

Ενέργεια και Περιβάλλον

Αιολική ενέργεια



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2023-24

Ιστορικό της αιολικής ενέργειας

- ❑ 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 6ο έως τον 9ο αιώνα μ.Χ.
- ❑ Στην Ευρώπη αναπτύχθηκαν διάφορα είδη ανεμόμυλου (**οριζόντιου άξονα**) από τον 13ο αιώνα, και πιθανόν οι νερόμυλοι να αποτέλεσαν πρότυπο για την κατασκευή τους
- ❑ Τον 17ο αιώνα η τεχνολογία των ανεμόμυλων μεταφέρθηκε στην Αμερική, κυρίως για **άντληση νερού**.
- ❑ Στην **Ελλάδα** (ειδικότερα στο Αιγαίο) η χρήση ανεμόμυλων χρονολογείται από τον 13ο αιώνα. Το 1960 υπήρχαν περίπου 13 000 ανεμόμυλοι στο Οροπέδιο Λασιθίου, 2 500 στην υπόλοιπη Κρήτη, και 600 στη Ρόδο.
- ❑ Ο πρώτος «ανεμόμυλος» για **παραγωγή ηλεκτρισμού** κατασκευάστηκε το 1888 στο Cleveland του Ohio, από τον Charles Brush. Είχε διάμετρο πτερωτής 17 m και ισχύ 12 kW.
- ❑ Πριν 30 χρόνια, μια **τυπική ανεμογεννήτρια** είχε ισχύ της τάξης των 25 kW. Σήμερα, κατασκευάζονται ανεμογεννήτριες τάξεις μεγέθους μεγαλύτερης ισχύος. Η μεγαλύτερη σε λειτουργία (Haliade-X) έχει ισχύ **14 MW**, διάμετρο πτερωτής **220 m**, και εκτιμώμενο συντελεστή δυναμικότητας 60-64% (υπεράκτια Α/Γ).
- ❑ Σήμερα, η **Δανία** κατέχει τα πρωτεία στην κατασκευή ανεμογεννητριών και την παραγωγή αιολικής ενέργειας.

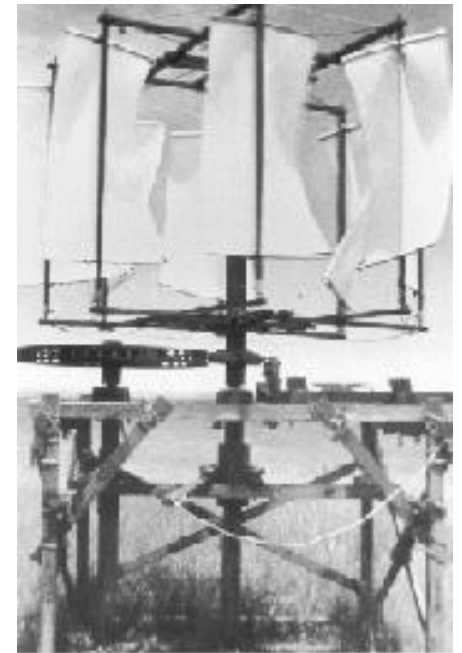
Αναφορά στην ελληνική μυθολογία

- ❑ Κατά τη μυθολογία, ο Αίολος είχε οριστεί από τον Δία κλειδοκράτορας των ανέμων και τους προκαλούσε ή τους σταματούσε κατά βούληση.
- ❑ Οι οκτώ άνεμοι, που θεωρούνταν βοηθοί του Αιόλου, απεικονίζονται στον «Πύργο των Αέρηδων» στην Πλάκα (1ος π.Χ. αιώνας).

«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)



Ιστορική αναδρομή (1)



*Αντίγραφο του πρώτου
Περσικού μύλου*



**Οροπέδιο Λασιθίου: 13 000 ανεμόμυλοι,
εκ των οποίων σώζονται 24**



Ιστορική αναδρομή (2)

ΗΠΑ



Δανία



Γαλλία



Αγγλία



Καναδάς



Ολλανδία



Φυσικό πλαίσιο ανέμου

- Πρωτογενές αίτιο για τη δημιουργία ανέμων είναι η χωρικά διαφοροποιημένη απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία προκαλεί **θερμοκρασιακές διαφορές**, που με τη σειρά τους προκαλούν συνεχή κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας στην οριζόντια (**άνεμος**) και κατακόρυφη διεύθυνση (**ανοδικά και καθοδικά ρεύματα**).
- **Παράγοντες που επιδρούν στη δημιουργία ανέμων:**
 - Πλανητική → γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας
 - Μεγάλη κλίμακα → συστήματα καιρού
 - Μέση κλίμακα → ορογραφία, ανάγλυφο
 - Μικρή κλίμακα → τοπικά εμπόδια (π.χ. αστικό περιβάλλον)
- Χαρακτηριστικά μεγέθη του ανέμου είναι η **διεύθυνση** (διάνυσμα), η **ταχύτητα** και η **ριπή** (μέγιστη ταχύτητα σε κλίμακα 2 min).
- Η ταχύτητα μεταβάλλεται **συναρτήσει του υψομέτρου**, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{u_2}{u_1} = \ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) / \ln \left(\frac{z_1}{z_0} \right)$$

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

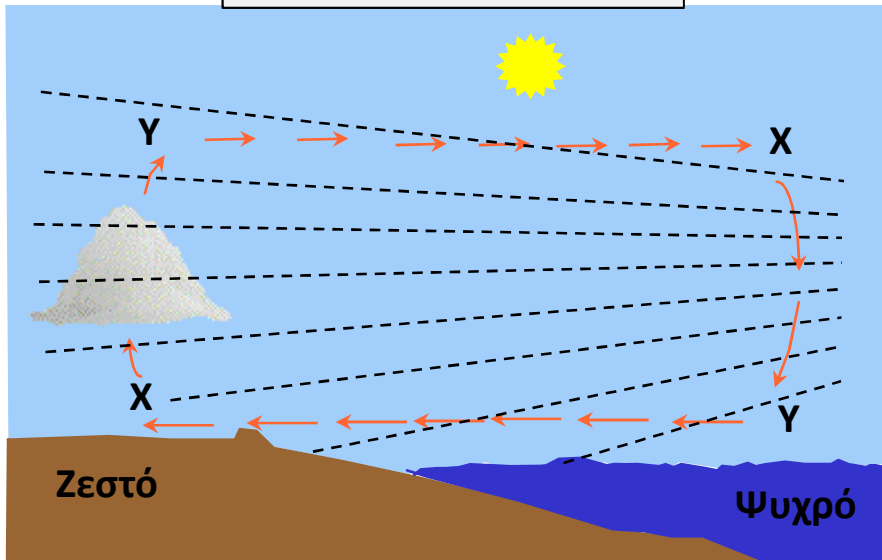
Τυπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)

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 ύψους 10-50 cm	2-5
Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m	20
Δένδρα ύψους 10-15 m	40-70

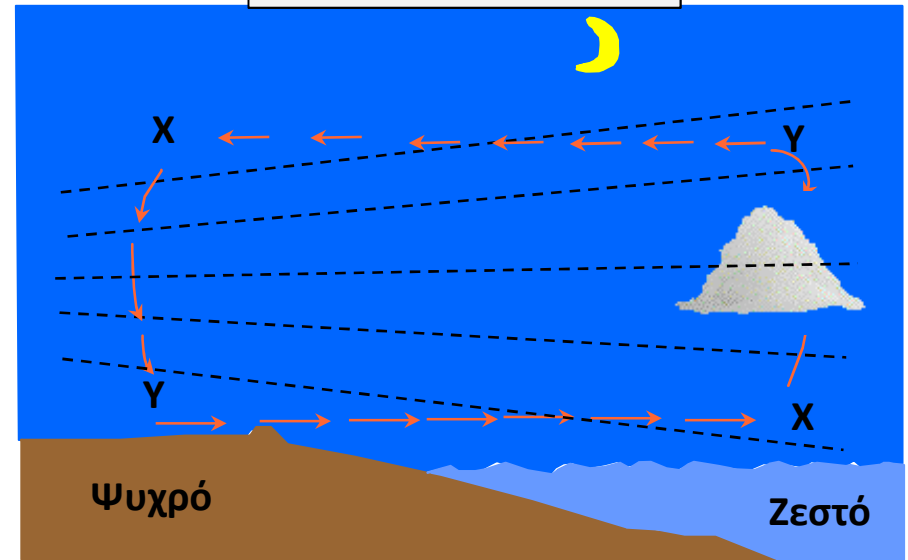
Πηγή: Κουτσογιάννης, Δ., & Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, ΕΜΠ, Αθήνα 1999

Παραδείγματα δημιουργίας ανέμων

Θαλάσσια αύρα (ημέρα)



Απόγειος αύρα (νύχτα)



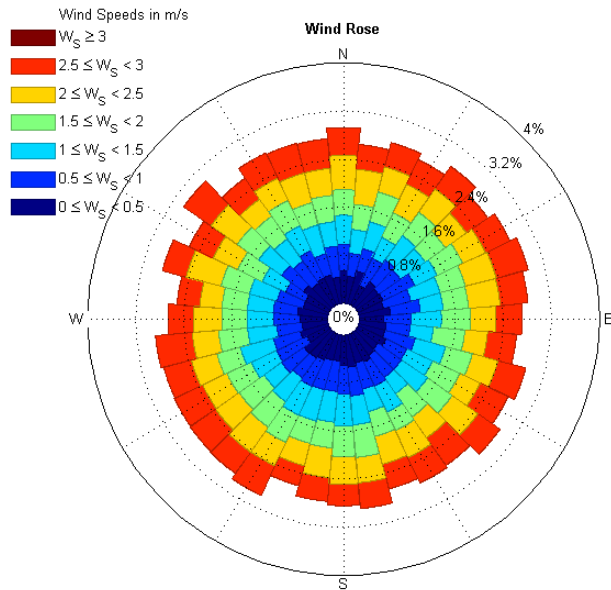
Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (ημέρα)



Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (νύχτα)



Χαρακτηριστικά ανέμου



Απεικόνιση στατιστικής κατανομής ταχυτήτων ανέμου ανά διεύθυνση (wind rose)

- ❑ Κόμβος, knot → nmi/h (=0.514 m/s)
- ❑ Μετατροπή Beaufort σε μονάδες ταχύτητας (m/s): $V = 0.836 B^{3/2}$
- ❑ Τυπικό ύψος μέτρησης ταχύτητας ανέμου: 2-10 m
- ❑ Τυπικό εύρος ταχυτήτων λειτουργίας ανεμογεννητριών: 3.0 ως 25.0 m/s
- ❑ Όταν ο αέρας βρει άνοιγμα, η ταχύτητα του αυξάνεται έως και 50 φορές (**tunnel effect**)
- ❑ Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται στις κορυφές λόφων (**hill effect**)

Κατάταξη ανέμων με βάση την κλίμακα Beaufort

B	Χαρακτηρισμός	m/s	km/h	Κόμβοι
0	Άπνοια	0.0-0.2	< 1	< 1
1	Σχεδόν άπνοια	0.3-1.5	1-5	< 1
2	Πολύ ασθενής	1.6-3.3	6-11	4-6
3	Ασθενής	3.4-5.4	12-19	7-10
4	Σχεδόν μέτριος	5.5-7.9	20-28	11-16
5	Μέτριος	8.0-10.7	29-38	17-21
6	Ισχυρός	10.8-13.8	39-49	22-27
7	Πολύ ισχυρός	13.9-17.1	50-61	28-33
8	Θυελλώδης	17.2-20.7	62-74	34-40
9	Πολύ θυελλώδης	20.8-24.4	75-88	41-47
10	Θύελλα	24.5-28.4	89-102	48-55
11	Ισχυρή θύελλα	28.5-32.6	103-117	56-63
12	Τυφώνας	≥ 32.7	≥ 118	≥ 64

