



Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στη Γεωργία

Αιολική Ενέργεια

Αγγελική Μαραγκάκη
Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, PhD



Εισαγωγή

Γενικά

Αιολικές μηχανές ή ανεμοκινητήρες: οι μηχανές οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας

Ανεμογεννήτριες (wind turbines) είναι αιολικές μηχανές που τη μετατρέπουν πρώτα σε **περιστροφική (μηχανική)** και μετά σε **ηλεκτρική**, ενώ για παράδειγμα οι **ανεμόμυλοι** ή οι ανεμαντλίες χρησιμοποιούν **απλά την περιστροφική ενέργεια** για την εκτέλεση ενός έργου (άλεση σιταριού, άντληση νερού)

Περιοχές με μέση ταχύτητα ανέμου της τάξεως των **>6m/s** αποτελούν δυνητικά τοποθεσίες για **οικονομικά συμφέρουσα** παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος

Αιολικό Δυναμικό

Ο **άνεμος**, δηλαδή η κίνηση αερίων μαζών εμπεριέχει ένα σημαντικό ποσό κινητικής ενέργειας που ονομάζεται **αιολική ενέργεια** και την οποία μπορούν να εκμεταλλευθούν οι αιολικές μηχανές.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του ανέμου:

- ταχύτητα και
- η διεύθυνσή του - Ως διεύθυνση ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος

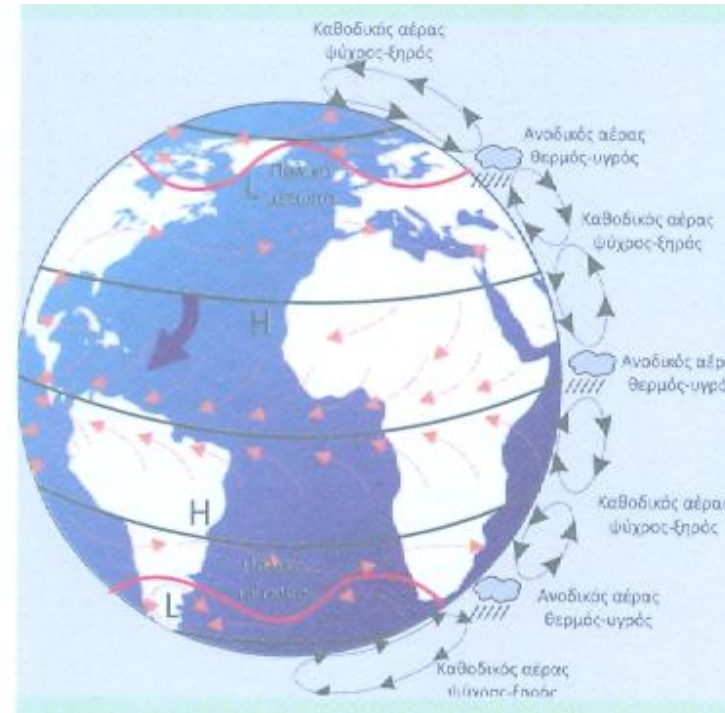
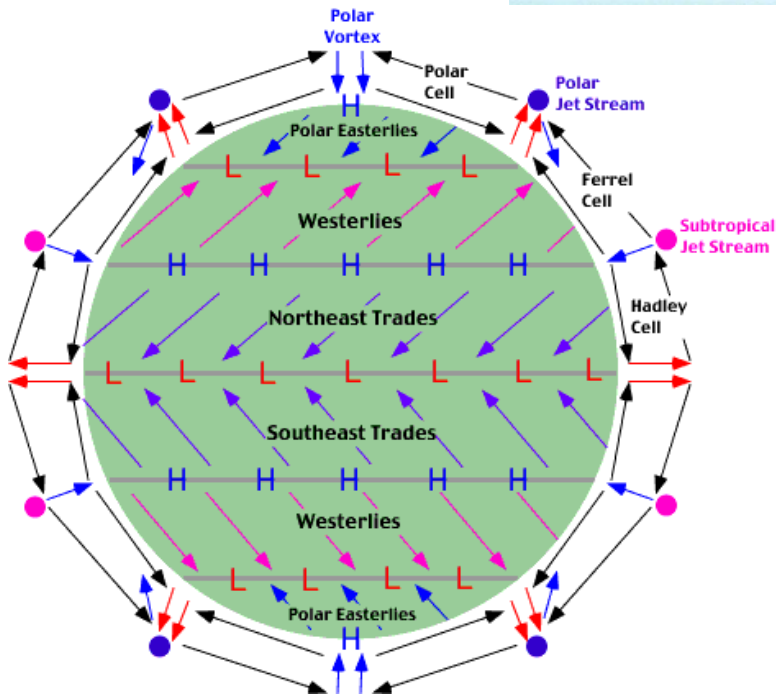
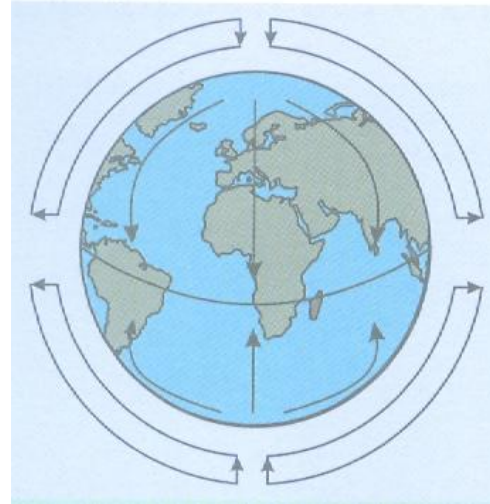
Αιολική Ενέργεια: ίσως η αρχαιότερη αξιοποιήσιμη μορφή ενέργειας



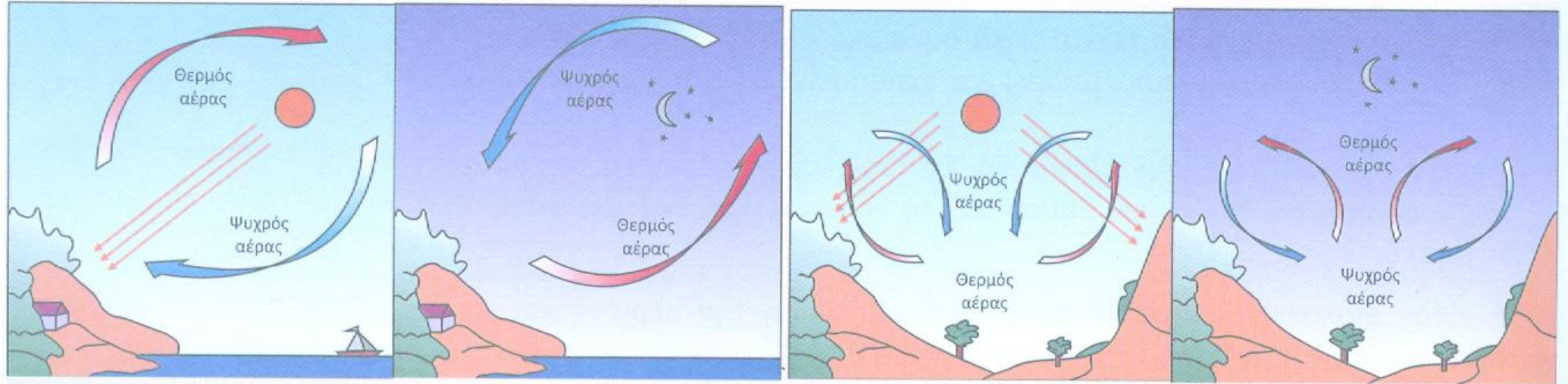
Κίνηση του ανέμου

Γενική ή παγκόσμια κίνηση:

