

Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία

1^ο και 5^ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

Αιολική ενέργεια



Ανδρέας Ευστρατιάδης & Νίκος Μαμάσης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2021-22

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)

Σκίρων (Μαΐστρος)



Βορέας (Τραμουντάνα)



Καικίας (Γραίγος)



Ζέφυρος (Πουνέντες)



Απηλιώτης (Λεβάντες)



Λιψ (Γαρμπής)



Νότος (Όστρια)



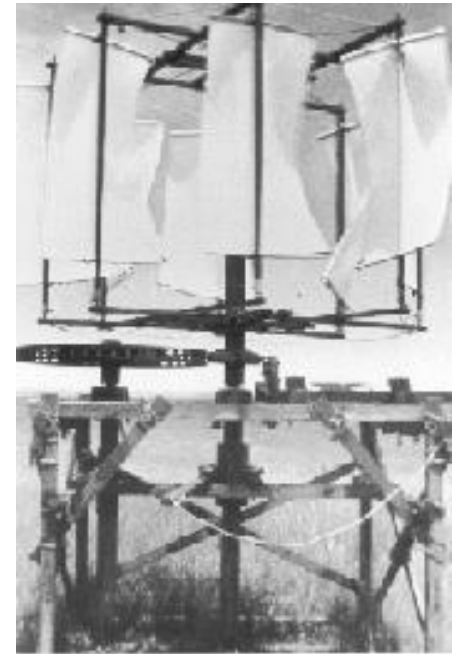
Εύρος (Σιρόκος)



Ιστορική αναδρομή (1)



Μύλος Αργυρίου, λόφος Πετρίτη, Μετσ



*Αντίγραφο του πρώτου
Περσικού μύλου*



Γιώργος Βιδάκης

Οροπέδιο Λασιθίου (1968)

**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.

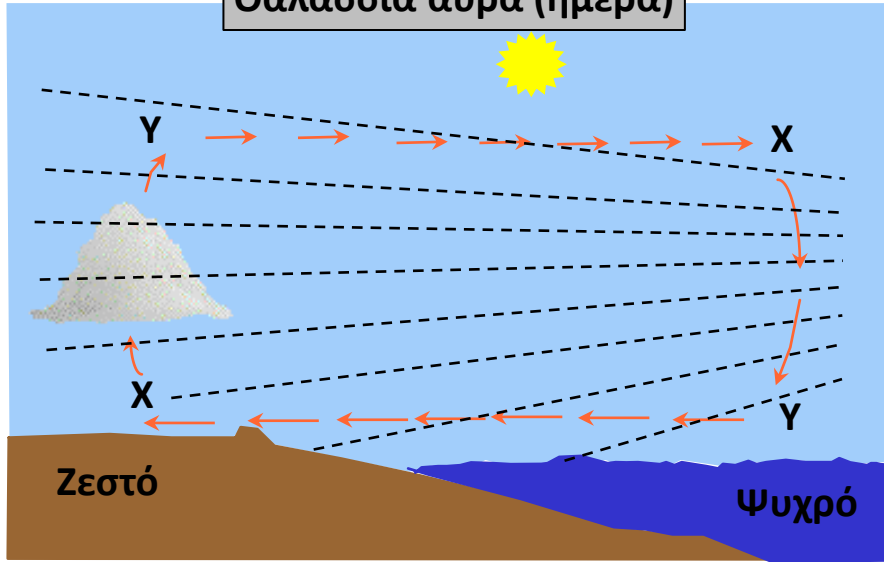
Τυπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm)

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

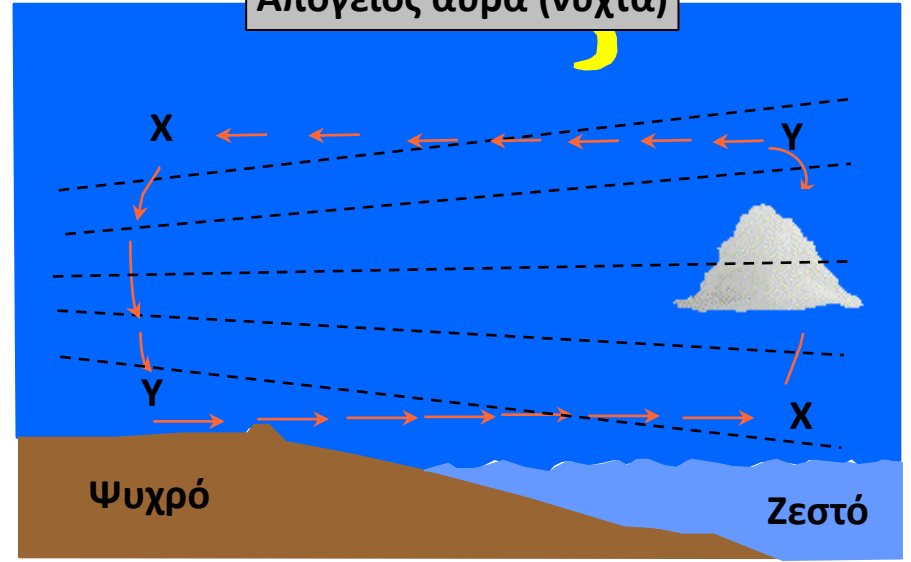
Πηγή: Κουτσογιάννης, Δ., & Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3, ΕΜΠ, Αθήνα 1999

Παραδείγματα δημιουργίας ανέμων

Θαλάσσια αύρα (ημέρα)



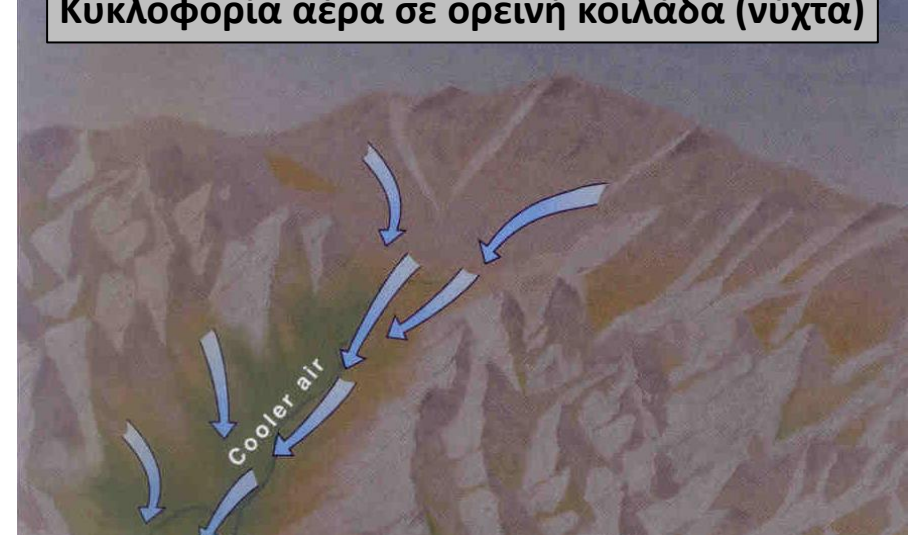
Απόγειος αύρα (νύχτα)



Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (ημέρα)

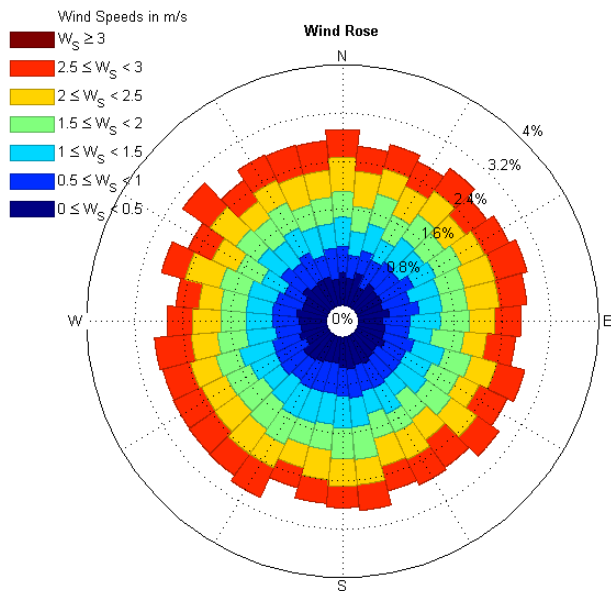


Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (νύχτα)



Χαρακτηριστικά ανέμου

Κατάταξη ανέμων με βάση την κλίμακα Beaufort



Απεικόνιση στατιστικής κατανομής ταχυτήτων ανέμου ανά διεύθυνση (wind rose)