Θεωρητική αιολική ισχύς

- Η ισχύς (σε W) μιας μάζας αέρα m (σε kg) κινούμενης με ταχύτητα V (σε m/s) για χρόνο t (σε s) είναι:

$$P_0 = \frac{E}{t} = \frac{m V^2}{2t}$$

- Αν στον χρόνο t ο αέρας διανύει απόσταση L (σε m) και προσπίπτει σε επιφάνεια A (σε m²), τότε:

$$P_0 = \frac{\rho L A V^2}{2t} = \frac{\rho A V^3}{2}$$

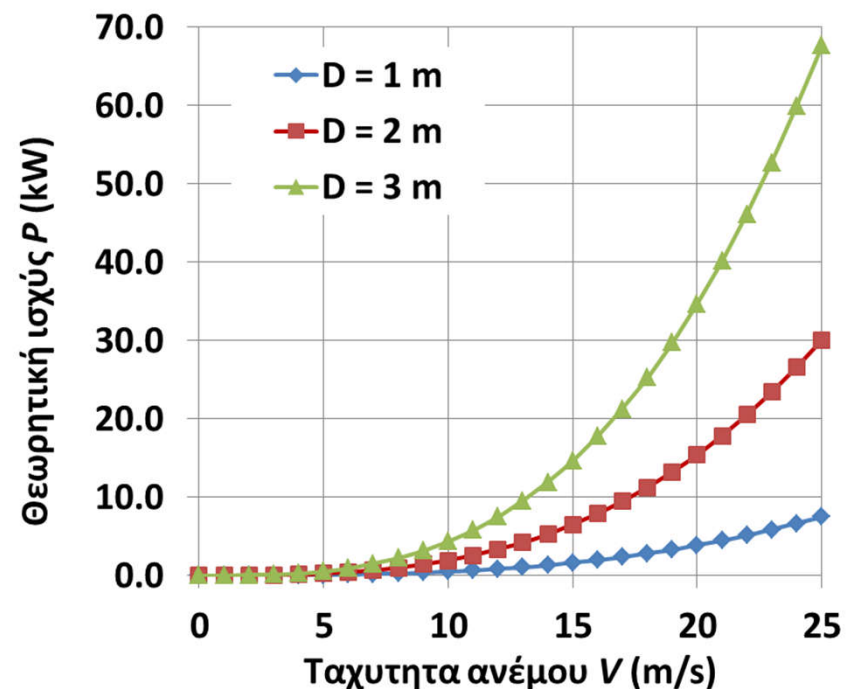
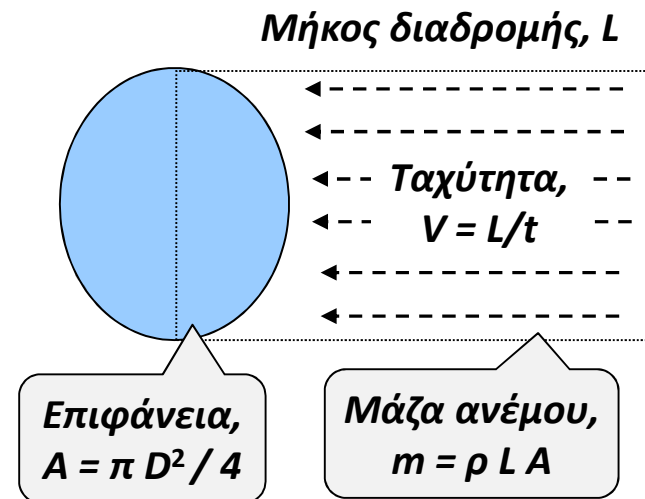
όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m³).

- Για κυκλική επιφάνεια διαμέτρου D , η **θεωρητική αιολική ισχύς** είναι:

$$P_0 = \frac{\rho \pi D^2 V^3}{8}$$

Θεωρητική αιολική ισχύς συναρτήσει της διαμέτρου, για ταχύτητα ανέμου 10 m/s:

$D = 1 \text{ m}$	$P = 0.48 \text{ kW}$
$D = 10 \text{ m}$	$P = 48.1 \text{ kW}$
$D = 100 \text{ m}$	$P = 4.81 \text{ MW}$



Θεωρητική ισχύς ιδεατής ανεμογεννήτριας (1)

□ Παραδοχές ιδεατής ανεμογεννήτριας:

- Άπειρο πλήθος πτερυγίων, που δεν προκαλούν αντίσταση στη ροή του ανέμου
- Μηδενικές απώλειες κατά τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική
- Ομοιόμορφο πεδίο ροής ανέμου, οριζόντια διεύθυνση ταχυτήτων

- Έστω V_1 η ταχύτητα του ανέμου σε ικανή απόσταση από την Α/Γ, η οποία μειώνεται σε V_2 , μετά την Α/Γ, και V_A η ταχύτητα στη θέση της Α/Γ. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι:

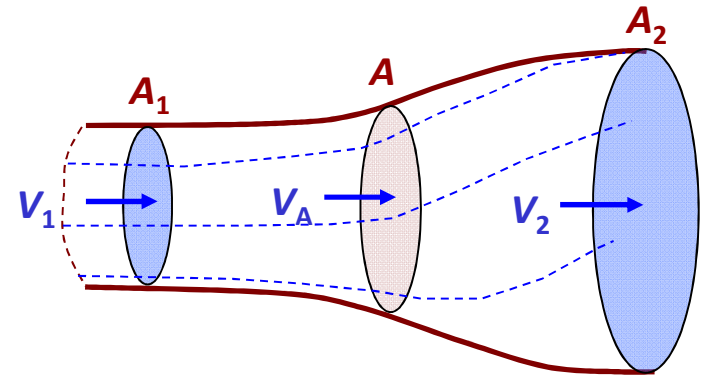
$$E = E_1 - E_2 = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1)$$

- Θέτοντας $V_1 = \alpha V_A$ και $V_2 = \beta V_A$ τότε:

$$E = \frac{m V_A^2 (\alpha^2 - \beta^2)}{2} = \frac{\rho L A V_A^2 (\alpha^2 - \beta^2)}{2} \quad (2)$$

- Με την υπόθεση ότι η ταχύτητα $V_A = dL/dt$ είναι σταθερή, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{\rho A V_A^3 (\alpha^2 - \beta^2)}{2} \quad (3)$$



Παρατηρήσεις

- Δεδομένου ότι $V_1 \geq V_A \geq V_2$, ισχύει $\alpha \geq 1$ και $\beta \leq 1$.
- Αν δεν υπάρχουν πτερύγια, η ροή του ανέμου είναι ανεμπόδιστη ($V_1 = V_A = V_2$), και δεν παράγεται ισχύς (συνεπώς $\alpha = \beta = 1$).

Θεωρητική ισχύς ιδεατής ανεμογεννήτριας (2)

- Με βάση την **εξίσωση ορμής**, η δύναμη που ασκείται στην πτερωτή είναι:

$$F = m \frac{dV}{dt} = \rho A V_A (V_1 - V_2) = \rho A V_A^2 (\alpha - \beta) \quad (4)$$

- Το έργο που παράγει η δύναμη F στη μονάδα του χρόνου (**ισχύς**) είναι:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d(F L)}{dt} = F \frac{dL}{dt} = F V_A = \rho A V_A^3 (\alpha - \beta) \quad (5)$$

- Συνδυάζοντας τις σχέσεις της ισχύος (3) και (5) προκύπτει:

$$P = 0.5 \rho A V_A^3 (\alpha^2 - \beta^2) = \rho A V_A^3 (\alpha - \beta) \Rightarrow \alpha + \beta = 2 \quad (6)$$

- Αφού $V_1 = \alpha V_A$ και $V_2 = \beta V_A$ τότε:

$$\alpha V_A + \beta V_A = 2 V_A \Rightarrow V_1 + V_2 = 2 V_A \Rightarrow V_A = (V_1 + V_2)/2 \quad (7)$$

- Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει:

$$P = 2 \rho A V_A^3 (\alpha - 1) \quad (8)$$

- Αντικαθιστώντας με την ταχύτητα του ανέμου στη διατομή εισόδου προκύπτει η τελική έκφραση της **θεωρητικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος**, ήτοι:

$$P = 2 \rho A (V_1 / \alpha)^3 (\alpha - 1) = 2 \rho A V_1^3 (a^{-2} - a^{-3}) \quad (9)$$

Βαθμός απόδοσης – όριο Betz

- Ο **βαθμός απόδοσης**, ήτοι ο λόγος της θεωρητικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (μέγιστη ισχύς ιδεατής ανεμογεννήτριας) προς την θεωρητική αιολική ισχύ, και δίνεται από τη σχέση:

$$c = P/P_0 = 4(a^{-2} - a^{-3}) \quad (10)$$

- Ο βαθμός απόδοσης γίνεται μέγιστος όταν:

$$\frac{\partial c}{\partial a} = 0 \Rightarrow -2a^{-3} + 3a^{-4} = 0 \Rightarrow a^* = 3/2 \quad (11)$$

- Αντικαθιστώντας στη (10) προκύπτει ότι ο **μέγιστος βαθμός απόδοσης** μιας ιδεατής ανεμογεννήτριας (αναφέρεται και ως **όριο Betz**) είναι:

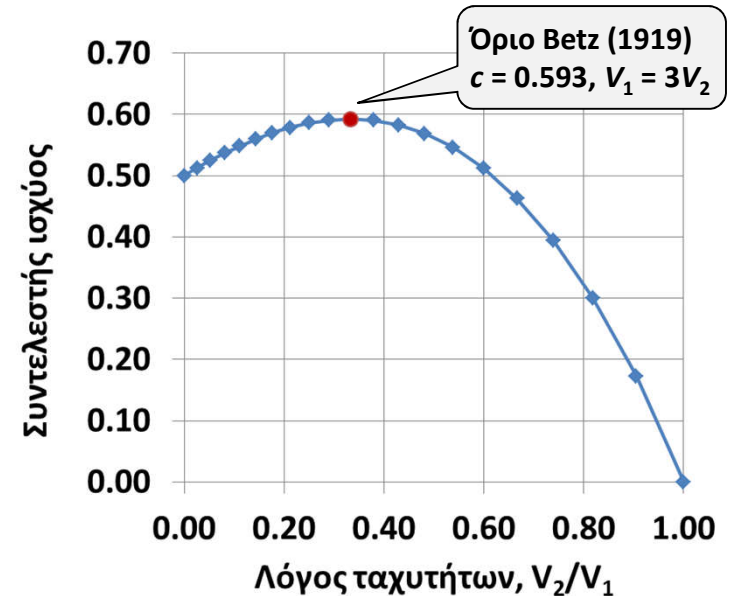
$$c_{max} = 2(2/3)^3 = 16/27 = 0.593 \quad (12)$$

