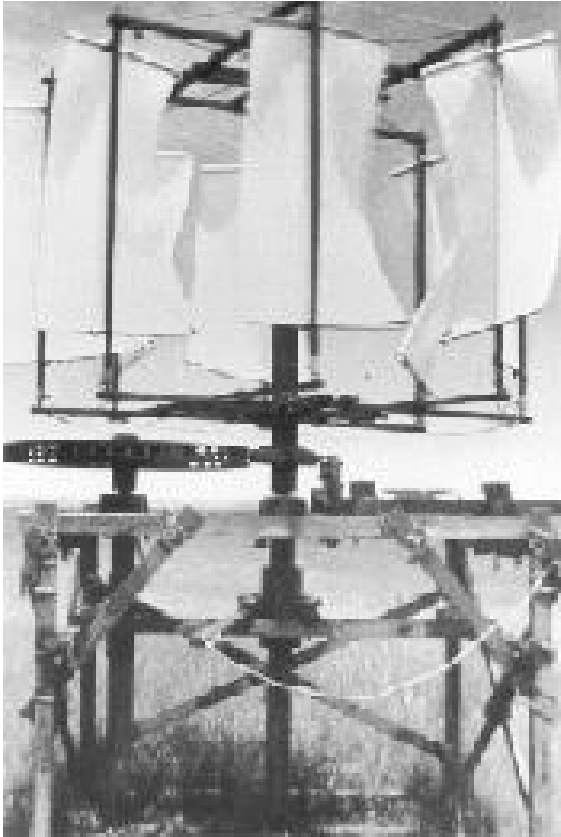
Εύρος (Σιρόκος)





# ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Αντίγραφο του πρώτου  
Περσικού μύλου



Μεσογειακός

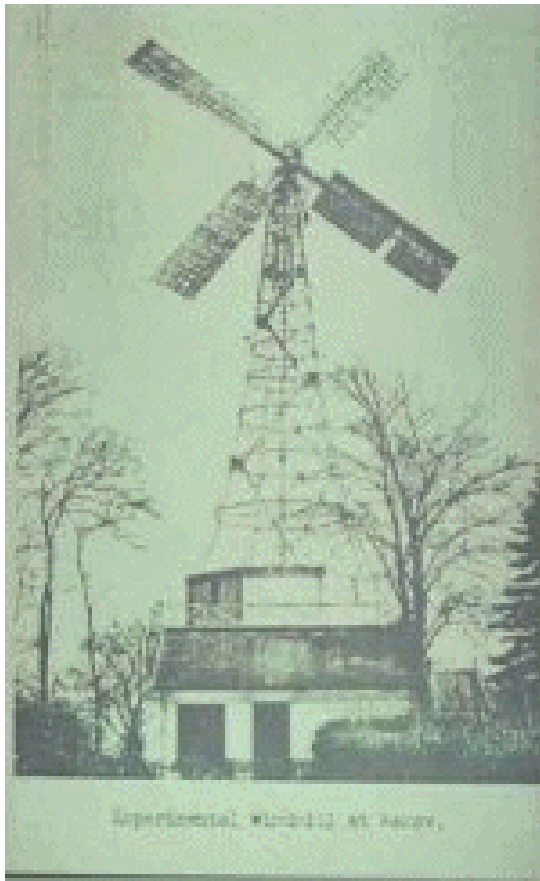


Αμερικάνικος  
(18<sup>ος</sup> αιώνας)



# ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Δανικός



Ολλανδικός



Αγγλικός



# ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

## Θεωρητική αιολική ισχύς

$$I = E / t = (1/2) m V^2 / t = (1/2) \rho L A V^2 / t = (1/2) \rho A V^3$$

$I$  αιολική ισχύς (W)

$E$  κινητική ενέργεια (J)

$t$  χρόνος (s)

$m$  μάζα αέρα (kg)

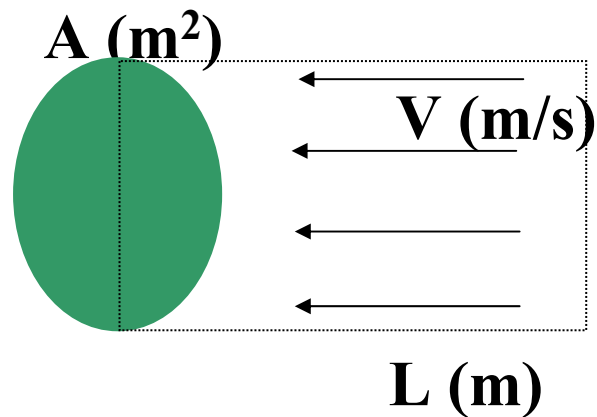
$V$  ταχύτητα ανέμου (m/s)

$\rho$  πυκνότητα αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

$A$  επιφάνεια αναφοράς (m<sup>2</sup>)

$L$  διαδρομή ανέμου σε χρόνο  $t$  (m)

## Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας



$$I = (1/2) C \eta_M \eta_E \rho A V^3$$

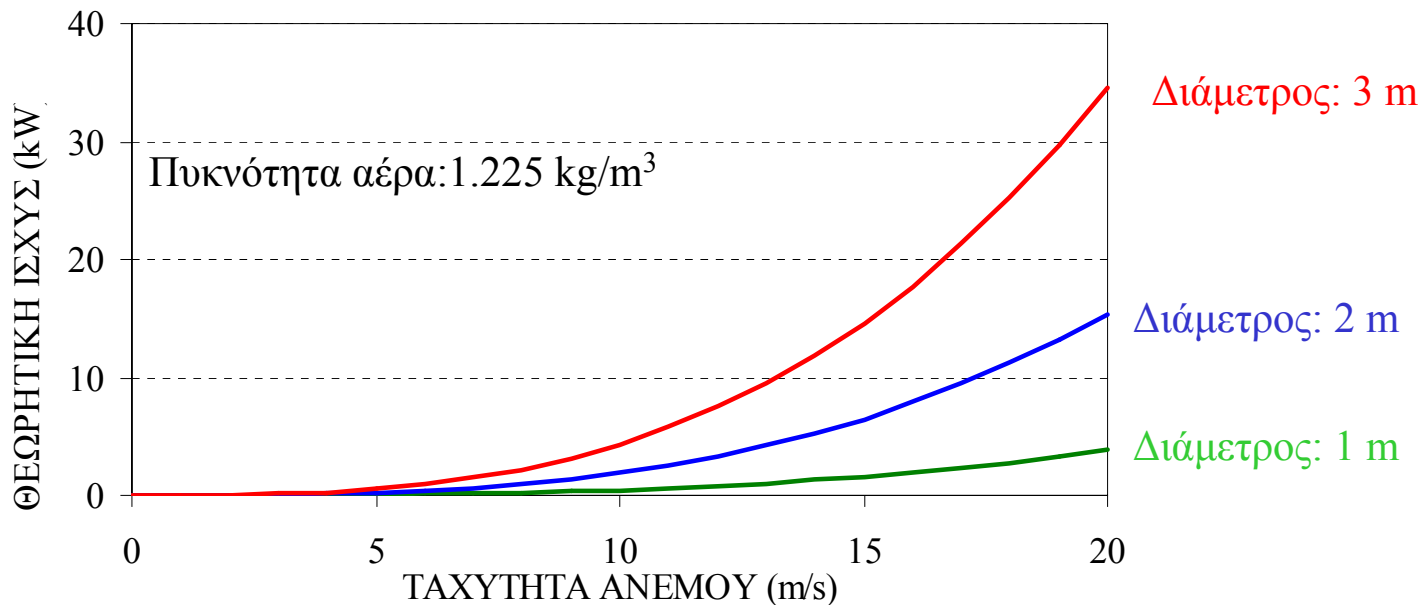
$C$  συντελεστής ισχύος

$\eta_M$  βαθμός απόδοσης μηχανικού συστήματος

$\eta_H$  βαθμός απόδοσης ηλεκτρομηχανικής μετατροπής

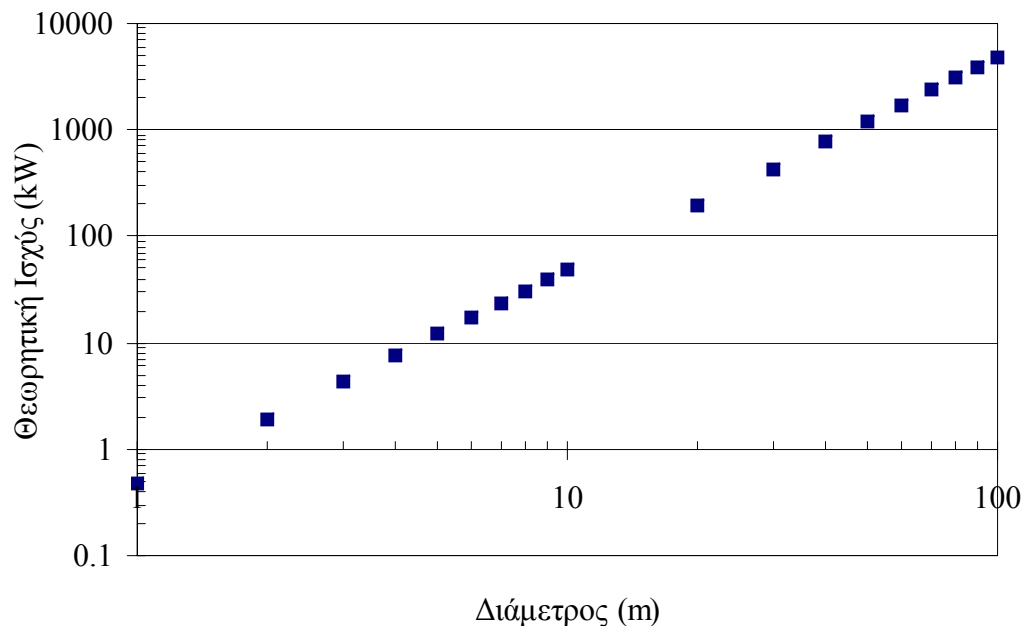
# ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