- Κατακόρυφη μεταφορά
- Κυψέλες ανακυκλοφορίας



Κίνηση του ανέμου



Παραλία ημέρα

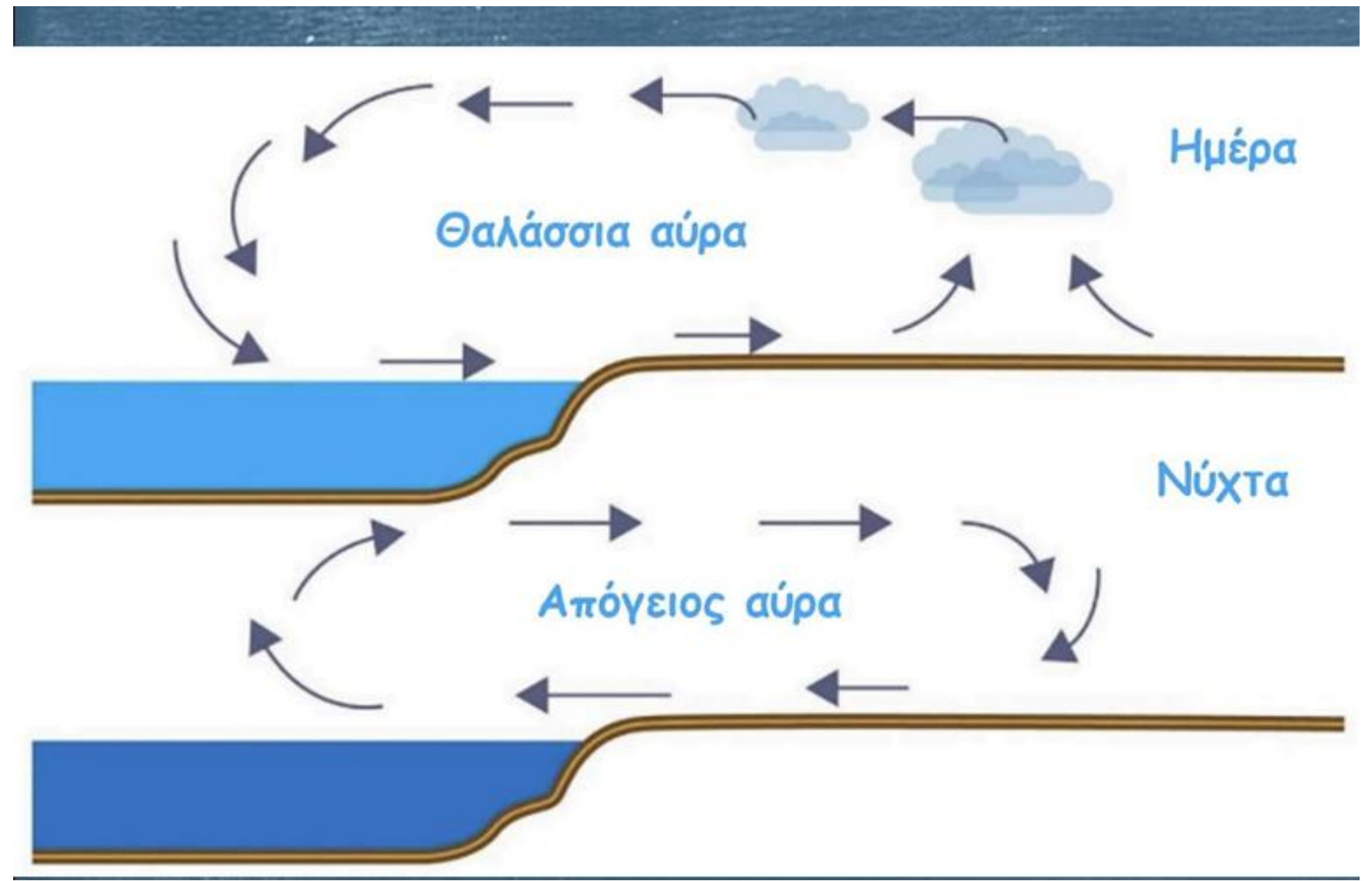
Παραλία νύκτα

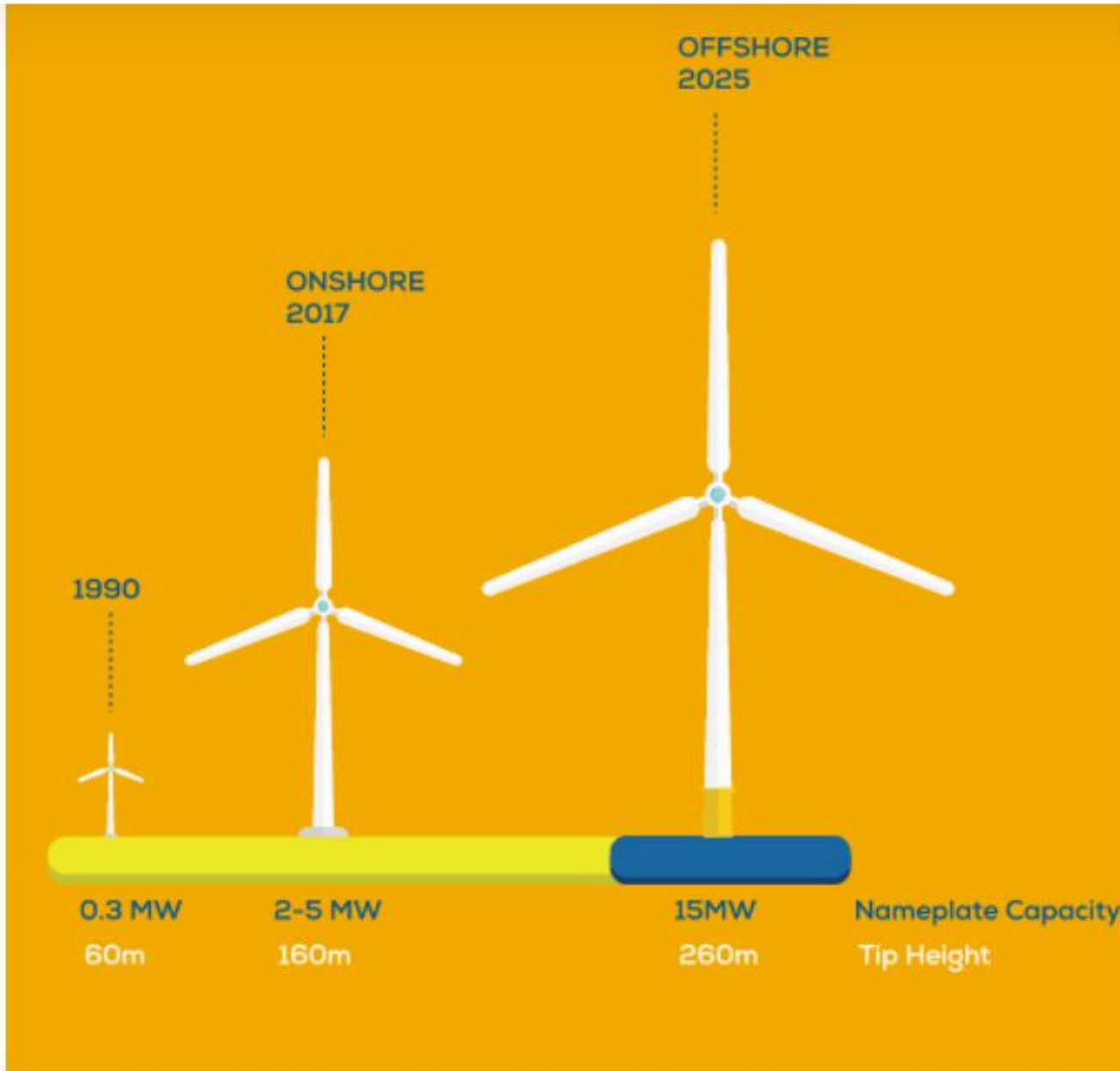
Πεδιάδα ημέρα

Πεδιάδα νύκτα

Εισαγωγή

Τύποι ανέμου



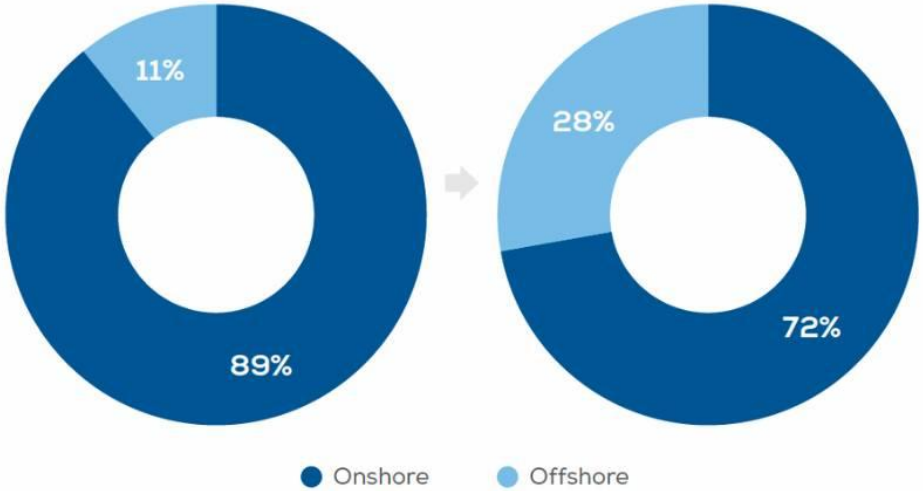


Most of our wind energy is onshore

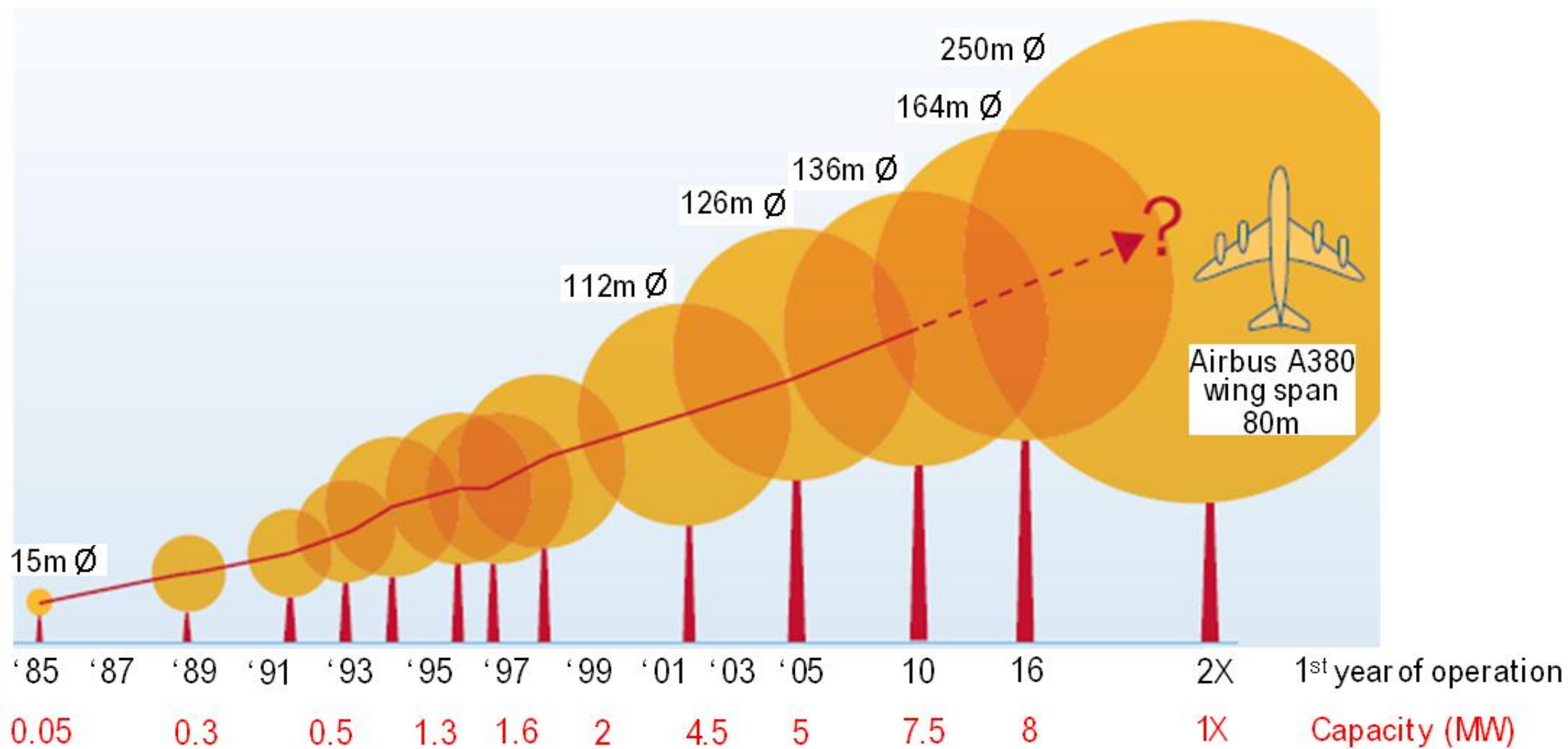
.....

Wind energy generation in the EU, 2023

Wind energy generation in the EU, 2030



Source: WindEurope



Η αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

ΦΘΗΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Τα αιολικά πάρκα παράγουν ηλεκτρισμό

7 φορές φθηνότερο

συγκριτικά με το φυσικό αέριο

3,5 φορές φθηνότερο
συγκριτικά με τον λιγνίτη



ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η αιολική ενέργεια δημιουργεί θέσεις εργασίας

6.300

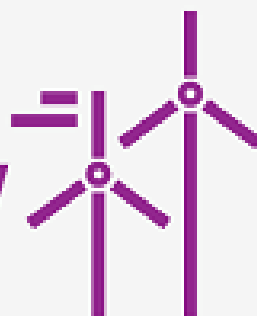
εργαζόμενοι στη χώρα μας

1,6 θέσεις εργασίας ανά εγκατεστημένο MW, αναλογικά περισσότερες από τους άλλους κλάδους ηλεκτροπαραγωγής

Αιολική ισχύς

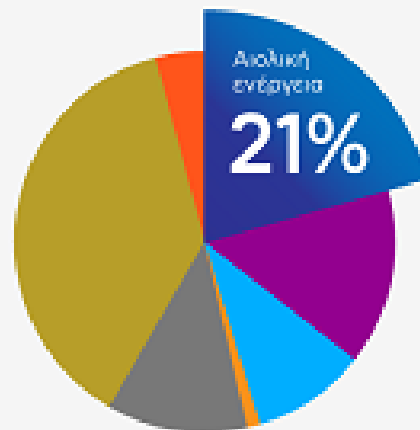
4,6 GW

Ιούνιος 2022



Μερίδια τεχνολογιών επί της εγχώριας ηλεκτροπαραγωγής το πρώτο 9μηνο 2022

Αιολική ενέργεια	21%
Φωτοβολταϊκά	19%
Υδροηλεκτρικά	10%
Βιομάζα και λοιπές Α.Π.Ε.	1%
Λιγνίτης	12%
Φυσικό αέριο	28%
Πετρέλαιο	4%

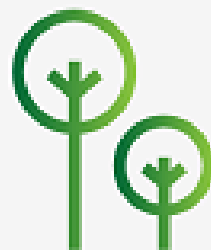


ΚΑΘΑΡΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια προστατεύει το περιβάλλον