- Η **μέγιστη παραγωγή ισχύος** είναι:

$$P_{max} = (2/3)^3 \rho A V_1^3 = 0.296 \rho A V_1^3 \quad (13)$$

- Για $a^* = 3/2$, από τη σχέση (6) προκύπτει $\beta^* = 1/2$, συνεπώς η ταχύτητα στη διατομή εξόδου είναι:

$$V_2 = V_1/3 \quad (14)$$



Παρατηρήσεις

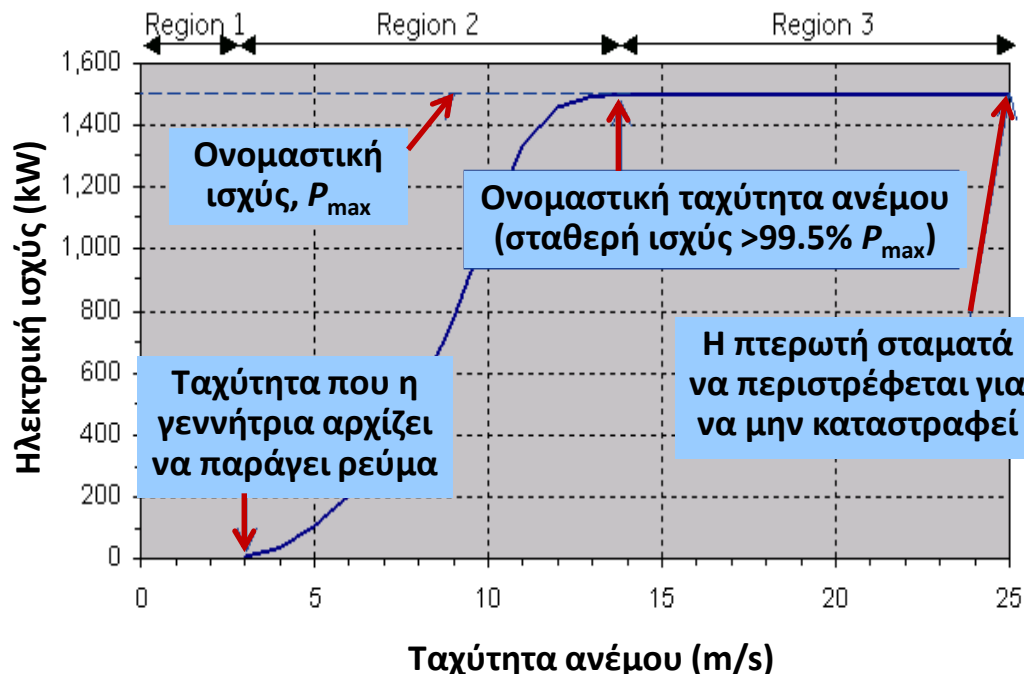
- Από την εξ. (10) προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης μηδενίζεται για $\alpha = 1$ ($V_1 = V_2$), δηλαδή για ανεμπόδιστη ροή ανέμου.
- Όταν τα πτερύγια διακόπτουν πλήρως την ροή του ανέμου, οπότε μηδενίζεται η ταχύτητα εξόδου ($V_2 = 0$, $\alpha = 2$, $\beta = 0$), ο βαθμός απόδοσης τη ιδεατής Α/Γ γίνεται $c = 0.50$.
- Γενικά ισχύει $V_2/V_1 = (2 - \alpha)/\alpha$

Ολικός βαθμός απόδοσης – Καμπύλες ανεμογεννήτριας

- Ο πραγματικός βαθμός απόδοσης c_p είναι μικρότερος από το όριο Betz (59.3%), και εξαρτάται από την **ταχύτητα του ανέμου**, το **πλήθος** και **γωνία των πτερυγίων**, και την **ταχύτητα περιστροφής του ρότορα**.
- Απώλειες προκύπτουν και κατά τη **μετατροπή της κινητικής ενέργειας** σε μηχανική-ηλεκτρική, οπότε ο ολικός **βαθμός απόδοσης** (συντελεστής ισχύος) είναι γινόμενο τριών συνιστωσών.

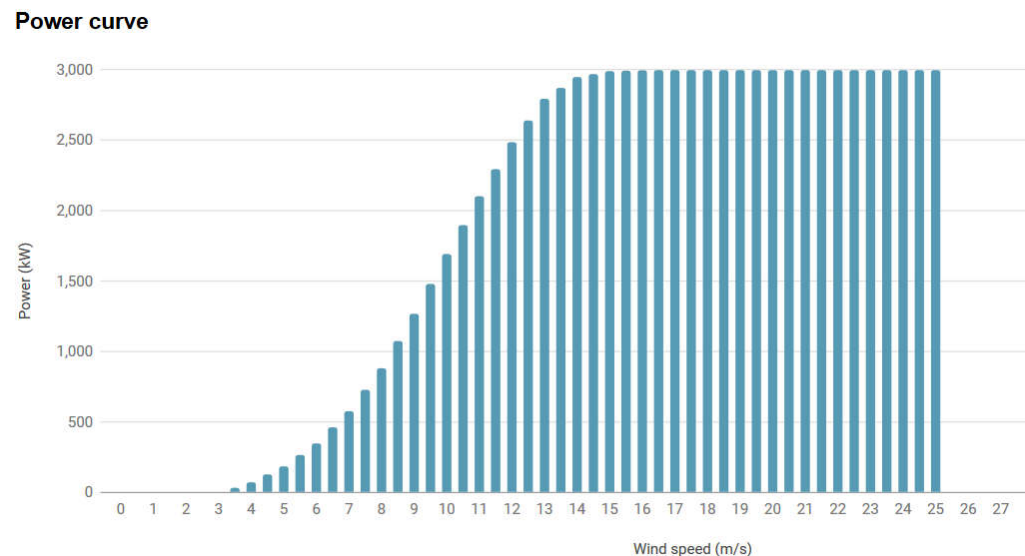
Συνιστώσα	Βαθμός απόδοσης
Ρότορας	45-52% (<i>max</i> 59.3%)
Κιβώτιο ταχυτήτων	95-97%
Γεννήτρια	97-98%
Μετασχηματιστής	96-99%
Πλήρες σύστημα	40-45%

- Η παραγόμενη ισχύς δίνεται μέσω νομογραφημάτων (καμπύλες ισχύος), συναρτήσεως της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος της πτερωτής (απαιτείται υψομετρική αναγωγή των ταχυτήτων που μετρούνται κοντά στο έδαφος).
- Οι σχέσεις αυτές προκύπτουν με βάση εργαστηριακές μετρήσεις.
- Ο βαθμός απόδοσης μειώνεται με τον χρόνο, με ρυθμό της τάξης του 5-7% ανά έτος (για παλιές Α/Γ).



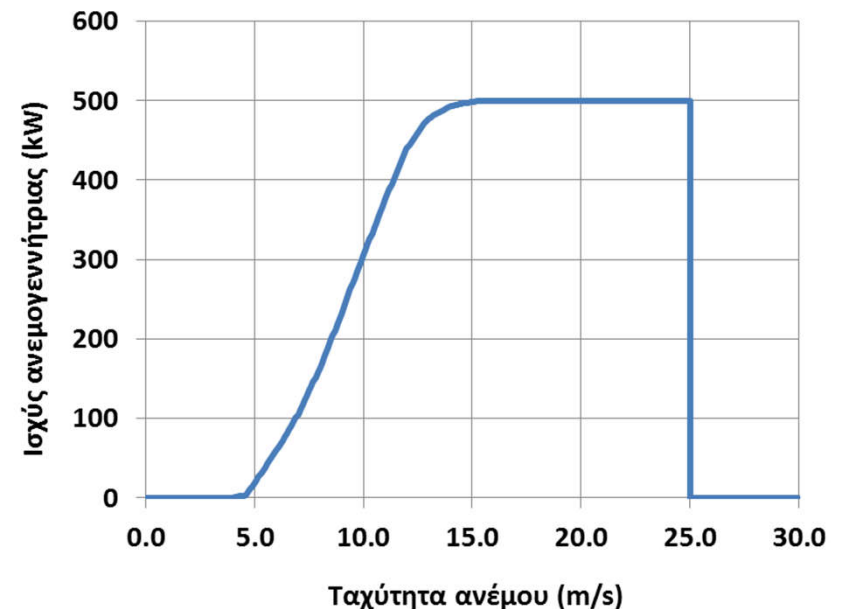
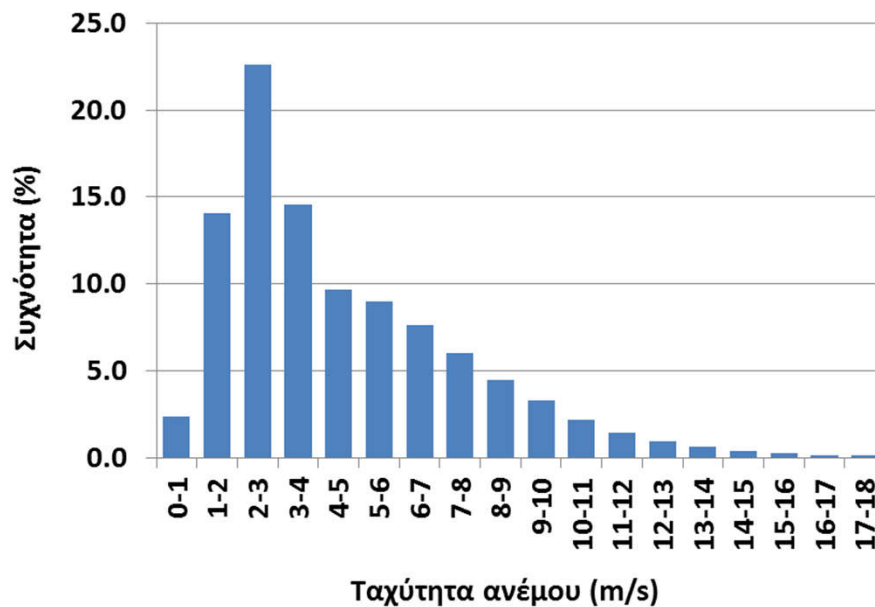
Χαρακτηριστικές τιμές ισχύος και ταχυτήτων

- ❑ **Ονομαστική ισχύς (rated power):** Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει η Α/Γ, η οποία είναι πρακτικά σταθερή για σημαντικό εύρος ταχυτήτων ανέμου (εφαρμόζεται στην εκτίμηση του συντελεστή δυναμικότητας).
- ❑ **Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut-in speed):** Ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πτερωτής για παραγωγή ενέργειας (τυπική τιμή <3.0 m/s).
- ❑ **Ονομαστική ταχύτητα (rated wind speed):** Ταχύτητα ανάκτησης της μέγιστη ισχύος (τυπική τιμή 13-14 m/s).
- ❑ **Ταχύτητα παύσης λειτουργίας (cut-out speed):** Ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία διακόπτεται η λειτουργία της Α/Γ για λόγους ασφαλείας (τυπική τιμή >25 m/s).
- ❑ **Ταχύτητα επιβίωσης (survival wind speed):** Ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία η κατασκευή καθίσταται επισφαλής (τυπικό εύρος 40-72 m/s, τυπική τιμή 60 m/s). Πρόκειται για μέγεθος σχεδιασμού που αφορά στη στατική μελέτη της Α/Γ, και απαιτεί στατιστική ανάλυση των ακραίων τιμών ταχύτητας ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