- ❑ Κόμβος, knot \rightarrow 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**)

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:

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

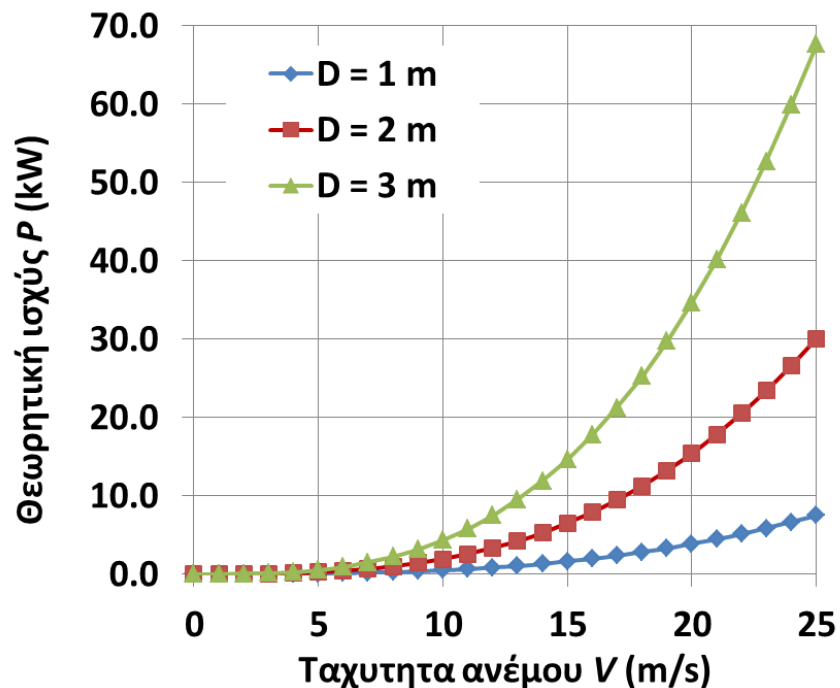
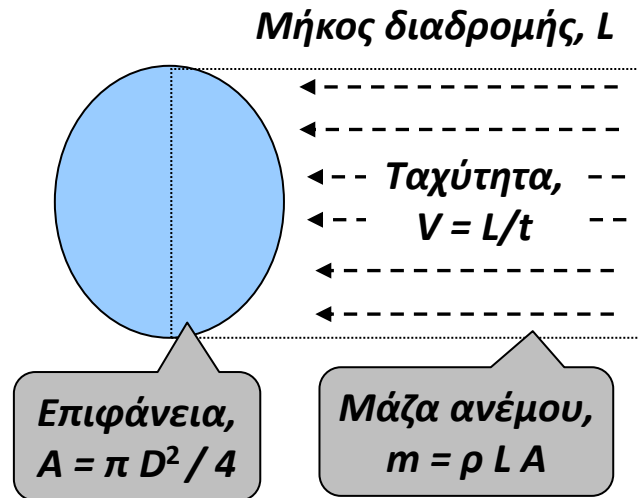
όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (1.225 kg/m³).

- 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:

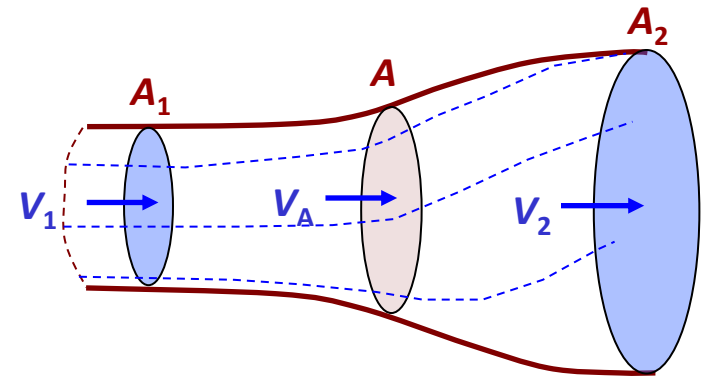
$$E = E_1 - E_2 = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1)$$

- 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:

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

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:

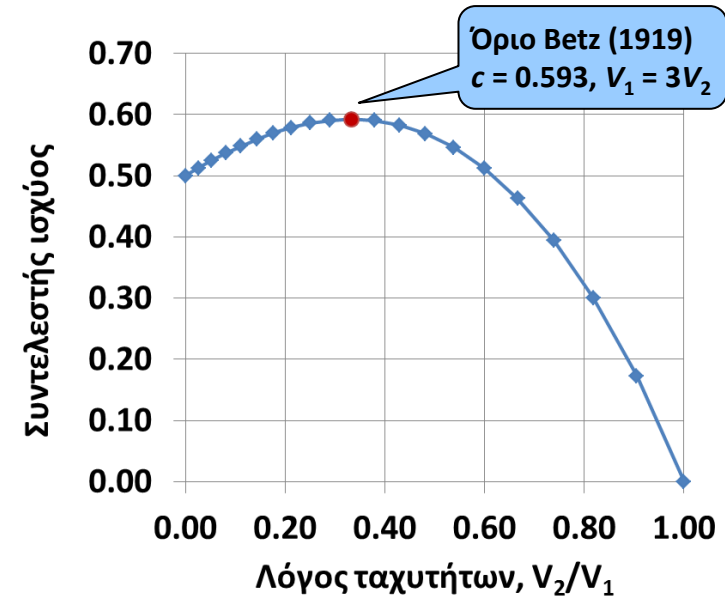
$$c_{max} = 2(2/3)^3 = 16/27 = 0.593 \quad (12)$$

- 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:

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

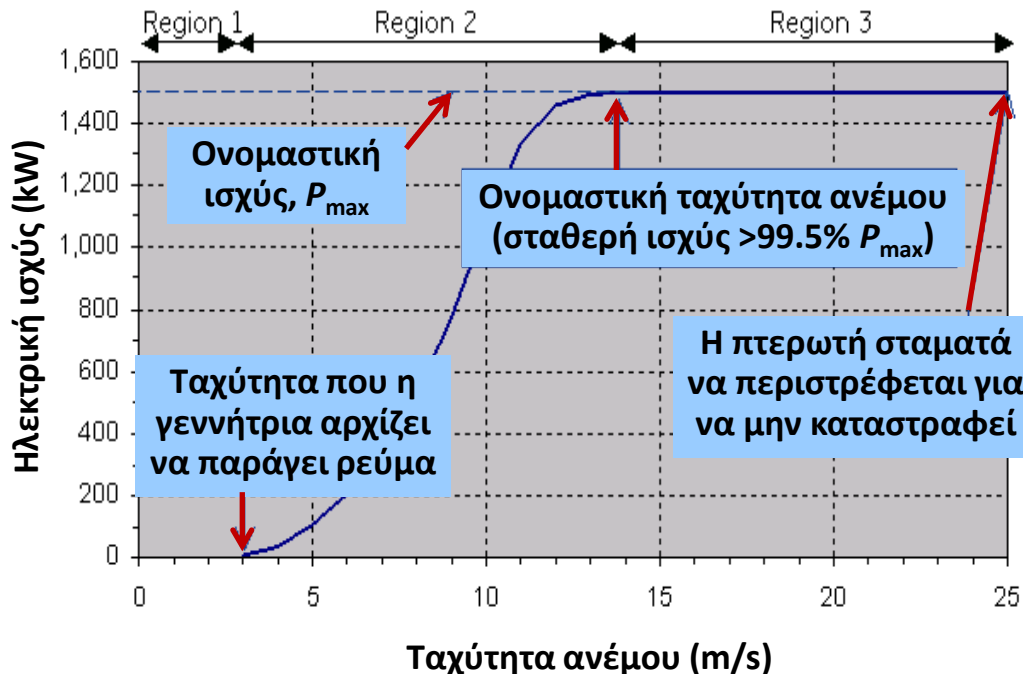


Παρατηρήσεις

- Από την εξ. (10) προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης μηδενίζεται για $\alpha = 1$ ($V_1 = V_2$), ήτοι 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.