Εξοικονομεί ρύπους CO₂ ίσους με όσους δεσμεύουν

11,3 εκ.
στρέμματα δάσους



ή με όσους εκπέμπουν

3,7 εκ.
αυτοκίνητα



ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΕΛΕΥΘΕΡΙΑΣ

Τα αιολικά πάρκα ενισχύουν την ενεργειακή αυτονομία της χώρας

Χωρίς αιολικά πάρκα θα χρειαζόταν

34%

περισσότερο εισαγόμενο φυσικό αέριο

που αναλογεί σε ετήσιο κόστος

4,8 δις ευρώ

ΦΘΗΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια ωφελεί τους καταναλωτές



Καλύπτει τις ανάγκες

2,4 εκ.
νοικοκυριών

Οι ΑΠΕ μείωσαν το 2021 την τιμή κατά

€ 2,5 δις

Επιδότησε με πάνω από

€ 1 δις

τους καταναλωτές τους πρώτους μήνες της κρίσης και συνεχίζει



Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας

The EU's wind energy generation in 2024



475 TWh
EU wind energy generation



210 GW
onshore wind capacity

17%
of EU electricity demand met by onshore wind

23%
average onshore wind capacity factor*



21 GW
offshore wind capacity

2%
of EU electricity demand met by offshore wind

35%
average offshore wind capacity factor*

Highest wind energy shares



*Capacity factors of entire fleet including old turbines
** Refers to shares in demand at the interconnected systems

Κόστος κατασκευής
χερσαίων αιολικών πάρκων €44-€66 /MW
φυσικό αέριο €122-€131)
πυρηνική ενέργεια €279



0,03%

του εδάφους της Ελλάδας,
θα καταλαμβάνεται από
αιολικά πάρκα το 2050

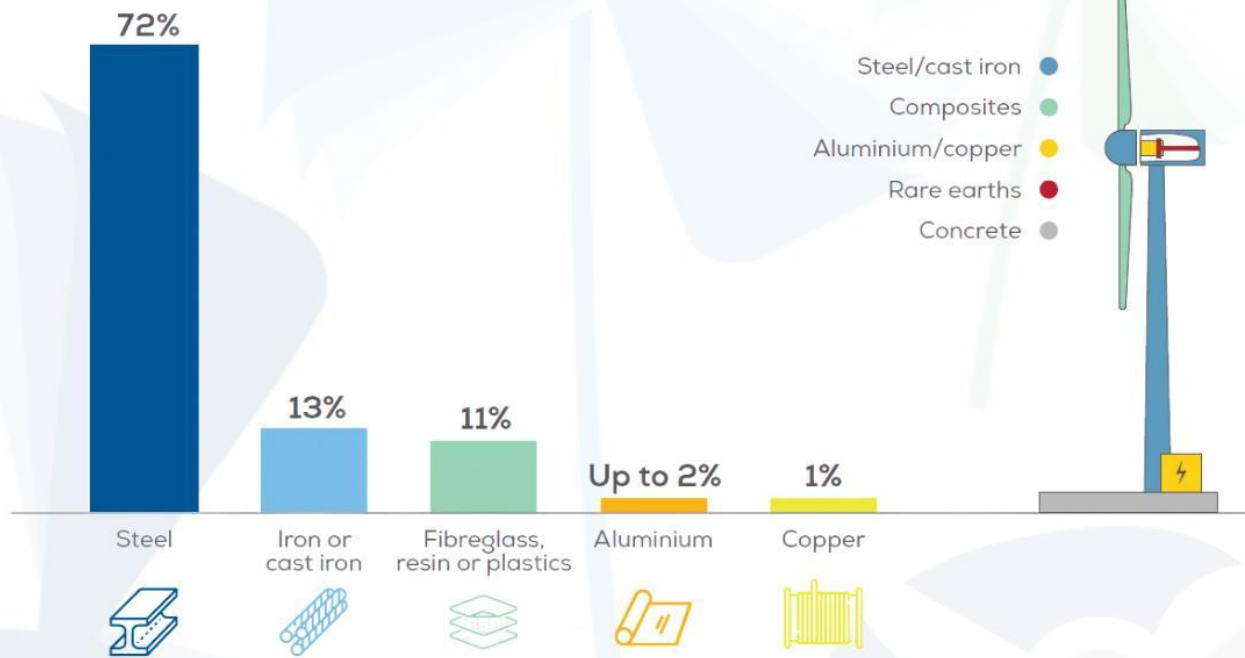


0,13%

του εδάφους της Ελλάδας,
ήδη καταλαμβάνεται από
τα λιγνιτωρυχεία

Materials used in wind turbines

Share of materials by volume



Source: WindEurope



Ανεμοδείκτης στην κορυφή κάθε ανεμογεννήτριας ο οποίος υποδεικνύει την κατεύθυνση του αέρα. (1)

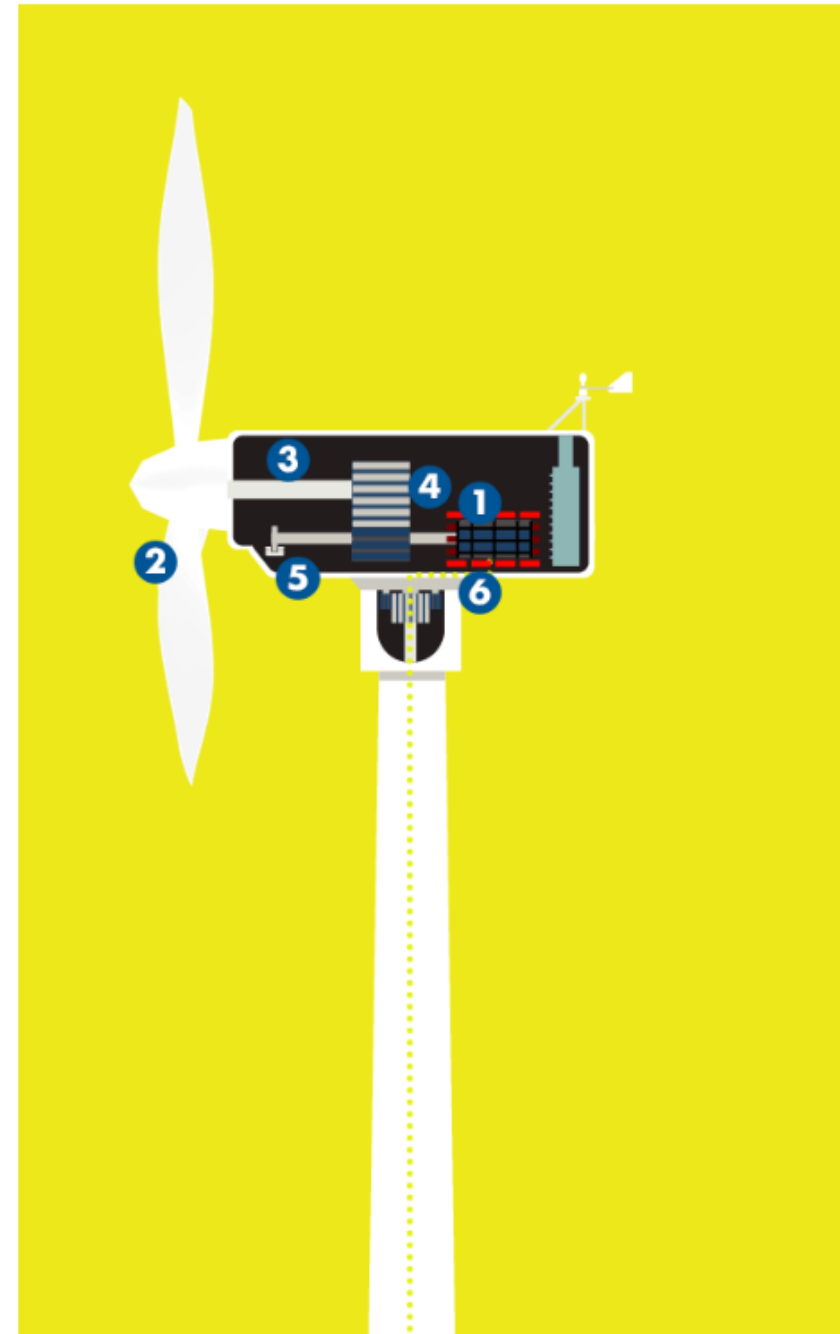
Πτερύγια (2) περιστρέφονται στον άξονά τους ώστε να δημιουργήσουν την μεγαλύτερη δυνατή αντίσταση στον αέρα.

Ο αέρας ξεκινά να περιστρέφει τα πτερύγια τα οποία είναι συνδεδεμένα μέσω της πλήμνης με έναν άξονα χαμηλής ταχύτητας (3)

Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας περιστρέφεται με την ίδια ταχύτητα όπως τα πτερύγια (7-12 περιστροφές ανά λεπτό). Όμως απαιτείται πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής ώστε να παραχθεί ρεύμα από μια γεννήτρια.

Κιβώτιο ταχυτήτων (4), πολλαπλασιάζει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα χαμηλής ταχύτητας έως 100 φορές περισσότερο σε ένα άξονα υψηλής ταχύτητας (5), ο οποίος έτσι μπορεί να περιστρέφεται έως και 1500 φορές ανά λεπτό.

Ο άξονας υψηλής ταχύτητας συνδέεται με μια γεννήτρια (6), η οποία μετατρέπει την κινητική ενέργεια του άξονα σε ηλεκτρική ενέργεια.



Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Ανάλογα την ισχύ:

Μέγεθος Α/Γ	Ισχύς εξόδου (kW)	Διάμετρος στροφείου (m)	Ύψος πύργου (m)	Επιφάνεια σάρωσης (m ²)
Micro	< 1	< 1		< 1
Μικρό	1 - 50	1 - 16	5 - 30	1 - 200
Μεσαίο	50 με 1,000	16 με 55	30 με 70	200 – 2,400
Μεγάλο	> 1,000	>55	>50	>2,400

Ανάλογα του τρόπου αλληλεπίδρασης του ανέμου με την ανεμογεννήτρια:

- **Τύπου άνωσης:** Μοντέλο ροής όπως στην άνωση
- **Τύπου οπισθέλκουσας:** Αν το πτερύγιο είναι έτσι τοποθετημένο και διαμορφωμένο έτσι ώστε η ροή του αέρα να δημιουργεί μια ωστική ροπή



Μικρές

- ❖ Σπίτια
- ❖ Αγροκτήματα
- ❖ Μικρές απομονωμένες εφαρμογές



Μεσαίες

- Οικισμοί
- Υβριδικά συστήματα
- Αποκεντρωμένη παραγωγή



Μεγάλες

- Αιολικά πάρκα
μεγάλη ισχύος
- Συγκεντρωμένη παραγωγή

Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Ανάλογα της διεύθυνσης του άξονα περιστροφής:

**Ανεμογεννήτριες
Οριζόντιου
Άξονα, (ΑΟΑ)**



Savonius

**Ανεμογεννήτριες
Κατακόρυφου
Αξονα, (ΑΟΑ)**



Darrieus

Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα (ΑΟΑ):

- Η τεχνολογία και η εμπειρία σχετικά με τις ΑΟΑ είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτές των ΑΚΑ.
- Έχουν ελαφρά μεγαλύτερο C_p (μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης) από τις ΑΚΑ.
- Απαιτούν υψηλότερη κατασκευή πύργου από τις ΑΚΑ, αλλά λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας, εκμεταλλεύονται και άνεμο μεγαλύτερης ταχύτητας.
- Εύκολη συναρμολόγηση.
- Χρειάζονται μεταβολή του σχήματος του πτερυγίου, ολική ή μερική, ώστε να επιτυγχάνεται σταθερή ταχύτητα και έλεγχος υπερφόρτωσης αν και υπάρχουν εξαιρέσεις.
- Κατά τη λειτουργία τους παράγεται αξιοσημείωτος θόρυβος.
- Λόγω του μεγέθους, κοστίζει πολύ η κατασκευή και η μεταφορά τους.
- Χρειάζονται μηχανισμό περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στη διεύθυνση του ανέμου.