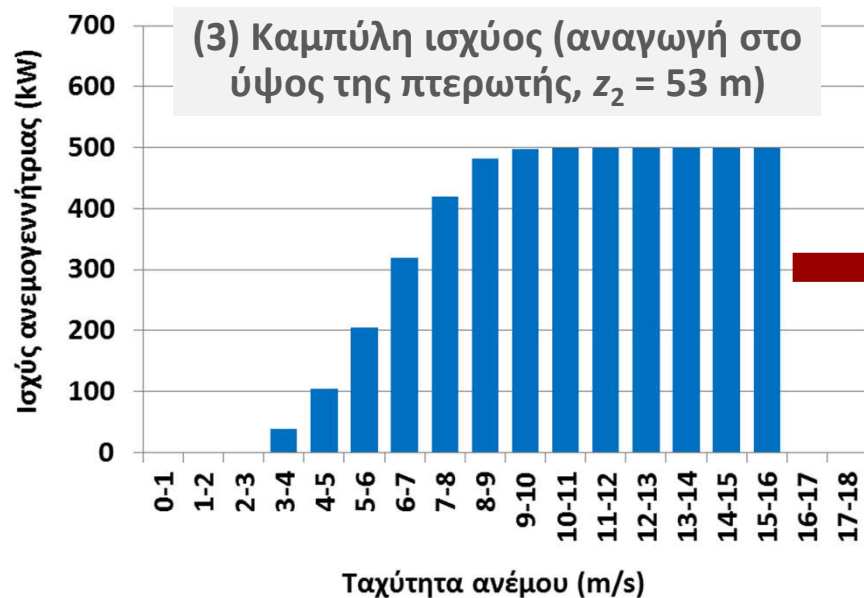
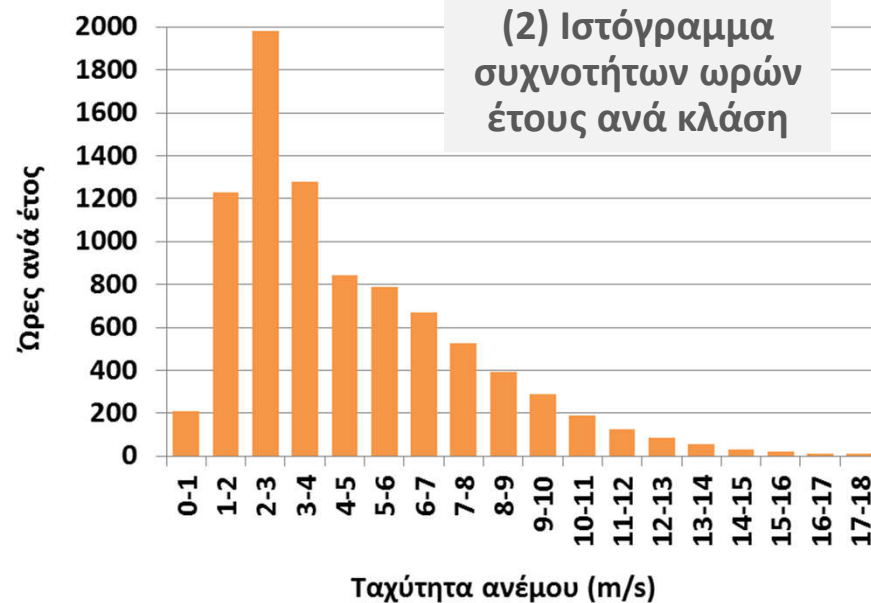
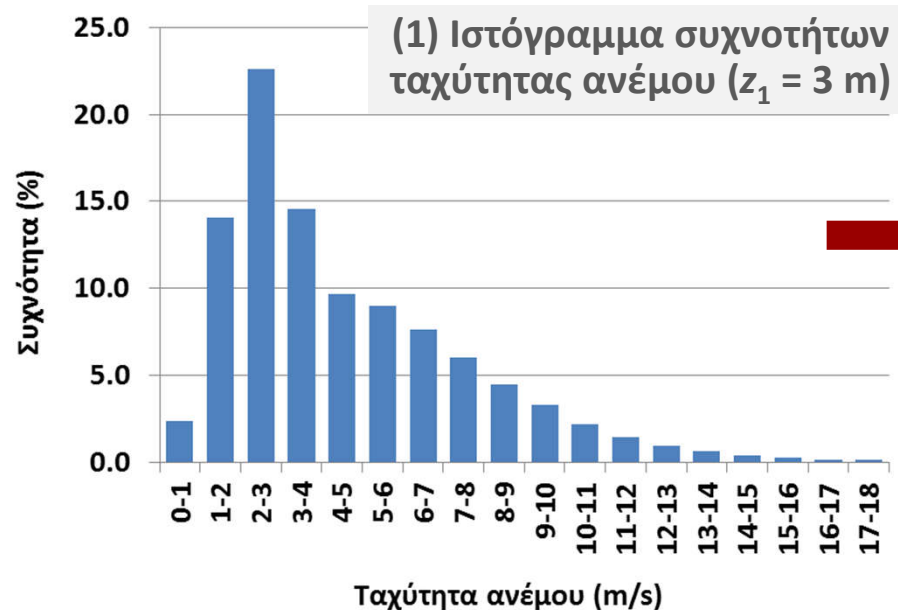


Εκτίμηση μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας

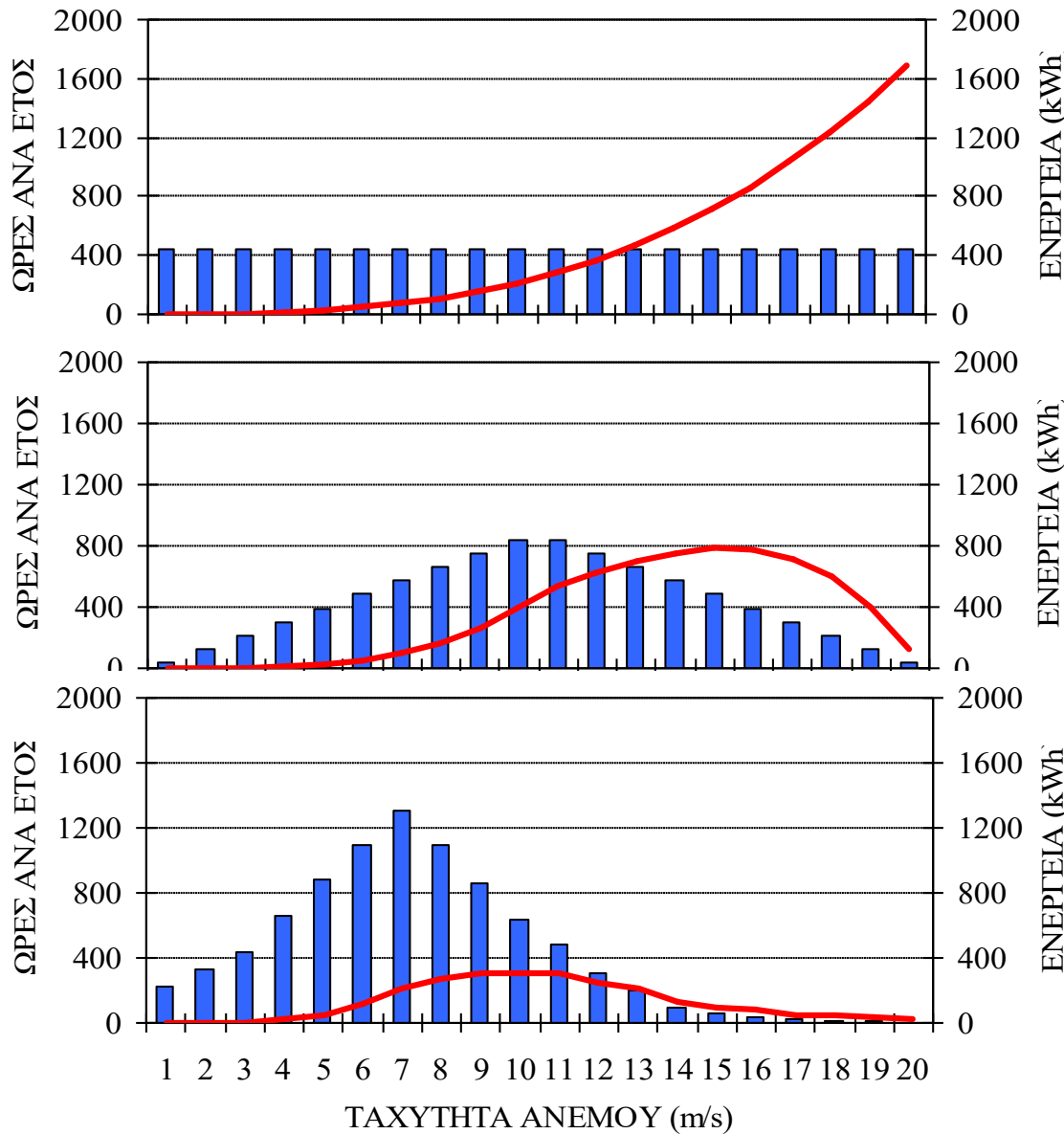
- ❑ Ανεμολογικά δεδομένα (ταχύτητες ανέμου)
 - ❑ Πλήρη (χρονοσειρές σε λεπτή χρονική κλίμακα, π.χ. ωριαία)
 - ❑ Συνοπτικά (μέσες μηνιαίες τιμές, ιστόγραμμα συχνοτήτων)
- ❑ Αναγωγή στο υψόμετρο της πτερωτής (λογαριθμική κατανομή ταχύτητας ανέμου)
- ❑ Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας μέσω χρονικής ολοκλήρωσης, με βάση την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας:
 - ❑ Αναλυτικά (προσομοίωση), αν διατίθεται η χρονοσειρά ταχυτήτων ανέμου
 - ❑ Εμπειρικά, με βάση τις ώρες που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση ταχύτητας ανέμου ($E = \text{ώρες ανά κλάση} \times \text{ισχύς που αντιστοιχεί στη μέση ταχύτητα της κλάσης}$)



Παράδειγμα με βάση το ιστόγραμμα συχνοτήτων



Εκτίμηση ετήσιας θεωρητικής αιολικής ενέργειας με βάση το ιστόγραμμα συχνοτήτων της ταχύτητας ανέμου



Ομοιόμορφη κατανομή ταχυτήτων ανέμου

Συνολική ενέργεια: 9292 kWh
Μέση τιμή ταχύτητας: 10.0 m/s
Ενέργεια μέσης τιμής: 4214 kWh

Κανονική (συμμετρική) κατανομή ταχυτήτων ανέμου

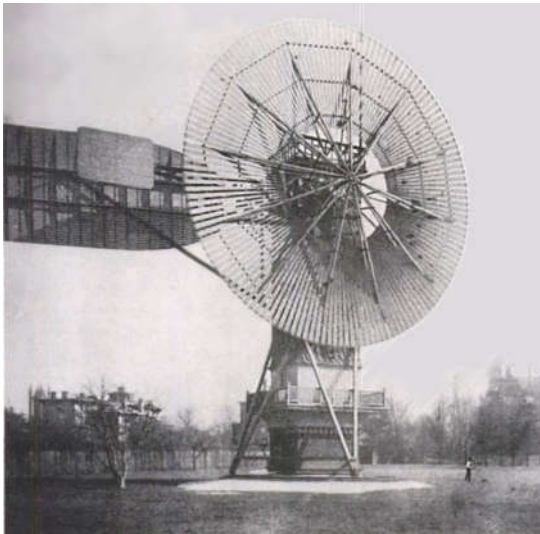
Συνολική ενέργεια: 7040 kWh
Μέση τιμή ταχύτητας: 10.5 m/s
Ενέργεια μέσης τιμής: 4877 kWh