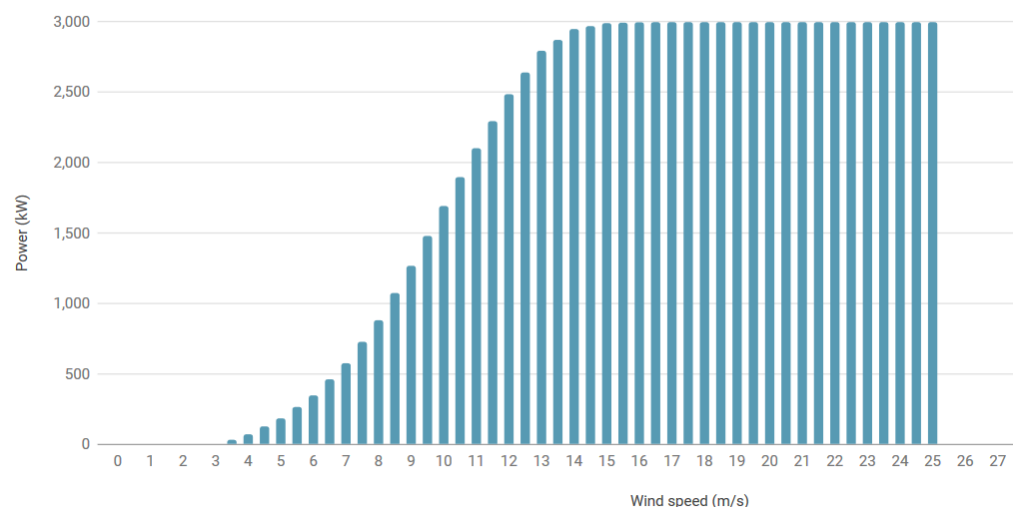
Συνιστώσα	Βαθμός απόδοσης
Ρότορας	45-52% (<i>max 59.3%</i>)
Κιβώτιο ταχυτήτων	95-97%
Γεννήτρια	97-98%
Μετασχηματιστής	96-99%
Πλήρες σύστημα	40-45%

- Η παραγόμενη ισχύς δίνεται μέσω νομογραφημάτων (καμπύλες ισχύος), συναρτήσει 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

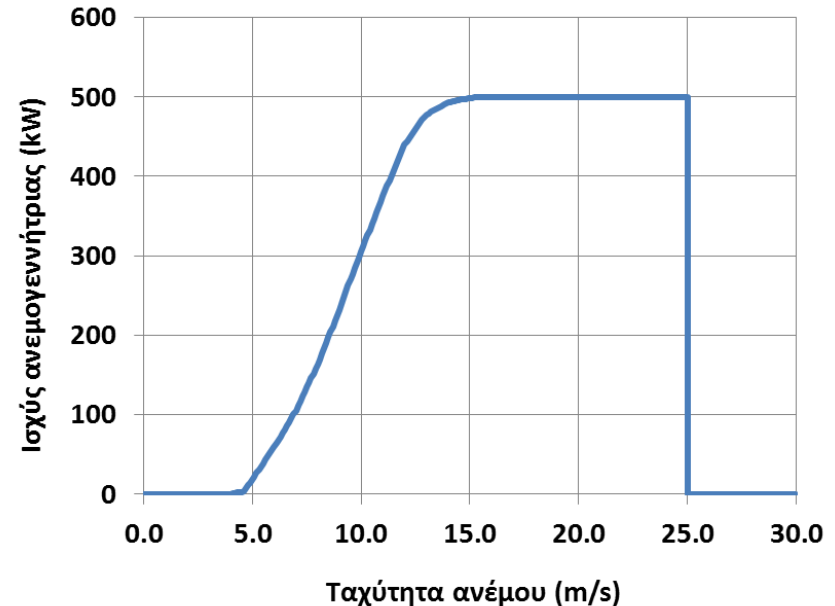
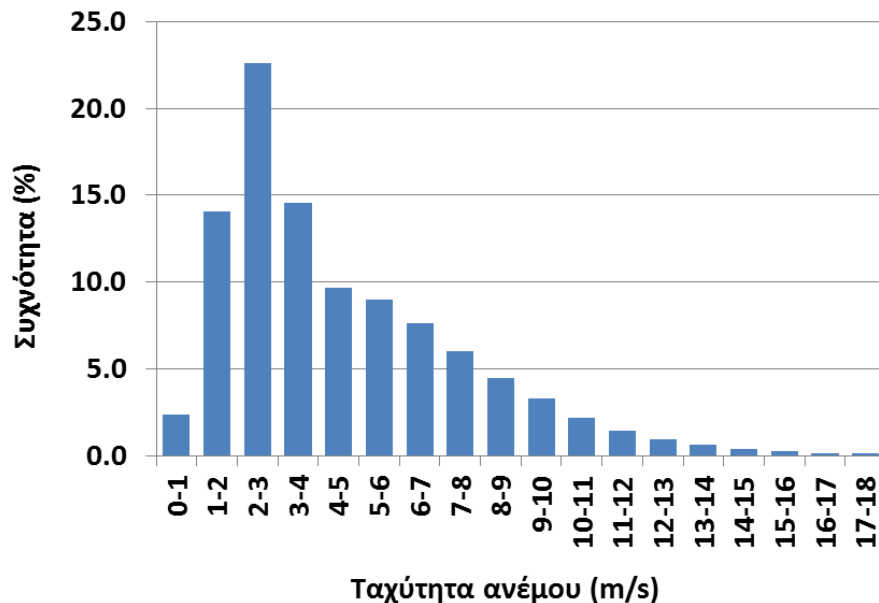
- ❑ **Ονομαστική ισχύς (rated power):** Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει η Α/Γ, η οποία είναι πρακτικά σταθερή για σημαντικό εύρος ταχυτήτων ανέμου. Η μέγιστη ισχύς χρησιμοποιείται στην εκτίμηση του συντελεστή δυναμικότητας (= λόγος παραγόμενης προς θεωρητικά μέγιστη δυναμική ενέργεια, σε ετήσια ή μέση ετήσια κλίμακα)
- ❑ **Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut-in speed):** Ελάχιστη απαιτούμενη ταχύτητα ανέμου στο ύψος της πτερωτής για παραγωγή ενέργειας (τυπική τιμή 3.0-3.5 m/s).
- ❑ **Ονομαστική ταχύτητα (rated wind speed):** Ταχύτητα ανάκτησης της μέγιστη ισχύος (τυπική τιμή 14-15 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 25-27 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.