## Θεωρητική αιολική ισχύς συναρτήσει της ταχύτητας



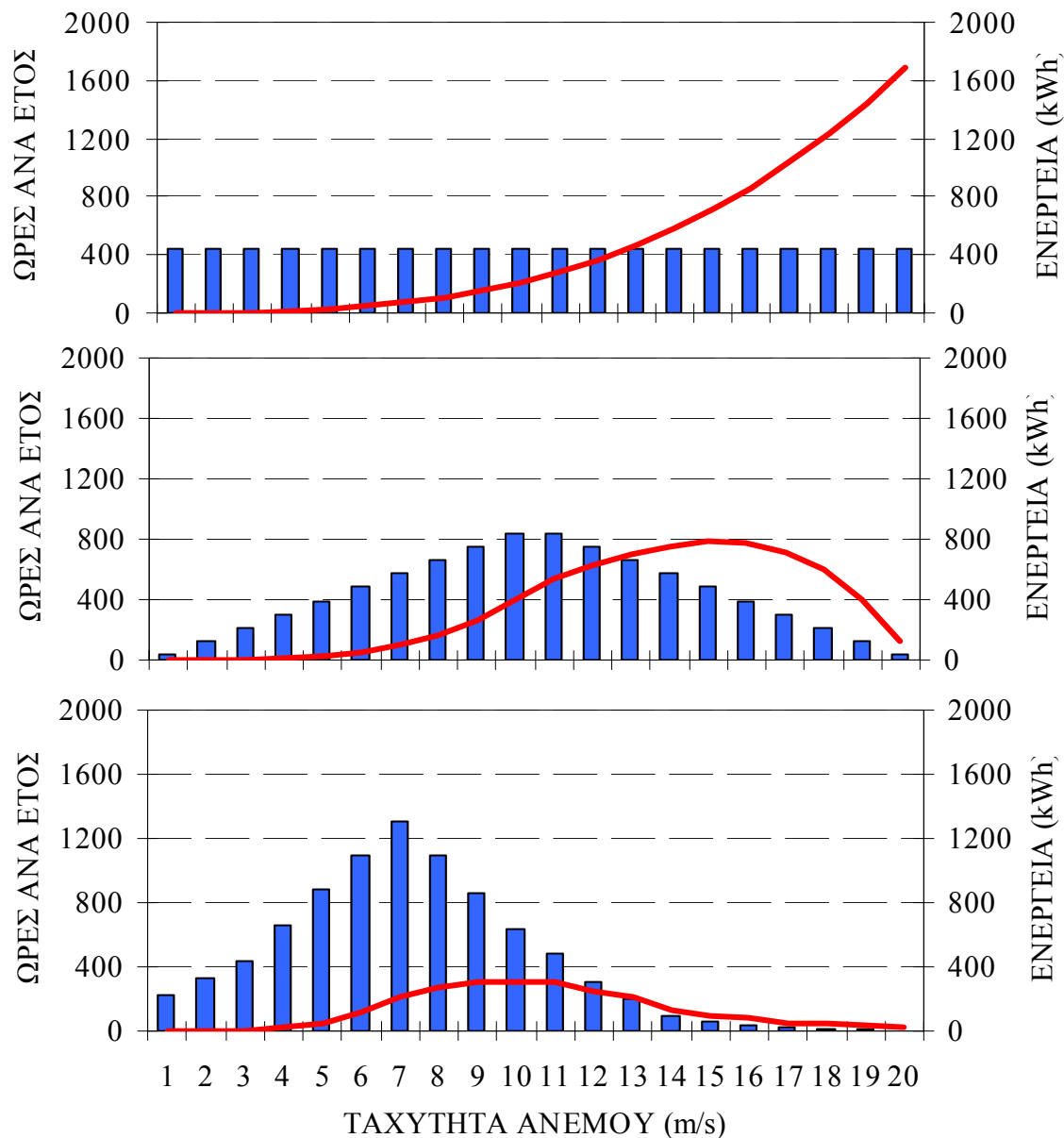
## Θεωρητική ισχύς συναρτήσει της διαμέτρου (ταχύτητα 10 m/s)

D = 1 m	I = 0.48 kW
D = 10 m	I = 48.1 kW
D = 100 m	I = 4.8 MW



# ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

## Θεωρητική αιολική ενέργεια για D=1 m



### Ισοκατανομή ταχυτήτων ανέμου

Συνολική ενέργεια: 9290 kWh/y  
Μέση τιμή ταχύτητας: 10 m/s  
Ενέργεια μέσης τιμής: 4213 kWh/y

### Συμμετρική κατανομή ταχυτήτων ανέμου

Συνολική ενέργεια: 7040 kWh/y  
Μέση τιμή ταχύτητας: 10.5 m/s  
Ενέργεια μέσης τιμής: 4877 kWh/y

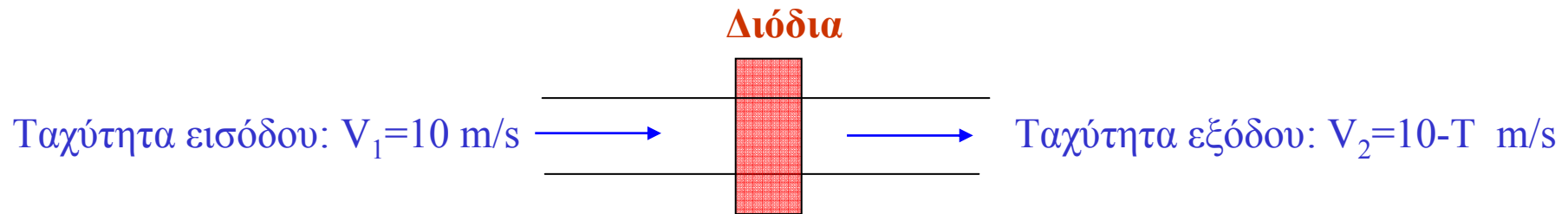
### Τυπική κατανομή ταχυτήτων ανέμου

Συνολική ενέργεια: 2507 kWh/y  
Μέση τιμή ταχύτητας: 7.2 m/s  
Ενέργεια μέσης τιμής: 1582 kWh/y

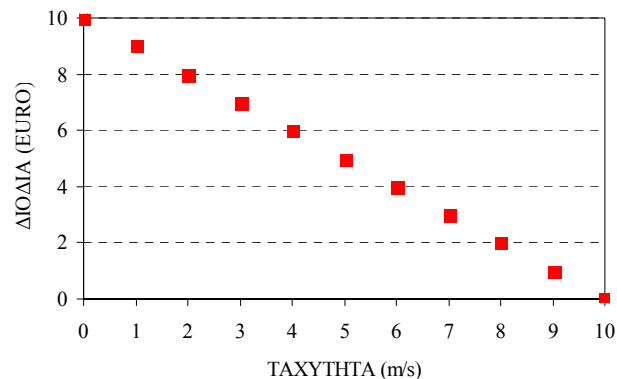
# ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

## Όριο Betz

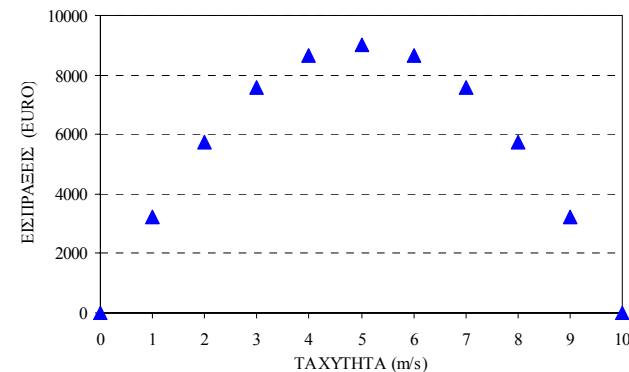
Σε αυτοκινητόδρομο με συνεχή ροή τα αυτοκίνητα εισέρχονται σε σταθμό διοδίων με ταχύτητα  $V_1=10$  m/s και εξέρχονται με ταχύτητα ( $V_2$ ) που είναι συνάρτηση της τιμής των διοδίων  $T$  ( $0 \leq T \leq 10$  EURO) και δίδεται από τη σχέση  $V_2$  (m/s) =  $10 - T$ . Ποια είναι η τιμή των διοδίων που μεγιστοποιεί τις ημερήσιες εισπράξεις;



Τιμή (T): 0-10 EURO



Εισπράξεις (EURO/h)



# ΑΙΟΛΙΚΗ ΙΣΧΥΣ

Κινητική ενέργεια εισόδου

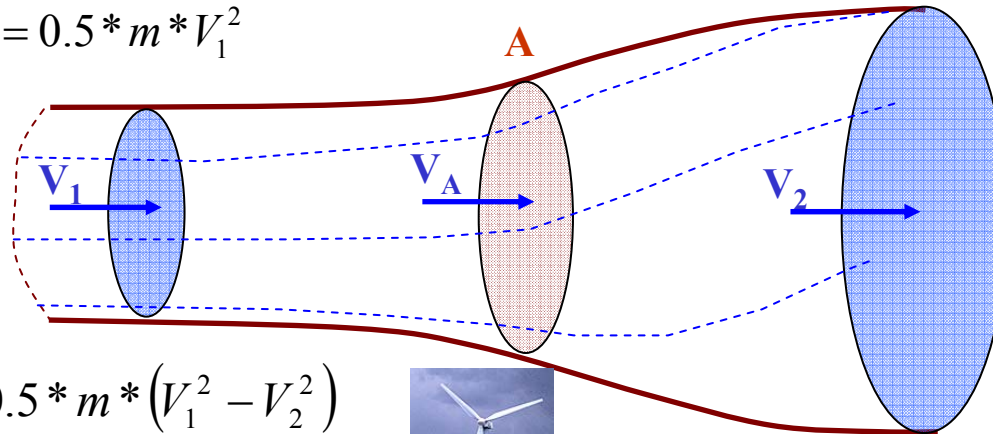
$$E_1 = 0.5 * m * V_1^2$$

*Όριο Betz*

A

Κινητική ενέργεια εξόδου

$$E_2 = 0.5 * m * V_2^2$$



$$dE = 0.5 * m * (V_1^2 - V_2^2)$$



$$m = \rho * A * L \Rightarrow \frac{dm}{dt} = \rho * A * V$$

Ισχύς με βάση την κινητική ενέργεια

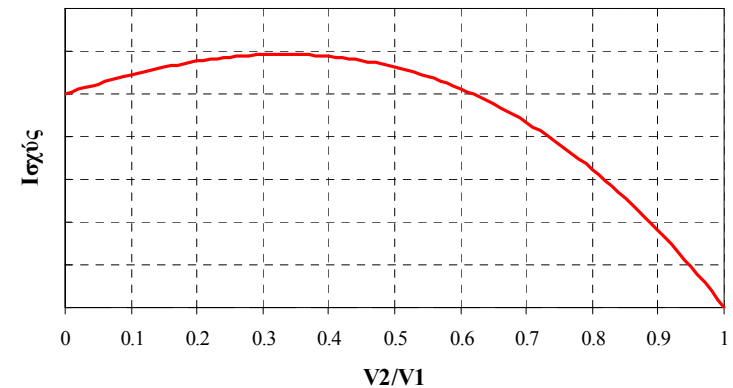
$$\frac{dE}{dt} = I_A = 0.5 * \frac{dm}{dt} (V_1^2 - V_2^2) \Rightarrow I_A = 0.5 * \rho * A * V_A * (V_1^2 - V_2^2)$$

$$V_A = 0.5 * (V_1 + V_2)$$

$$I_A = 0.25 * \rho * A * V_1^3 * \left[ 1 + \frac{V_2}{V_1} - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \right]$$

$$\frac{dI_A}{d\left(\frac{V_2}{V_1}\right)} = 0 \Rightarrow 3 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 + 2 * \left(\frac{V_2}{V_1}\right) - 1 = 0 \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$$

$$I_{A_{MAX}} = \frac{16}{27} * 0.5 * \rho * A * V_1^3$$



# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Οριζοντίου άξονα





# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

*Υπεράκτια αιολικά πάρκα*



# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ



*Κοπεγχάγη*

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Κατακόρυφου άξονα



Η κατακόρυφη ανεμογεννήτρια του σχήματος είναι η πιο διαδεδομένη. Ονομάζεται Darrieus από τον Γάλλο μηχανικό που την κατοχύρωσε το 1931.

### Πλεονεκτήματα

- δεν χρειάζονται σύστημα προσανατολισμού
- η ηλεκτρική γεννήτρια είναι στο έδαφος

### Μειονεκτήματα

- εκμεταλλεύονται μικρότερες ταχύτητες ανέμου (αφού είναι κοντά στο έδαφος)
- έχουν μικρότερο συντελεστή ισχύος
- η στερέωση στο έδαφος απαιτεί εγκαταστάσεις που καταλαμβάνουν μεγάλο εμβαδόν

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Κύρια μέρη

**Πύργος.** Είναι κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένος από χάλυβα και συνήθως αποτελείται από δύο η τρία συνδεδεμένα τμήματα.

**Θάλαμος που περιέχει τα μηχανικά υποσυστήματα** (κύριος άξονας, σύστημα πέδησης, κιβώτιο ταχυτήτων ηλεκτρογεννήτρια)

Ο κύριος άξονας με το σύστημα πέδησης είναι παρόμοιος με τον άξονα των τροχών ενός αυτοκινήτου με υδραυλικά δισκόφρενα.

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι παρόμοιας κατασκευής με εκείνο του αυτοκινήτου με την διαφορά ότι έχει μόνον μια σχέση.

Η ηλεκτρογεννήτρια είναι παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη.

**Ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου ασφαλούς λειτουργίας.** Αποτελούνται από ένα η περισσότερα υποσυστήματα μικροελεγκτών και εξασφαλίζουν την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε όλες τις συνθήκες.