Μη κανονική (ασύμμετρη) κατανομή ταχυτήτων ανέμου

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

$$E = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 \sum_{i=1}^N V_i^3 T_i$$

Βασικά στοιχεία τεχνολογίας ανεμογεννητριών



Οικονομικά στοιχεία:

- Αρχικό κόστος: 1.1-1.3 Μ€/MW
- Κόστος λειτουργίας: 0.01-0.02 €/kWh

Η μεγαλύτερη του κόσμου: Goldwind GWH252-16MW (υπεράκτια, Κίνα)

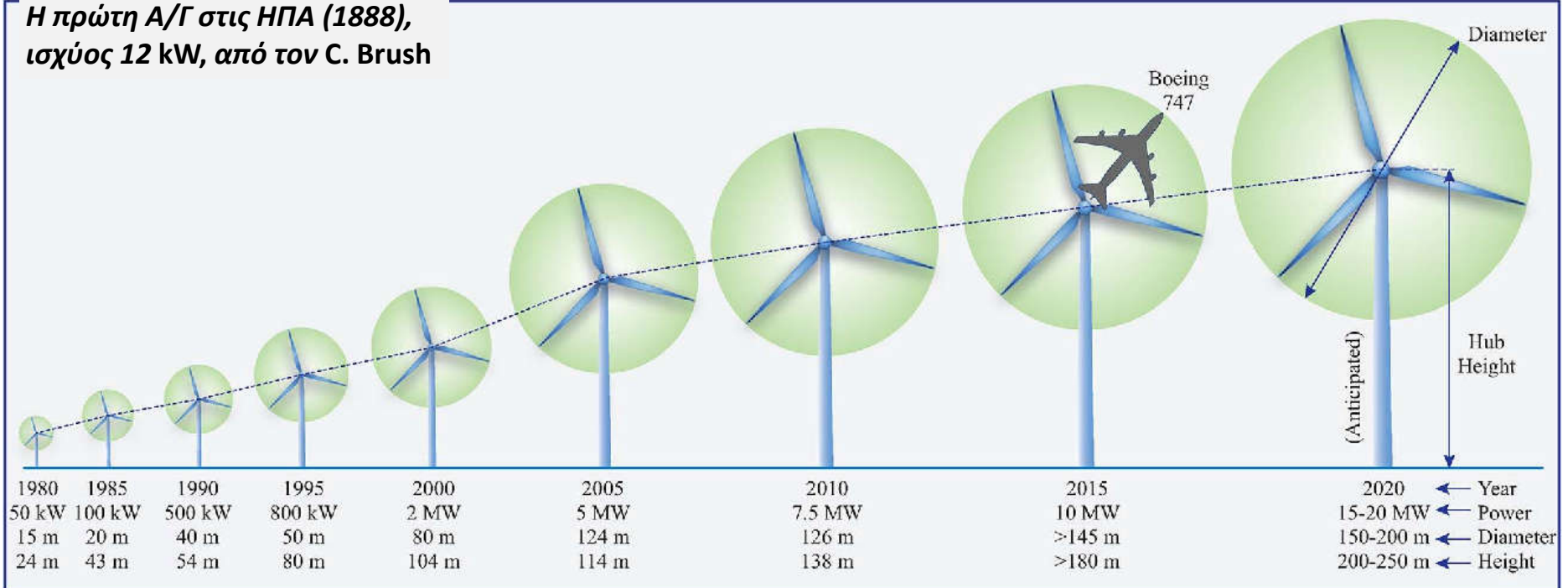
Τυπικά μεγέθη Α/Γ:

- Επίγειες: 1-4 MW
- Υπεράκτιες: 6-8 MW

Συντελεστές δυναμικότητας:

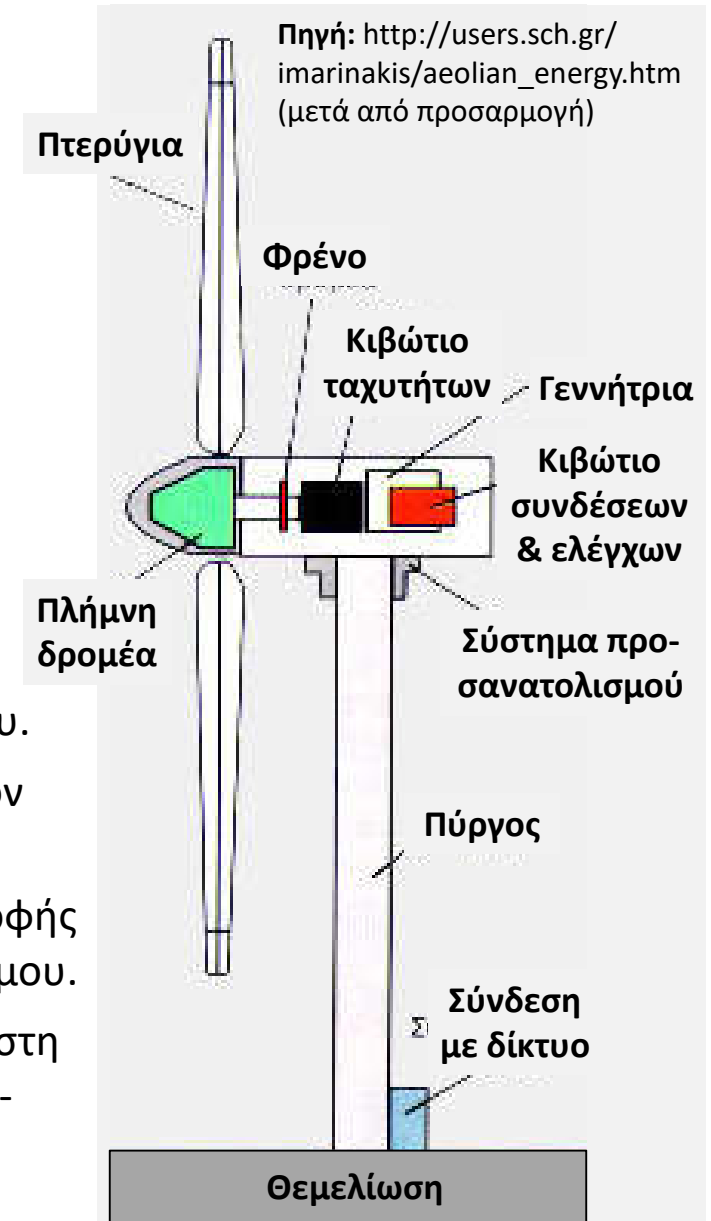
- Επίγειες: 35-40% (Ελλάδα)
- Υπεράκτιες: >55%

Η πρώτη Α/Γ στις ΗΠΑ (1888), ισχύος 12 kW, από τον C. Brush



Τυπικός εξοπλισμός ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

- ❑ **Δρομέας:** Αποτελείται από δύο ή (συνήθως) τρία **πτερύγια** από ενισχυμένο πολυεστέρα, τα οποία προσδένονται σε μια **πλήμνη**, είτε σταθερά ή με δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον διαμήκη άξονα τους. Κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά (υαλονήματα και ειδικές ρητίνες), ώστε να αντέχουν πολύ μεγάλες καταπονήσεις.
- ❑ **Σύστημα μετάδοσης κίνησης:** Αποτελείται από τον **κύριο άξονα**, τα **έδρανά** του και το **κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών**, που προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της γεννήτριας (η ταχύτητα παραμένει σταθερή κατά τη λειτουργία της Α/Γ).
- ❑ **Ηλεκτρογεννήτρια:** Συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή, μέσω ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου.
- ❑ **Σύστημα πέδης:** Σύνηθες δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- ❑ **Σύστημα προσανατολισμού:** Αναγκάζει τον άξονα περιστροφής να βρίσκεται συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- ❑ **Ηλεκτρονικός πίνακας & πίνακας ελέγχου:** Τοποθετούνται στη βάση του πύργου και περιλαμβάνουν υποσυστήματα μικρο-ελεγκτών, που εξασφαλίζουν την εύρυθμη και ασφαλή λειτουργία της Α/Γ σε όλες τις συνθήκες ανέμου.



Τεχνικά μεγέθη ανεμογεννήτριας

- ❑ **Κωδικοποίηση:** Στην εμπορική ονομασία της Α/Γ αναφέρονται η τιμή της διαμέτρου και της ονομαστικής ισχύος (π.χ. V164-9.5 MW)
- ❑ **Διάμετρος πτερωτής:** Μια τυπική Α/Γ ισχύος 0.5 MW έχει διάμετρο πτερωτής 40 m και ύψος έως 50 m, ενώ μια Α/Γ ισχύος 3.0 MW έχει διάμετρο 80 m και ύψος έως 100 m. Η μεγαλύτερη του κόσμου (Haliade-X, ισχύος 14 MW) έχει διάμετρο 220 m και ύψος 248 m.
- ❑ **Ύψος πυλώνα:** Εξαρτάται από τη διάμετρο, γενικά ισχύει $1.0 < H/D < 1.5$.
- ❑ **Πλήθος πτερυγίων:** Γενικά έχουν επικρατήσει οι αιολικές μηχανές με τρία πτερύγια, καθώς με λιγότερα πτερύγια απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής για το ίδιο ενεργειακό αποτέλεσμα, το οποίο συνεπάγεται περισσότερο θόρυβο και φθορές, με μόνο πλεονέκτημα το μικρότερο κόστος. Από την άλλη πλευρά, παραπάνω από τρία πτερύγια εξασφαλίζουν ελάχιστα καλύτερη απόδοση, με δυσανάλογα υψηλότερο κόστος.
- ❑ **Είδος πτερυγίων:** Οι πολύ συμπαγείς πτερωτές (πολλά ή φαρδιά πτερύγια) ξεκινούν τη λειτουργία τους από μικρές ταχύτητες ανέμου, ωστόσο θα πρέπει να βγαίνουν εκτός λειτουργίας στις μεγάλες ταχύτητες. Παράδειγμα αποτελούν οι αμερικανικοί ανεμόμυλοι του 18ου αιώνα, που αντλούσαν σταθερά μικρή ποσότητα νερού όλο το χρόνο.
- ❑ **Ονομαστική ταχύτητα περιστροφής:** Συνδέεται με παράγοντες όπως η συχνότητα του ηλεκτρικού δικτύου και η αντοχή των πτερυγίων σε φυγόκεντρες τάσεις.
- ❑ **Καμπύλη ισχύος:** Γραφική απεικόνιση της σχέσης ταχύτητας ανέμου και αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Πύργος ανεμογεννήτριας (πυλώνας)

Επίδραση ύψους πυλώνα:

- Αύξηση διαθέσιμου αιολικού δυναμικού (σε σχέση με έναν πύργο 80 m επιτυγχάνεται περίπου 5% αύξηση της παραγόμενης ενέργειας ανά 20 m αύξηση του ύψους της Α/Γ)
- Περιορισμένη επίδραση εμποδίων στο έδαφος

Τρόπος κατασκευής:

- Δικτυωτός πυλώνας (έως το 1980, δεν κατασκευάζεται πλέον)
- Σωληνοειδής πύργος μορφής ελευθέρου προβόλου
 - Χαλύβδινος (μέγιστο πάχος χάλυβα 40 mm)
 - «Υβριδικός» πυλώνας σκυροδέματος (βάση) – χάλυβα
 - Σύνθετος, από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά (fiber glass)



Υβριδικός πύργος

Τεχνικές απαιτήσεις:

- Εύκολη πρόσβαση στην άτρακτο και τον εξοπλισμό (σωληνοειδής πύργος, προστασία από καιρικές συνθήκες)
- Εύκολη μεταφορά και ανέγερση (μέγιστη εξωτερική διάμετρος 6 m)
- Μέγιστη αποδεκτή μετατόπιση κορυφής ίση με το 1% του ύψους του πυλώνα



Σωληνοειδής



Δικτυωτός



Σκυροδέματος

Θεμελίωση ανεμογεννήτριας

Τυπικές διατάξεις:

- Εκτεταμένη θεμελίωση (πέδιλο)
 - Ρηχή, μεγάλου εμβαδού
 - Βαθιά (θεμελίωση βαρύτητας)
- Πάσσαλοι που συνδέονται με κεφαλόδεσμο

Τεχνικές απαιτήσεις:

- Φορτία ανέμου → καμπτικές ροπές στη θεμελίωση
- Ανάπτυξη πολύ μικρών μετακινήσεων (διαφορικές καθιζήσεις, στροφές)



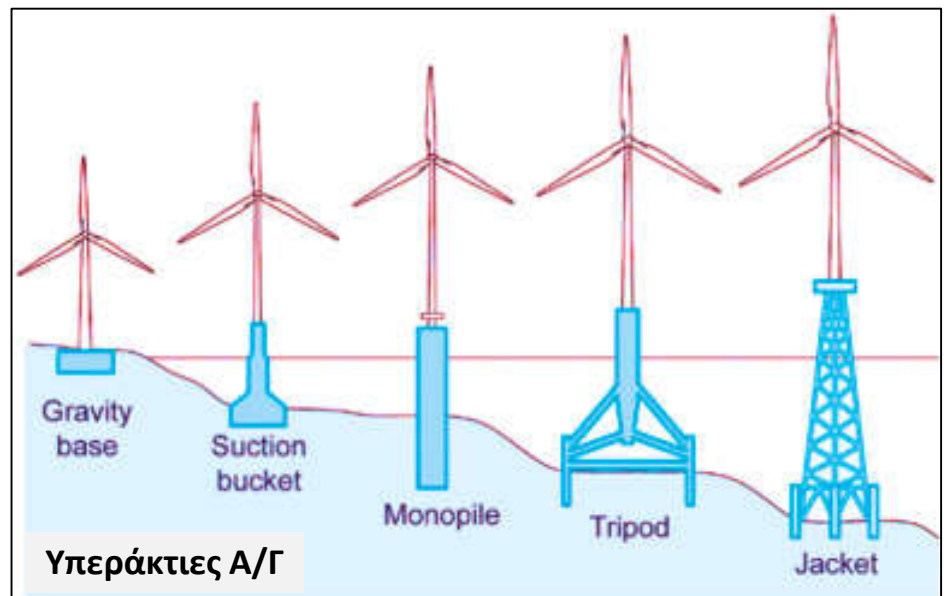
Πάσσαλοι με κεφαλόδεσμο



Ρηχή θεμελίωση



Βαθιά θεμελίωση (λήψη
13/11/2018, Κ. Κυριακίδης)



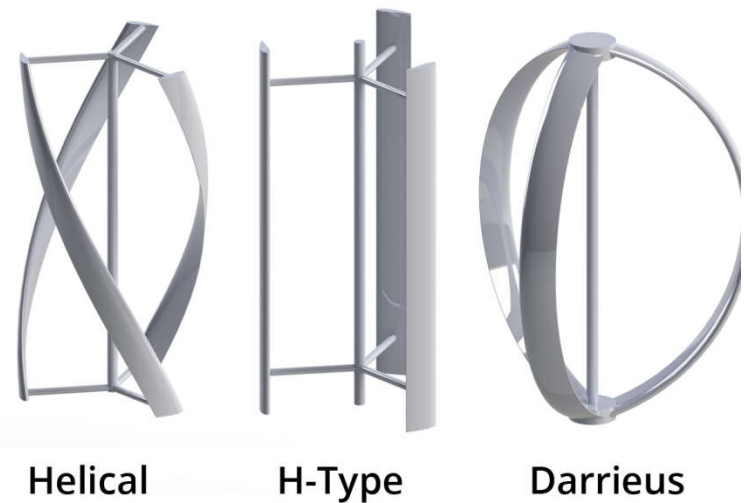
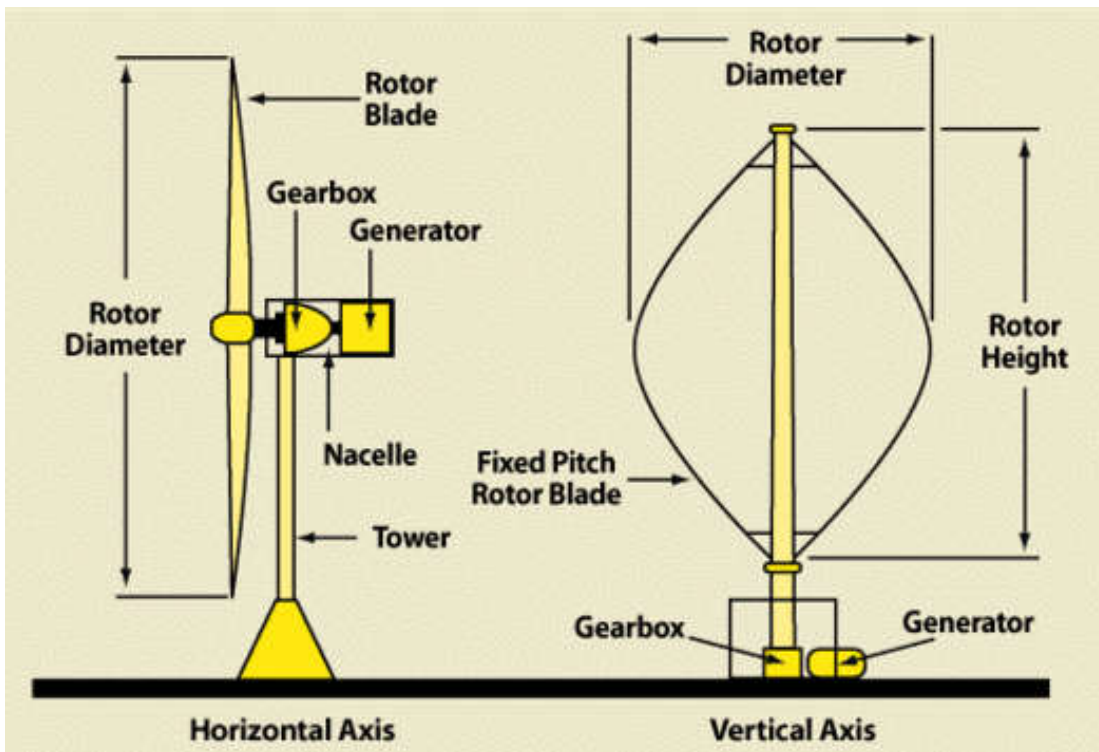
Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

Πλεονεκτήματα:

- δεν απαιτούν σύστημα προσανατολισμού
- τοποθέτηση ηλεκτρικής γεννήτριας στο έδαφος

Μειονεκτήματα σε σχέση με Α/Γ οριζόντιου άξονα:

- εκμεταλλεύονται μικρότερες ταχύτητες ανέμου
- έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης
- καταλαμβάνουν μεγαλύτερο εμβαδόν στο έδαφος



Τυπικές διατάξεις Α/Γ κατακόρυφου άξονα

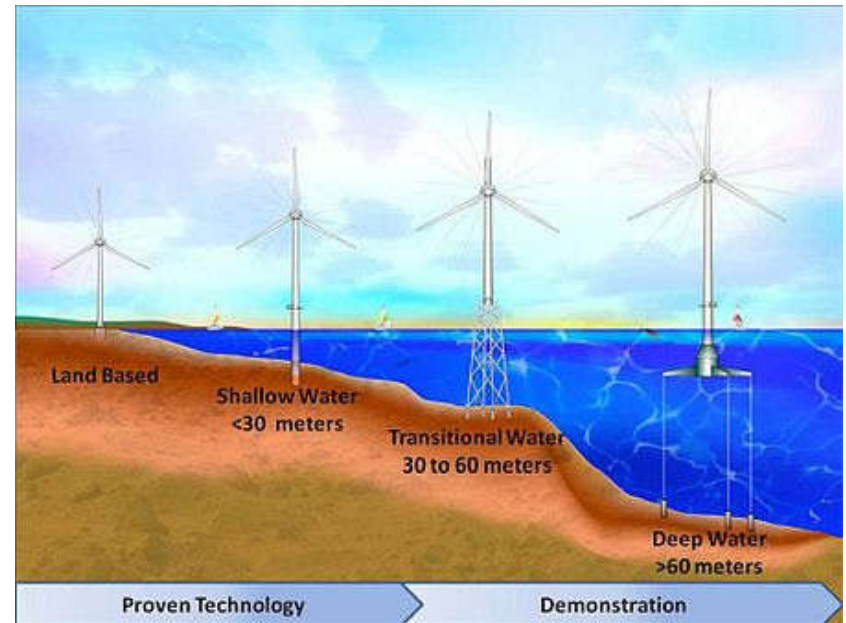
Υπεράκτια αιολικά πάρκα

Κριτήρια εγκατάστασης υπεράκτιων Α/Γ:

- ❑ Βάθος θάλασσας (συνήθως έως 50 m)
- ❑ Απόσταση από τη στεριά (<10 km)
- ❑ Οπτική όχληση από την ακτή
- ❑ Περιβαλλοντικά κριτήρια

Μεγαλύτερα υπεράκτια πάρκα:

- ❑ Walney & Walney Extension, Αγγλία, 1026 MW
- ❑ Hornsea Wind Farm, Βόρεια Θάλασσα, έως 6000 MW (υπό κατασκευή)