Power curve

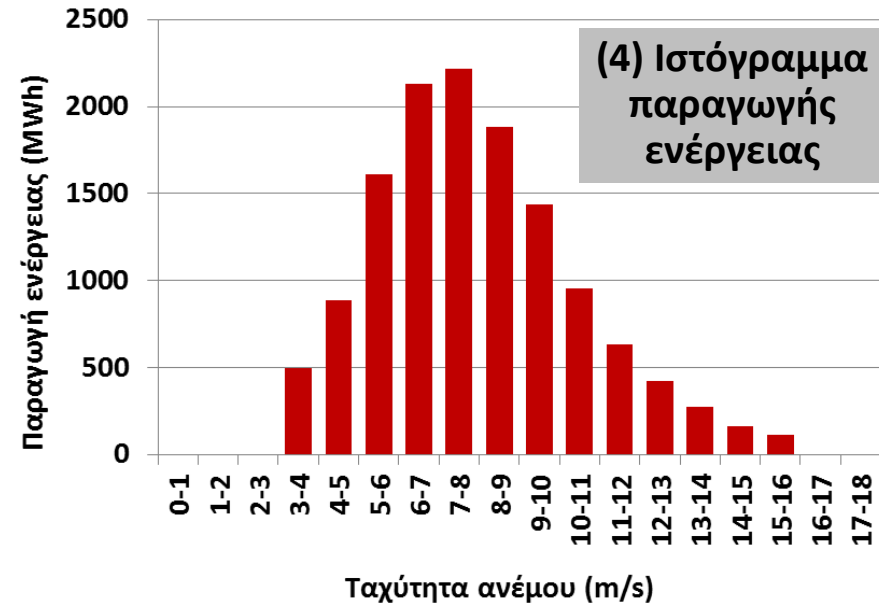
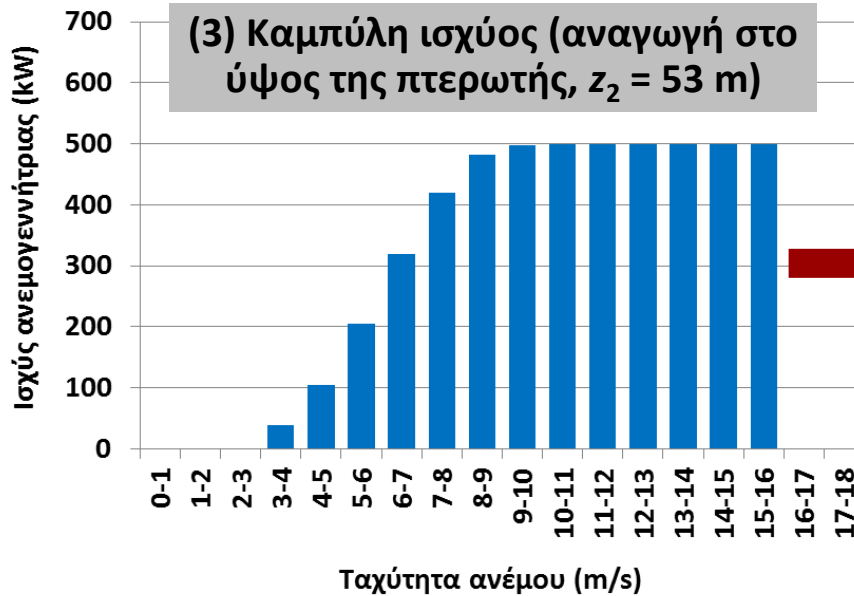
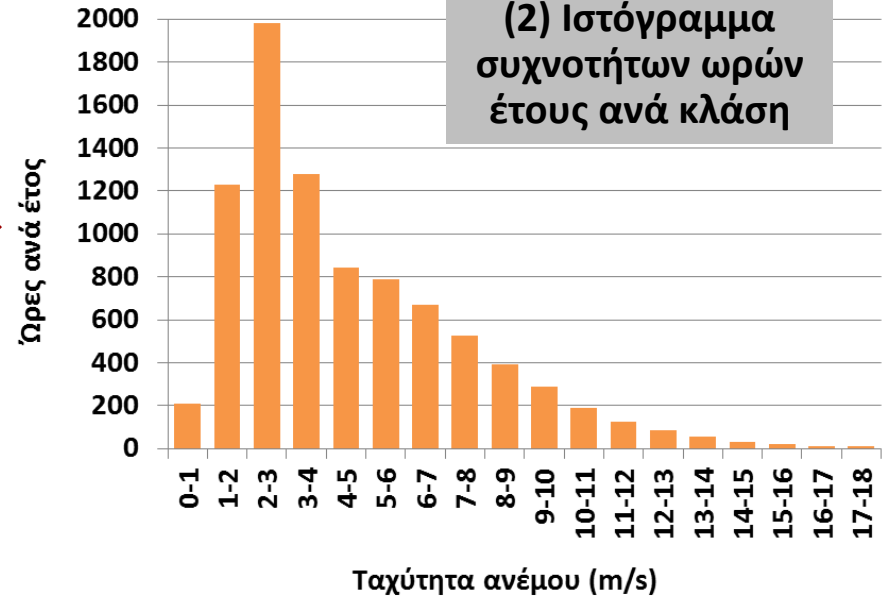
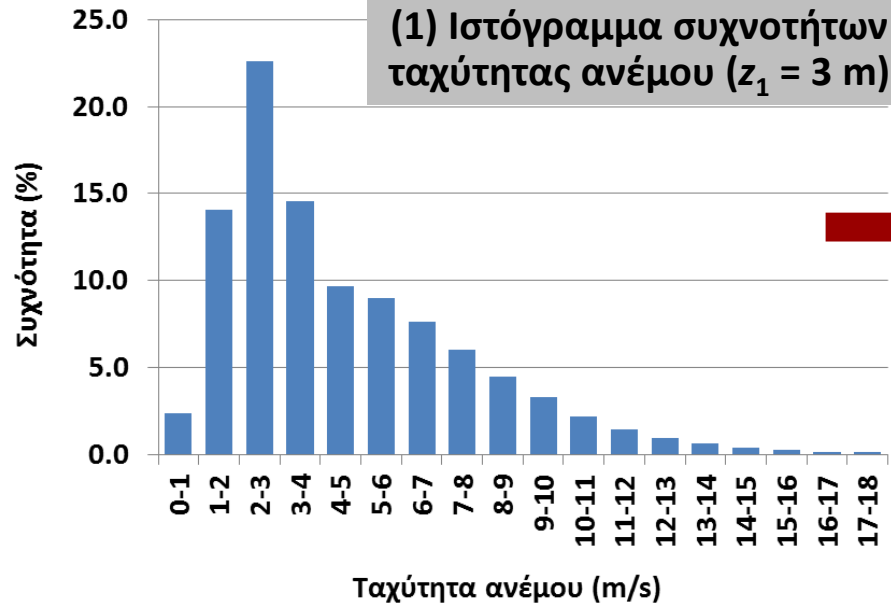


Εκτίμηση μέσης ετήσιας παραγωγής ενέργειας

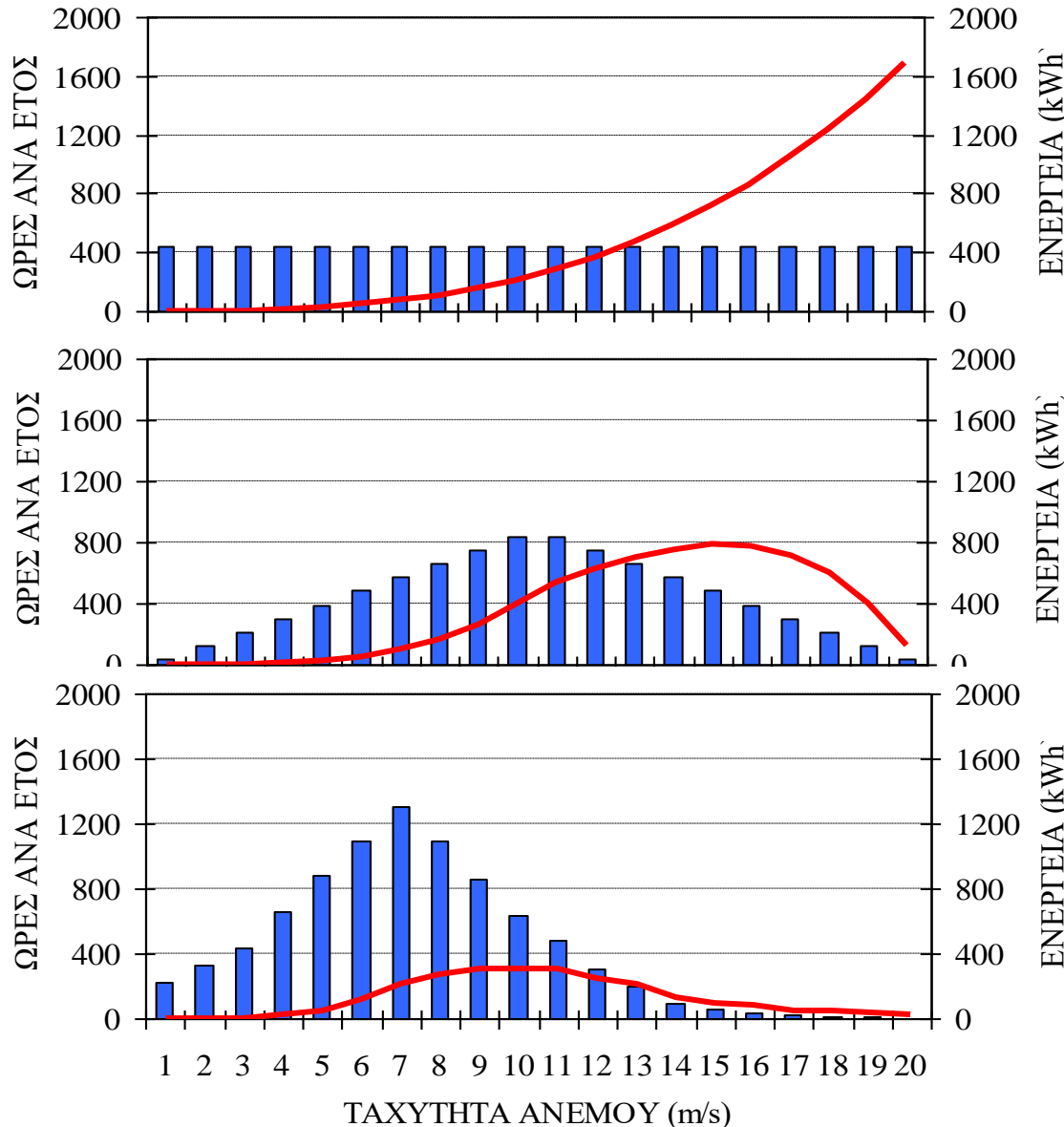
- Ανεμολογικά δεδομένα (ταχύτητες ανέμου)
 - Πλήρη (χρονοσειρές σε λεπτή χρονική κλίμακα, π.χ. ωριαία)
 - Συνοπτικά (μέσες μηνιαίες τιμές, ιστόγραμμα συχνοτήτων)
- Αναγωγή στο υψόμετρο της πτερωτής (λογαριθμική κατανομή ταχύτητας ανέμου)
- Εκτίμηση παραγόμενης ενέργειας μέσω χρονικής ολοκλήρωσης, με 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