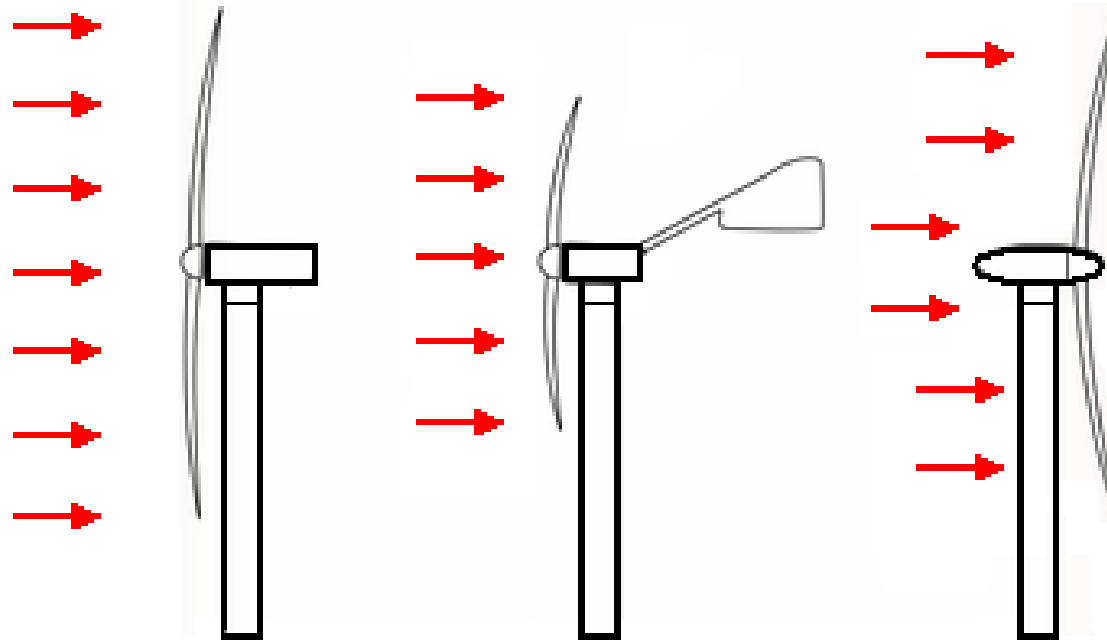
Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Γενικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (ΑΚΑ):

- Σχετικά με τις ΑΟΑ έχουν χαμηλότερη απόδοση.
- Διαθέτουν πτερύγια σταθερής διατομής μη συστρεφόμενα, αλλά απαιτούν μια κατά μήκος καμπυλότητα.
- Έχουν το σύστημα μετάδοσης, τη γεννήτρια και το σύστημα ελέγχου κοντά στο έδαφος και έτσι είναι πιο εύκολη η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των μηχανικών μερών.
- Δουλεύουν με χαμηλότερες μέσες ταχύτητες αέρα, οπότε παράγουν λιγότερο θόρυβο.
- Δέχονται άνεμο από όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να χρειάζεται ειδικός μηχανισμός προσανατολισμού.
- Λόγω του μικρού μεγέθους δεν μπορούν να εκμεταλλευτούν ανέμους υψηλών ταχυτήτων.
- Έχουν κάποιες μεγαλύτερες δυσκολίες με τις ροπές ανατροπής απ' ότι οι ΑΟΑ.
- Μπορεί να τοποθετηθούν σε περισσότερα μέρη λόγω μεγέθους (όπως μέσα στην πόλη, στις ταράτσες, σε αυτοκινητόδρομους).
- Η κατασκευή τους είναι πιο απλή και κατά συνέπεια τα έξοδα αυτοματισμού, συντήρησης ή επισκευών είναι σαφώς μικρότερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα των ΑΚΑ.
- Υπάρχει δυσκολία συντήρησης σε κάποια μηχανικά μέρη, για παράδειγμα η αλλαγή των εδράνων κύλισης.

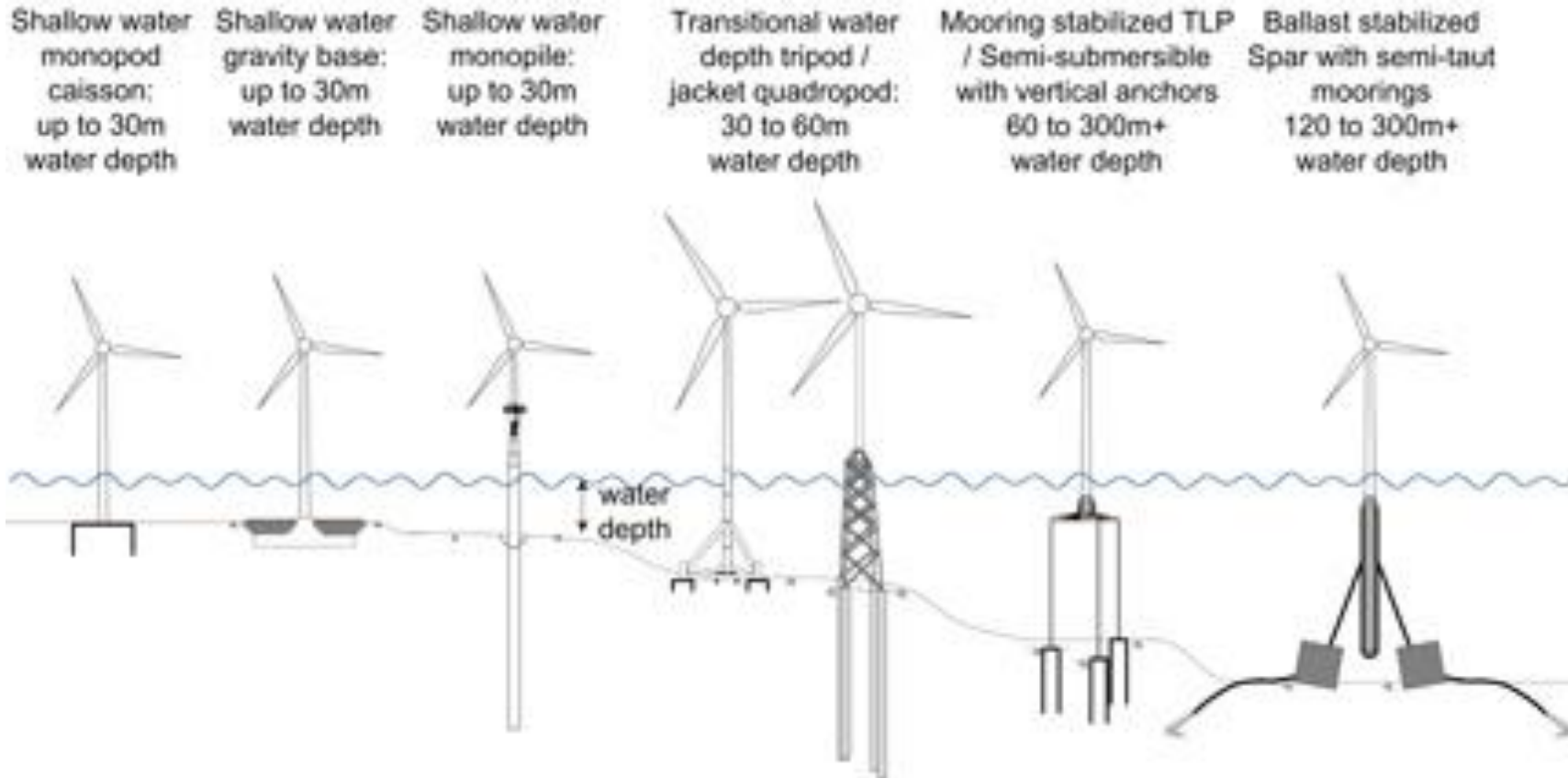
Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Ανάλογα τη θέση του στροφείου και του πύργου σε σχέση με τον άνεμο:
ανεμογεννήτριες **προσήνεμης διάταξης** όπου ο άνεμος συναντά πρώτα το στροφείο και μετά τον πύργο και στην **υπήνεμη διάταξη** όπου συμβαίνει το αντίθετο

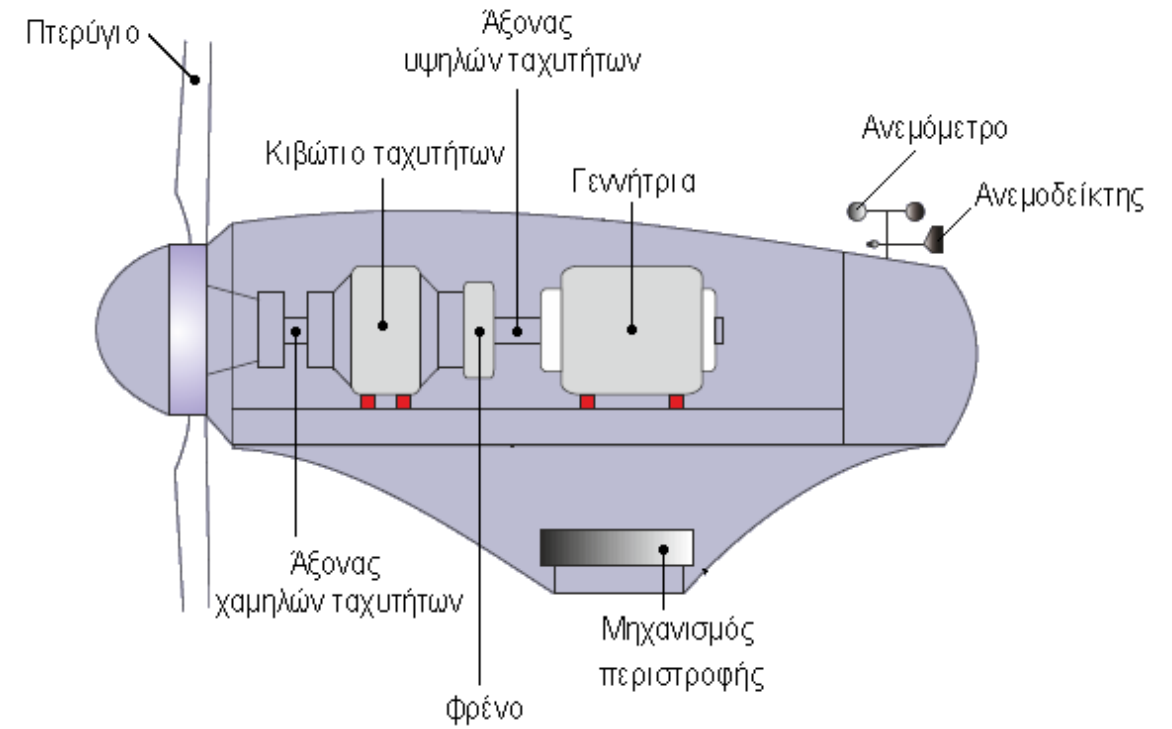
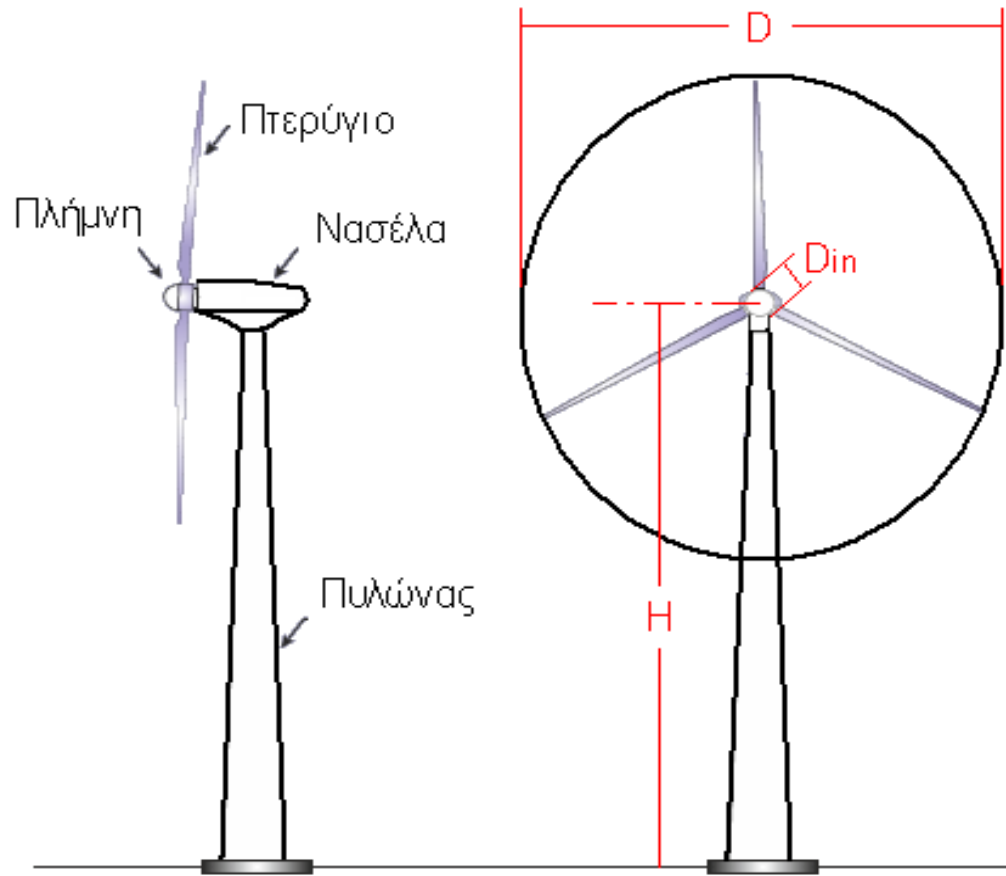


Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών

Ανάλογα της θέσης τοποθέτησης:



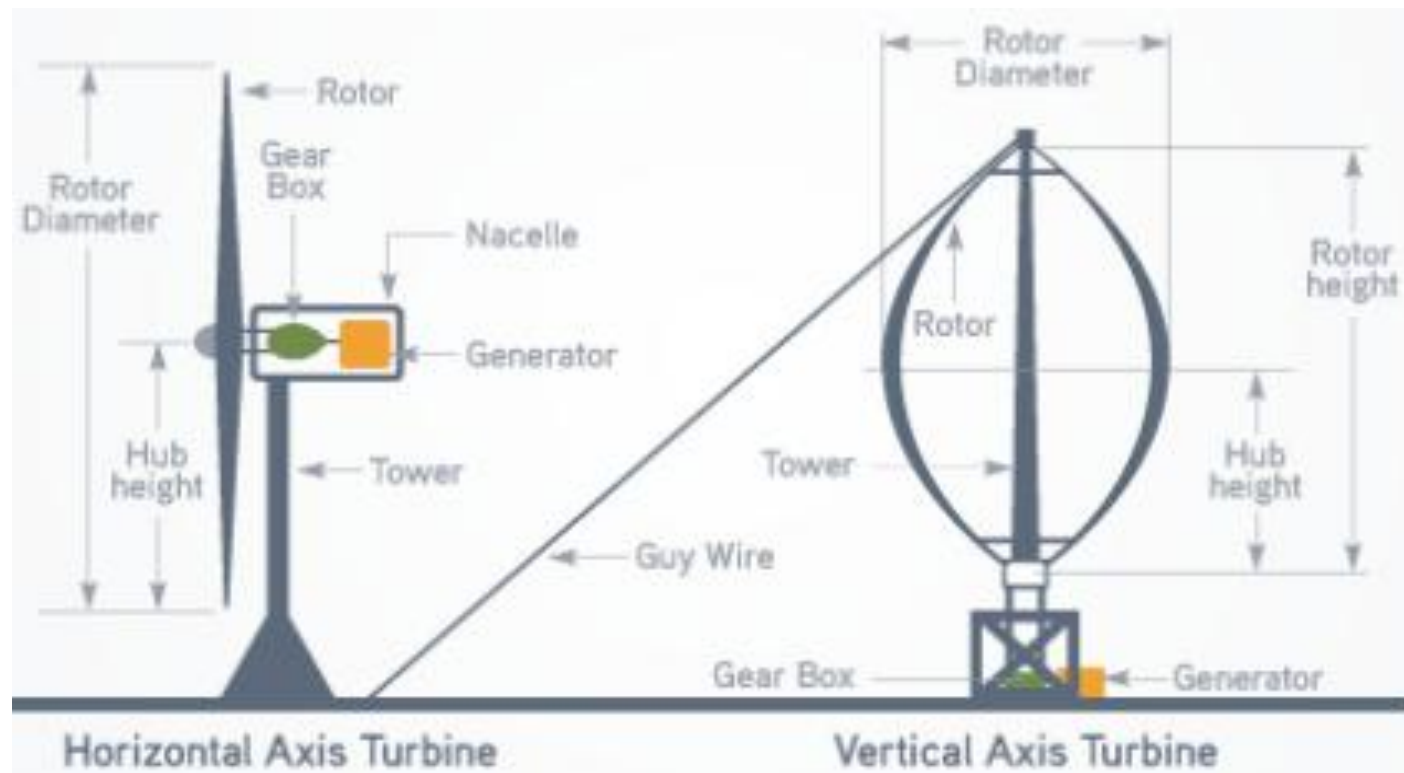
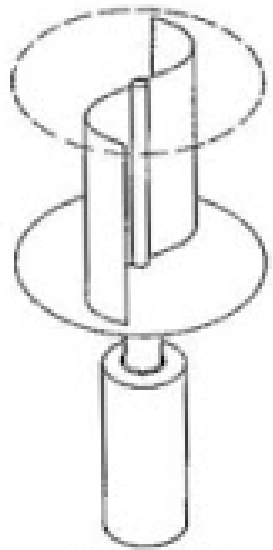
Ανεμογεννήτρια Οριζόντιου Άξονα