Χωροθέτηση αιολικών πάρκων

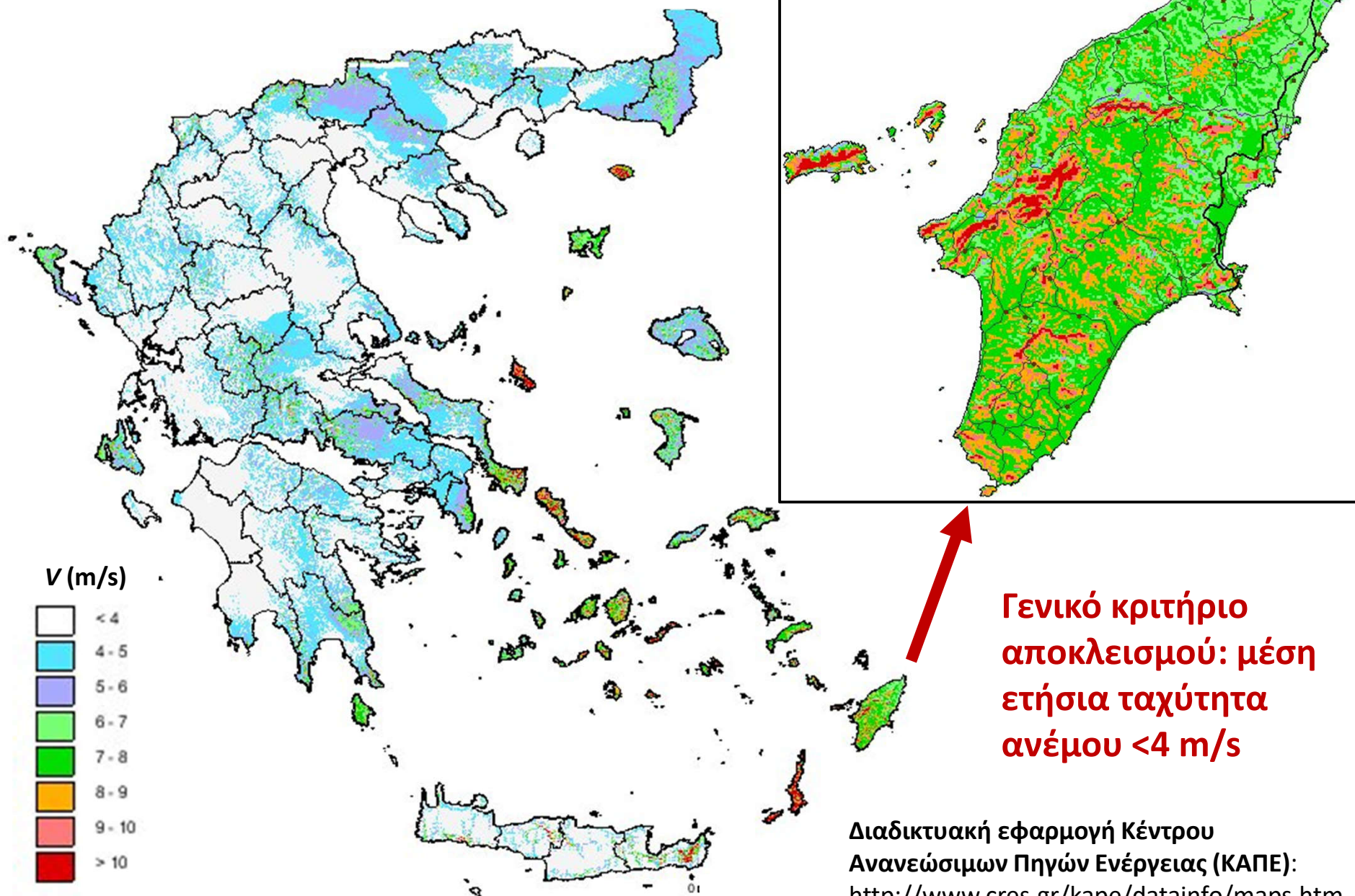
Βασικά τεχνικά κριτήρια:

- ❑ Αιολικό δυναμικό (στατιστική ανάλυση ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου)
- ❑ Κατασκευαστικά κριτήρια (συνθήκες θεμελίωσης, σεισμικότητα)
- ❑ Απόσταση από φυσικά εμπόδια (κριτήριο ομόρου)
- ❑ Πρόσβαση – απόσταση από υποδομές (οδικό και ηλεκτρικό δίκτυο)

Περιοχές αποκλεισμού με βάση την ελληνική νομοθεσία:

- ❑ Περιοχές διατηρητέων μνημείων, αρχαιολογικών ζωνών προστασίας Α
- ❑ Περιοχές απολύτου προστασίας της φύσης και προστασίας της φύσης, πυρήνες εθνικών δρυμών, κηρυγμένα μνημεία της φύσης, αισθητικά δάση, περιοχές Ραμσάρ
- ❑ Μόνιμα αρδευόμενες εκτάσεις και μόνιμες καλλιέργειες
- ❑ Υγρότοποι, ποταμοί, λίμνες
- ❑ Ακτές κολύμβησης
- ❑ Οικιστικές περιοχές & παραδοσιακοί οικισμοί, τουριστικές και οικιστικές περιοχές εκτός σχεδίου, περιοχές οργανωμένης ανάπτυξης παραγωγικών δραστηριοτήτων
- ❑ Εγκαταστάσεις αεροπλοΐας
- ❑ Τμήματα λατομικών περιοχών και μεταλλευτικών και εξορυκτικών ζωνών που λειτουργούν επιφανειακά

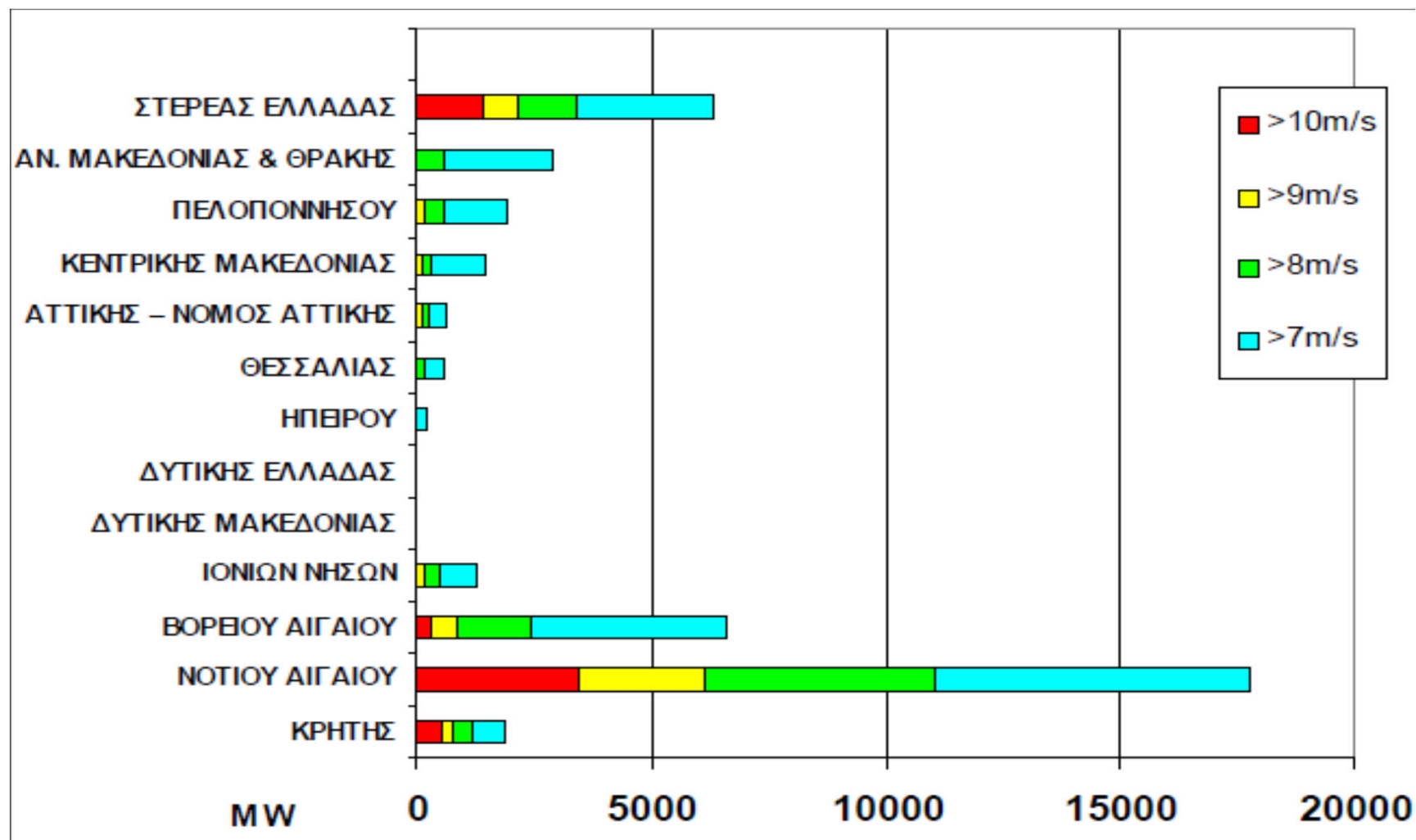
Αιολικό δυναμικό Ελλάδας



**Γενικό κριτήριο
αποκλεισμού: μέση
ετήσια ταχύτητα
ανέμου <4 m/s**

Διαδικτυακή εφαρμογή Κέντρου
Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ):
<http://www.cres.gr/kape/datainfo/maps.htm>

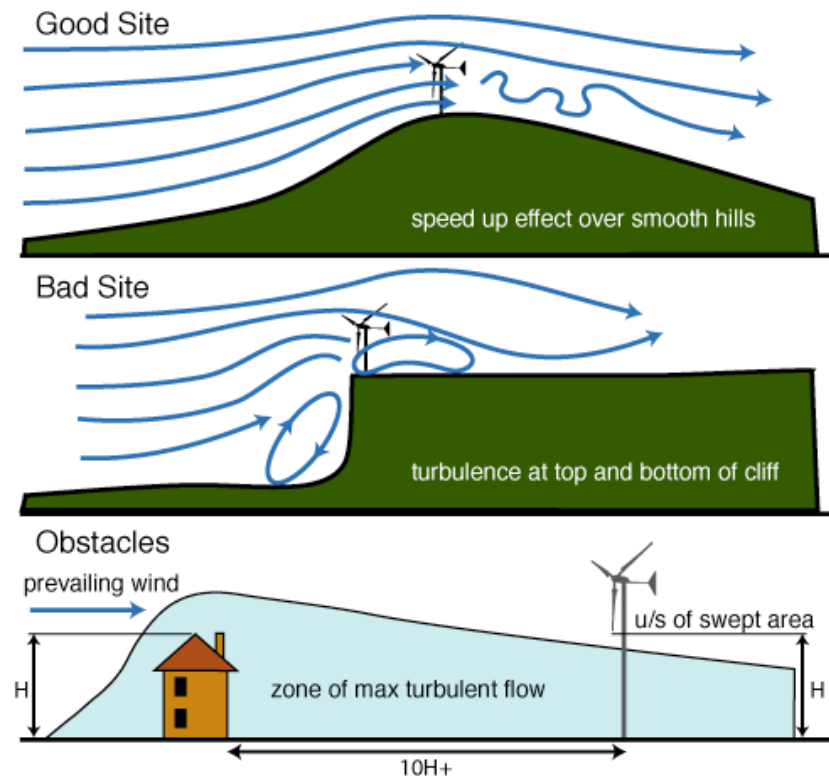
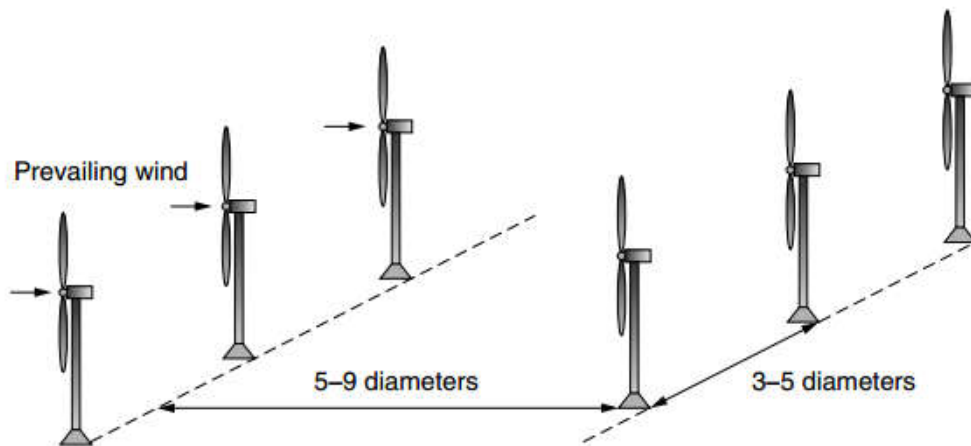
Κατανομή αιολικού δυναμικού ανά περιφέρεια