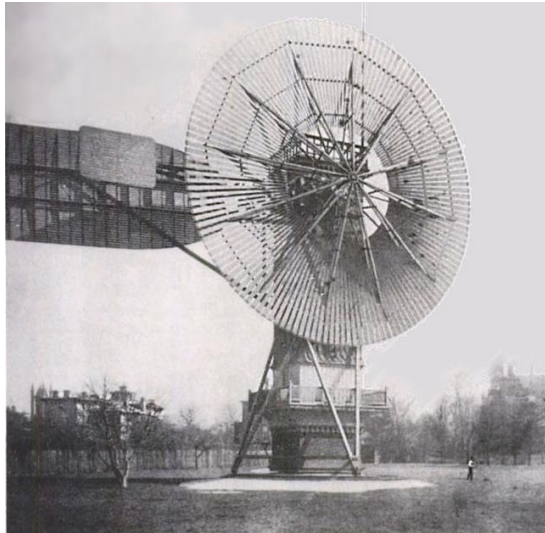
Συνολική ενέργεια: 7040 kWh
Μέση τιμή ταχύτητας: 10.5 m/s
Ενέργεια μέσης τιμής: 4877 kWh

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



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

Οικονομικά στοιχεία:

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

Τυπικά μεγέθη Α/Γ:

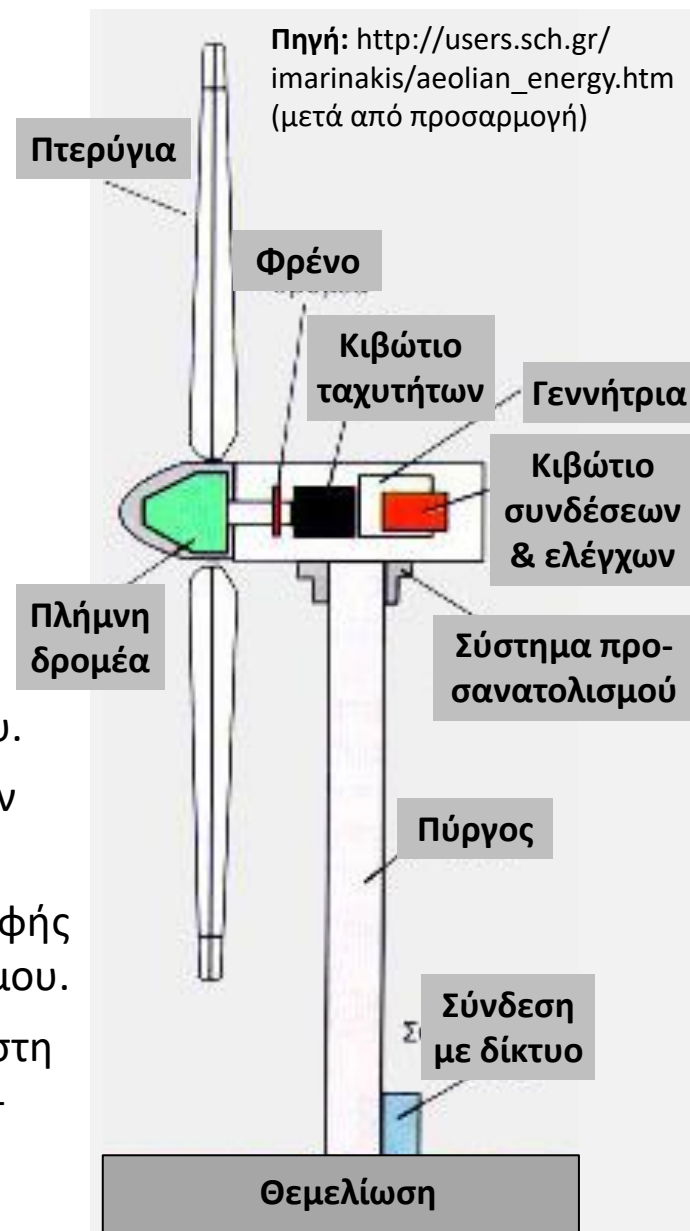
- Επίγειες: 1-4 MW
- Υπεράκτιες: 6-8 MW



Χρονολογία	1981	1985	1990	1996	1999	2001	2005	2010	2020
Διάμετρος (m)	10	17	27	40	50	71	88	125	222
Ισχύς (kW)	25	100	225	550	750	1500	2500	7500	14000

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

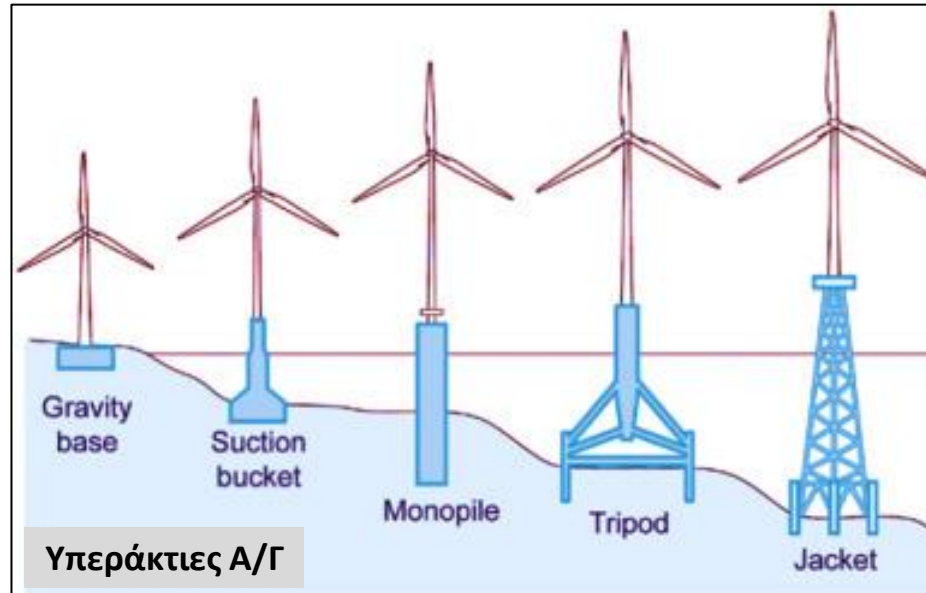
Θεμελίωση ανεμογεννήτριας

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)



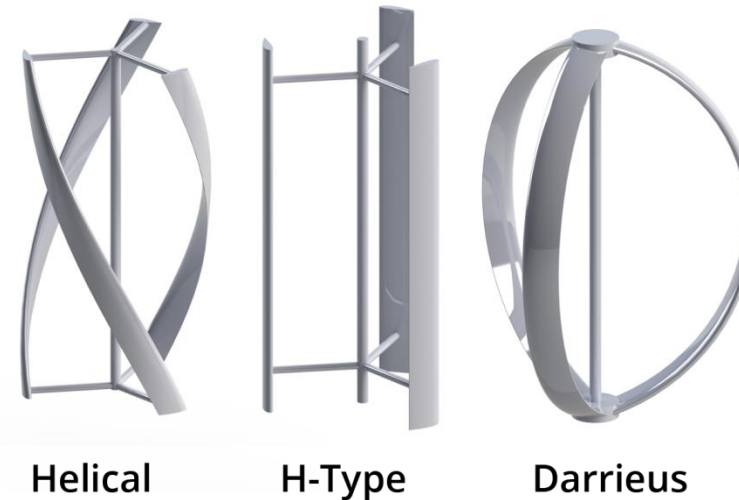
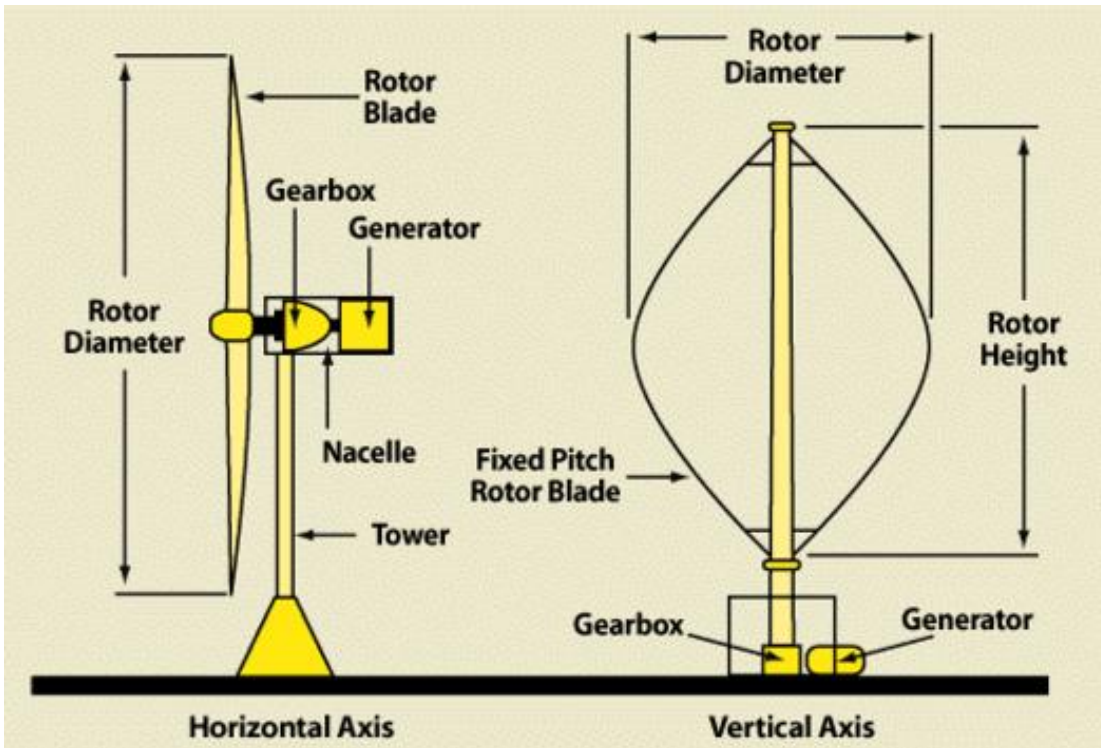
Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα

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

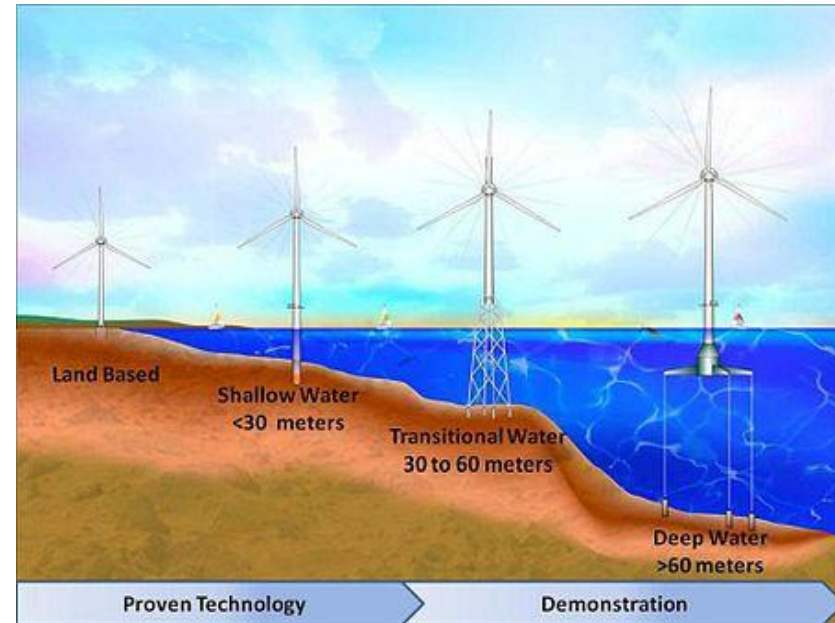
Υπεράκτια αιολικά πάρκα

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

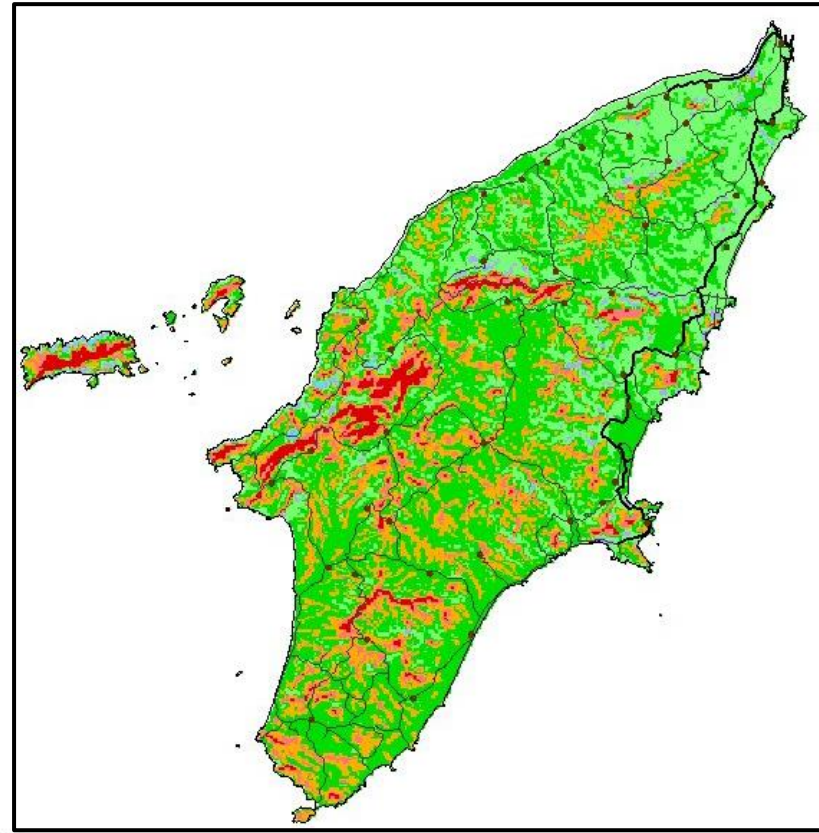
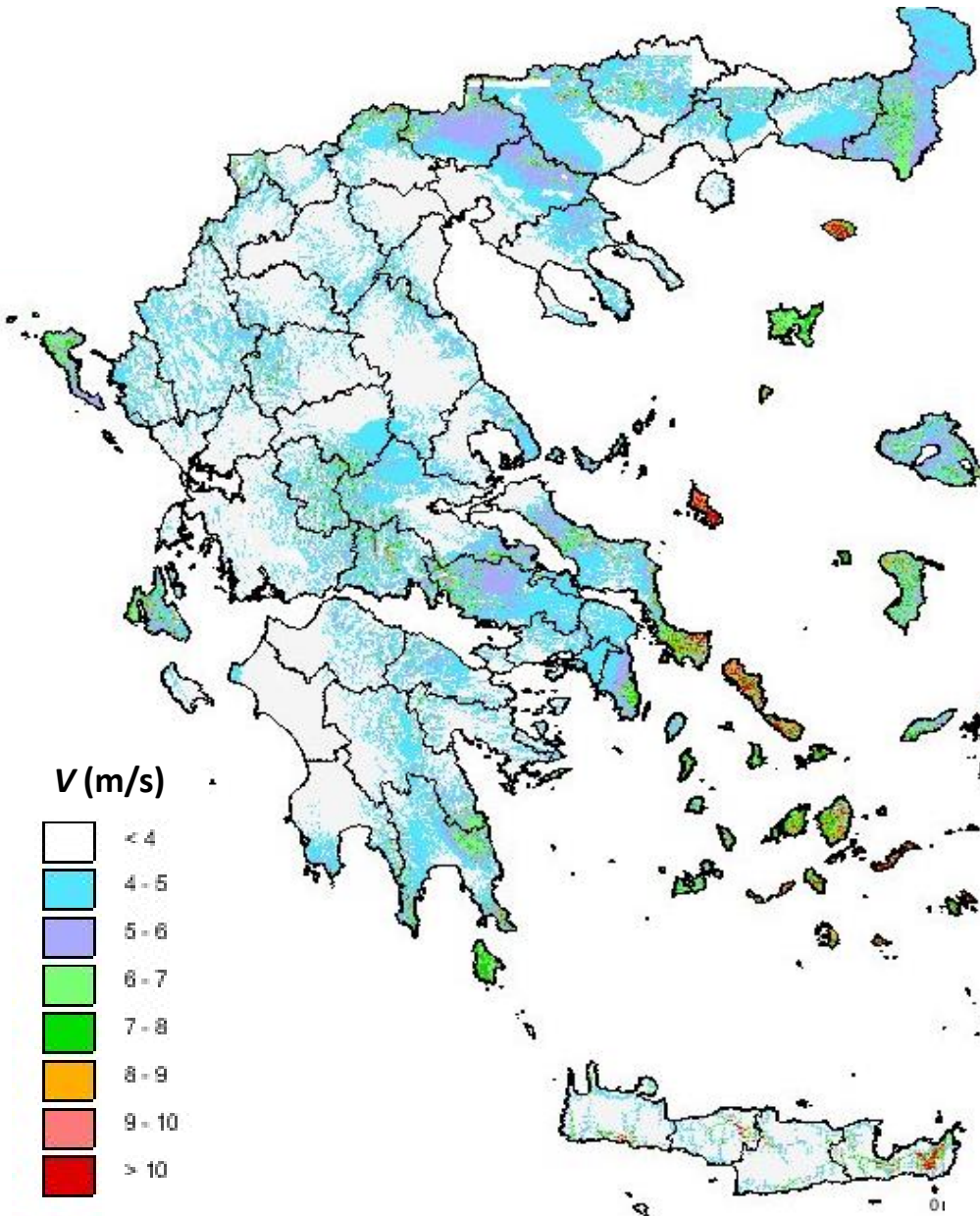
Βασικά τεχνικά κριτήρια:

- ❑ 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

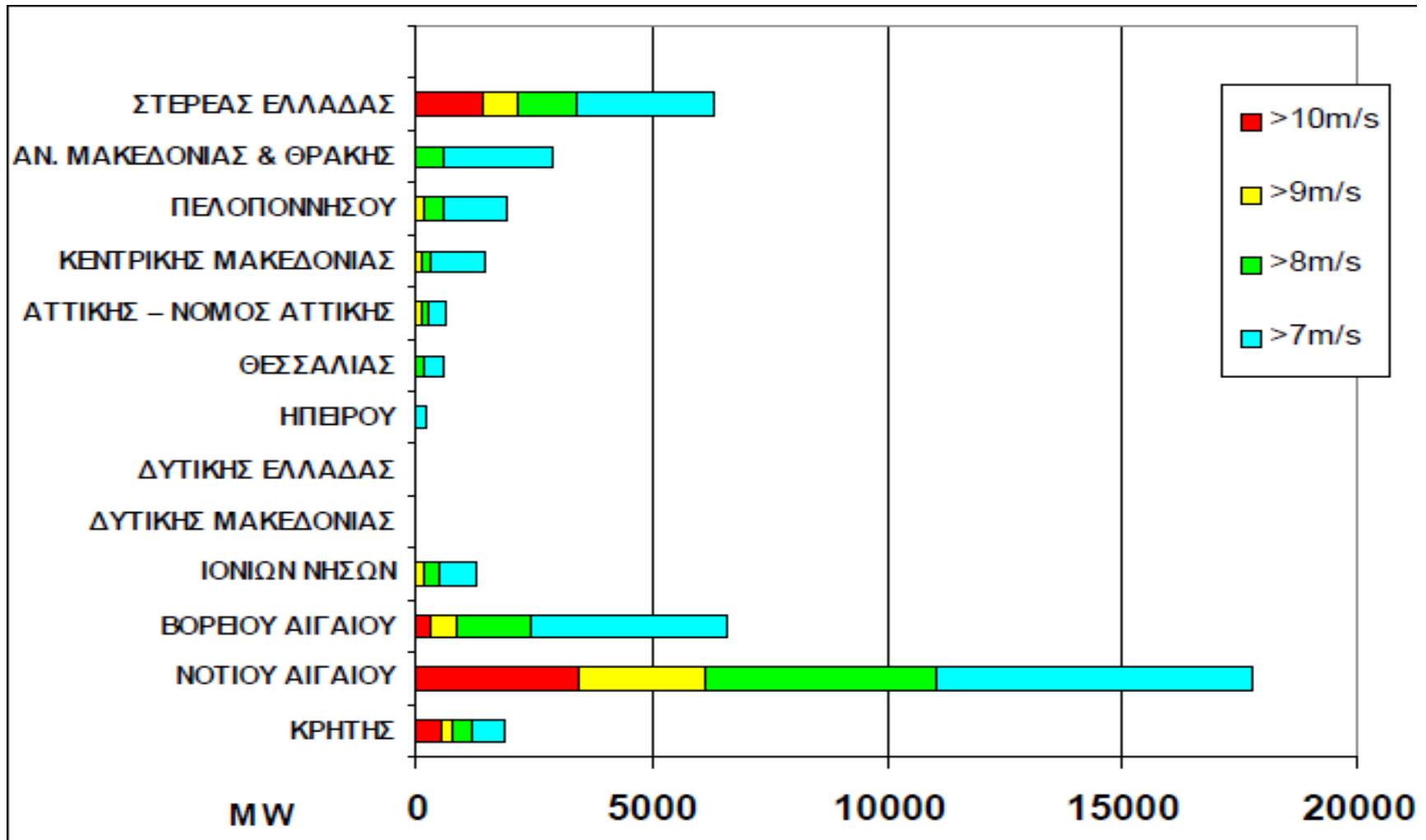
Αιολικό δυναμικό Ελλάδας



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>

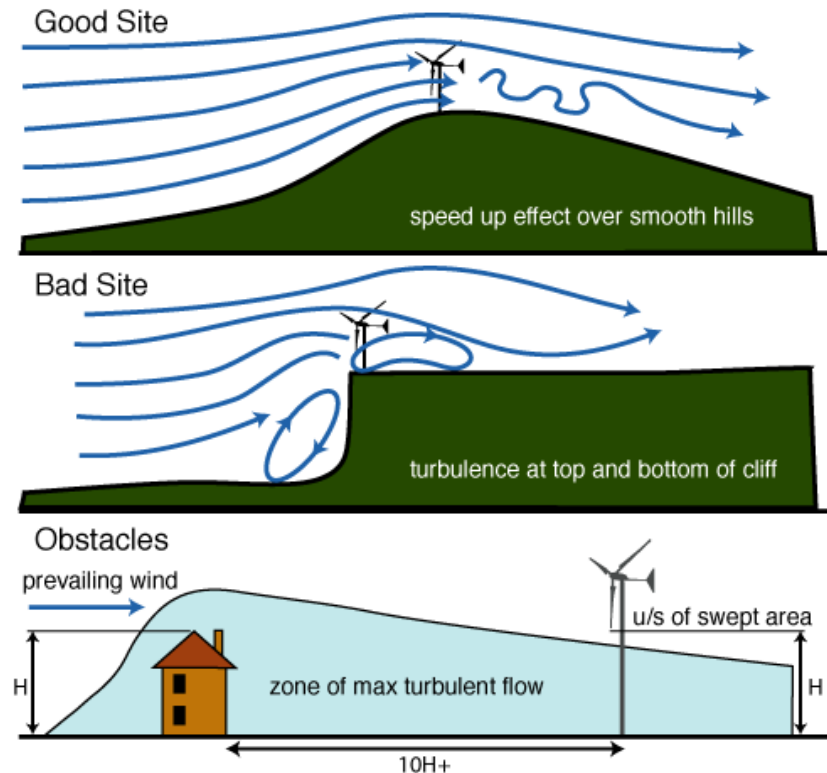
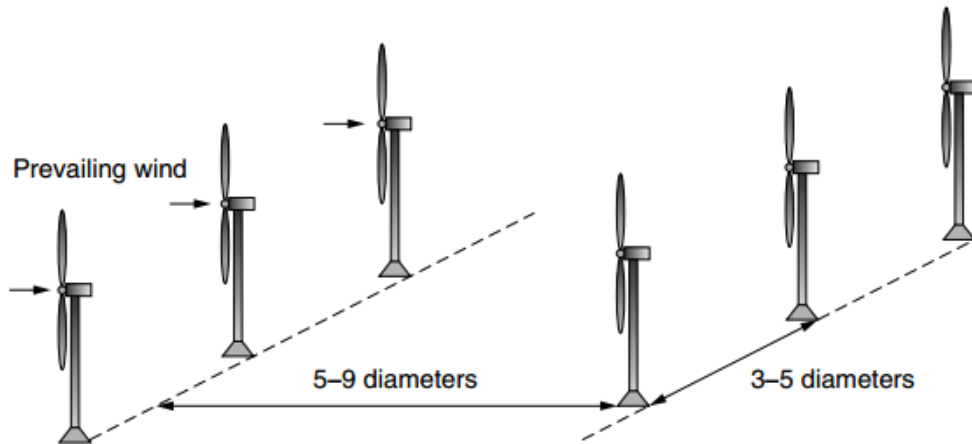
Κατανομή αιολικού δυναμικού ανά περιφέρεια