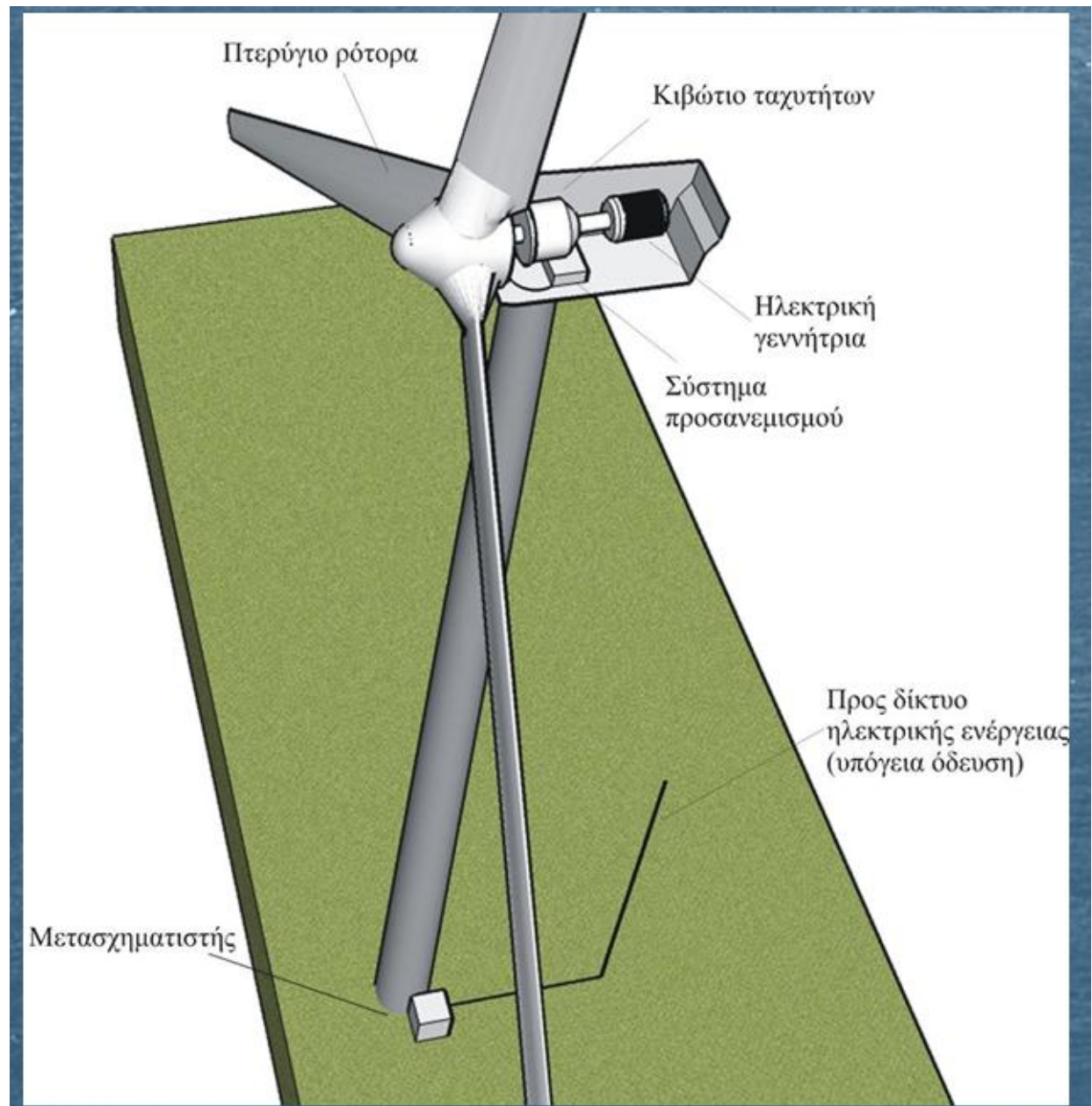
Ανεμογεννήτρια Κατακόρυφου Άξονα

Darrieus

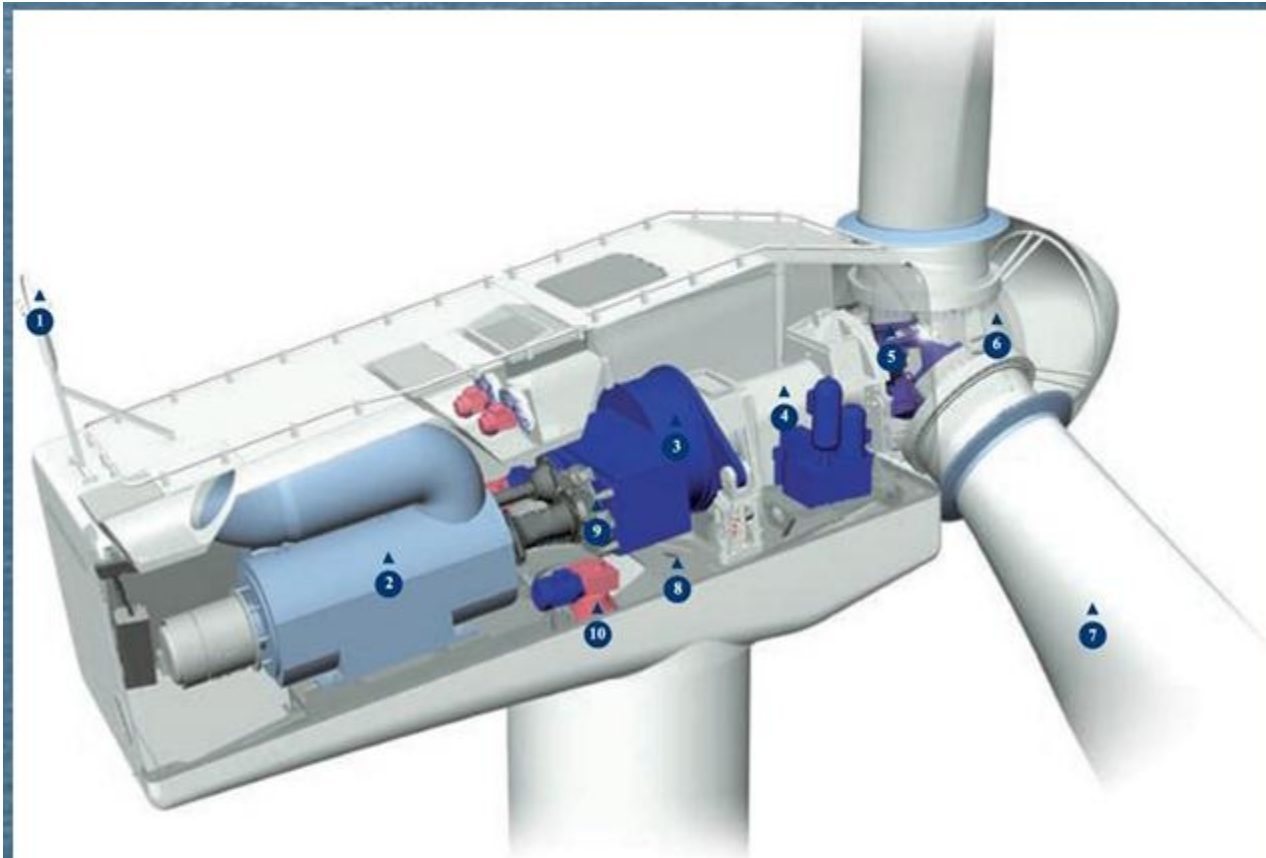
Savonius



Η τεχνολογία των σύγχρονων ανεμογεννητριών

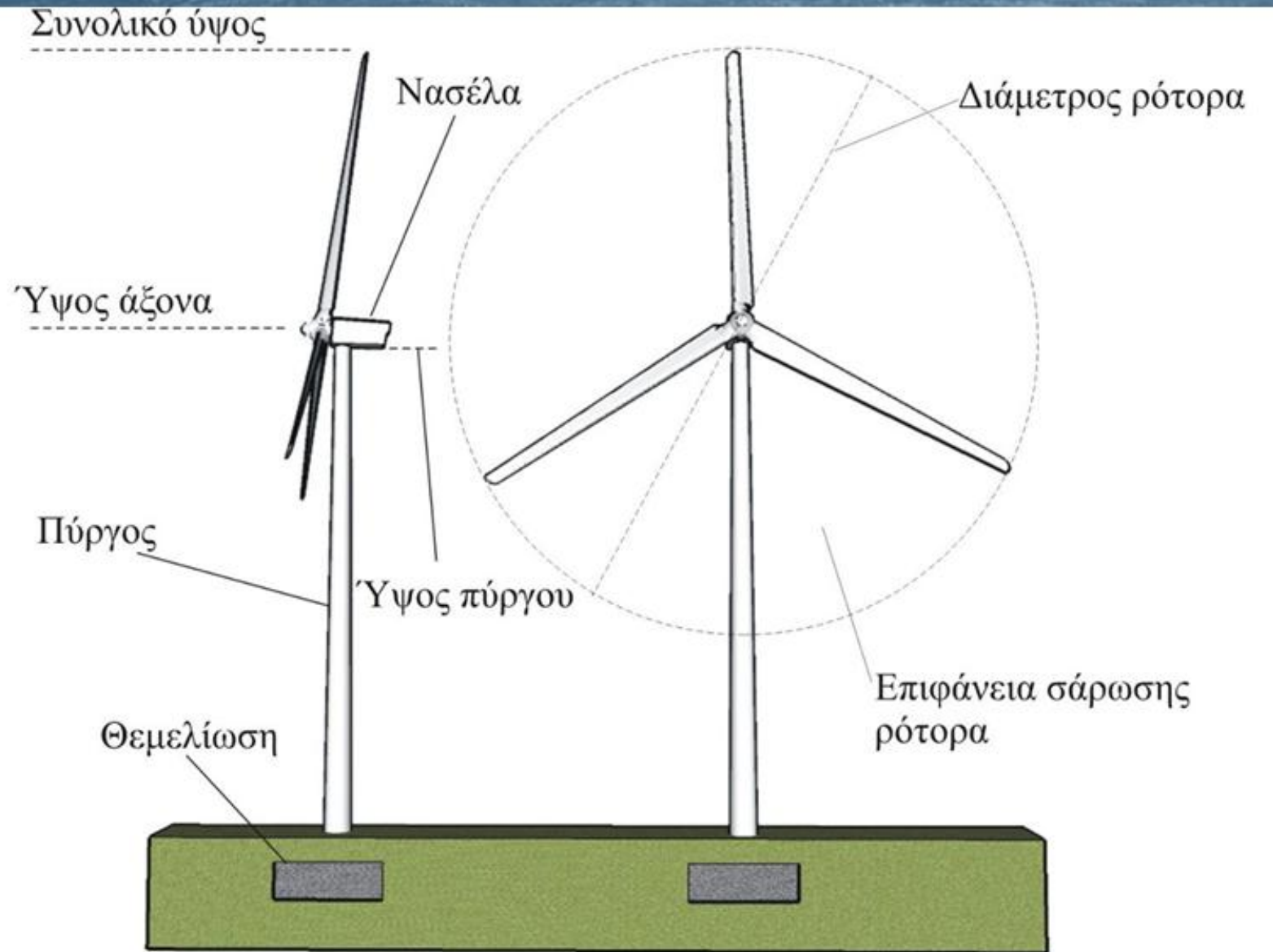


Η τεχνολογία των σύγχρονων ανεμογεννητριών

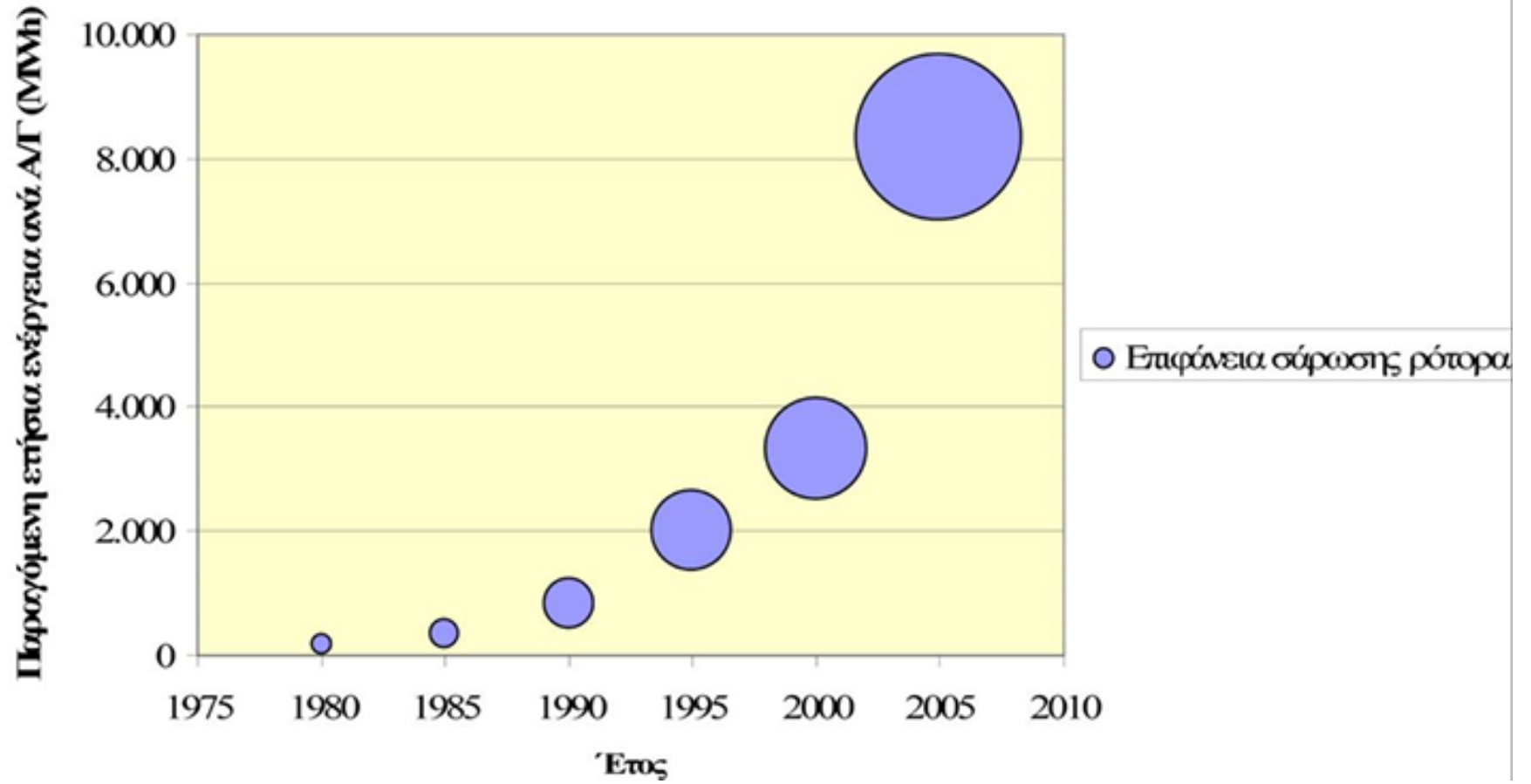


1. Ανεμόμετρο
2. Ηλεκτρική γεννήτρια
3. Κιβώτιο ταχυτήτων
4. Κύριος άξονας
5. Σύστημα ρύθμισης βήματος πτερυγίου (pitch system)
6. Πλήμνη
7. Πτερύγιο
8. Έδραση μηχανής
9. Μηχανικό φρένο άξονα
10. Σύστημα προσανεμισμού νασέλας (yaw system)

Η τεχνολογία των σύγχρονων ανεμογεννητριών



Η τεχνολογία των σύγχρονων ανεμογεννητριών



Εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα επιτυγχάνεται με την εγκατάσταση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών σε περιοχές με σημαντική ένταση ανέμου, δημιουργώντας έτσι αιολική μονάδα παράγωγής ισχύος

Οικονομία κλίμακας, μείωση του κόστους:

- μελετών σκοπιμότητας, προμελετών (προκαταρκτικού σχεδιασμού) και των οριστικών (τελικών) μελετών εφαρμογής,
- των δικαιώματα χρήσης Γης,
- των αδειών,
- διαχείρισης κατασκευής του έργου (*project management*),
- σύνδεσης με το δίκτυο (επίγεια ή υποθαλάσσια),
- έργων υποδομής (βοηθητικά κτίρια, κατασκευές, περίφραξη, οπτικό σύστημα παρακολούθησης και ασφάλειας κ.λπ.),
- της συντήρησης.
- που είναι ανεξάρτητοι της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, μειώνοντας έτσι το κόστος της επένδυσης και λειτουργίας ανά ανεμογεννήτρια.