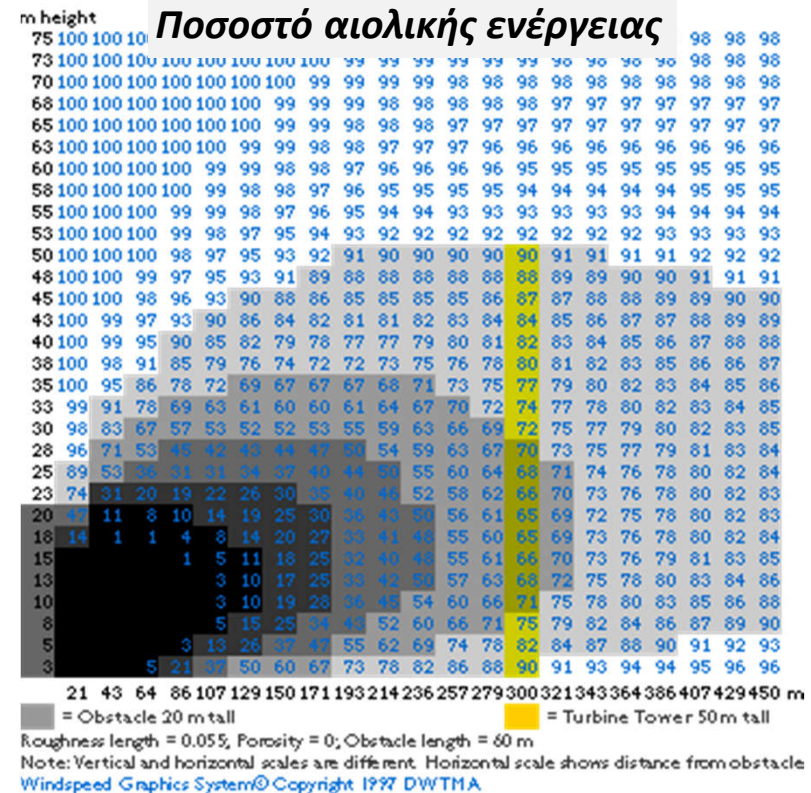
Πληροφορίες σχετικά με τη νομοθεσία και τυποποίηση κριτηρίων χωροθέτησης αιολικών πάρκων: Δασκάλου, Ο., Μεθοδολογία βέλτιστης χωροθέτησης και διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών & αιολικών πάρκων με χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών: Εφαρμογή στην Περιφέρεια Θεσσαλίας, Διπλωματική εργασία, 161 σ., Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος ΕΜΠ, Ιούλιος 2016 (<http://www.itia.ntua.gr/1645/>)

Παρεμπόδιση ανέμου & όρια ελάχιστων αποστάσεων

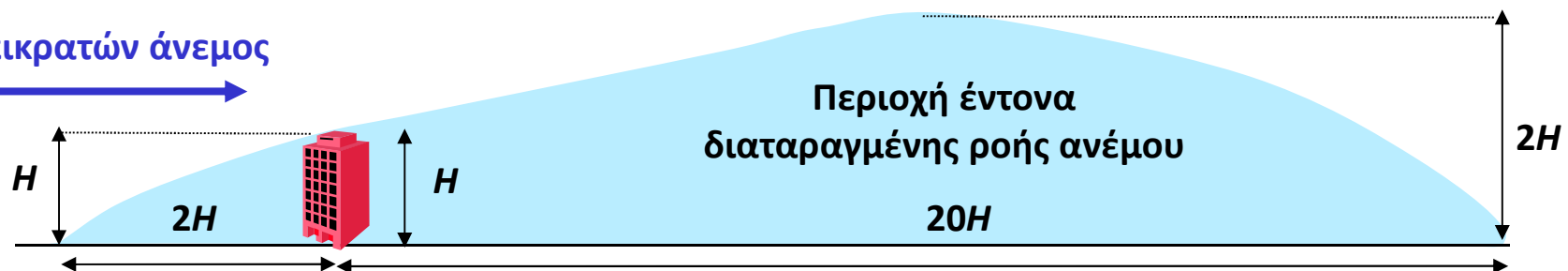
- Η παρεμβολή εμποδίων στη ροή του ανέμου προκαλεί φαινόμενα **τύρβης**, που έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.
- Γενικά, στα αιολικά πάρκα, οι απώλειες ενέργειας λόγω των εμποδίων (που κυρίως οφείλονται στη γειτνίαση των ανεμογεννητριών) κυμαίνονται από 5 έως 15%.
- Στα αιολικά πάρκα εφαρμόζονται **ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ**, που ορίζονται με βάση τη διάμετρο της πτερωτής ως εξής:
 - 5-9 διαμέτροι, κατά τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων
 - 3-5 διαμέτροι, κάθετα στην επικρατούσα διεύθυνση
- Σε σχέση με **εμπόδιο στο έδαφος**, η Α/Γ τοποθετείται σε ελάχιστη απόσταση ίση με 10 φορές το ύψος του εμποδίου.



Επίδραση εμποδίου ύψους 20 m και μήκους 60 m σε Α/Γ ύψους 50 m τοποθετημένης σε απόσταση 300 m



Επικρατών ανέμος



Σύγκριση αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων

Έκταση Φ/Β πάρκου ισχύος 18 MW: 370 000 m²

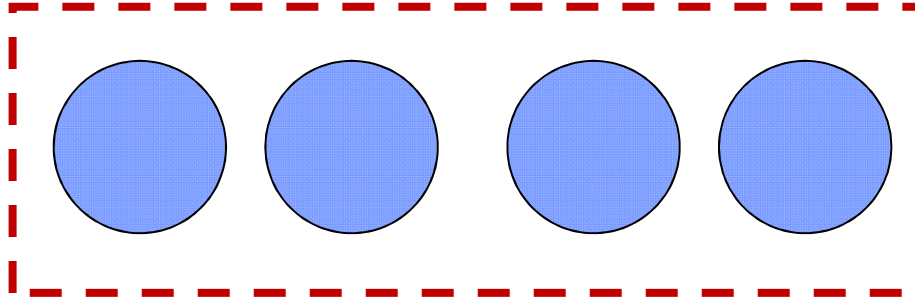
Τύπος: ENERCON E112

Ισχύς: 4500 kW

Διάμετρος: 114 m

Αριθμός: 4

Επιφάνεια: 40 828 m²



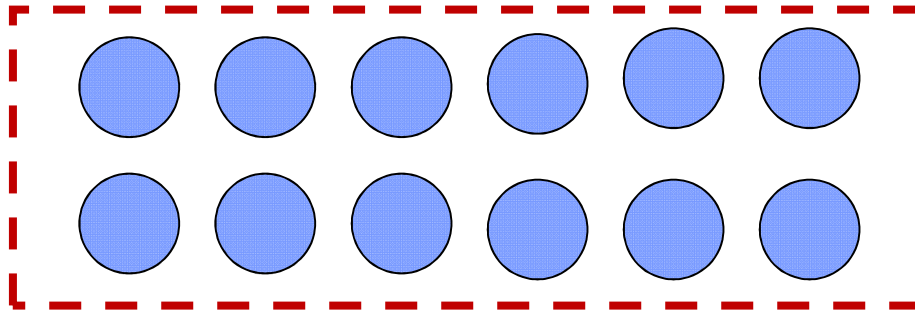
Τύπος: ENERCON E-66

Ισχύς: 1500 kW

Διάμετρος: 66 m

Αριθμός: 12

Επιφάνεια: 41 054 m²



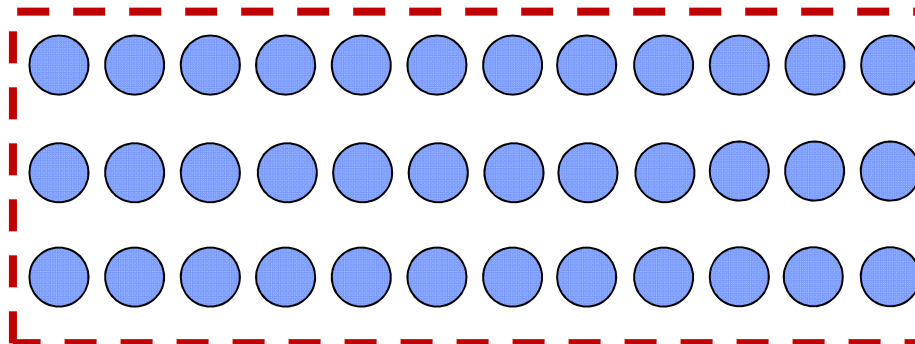
Τύπος: VESTAS V-39

Ισχύς: 500 kW

Διάμετρος: 39 m

Αριθμός: 36

Επιφάνεια: 43 005 m²



Πλεονεκτήματα & μειονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Πλεονεκτήματα

- ❑ Τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική, γρήγορη και τυποποιημένη συναρμολόγηση και εγκατάσταση, με χαμηλό λειτουργικό κόστος
- ❑ Αμελητέες επιδράσεις στην πανίδα και ελάχιστες απαιτήσεις γης
- ❑ Συμβάλει στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος και τη μείωση των απωλειών μεταφοράς ενέργειας

Μειονεκτήματα

- ❑ Απρόβλεπτη διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας, ως συνέπεια της έντονης χωροχρονικής μεταβλητότητας του ανέμου (**έντονα στοχαστική ΑΠΕ**)
- ❑ Εκπεμπόμενος θόρυβος από τα μηχανικά τμήματα και την περιστροφή των πτερυγίων (44 db σε απόσταση 200 m για ταχύτητα ανέμου 8 m/s)
- ❑ Οπτική όχληση (δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες είναι ορατές από απόσταση, πρέπει να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσης τους στο τοπίο)
- ❑ Θάνατος πουλιών από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες (πολύ μικρό ποσοστό, ωστόσο πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη χωροθέτηση τυχόν προστατευόμενες περιοχές και να εξετάζεται η τοποθέτηση συστήματος υπερήχων)
- ❑ Αλλοίωση ορεινού τοπίου, λόγω της κατασκευής οδικών έργων σε απρόσιτες περιοχές
- ❑ Αδυναμία ανακύκλωσης πτερυγίων (fiberglass)

Αντί επιλόγου: περί αισθητικής (ή μέτρον άριστον)



Ο Αθέρας (Ικαρία) πάνω από τον Μαγγανίτη, όπως θα φαίνεται μετά από την εγκατάσταση 110 Α/Γ ισχύος 3.0 MW, ύψους 150 m και διαμέτρου πτερωτής 90 m, σε έκταση 28 km².



Η παιδική χαρά Wikado στο Ρότερνταμ, με πύργο με τσουλήθρες, σήραγγες και ράμπες, κατασκευασμένα από πέντε πτερύγια παλαιών ανεμογεννητριών