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 διαμετροί, κατά τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων
 - 3-5 διαμετροί, 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 εμπόδιου ύψους 20 m και μήκους 60 m σε Α/Γ ύψους 50 m τοποθετημένης σε απόσταση 300 m

m height

Ποσοστό ταχύτητας ανέμου

75	100	100	100							99	99	99	99
73	100	100	100							99	99	99	99
70	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	99
68	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	99	99
65	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	99	99	99
63	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	99	99	99
60	100	100	100	100	100	99	99	99	99	99	98	98	98
58	100	100	100	100	99	99	99	98	98	98	98	98	98
55	100	100	100	100	99	99	98	98	98	98	98	98	98
53	100	100	100	99	99	98	98	98	97	97	97	97	98
50	100	100	99	99	98	98	97	97	97	97	97	97	97
48	100	100	99	98	97	96	96	96	96	96	96	96	97
45	100	100	99	99	98	97	96	95	95	95	95	96	97
43	100	100	99	98	96	95	94	94	93	93	94	94	96
40	100	100	98	96	95	93	93	92	92	92	93	93	96
38	100	99	97	95	93	91	90	90	90	91	92	93	96
35	100	98	95	92	90	88	88	87	87	88	89	90	95
33	100	97	92	88	86	85	84	84	85	86	87	89	95
30	99	94	87	83	81	80	81	81	82	84	86	87	95
28	99	89	81	76	75	75	76	78	79	81	84	86	94
25	96	81	71	68	68	70	72	74	76	79	82	84	94
23	90	68	59	58	60	63	67	70	73	77	80	83	94
20	78	52	43	45	52	57	63	67	71	75	79	82	94
18	52	21	24	34	43	52	59	65	69	74	79	82	94
15	4		4	22	36	43	56	63	69	74	79	82	95
13				13	32	48	56	63	69	75	79	83	95
10				9	32	47	58	65	71	77	81	85	96
8				14	35	53	63	70	75	80	84	87	97
5				31	51	63	72	78	82	85	88	91	98
3				35	60	72	80	84	88	90	92	94	99

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 50 m 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

m height

Ποσοστό αιολικής ενέργειας

75	100	100	100								98	98	98
73	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	99
70	100	100	100	100	100	100	100	99	99	99	98	98	98
68	100	100	100	100	100	99	99	99	98	98	98	97	97
65	100	100	100	100	100	99	99	98	98	97	97	97	97
63	100	100	100	100	99	99	98	98	97	97	97	96	96
60	100	100	100	99	99	98	98	97	96	96	96	95	95
58	100	100	100	99	98	98	97	96	95	95	95	94	95
55	100	100	99	99	98	97	96	95	94	94	93	93	94
53	100	100	99	98	97	95	94	93	92	92	92	92	93
50	100	100	98	97	95	93	92	91	90	90	90	90	91
48	100	100	99	97	95	93	91	89	88	88	88	88	89
45	100	100	98	96	93	90	88	86	85	85	85	85	86
43	100	99	97	93	90	86	84	82	81	81	82	83	84
40	100	99	95	90	85	82	79	76	77	77	79	80	81
38	100	98	91	85	79	76	74	72	72	73	75	76	78
35	100	95	86	78	72	69	67	67	68	71	73	75	77
33	99	91	78	69	63	61	60	60	61	64	67	70	72
30	98	83	67	57	53	52	52	53	55	59	63	66	69
28	96	71	53	45	42	43	44	47	50	54	59	63	67
25	89	53	35	31	31	34	37	40	44	50	55	60	64
23	74	31	20	19	22	26	30	35	40	46	52	58	62
20	47	11	8	10	14	19	25	30	36	43	50	56	61
18	14	1	1	4	8	14	20	27	33	41	48	55	60
15				1	5	11	18	25	32	40	48	55	61
13					3	10	17	25	33	40	50	57	63
10					3	10	19	28	36	45	54	60	66
8					5	15	25	34	43	52	60	66	71
5					3	13	26	37	47	55	62	69	74
3					5	21	37	50	60	67	73	78	82

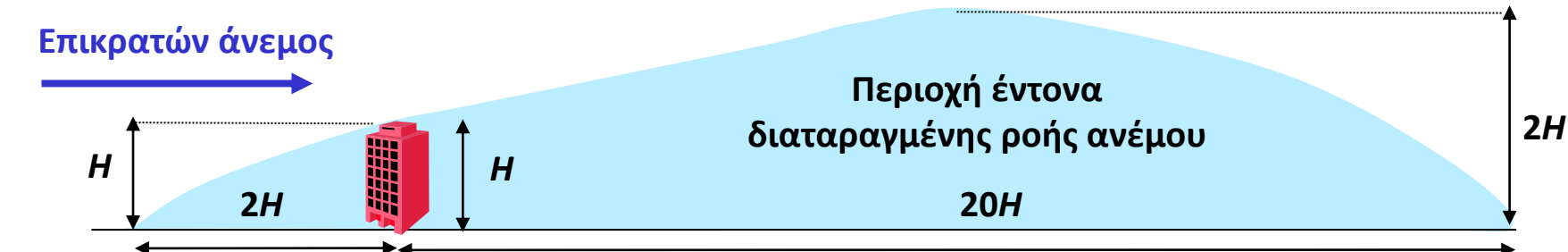
21 43 64 86 107 129 150 171 193 214 236 257 279 300 321 343 364 386 407 429 450 m

= Obstacle 20 m tall = Turbine Tower 50 m 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



Σύγκριση αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων

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

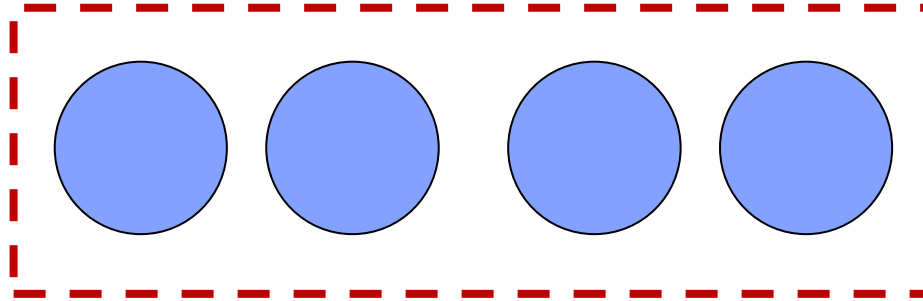
Τύπος: ENERCON E112

Ισχύς: 4500 kW

Διάμετρος: 114 m

Αριθμός: 4

Επιφάνεια: 40 828 m²



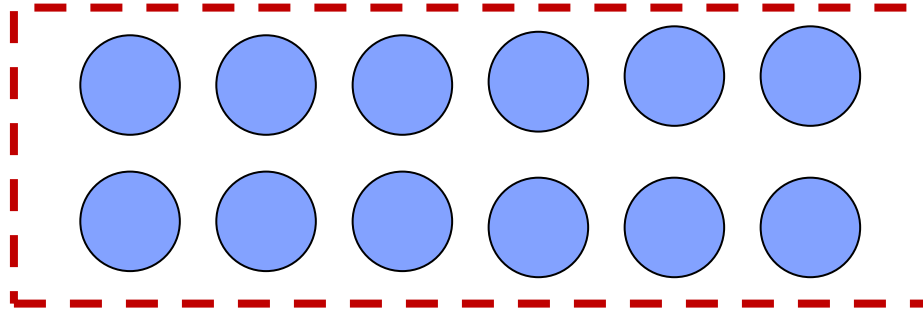
Τύπος: ENERCON E-66

Ισχύς: 1500 kW

Διάμετρος: 66 m

Αριθμός: 12

Επιφάνεια: 41 054 m²



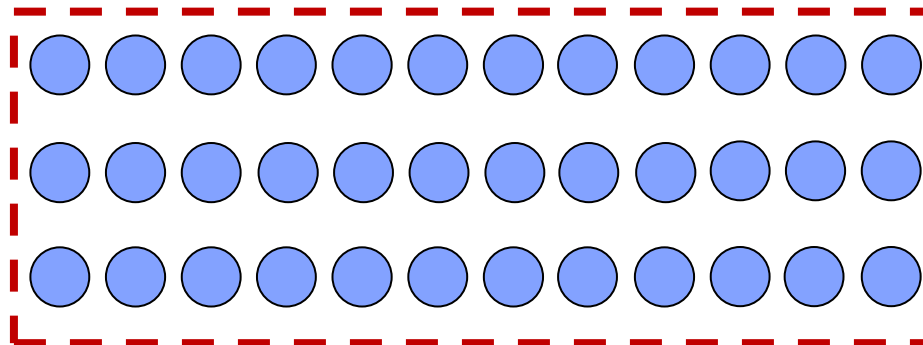
Τύπος: VESTAS V-39

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 Μαγνανίτη, 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