Παράγοντες που καθορίζουν την οικονομική βιωσιμότητα μιας επένδυσης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι:

- Κόστος κτήσης της ή των ανεμογεννητριών
- Κόστος αγοράς ή ενοικίασης της Γης
- Κόστος κατασκευής υποδομών.
- Το αιολικό δυναμικό της περιοχής
- Κόστος της kWh που παράγεται από συμβατικούς ενεργειακούς σταθμούς
- Διάρκεια ζωής της ή των ανεμογεννητριών
- Επιδοτήσεις
- Κόστος χρήματος

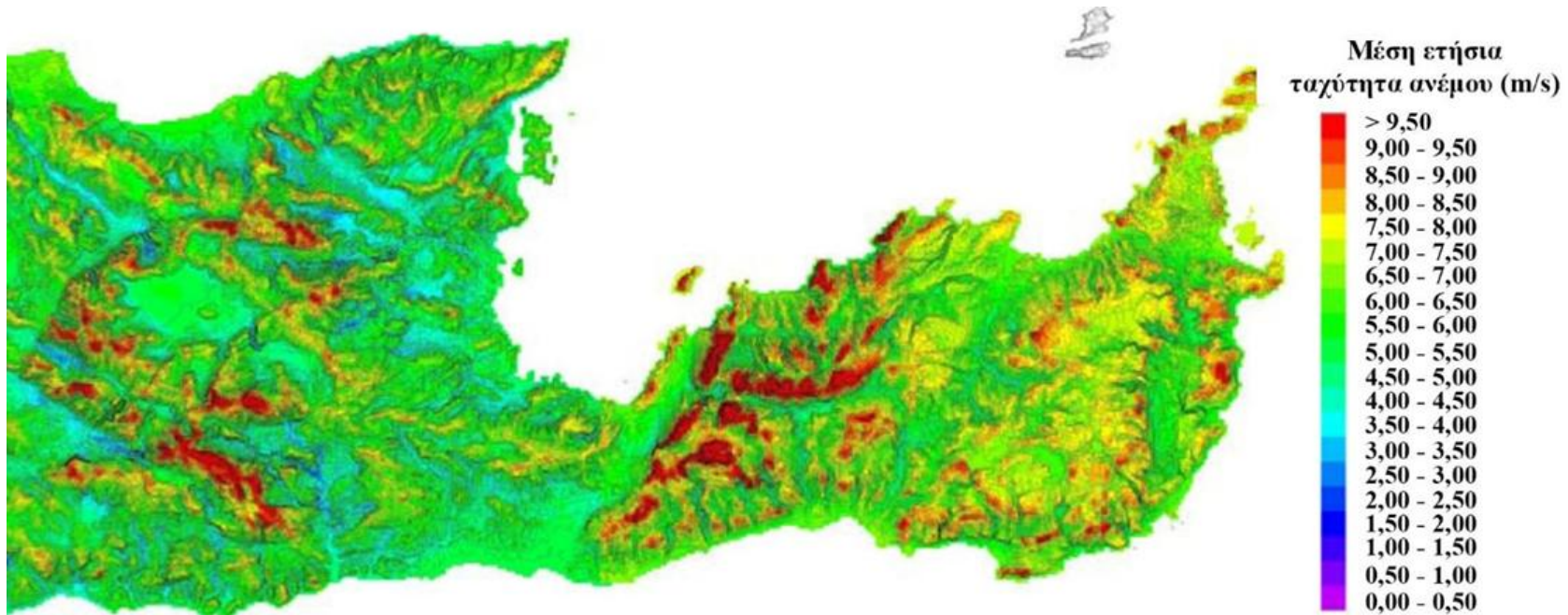


Θέση Εγκατάστασης Συστήματος Ανεμογεννητριών

Οι βασικές παράμετροι για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός συστήματος ανεμογεννητριών (μίας ή ενός αιολικού πάρκου) είναι οι εξής:

• **Αιολικό δυναμικό.** Όσο το δυνατό ακριβή γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου (ένταση και οι διακυμάνσεις σε μέτρο και διεύθυνση).

- από υφιστάμενους χάρτες αιολικού δυναμικού
- από την παραμόρφωση των δέντρων
- από τις γνώμες τοπικών κατοίκων ή χρηστών της θέσης (βοσκοί, ψαράδες κλπ).



Παραμόρφωση Δείκτης

Παραμόρφωση Δείκτης

Παραμόρφωση Δείκτης

Παραμόρφωση Δείκτης



0-1



5



0



4



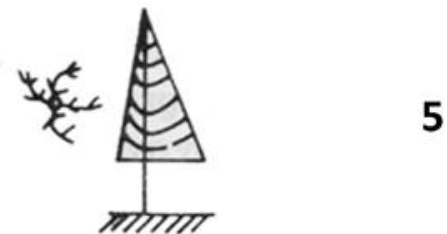
2



6



1



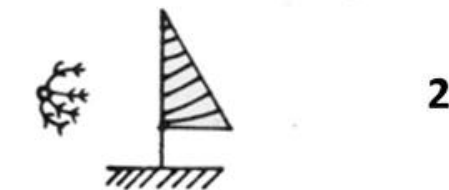
5



3



7



2



6



4



3



7

Θέση Εγκατάστασης Συστήματος Ανεμογεννητριών

- Η εγκατάσταση να μην έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή από την τοπική κοινότητα και σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς όρους.
- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας να είναι συμβατή (εγγύτητα, διασύνδεση) με τη λειτουργία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου.
- Να έχουν ληφθεί υπόψη κατά το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας τα πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα της συγκεκριμένης θέσης (πάγος, θυελλώδεις άνεμοι, έντονος κυματισμός, διάβρωση κ.λπ.).



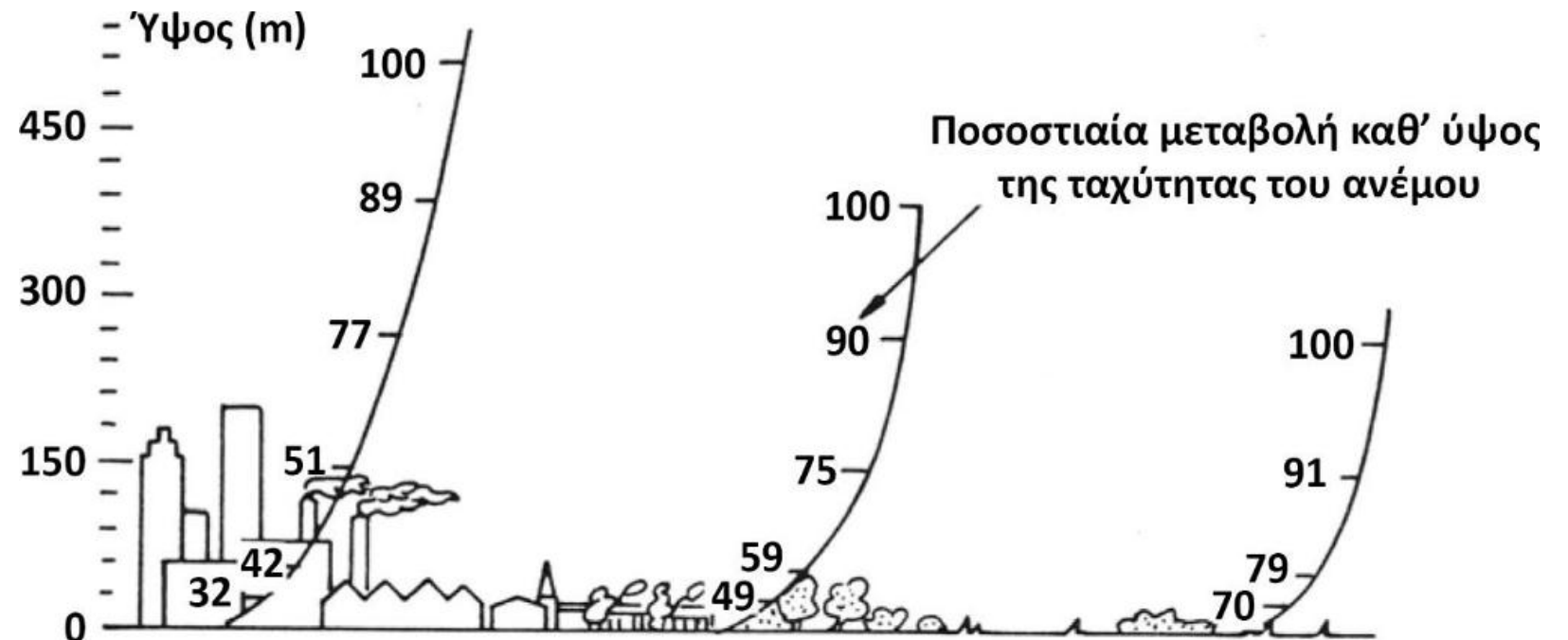
Θέση Εγκατάστασης Συστήματος Ανεμογεννητριών

1. Επίπεδο έδαφος ή θάλασσα

Η οριζόντια ταχύτητα του ανέμου V (που είναι και η πιο μεγάλη σε μέτρο) μεταβάλλεται με το ύψος από το έδαφος