**Πτερύγια.** Είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά (υαλονήματα και ειδικές ρητίνες), σχεδιασμένα για να αντέχουν σε μεγάλες καταπονήσεις

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Χαρακτηριστικά μεγέθη

### 1. Διάμετρος της πτερωτής $D$

### 2. Ύψος τοποθέτησης $H$

Συνήθως  $1 < H/D < 1.5$

### 3. Πλήθος των πτερυγίων

Έχουν επικρατήσει οι αιολικές μηχανές με 3 πτερύγια. Με λιγότερα πτερύγια (2 ή 1) απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για το ίδιο ενεργειακό αποτέλεσμα που συνεπάγεται περισσότερο θόρυβο και φθορές, με μόνο πλεονέκτημα το μικρότερο κόστος.

### 4. Είδος των πτερυγίων (πάχος, υλικό)

Οι πολύ συμπαγείς πτερωτές (πολλά ή φαρδιά πτερύγια) σημαίνει ότι ξεκινάνε τη λειτουργία τους με μικρές ταχύτητες ανέμου αλλά θα πρέπει να βγαίνουν εκτός λειτουργίας στις μεγάλες ταχύτητες. Κλασικό παράδειγμα τέτοιων ανεμομύλων αποτελούν οι αμερικανικοί του 18<sup>ου</sup> αιώνα οι οποίοι αντλούσαν σταθερά μικρή ποσότητα νερού όλο το χρόνο.

### 5. Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής

Συνδέεται με παράγοντες όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.

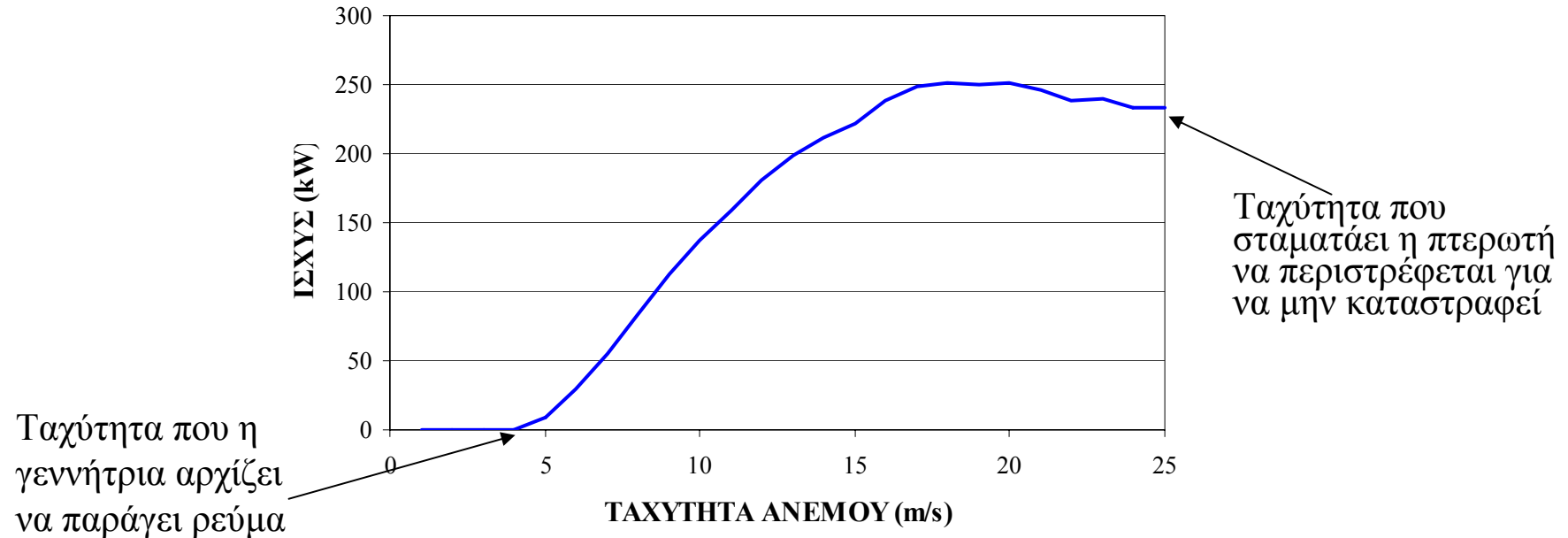
### 6. Συντελεστής ισχύος $C$

Υπολογίζεται από το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος προς την εισερχόμενη ενέργεια του αέρα. Ουσιαστικά είναι ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης πτερωτής και έχει μέγιστο όριο την τιμή  $C \leq 16/27 = 0.593$  (όριο Betz, 1919). Πρακτικά στην περίπτωση καλού σχεδιασμού ο συντελεστής κυμαίνεται στο 0.35.

### 7. Ονομαστική ισχύς

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Καμπύλες ισχύος ανεμογεννήτριας



Οι καμπύλες ισχύος συνήθως εκτιμώνται εμπειρικά, από μετρήσεις πεδίου της ταχύτητας ανέμου με ανεμόμετρο και της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

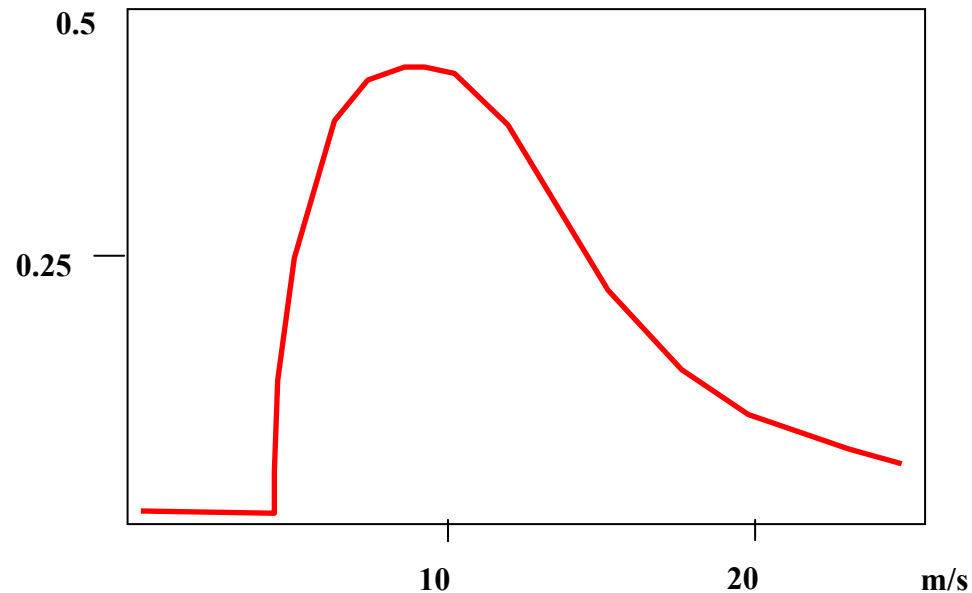
Υπάρχουν αβεβαιότητες στην εκτίμηση των καμπυλών που σχετίζονται με:  
(α) τη μέτρηση της ταχύτητας και (β) την ποσότητα του αέρα που εισέρχεται στην πτερωτή

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Συντελεστής ισχύος (Power coefficient)

Ο λόγος της ισχύος που παράγει η ανεμογεννήτρια σε κάθε ταχύτητα ανέμου, προς τη θεωρητική.

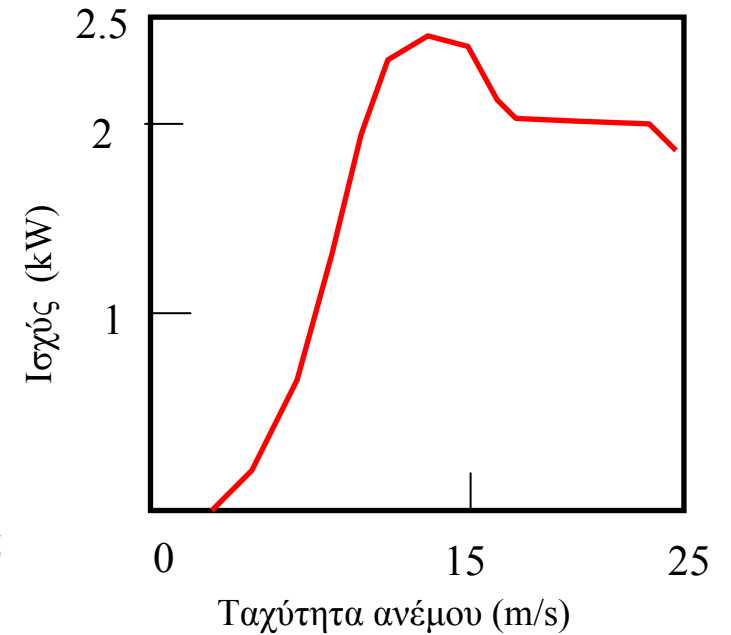
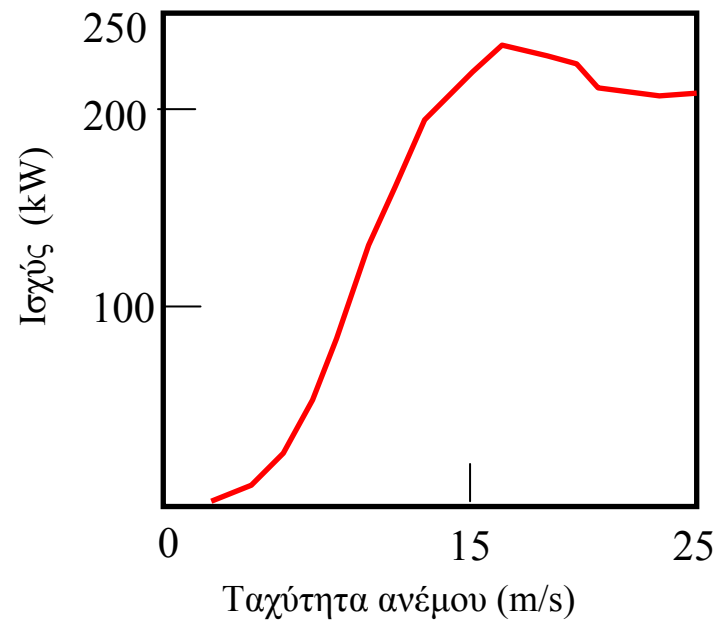
Διακύμανση συντελεστή ισχύος τυπικής ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου



Τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας όπως η έναρξη-λήξη λειτουργίας και μέγιστη τιμή (0.45) είναι επιλογή των κατασκευαστών της

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Μοντέλο	Zeus 225/40	Skystream 3.7
Μέγιστη ισχύς (kW)	225	2.4
Διάμετρος (m)	29.8	3.72
Ύψος (m)	48.7	10-18
Ταχύτητες λειτουργίας (m/s)	4-25	3.5-25
Ταχύτητα μέγιστης ισχύος (m/s)	15	13
Συντελεστής μέγιστης ισχύος	0.16	0.17
Τιμή	335.000 \$	12-18.000 \$





# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Επιλογή θέσης ανεμογεννητριας

- Μελέτη για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης και της ταχύτητας των επικρατούντων ανέμων
- Εντοπισμός των φυσικών και τεχνητών εμποδίων
- Εκτίμηση της τραχύτητας του εδάφους
- Καταγραφή του υπάρχοντος στην περιοχή ηλεκτρικού δικτύου
- Εκτίμηση της ευκολίας υλοποίησης κατασκευών (πρόσβαση στη θέση, μορφολογία εδάφους)

## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- ◆ Όταν ο αέρας έχει φύγει από ανεμογεννήτρια έχει χάσει την ενέργειά του και έτσι στην περίπτωση των αιολικών πάρκων οι αποστάσεις μεταξύ δύο ανεμογεννητριών πρέπει να είναι 5-9 φορές την διάμετρο της πτερωτής (στη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων) και 3-5 φορές (κάθετα στη επικρατούσα διεύθυνση). Γενικά σε αιολικά πάρκα οι απώλειες κυμαίνονται από 5 έως 15%
- ◆ Όταν ο αέρας βρει άνοιγμα, η ταχύτητα του μπορεί να αυξηθεί έως και 50% (tunnel effect)
- ◆ Η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται στις κορυφές λόφων (hill effect)