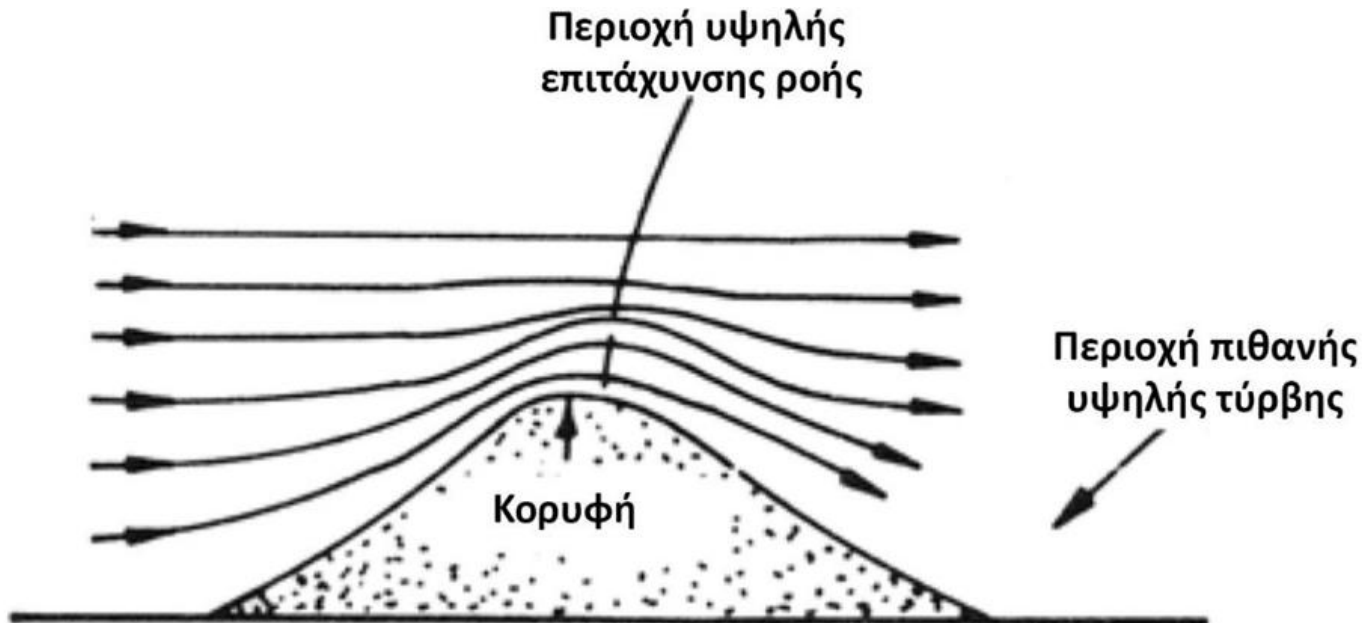
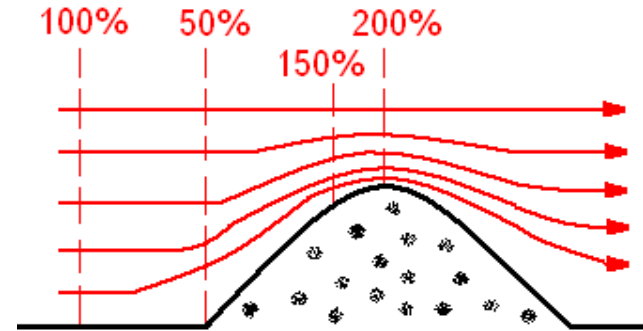
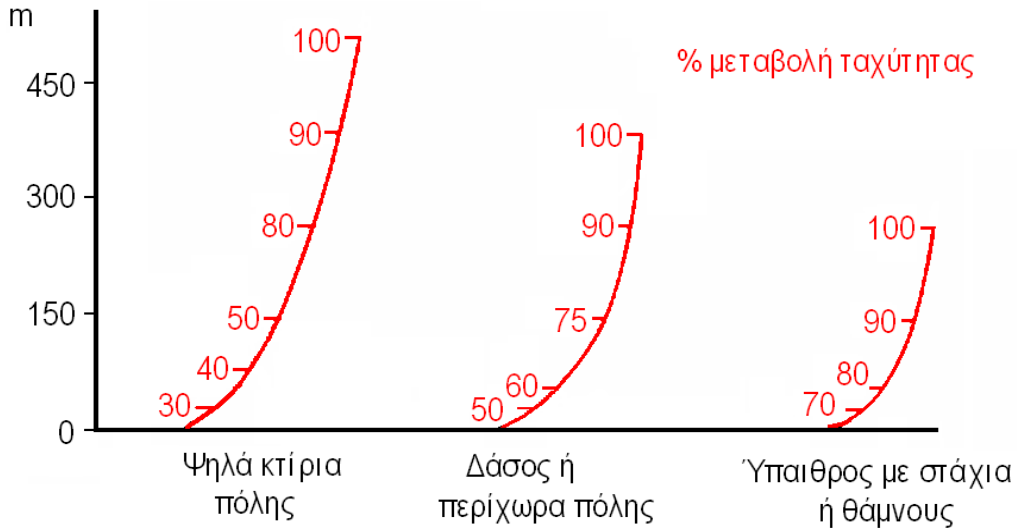
Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος από το έδαφος, λόγω της επίδρασης της τραχύτητας του εδάφους

Όσο πιο μακριά από το έδαφος, τόσο μειώνονται οι τριβές του εδάφους στη ροή του ανέμου και τόσο αυξάνει η κινητική ενέργειά του



Θέση Εγκατάστασης Συστήματος Ανεμογεννητριών

2. Λόφοι - βουνά



Συνεπώς, τα αιολικά πάρκα θα πρέπει να εγκαθίστανται στις κορυφές βουνών ή λόφων και σε περιοχές με μικρή τραχύτητα εδάφους, όπου η ταχύτητα του ανέμου έχει μεγιστοποιηθεί

Χωροθέτηση Ανεμογεννητριών Εντός του Αιολικού Πάρκου

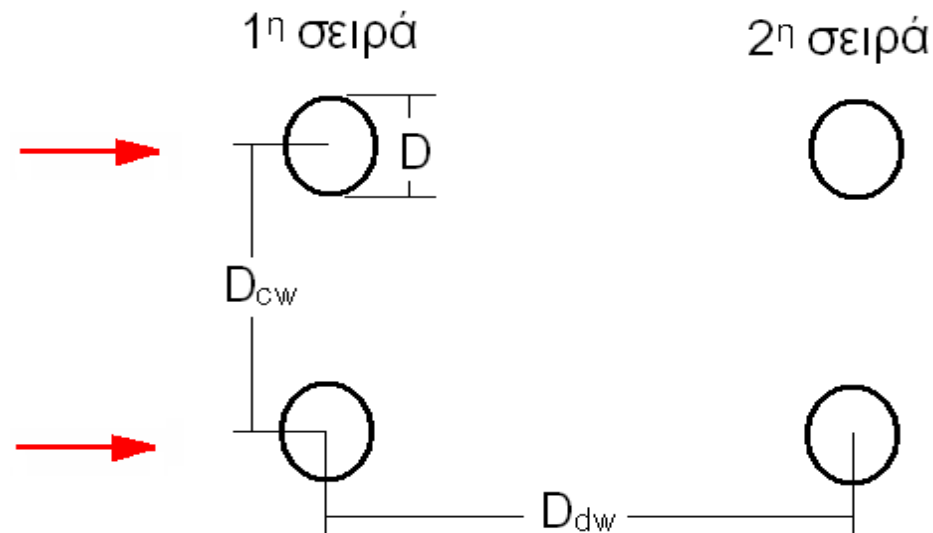
Η τοποθέτηση τους καθορίζεται από:

- την τοπογραφία της περιοχής,
- την ένταση και διεύθυνση του ανέμου,
- τους φυσικούς και τεχνολογικούς περιορισμούς (π.χ. ακατάλληλο έδαφος, μεγάλες κλίσεις, πρόσβαση, τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί, ραντάρ),
- τους νομοθετικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

$$D_{cw} = 2D \div 4D$$

$$D_{dw} = 4D \div 8D$$

$$\text{Πυκνότητα ισχύος} = \frac{\text{Ισχύς}}{\text{Εμβαδόν}}$$



Ενεργειακή Παραγωγή Αιολικού Πάρκου

Η ενεργειακή παραγωγή του πάρκου είναι ίση με το άθροισμα της παραγωγής ενέργειας της κάθε ανεμογεννήτριας:

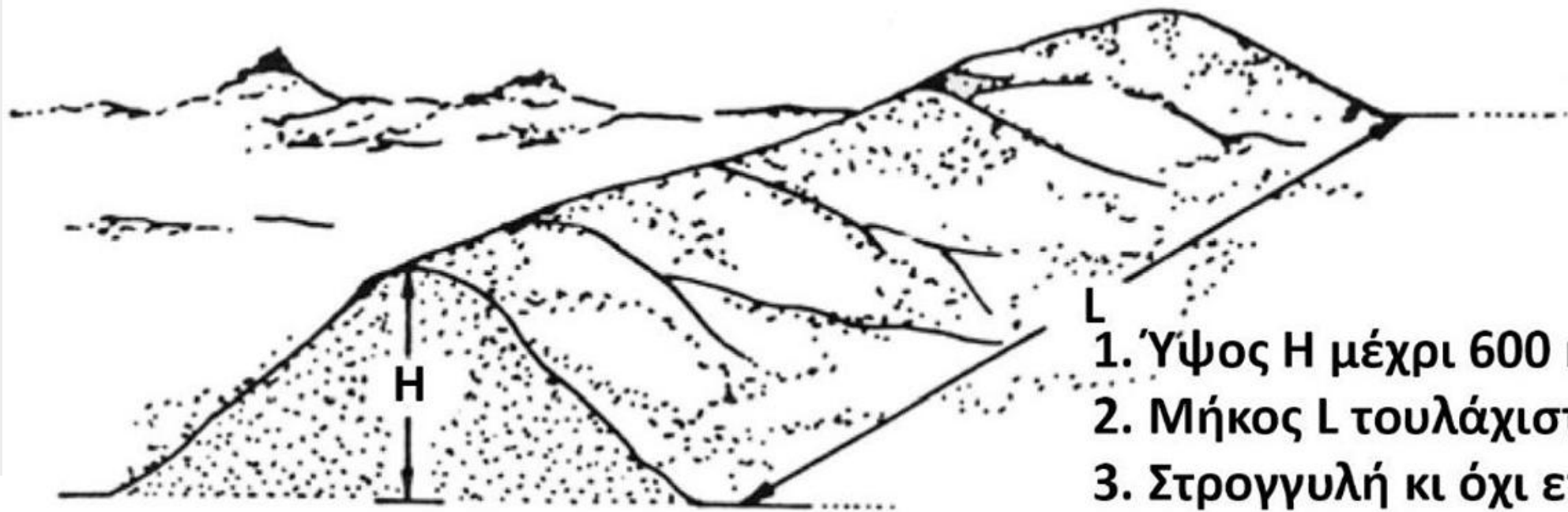
$$E_{\text{park}} = \sum_{i=1}^N E_{\text{turb}}$$

Η συνολική παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο δεν ισούται με το άθροισμα των N ανεμογεννητριών αλλά είναι μικρότερη από αυτό:

$$E_{\text{park}} = N(1 - \eta_{\text{airloss}})E_{\text{turb}}$$

Οι απώλειες της παραγόμενης ενέργειας οφείλονται στην επίδραση των υπόλοιπων ανεμογεννητριών και ονομάζονται απώλειες ομόρρου

Βέλτιστη επιλογή



1. Ύψος H μέχρι 600 m
2. Μήκος L τουλάχιστον $10H$
3. Στρογγυλή κι όχι επίπεδη κορυφή

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα



Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα



- Υψηλότερες ταχύτητες ανέμου
- Χαμηλότερες διακυμάνσεις ανέμου
- Περισσότερος διαθέσιμος χώρος



Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα



Για βάθη έως 50 m οι ανεμογεννήτριες μπορούν να πακτώνονται
στο βυθό

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα



Για βάθη μεγαλύτερα των 50 m οι ανεμογεννήτριες
επιπλέουν

Κατασκευή αιολικού πάρκου...

Στάδια κατασκευής

Διάνοιξη της οδοποιίας πρόσβασης στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και της εσωτερικής οδοποιίας του

Επιπεδοποίηση των πλατειών εναπόθεσης των τμημάτων της ανεμογεννήτριας

Κατασκευή των θεμελίων των ανεμογεννητριών: εργασίες εκσκαφής, τοποθέτηση οπλισμού, σκυροδέτηση και επιχωμάτωση του θεμελίου

Εκσκαφή των καναλιών εναπόθεσης των καλωδιώσεων μέσης τάσης του αιολικού πάρκου, την εναπόθεση των καλωδίων και την τελική επιχωμάτωσή τους

Κατασκευή αιολικού πάρκου...

Στάδια κατασκευής

Εκφόρτωση των ανεμογεννητριών και του συνοδού εξοπλισμού, τη μεταφορά τους στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου και την εναπόθεσή στις πλατείες των ανεμογεννητριών

Μεταφορά στο χώρο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου όλων των βαρέων οχημάτων που απαιτούνται για τη συναρμολόγηση και την ανέγερση των ανεμογεννητριών

Συναρμολόγηση ανεμογεννητριών και ανέγερσή τους

Διαμόρφωση χώρου για την κατασκευή του κτηρίου ελέγχου του αιολικού πάρκου

Κατασκευή του κτηρίου ελέγχου του αιολικού πάρκου

Εγκατάσταση εντός του κτηρίου του ΥΣ μέσης τάσης του αιολικού πάρκου, του συστήματος επικοινωνίας των ανεμογεννητριών και τηλελέγχου του αιολικού πάρκου

Μεταφορά ανεμογεννητριών



Κατασκευή θεμελίων



Συναρμολόγηση και ανέγερση ανεμογεννητριών



Συναρμολόγηση και ανέγερση ανεμογεννητριών



Ολοκλήρωση κατασκευής αιολικού πάρκου



Ολοκλήρωση κατασκευής αιολικού πάρκου