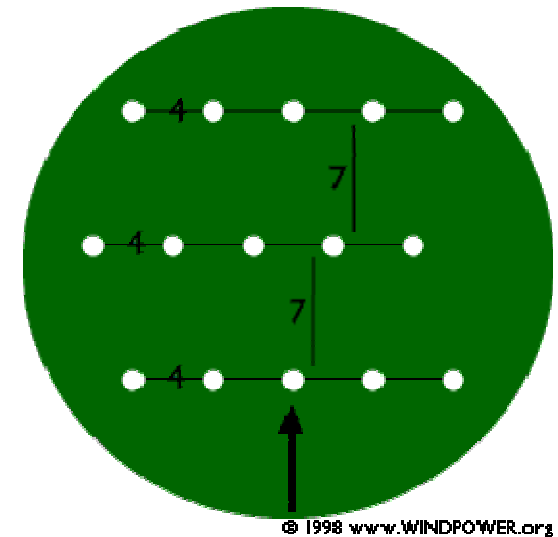
# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Επιλογή θέσης ανεμογεννητριας

- Μελέτη για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης και της ταχύτητας των επικρατούντων ανέμων
- Εντοπισμός των φυσικών και τεχνητών εμποδίων
- Εκτίμηση της τραχύτητας του εδάφους
- Καταγραφή του υπάρχοντος στην περιοχή ηλεκτρικού δικτύου
- Εκτίμηση της ευκολίας υλοποίησης κατασκευών (πρόσβαση στη θέση, μορφολογία εδάφους)

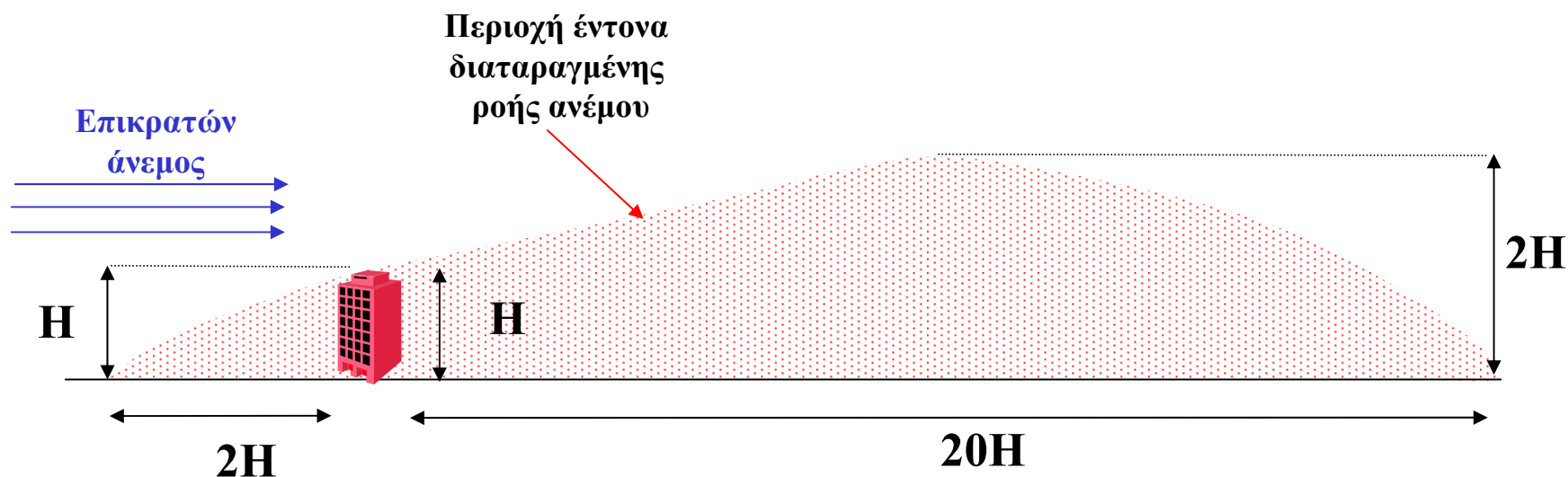
## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

- ◆ Όταν ο αέρας έχει φύγει από ανεμογεννήτρια έχει χάσει την ενέργειά του και έτσι στην περίπτωση των αιολικών πάρκων οι αποστάσεις μεταξύ δύο ανεμογεννητριών πρέπει να είναι 5-9 φορές την διάμετρο της πτερωτής (στη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων) και 3-5 φορές (κάθετα στη επικρατούσα διεύθυνση). Γενικά σε αιολικά πάρκα οι απώλειες κυμαίνονται από 5 έως 15%
- ◆ Όταν ο αέρας βρει άνοιγμα, η ταχύτητα του μπορεί να αυξηθεί έως και 50% (tunnel effect)
- ◆ Η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται στις κορυφές λόφων (hill effect)



# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

## Επιλογή θέσης ανεμογεννητριας σε σχέση με εμπόδιο



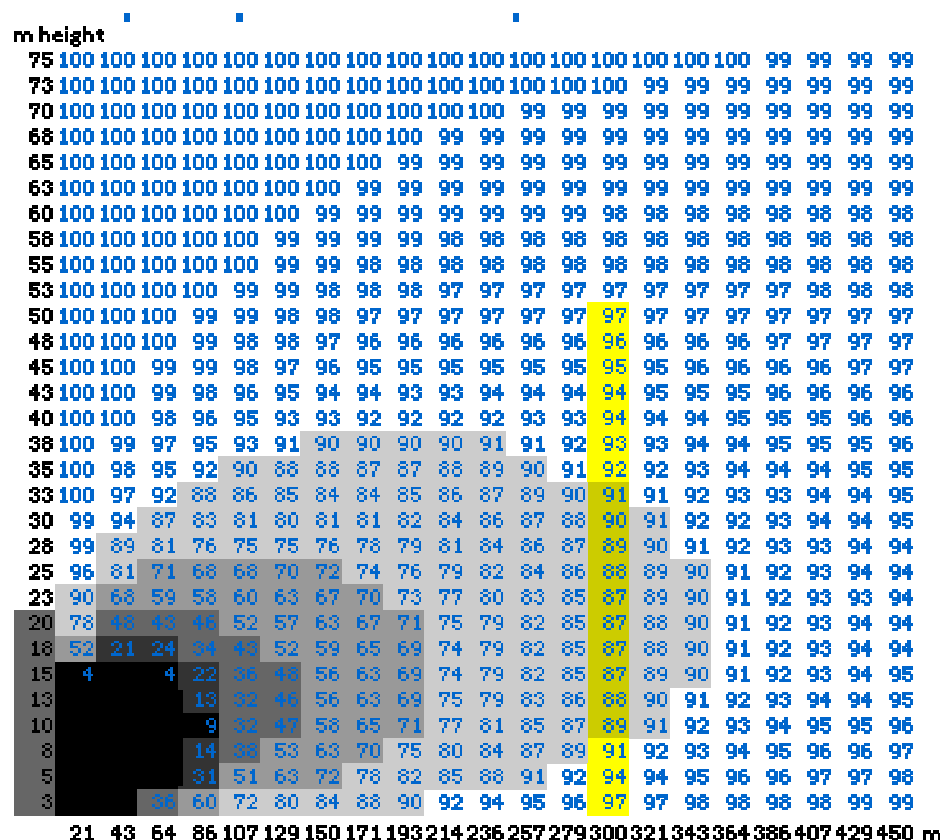
Σημαντική επίδραση έχει η ανεμοπερατότητα (porosity) του εμποδίου. Η ανεμοπερατότητα ενός συμπαγούς εμποδίου (π.χ. κτιρίου) έχει την τιμή 0, ενώ στην περίπτωση μη συμπαγούς εμποδίου (π.χ. συγκροτήματος κτιρίων) υπολογίζεται ως το πηλίκο της ανοικτής επιφάνειας προς τη συνολική επιφάνεια.

# ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

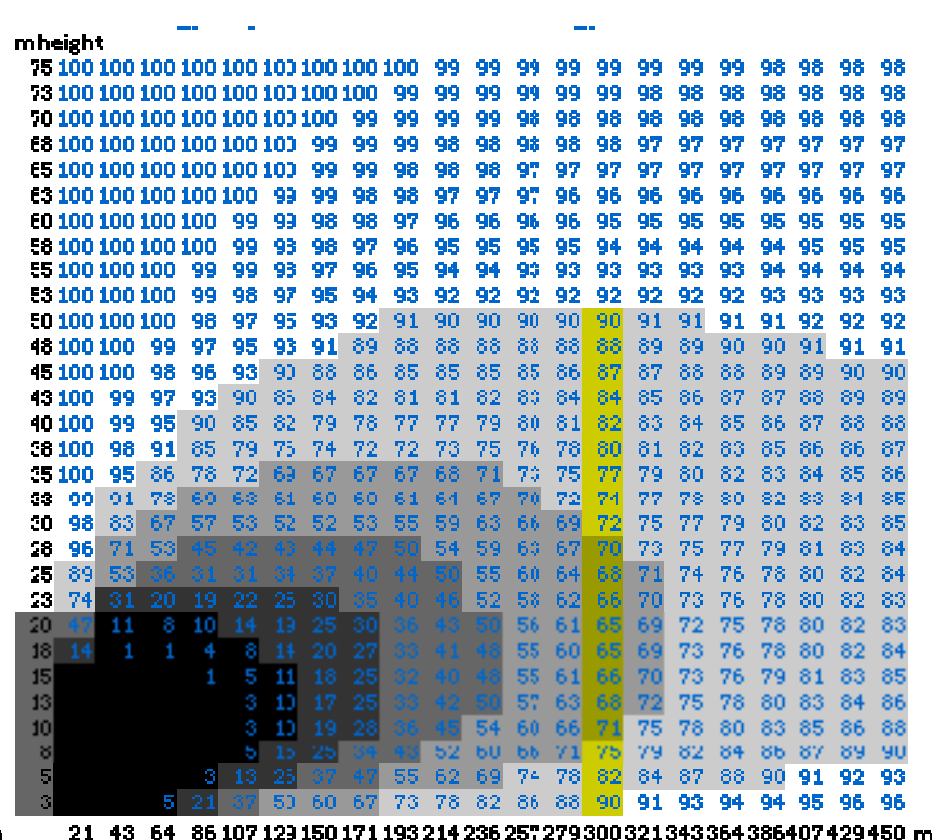
Επίδραση εμποδίου ύψους 20 m και μήκους 60 m  
σε ανεμογεννήτρια ύψους 50 m και σε απόσταση 300 m

Ποσοστό ταχύτητας ανέμου

Ποσοστό αιολικής ενέργειας



21 43 64 86 107 129 150 171 193 214 236 257 279 300 321 343 364 386 407 429 450 m  
 = Obstacle 20 m tall      = Turbine Tower 50m tall  
 Roughness length = 0.055, Porosity = 0, Obstacle length = 60 m  
 Note: Vertical and horizontal scales are different. Horizontal scale shows distance from obstacle  
 Windspeed Graphics System© Copyright 1997 DWTMA



21 43 64 86 107 129 150 171 193 214 236 257 279 300 321 343 364 386 407 429 450 m  
 = Obstacle 20 m tall      = Turbine Tower 50m tall  
 Roughness length = 0.055, Porosity = 0, Obstacle length = 60 m  
 Note: Vertical and horizontal scales are different. Horizontal scale shows distance from obstacle  
 Windspeed Graphics System© Copyright 1997 DWTMA

# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Εγκατεστημένη ισχύς

ΧΩΡΑ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	
	2004	2005
Γερμανία	16629	18428
Ισπανία	8263	10027
ΗΠΑ	6725	9149
Δανία	3124	3128
Ινδία	3000	4430
Ιταλία	1265	1717
Ολλανδία	1078	1219
Ιαπωνία	896	1040
Βρετανία	888	1353
Κίνα	764	1260
<b>Σύνολο</b>	<b>42632</b>	<b>51751</b>

## ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Δανία 19%  
Αυστραλία 12.5%  
Γερμανία 5.5%  
Ιρλανδία 2%  
ΗΠΑ 0.4%  
Ελλάδα 0.35%

Παγκόσμια

εγκατεστημένη 47912 MW 58982 MW

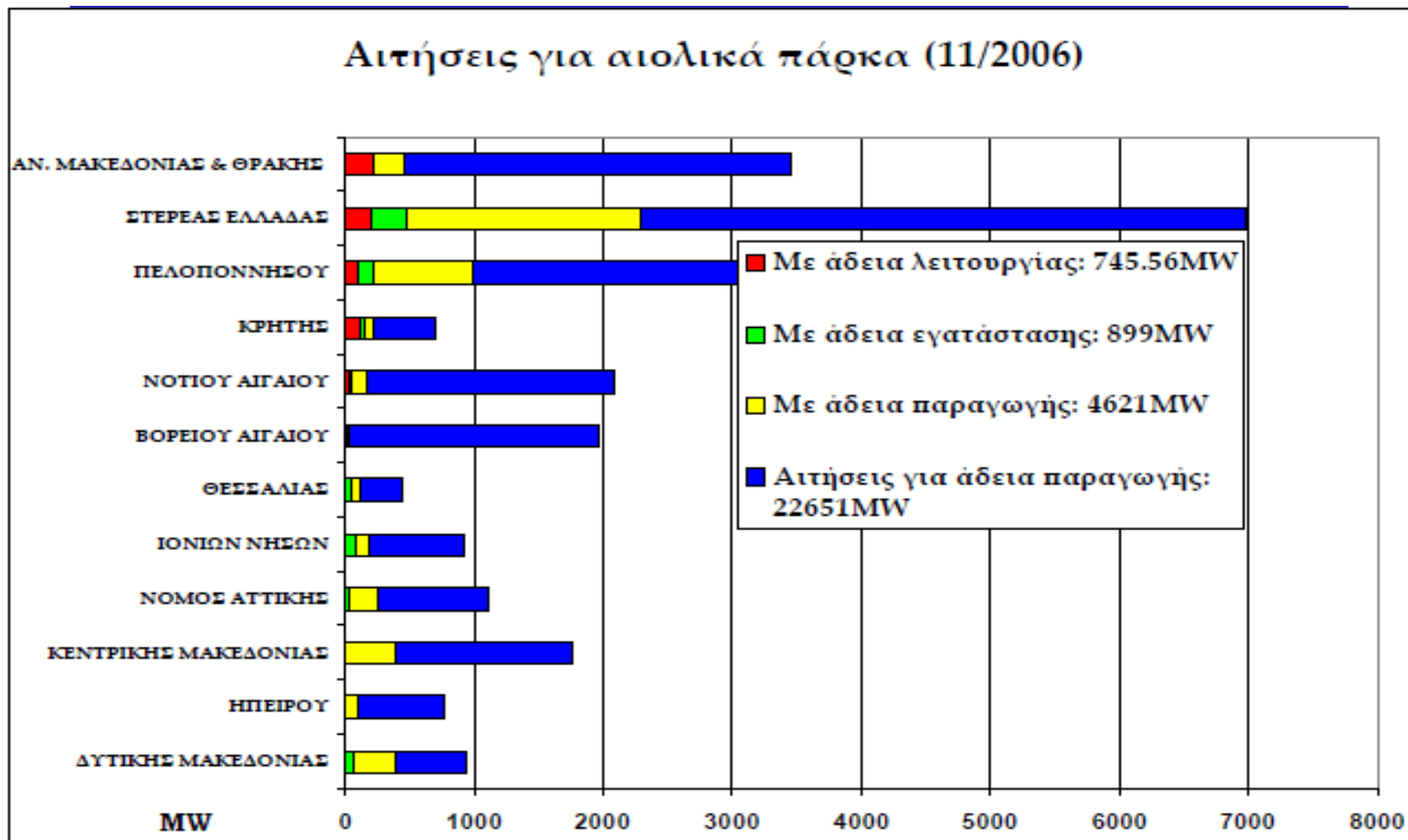
αιολική ισχύς

# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΡΓΟΥ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

- Εκτίμηση αιολικού δυναμικού
- Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Άδεια κατασκευής
- Σχεδιασμός έργου
- Κατασκευή
  - Ανεμογεννήτριας
  - Οδικής πρόσβασης
  - Γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος
  - Υποσταθμού ηλεκτρικού ρεύματος

# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Κατάσταση στην Ελλάδα (2007)



# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Μέτρηση Αιολικού δυναμικού

- μετρήσεις αιολικού δυναμικού απαραίτητες για σχεδιασμό και καλό προγραμματισμό λειτουργίας αιολικού σταθμού
- εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής πολύ ευαίσθητη στις διακυμάνσεις ταχύτητας του ανέμου
- κατάλληλη επιλογή θέσης μέτρησης, εξειδικευμένο προσωπικό και εμπειρία
- εγκατάσταση μεταλλικού ιστού ύψους τουλάχιστον 10 m στον οποίο τοποθετούνται ένα ή περισσότερα ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες για τουλάχιστον 1 έτος

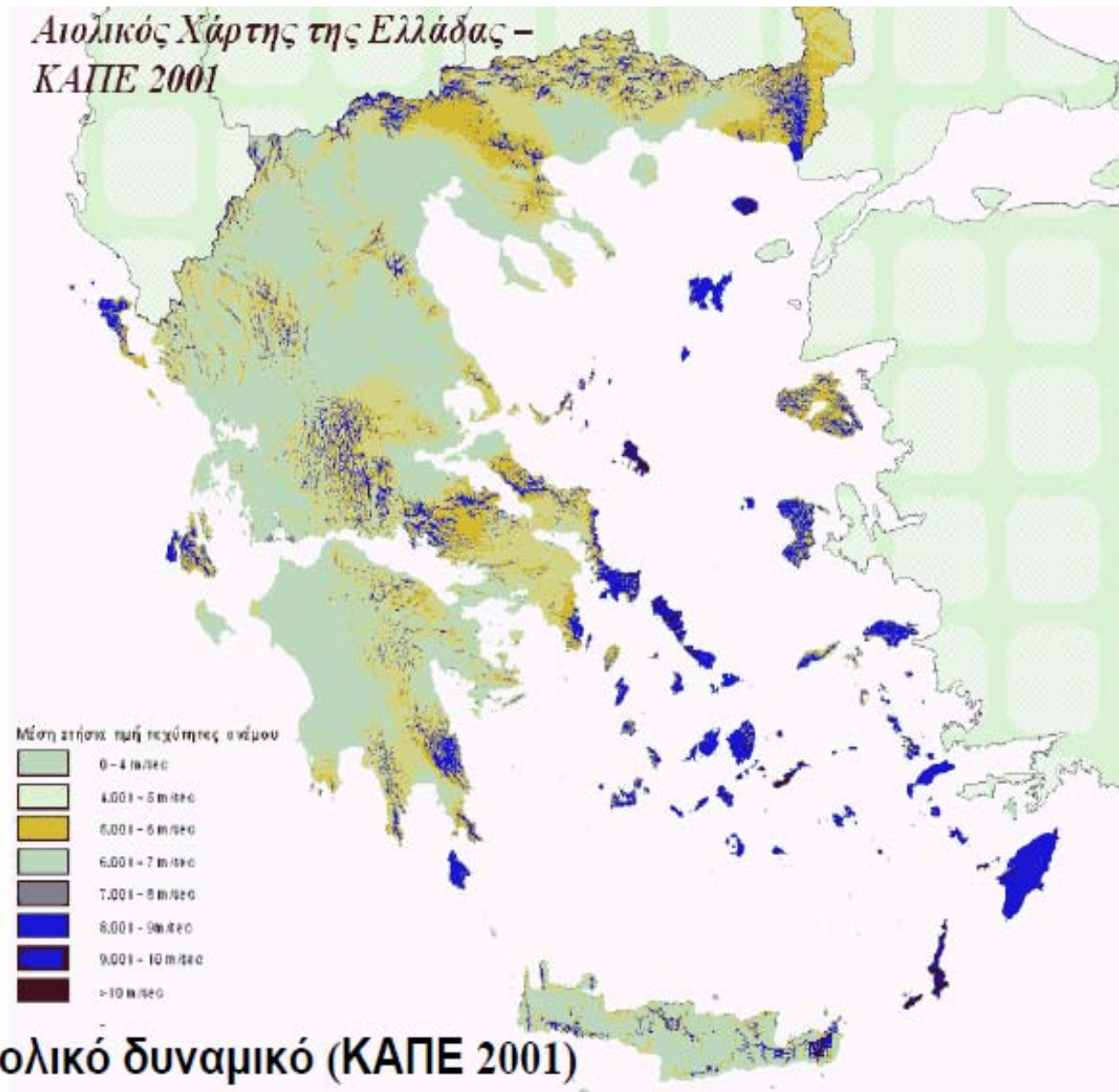
## Χωροθέτηση

- εντοπισμός κατάλληλων περιοχών (με πλούσιο αιολικό δυναμικό) με σκοπό την μεγαλύτερη δυνατή χωρική συγκέντρωση αιολικών πάρκων
- καθιέρωση κανόνων χωροθέτησης με σκοπό την αρμονική ένταξη τους στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον και περιορισμό των συγκρούσεων χρήσεων γης
- ορισμός περιοχών Αιολικής προτεραιότητας



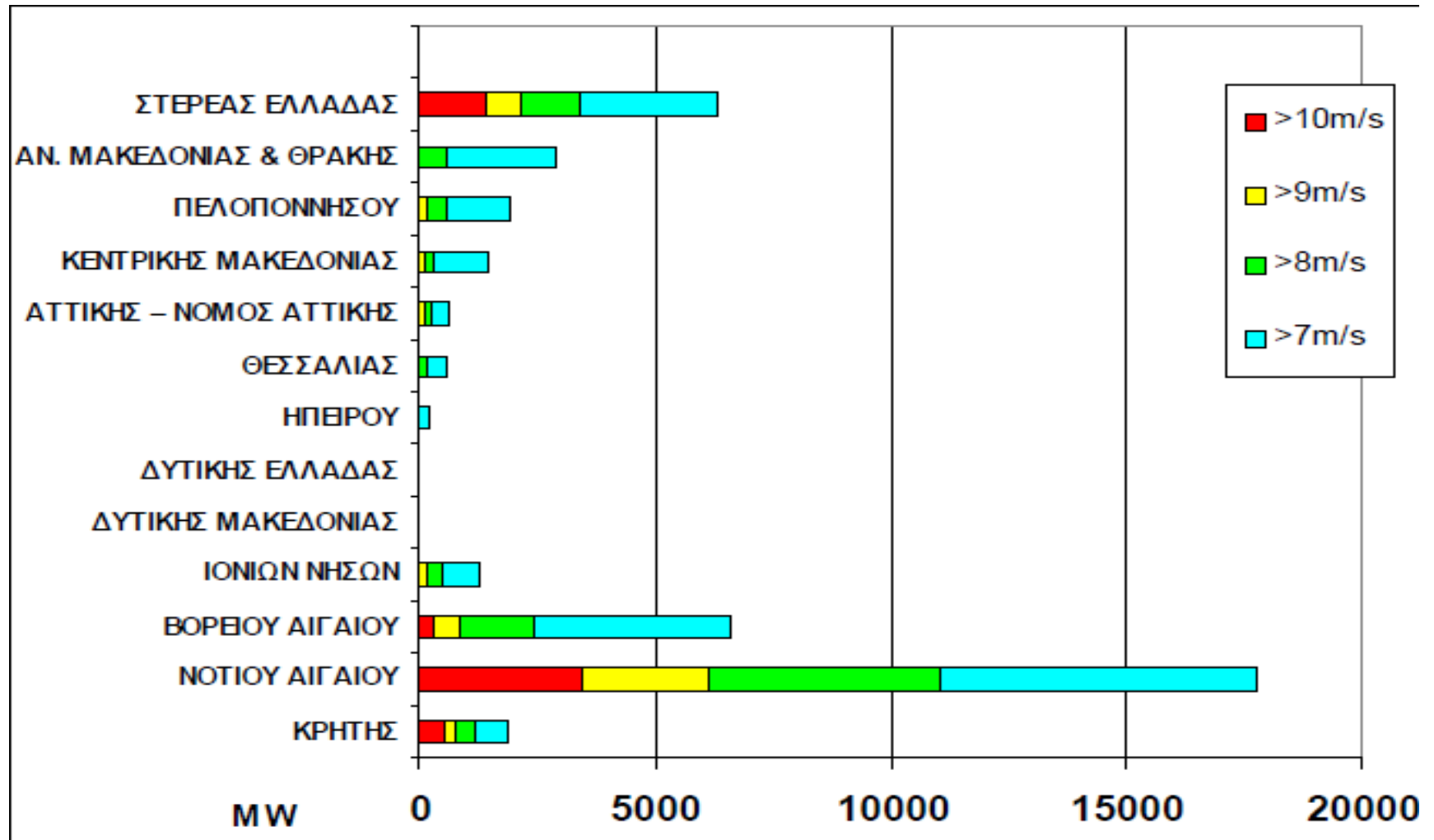
# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Αιολικό δυναμικό



# ΧΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Αιολικό δυναμικό



# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

## Κλίμακα Beaufort

<b>B</b>	<i>Χαρακτηρισμός</i>	<b>Ταχύτητα ανέμου</b>		
		<i>m/s</i>	<i>km/h</i>	<i>Κόμβοι (mi/hr)</i>
<b>0</b>	Άπνοια	0-0.2	< 1	< 1
<b>1</b>	Σχεδόν άπνοια	0.3-1.5	1-5	< 1
<b>2</b>	Πολύ ασθενής	1.6-3.3	6-11	4-6
<b>3</b>	Ασθενής	3.4-5.4	12-19	7-10
<b>4</b>	Σχεδόν μέτριος	5.5-7.9	20-28	11-16
<b>5</b>	Μέτριος	8.0-10.7	29-38	17-21
<b>6</b>	Ισχυρός	10.8-13.8	39-49	22-27
<b>7</b>	Πολύ ισχυρός	13.9-17.1	50-61	28-33
<b>8</b>	Θυελλώδης	17.2-20.7	62-74	34-40
<b>9</b>	Πολύ θυελλώδης	20.8-24.4	75-88	41-47
<b>10</b>	Θύελλα	24.5-28.4	89-102	48-55
<b>11</b>	Ισχυρή θύελλα	28.5-32.6	103-117	56-63
<b>12</b>	Τυφώνας	$\geq 32.7$	$\geq 118$	$\geq 64$

Η αντιστοιχία της ταχύτητας ανέμου  $u_{10}$  σε m/s, σε ύψος 10 m, με τον αριθμό Beaufort B, δίνεται από τη σχέση:  $u_{10} = 0.836 B^{3/2}$

# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

## Υψομετρική μεταβολή της ταχύτητας ανέμου

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

όπου  
 $u_1, u_2$  η ταχύτητα ανέμου σε ύψη  $z_1$  και  $z_2$  αντίστοιχα  
 $z_0$  η παράμετρος τραχύτητας

### Τυπικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας $z_0$ για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)

Πάγος	0.001
Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια	0.002
Υδάτινη επιφάνεια	0.01-0.06
Χλόη ύψους μέχρι 1cm	0.1
Χλόη ύψους μέχρι 1-10 cm	0.1-0.2
Χλόη-σιτηρά κλπ ύψους 10-50 cm	2-5
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m	20
Δένδρα ύψους 10-15 m	40-70

Πηγή: Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999

# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

## Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής

Συνάρτηση κατανομής Weibull:  $F(x) = 1 - e^{-(x/c)^k}$

$$\mu = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \sigma = c^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^2 \right\}$$

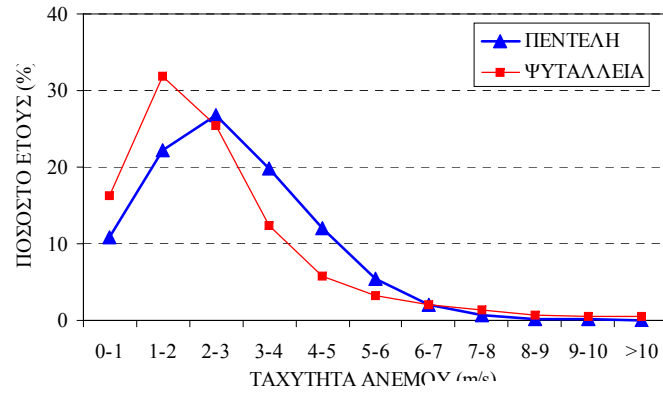
$\mu$ ,  $\sigma$  μέση τιμή και τυπική απόκλιση του δείγματος  
 $c$ ,  $k$  παράμετροι της κατανομής Weibull  
 $\Gamma(x)$  συνάρτηση Γάμα

Εκτίμηση παραμέτρων με τη μέθοδο των ροπών

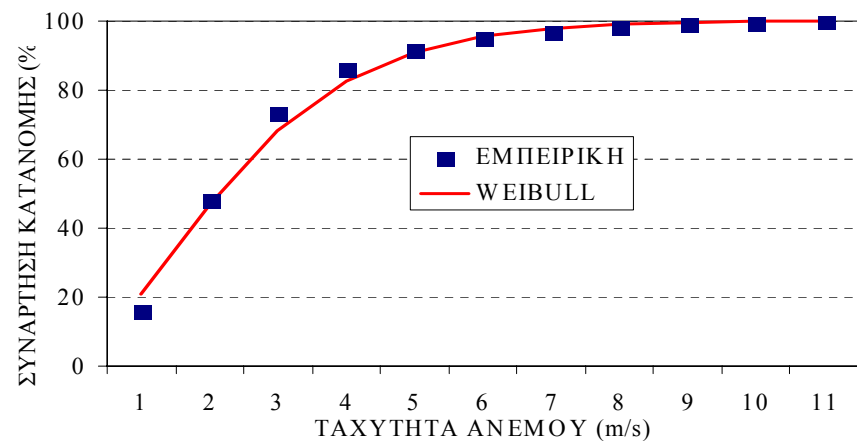
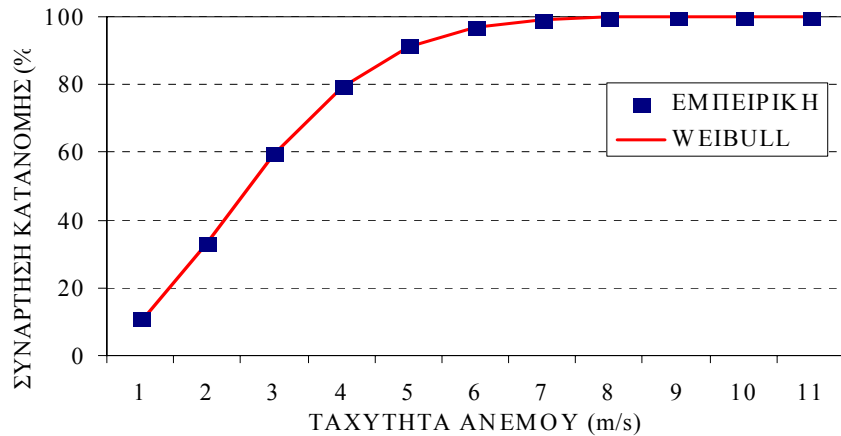
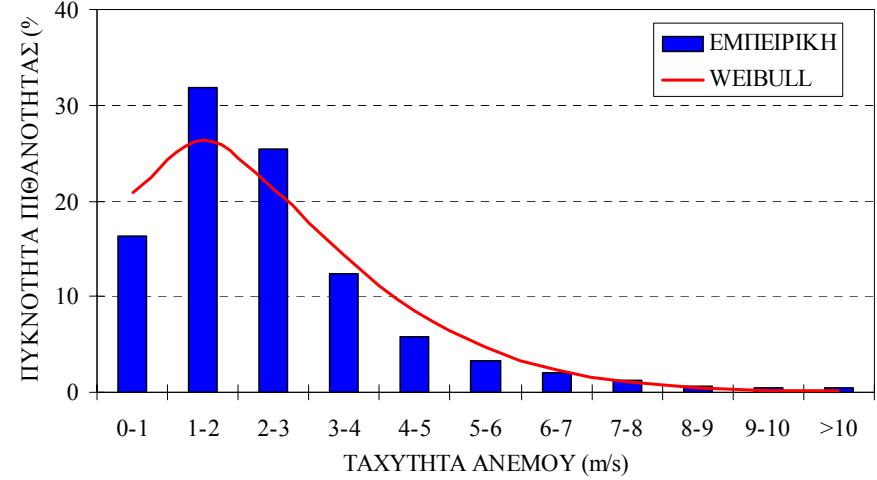
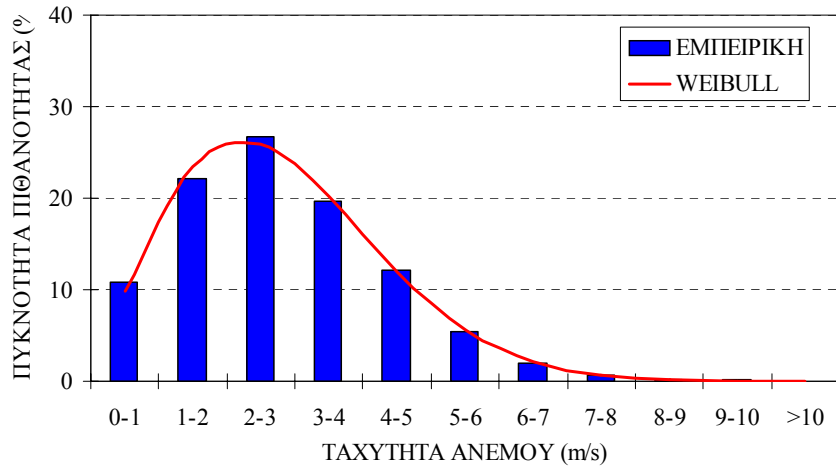
$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^2} \quad c = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

# ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πεντέλη

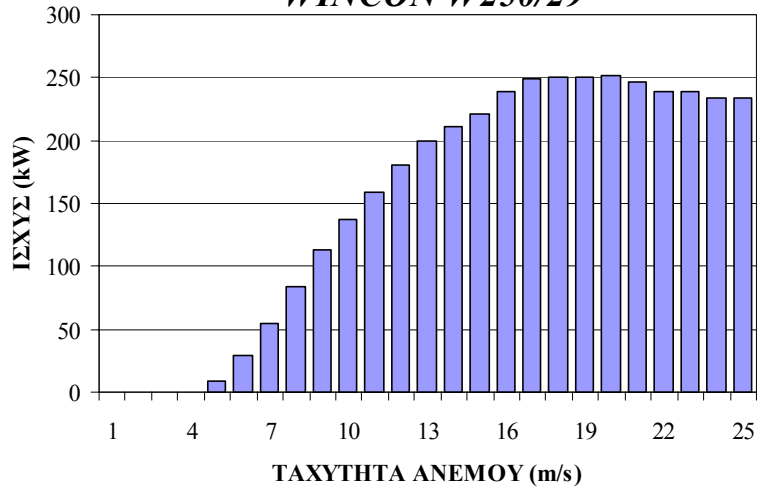


Ψυτάλλεια

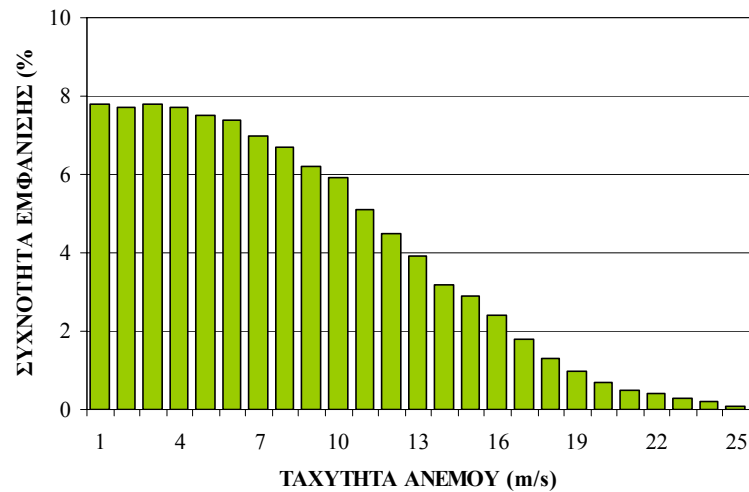


# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

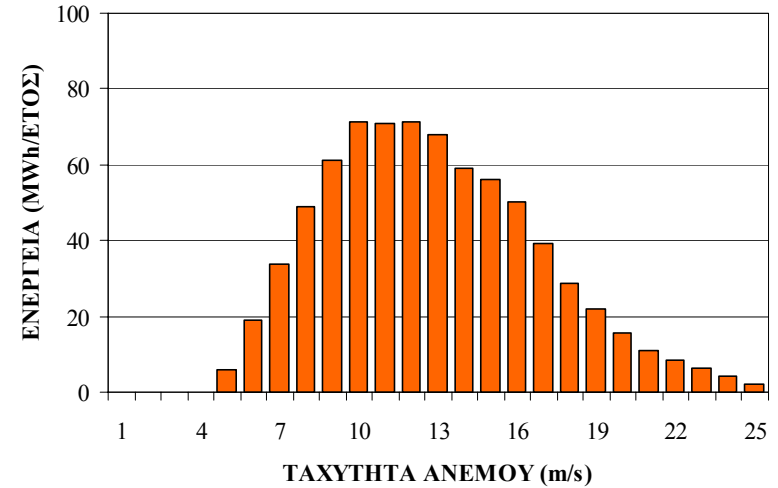
**ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ  
WINCON W250/29**



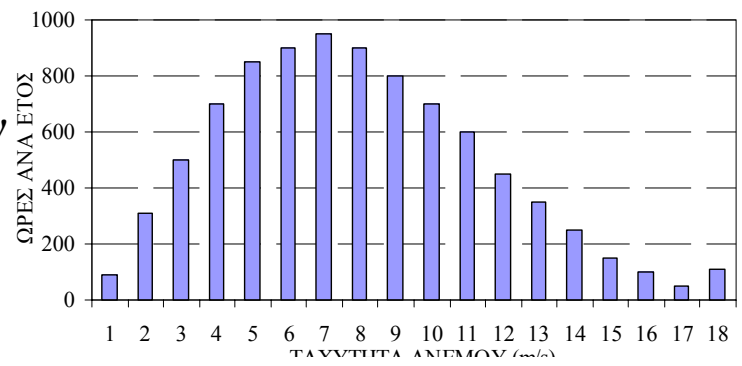
**ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ**



**ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**



Κατανομή ταχυτήτων

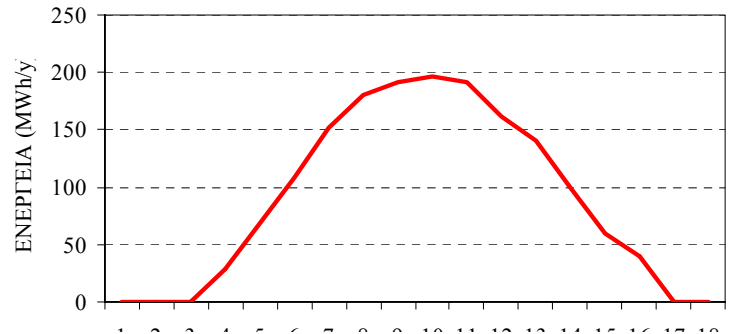
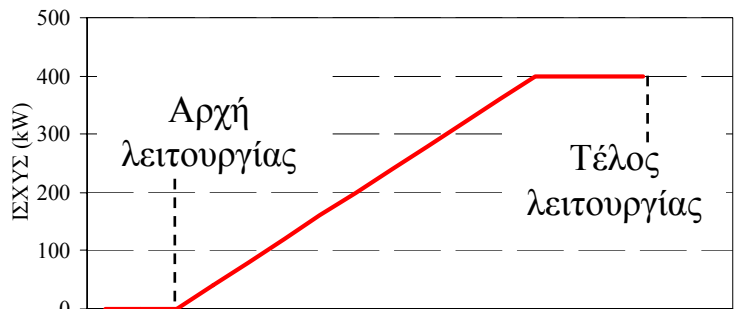


# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Καταλληλότητα καμπύλης ισχύος σε σχέση με τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά

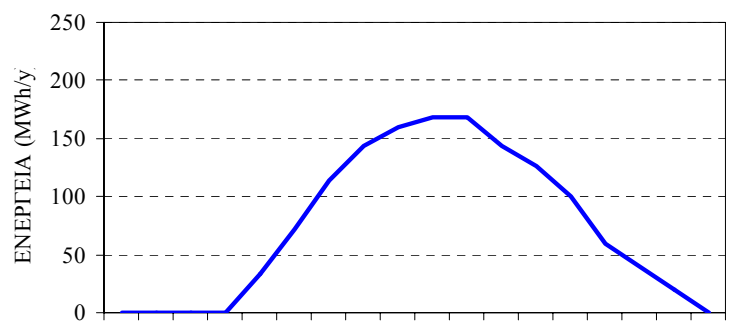
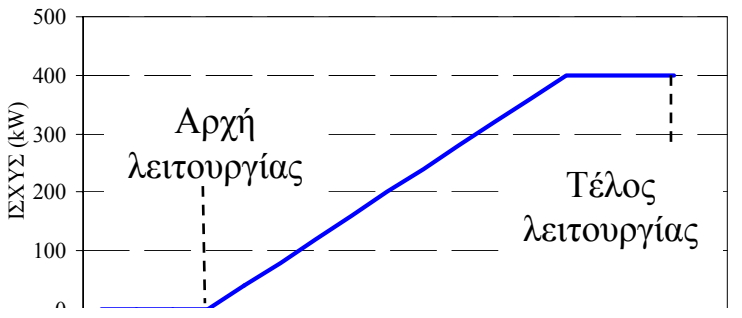
Ενέργεια (MWh) Σύνολο (MWh)

Καμπύλη 1



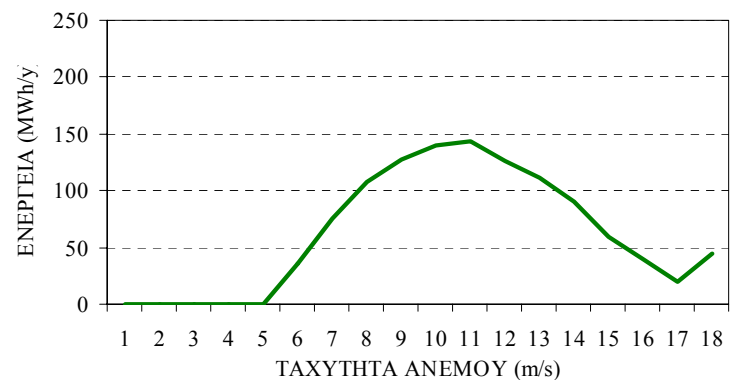
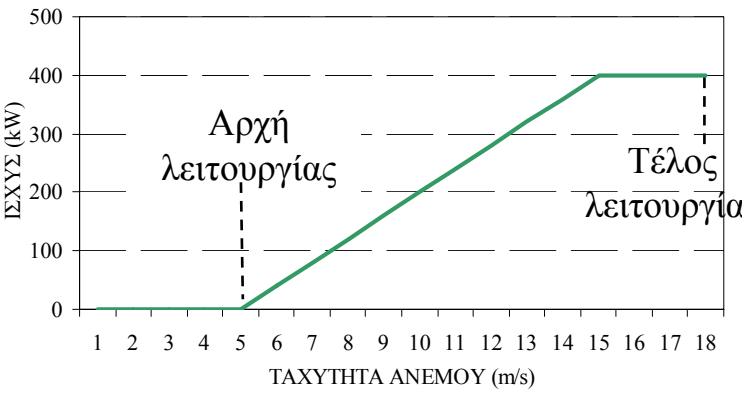
1650

Καμπύλη 2



1350

Καμπύλη 3



1124



# ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## Συντελεστής δυναμικότητας (Capacity Factor)

Η ποσότητα της ενέργειας που παράγει η ανεμογεννήτρια σε ένα έτος ως προς αυτή που θα μπορούσε θεωρητικά να παραχθεί με πλήρη λειτουργία (8766 ώρες)

### Παράδειγμα:

Μία ανεμογεννήτρια 600 kW παράγει 1.500.000 kWh σε ένα έτος

Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι:

$$1500000 / (8766 * 600) = 0.285 = 28.5 \%$$

Συνήθως ο συντελεστής δυναμικότητας κυμαίνεται από 0.3 - 0.7.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Βιβλία-Άρθρα

Αλεξάκης Α., *Αιολική ενέργεια*, Εκδόσεις Σιδέρη, Αθήνα, 1993.

Καλδέλλης Ι., *Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας*, Εκδόσεις Σταμούλης, Αθήνα 1999.

Κουτσογιάννης, Δ. και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Κουτσογιάννης, Δ., *Στατιστική Υδρολογία*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

Νομίδης Δ., *Αξιοποίηση της Αιολικής Ενέργειας στα νησιά του νότιου Αιγαίου*, Δελτίο ΠΣΔΜΗ, Αθήνα, 1999.

Gipe P., *Wind energy basics: a guide to small and micro wind systems*, Chelsea Publishing Co., 1999.

Walker J., *Wind energy technology*, John Wiley & Sons, 1997.

### Ιστοσελίδες

[www.worldweb.com](http://www.worldweb.com)

[www.cogreenpower.org](http://www.cogreenpower.org)

[www.telosnet.com/wind](http://www.telosnet.com/wind)

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

## Επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων

Μέτρηση

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \frac{z_2}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

Εκτίμηση

Σταθμός Α

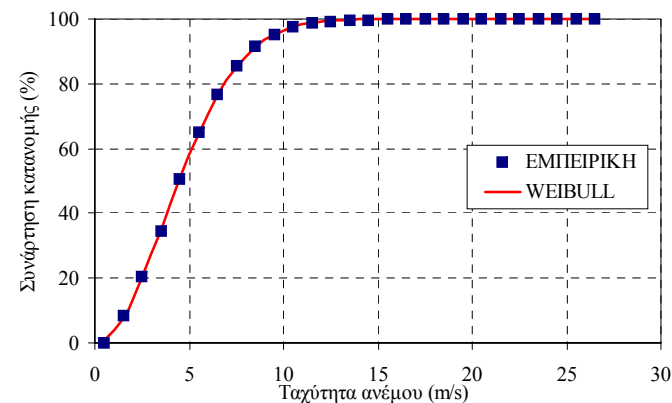
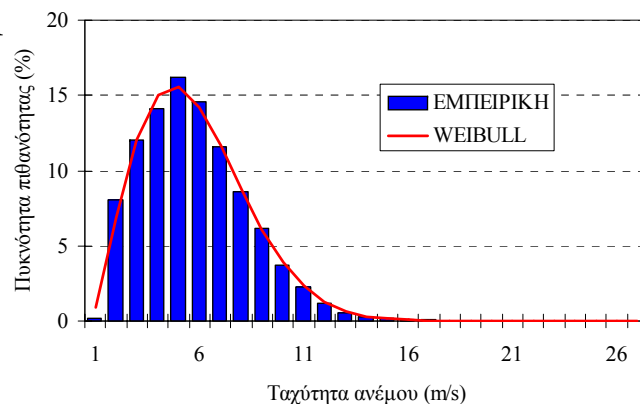
(8 m)

$\mu = 4.8$

$\sigma = 2.5$

$c = 1.96$

$k = 5.38$



Σταθμός Α

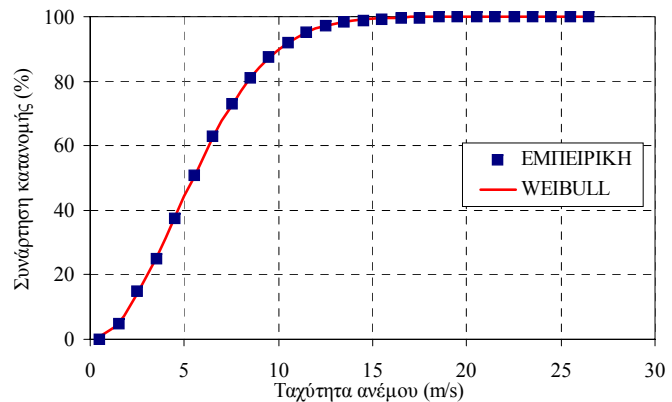
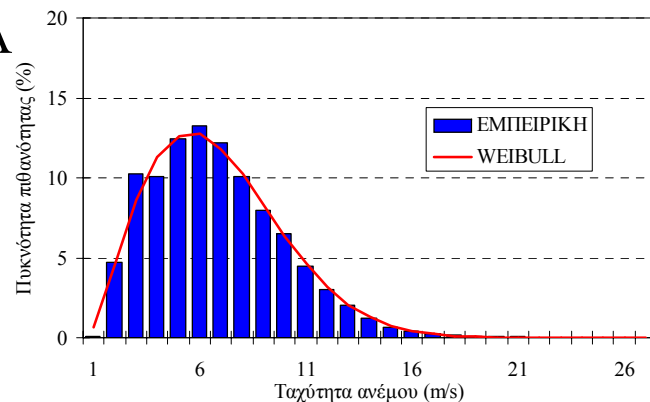
(18 m)

$\mu = 5.8$

$\sigma = 3.1$

$c = 1.96$

$k = 6.56$



Σταθμός Α

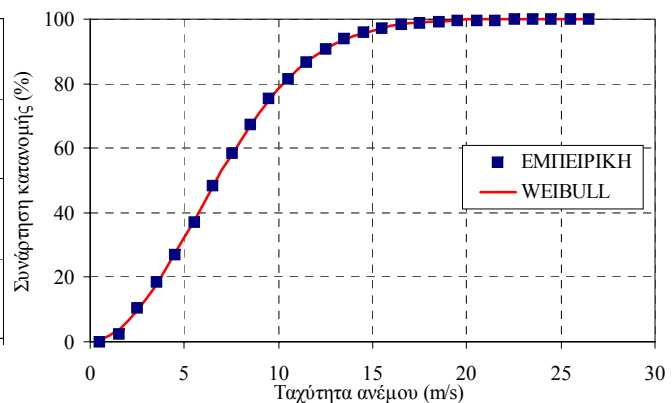
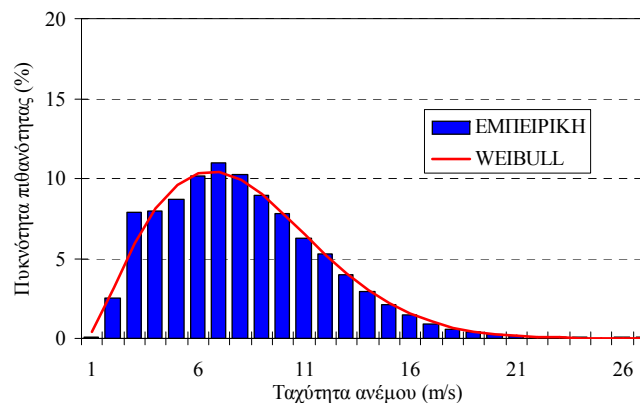
(50 m)

$\mu = 7.1$

$\sigma = 3.8$

$c = 1.96$

$k = 8.05$



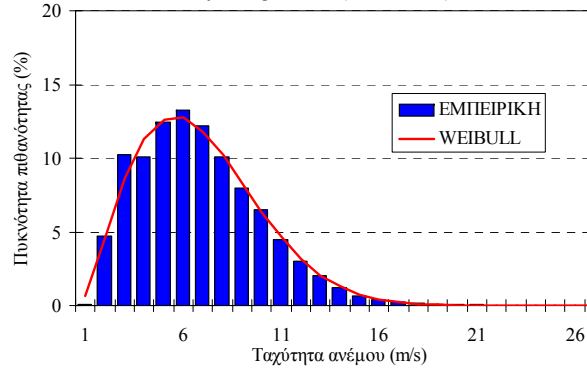
Εκτίμηση

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

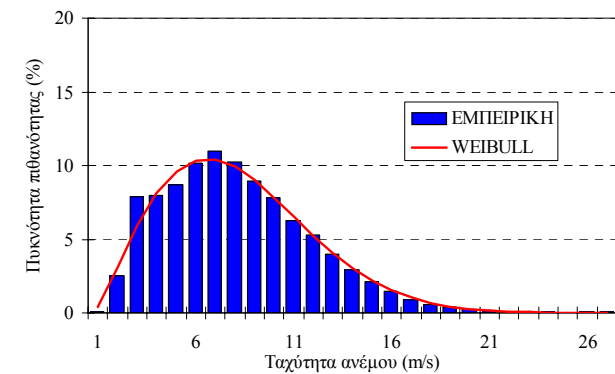
## Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας

Κατανομή ταχυτήτων ανέμου

Σταθμός Α (18 m)

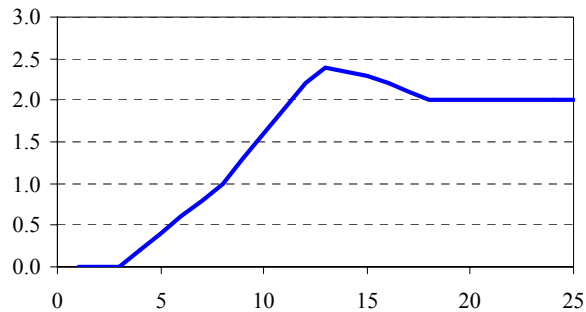


Σταθμός Α (50 m)

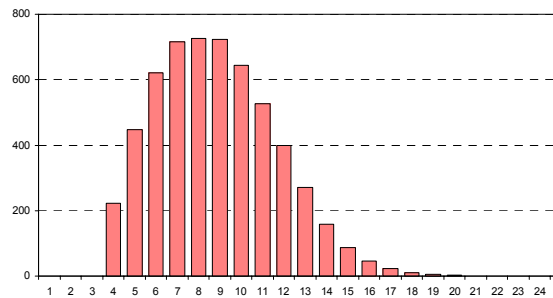


Καμπύλες ισχύος (kW-m/s)

Ανεμογεννήτρια 1 (D=3.7 m)

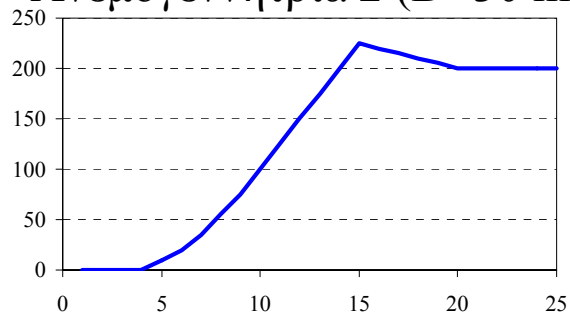


Παραγόμενη ενέργεια (kWh)

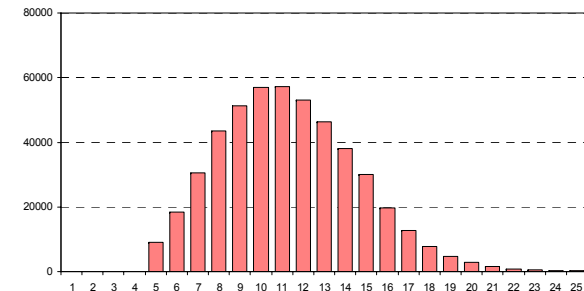


5625 kWh/yr

Ανεμογεννήτρια 2 (D=30 m)



485207 kWh/yr



# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

## Πορεία υπολογισμών

Αριθμός ωρών: 26304

Μέση τιμή: 7.1 m/s

Τυπ. Αποκ.: 3.8 m/s

Παράμετροι Weibull

k: 1.96 c: 8.05

k=κάρρα(μ,σ)

c=μ/EXP(GAMMALN(1+1/k))

Ανεμογεννήτρια

D: 30 m, A: 706.7 m<sup>2</sup>,

ρ: 1.225 kg/m<sup>3</sup>

ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΑ 50 m (m/s)				WEIBULL			ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΙΣΧΥΟΣ		ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh/ΕΤΟΣ)		
ΔΙΑΣΤΗΜΑ	ΟΡΙΟ	hr	ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ	F(x)%	f(x)%	ΩΡΕΣ/ΕΤΟΣ	m/s	kW	ΜΗΧΑΝΗ	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ	
<0.5	0.5	15	0.1	0.4	0.4	37.6	0	0	0	0	
0.5-1.5	1.5	655	2.5	3.6	3.2	280.7	1	0	0	122	0.00
1.5-2.5	2.5	2074	7.9	9.6	5.9	521.2	2	0	0	1805	0.00
2.5-3.5	3.5	2098	8.0	17.7	8.1	711.2	3	0	0	8312	0.00
3.5-4.5	4.5	2293	8.7	27.3	9.6	840.9	4	0	0	23296	0.00
4.5-5.5	5.5	2673	10.2	37.6	10.3	907.2	5	10	9072	49086	0.18
5.5-6.5	6.5	2881	11.0	48.1	10.4	913.8	6	20	18276	85439	0.21
6.5-7.5	7.5	2704	10.3	58.0	9.9	870.1	7	35	30453	129186	0.24
7.5-8.5	8.5	2359	9.0	67.0	9.0	789.0	8	55	43396	174869	0.25
8.5-9.5	9.5	2044	7.8	74.8	7.8	684.7	9	75	51353	216066	0.24
9.5-10.5	10.5	1648	6.3	81.3	6.5	570.5	10	100	57051	246956	0.23
10.5-11.5	11.5	1400	5.3	86.5	5.2	457.5	11	125	57190	263598	0.22
11.5-12.5	12.5	1051	4.0	90.6	4.0	353.8	12	150	53065	264616	0.20
12.5-13.5	13.5	776	3.0	93.6	3.0	264.1	13	175	46219	251171	0.18
13.5-14.5	14.5	558	2.1	95.7	2.2	190.6	14	200	38116	226372	0.17
15.5-15.5	15.5	382	1.5	97.3	1.5	133.0	15	225	29935	194366	0.15
15.5-16.5	16.5	242	0.9	98.3	1.0	89.9	16	220	19781	159417	0.12
16.5-17.5	17.5	145	0.6	99.0	0.7	58.9	17	215	12655	125176	0.10
17.5-18.5	18.5	102	0.4	99.4	0.4	37.3	18	210	7842	94273	0.08
18.5-19.5	19.5	67	0.3	99.6	0.3	23.0	19	205	4709	68202	0.07
19.5-20.5	20.5	43	0.2	99.8	0.2	13.7	20	200	2741	47460	0.06
20.5-21.5	21.5	26	0.1	99.9	0.1	7.9	21	200	1587	31803	0.05
21.5-22.5	22.5	20	0.1	99.9	0.1	4.5	22	200	891	20542	0.04
22.5-23.5	23.5	15	0.1	100.0	0.0	2.4	23	200	486	12800	0.04
23.5-24.5	24.5	10	0.0	100.0	0.0	1.3	24	200	257	7701	0.03
24.5-25.5	25.5	12	0.0	100.0	0.0	0.7	25	200	132	4476	0.03
>25.5	26.5	11	0.0	100.0	0.0	0.3					
		<b>26304</b>	<b>100</b>			<b>8766</b>			<b>485207</b>	<b>2707109</b>	