

Συντελεστής Δυναμικότητας και Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Αιολική Ενέργεια και Ανεμογεννήτριες

Σχεδιασμός Συστημάτων ΑΠΕ

Συντελεστής Δυναμικότητας Capacity Factor, Cf

- Ένας τρόπος με τον οποίο συγκρίνουμε την απόδοση ΑΠΕ είναι υπολογίζοντας τον **Συντελεστή Δυναμικότητας** ή αλλιώς **Συντελεστής Εκμετάλλευσης (Cf)** δηλαδή την ετήσια ενεργειακή παραγωγή ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος.
- Με άλλα λόγια, υπολογίζουμε πόσες kWh ενέργειας απέδωσε κάποια ΑΠΕ, ανά έτος, ανά Watt εγκατεστημένης δυναμικότητας.

$$Cf = EY / (IC * 8760) \quad (1)$$

- Όπου EY η ετήσια ενεργειακή συγκομιδή σε kWh και IC η εγκατεστημένη ισχύς σε kW.
- Είναι ένας **Βασικός Δείκτης Απόδοσης (Key Performance Indicator, KPI)** που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας σε ορισμένη χρονική περίοδο.

Παράδειγμα
υπολογισμού
συντελεστή Cf
Φωτοβολταϊκής
Εγκατάστασης

- Η εγκατεστημένη ΦΒ ισχύς σε κεραμοσκεπή είναι **1590Wp**.
- Η ΦΒ εγκατάσταση απέδωσε, στο πρώτο χρόνο, **1447.22 kWh** ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι:
$$Cf = 1447220 / (1590 * 8760) = 0.104$$
- Όπου 365 ημέρες * 24 ώρες ανά ημέρα = 8760 ώρες ανά έτος.
- Συνεπώς, κατά την διάρκεια μόνο του **10.4%** ενός έτους η εγκατάστασή μας παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια με τη μέγιστη δυναμικότητα.

Παράδειγμα
υπολογισμού
συντελεστή Cf
Ηλεκτροπαραγωγού
Ζεύγους (H/Z)

- Η ονομαστική ισχύς ενός H/Z που λειτουργεί για 353 μέρες τον χρόνο, είναι **5000W**.
- Το H/Z απέδωσε, στο πρώτο χρόνο, **42360 kWh** ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι:

$$Cf = 42360000 / (5000 * 8760) = 0.967$$

- Όπου 365 ημέρες * 24 ώρες ανά ημέρα = 8760 ώρες ανά έτος.
- Συνεπώς, κατά την διάρκεια του **96.7%** ενός έτους το H/Z παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια με τη μέγιστη δυναμικότητα.

Σταθμισμένο Κόστος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Levelized Cost of Electricity, LCOE

To LCOE είναι και αυτό Key Performance Indicator!

It is computed as follows (IEA/NEA, 2015):

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n (OCC_t + OM_t + FC_t + CO_{2,t} + D_t) \cdot (1 + r)^{-t}}{\sum_{t=1}^n MWh_t (1 + r)^{-t}} \quad (2)$$

Where:

- | | |
|----------------|--|
| OCC_t | The Overnight Capital Cost expended in year t ⁶ |
| OM_t | Operation & maintenance costs in year t , excluding fuel and possible CO_2 tax |
| FC_t | Fuel costs in year t |
| $CO_{2,t}$ | CO_2 tax costs in year t |
| D_t | Decommissioning and waste management costs in year t |
| MWh_t | The amount of electricity generated in MWh in year t , being equal to $P \cdot NOH = P \cdot LF \cdot 8760$, with P the installed power capacity, NOH the number of operating hours and LF the average load factor. |
| $(1 + r)^{-t}$ | The discount factor for year t , with r being the discount rate |

Υπολογισμός
σταθμισμένου
κόστους
ηλεκτρικής
ενέργειας για
Φωτοβολταϊκή
Εγκατάσταση

LCOE =
7521.62 /
21934.61 =
0.34 € / kWh

Year	Discount Factor [DF]*	Nominal Cash Flows				Discounted Cash Flows				Fixed Tilt PV Array Output	
		Capital	Replacement	Operation & Maintenance	Total	Capital	Replacement	Operation & Maintenance	Total NPC**	Annual Energy Output [AEO, kWh]	Total kWh [AEO * DF, kWh]
0	1	-3,296.35		-120.00	-3,416	-3,296	0	-120.00	-3,416.35	1450	1450
1	0.962			-125.00	-125	0	0	-120.19	-120.19	1440	1384.615385
2	0.925			-130.00	-130	0	0	-120.19	-120.19	1430	1322.115385
3	0.889			-135.00	-135	0	0	-120.01	-120.01	1420	1262.374829
4	0.855			-140.00	-140	0	0	-119.67	-119.67	1410	1205.273909
5	0.822			-145.00	-145	0	0	-119.18	-119.18	1400	1150.697949
6	0.790			-150.00	-150	0	0	-118.55	-118.55	1390	1098.537191
7	0.760			-155.00	-155	0	0	-117.79	-117.79	1380	1048.686582
8	0.731			-160.00	-160	0	0	-116.91	-116.91	1370	1001.045581
9	0.703			-165.00	-165	0	0	-115.93	-115.93	1360	955.5179604
10	0.676		-1,293.25	-170.00	-1,463	0	-873.67	-114.85	-988.52	1350	912.0116279
11	0.650			-175.00	-175	0	0	-113.68	-113.68	1340	870.4384483
12	0.625			-180.00	-180	0	0	-112.43	-112.43	1330	830.7140759
13	0.601			-185.00	-185	0	0	-111.11	-111.11	1320	792.7577937
14	0.577			-190.00	-190	0	0	-109.72	-109.72	1310	756.4923585
15	0.555			-195.00	-195	0	0	-108.28	-108.28	1300	721.8438535
16	0.534			-200.00	-200	0	0	-106.78	-106.78	1290	688.7415466
17	0.513			-205.00	-205	0	0	-105.24	-105.24	1280	657.1177547
18	0.494			-210.00	-210	0	0	-103.66	-103.66	1270	626.9077137
19	0.475			-215.00	-215	0	0	-102.05	-102.05	1260	598.0494543
20	0.456		-1,293.25	-220.00	-1,513	0	-590.22	-100.41	-690.63	1250	570.4836828
21	0.439			-225.00	-225	0	0	-98.74	-98.74	1240	544.1536666
22	0.422			-230.00	-230	0	0	-97.05	-97.05	1230	519.0051256
23	0.406			-235.00	-235	0	0	-95.35	-95.35	1220	494.9861266
24	0.390			-240.00	-240	0	0	-93.63	-93.63	1210	472.046984
TOTAL		€ (3,296.35)	€ (2,586.50)	€ (4,500.00)	€ (10,382.85)	€ (3,296.35)	€ (1,463.90)	€ (2,761.38)	€ (7,521.62)	1330	21,934.61

Σύγκριση LCOE Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής 2018

Version: March 2018

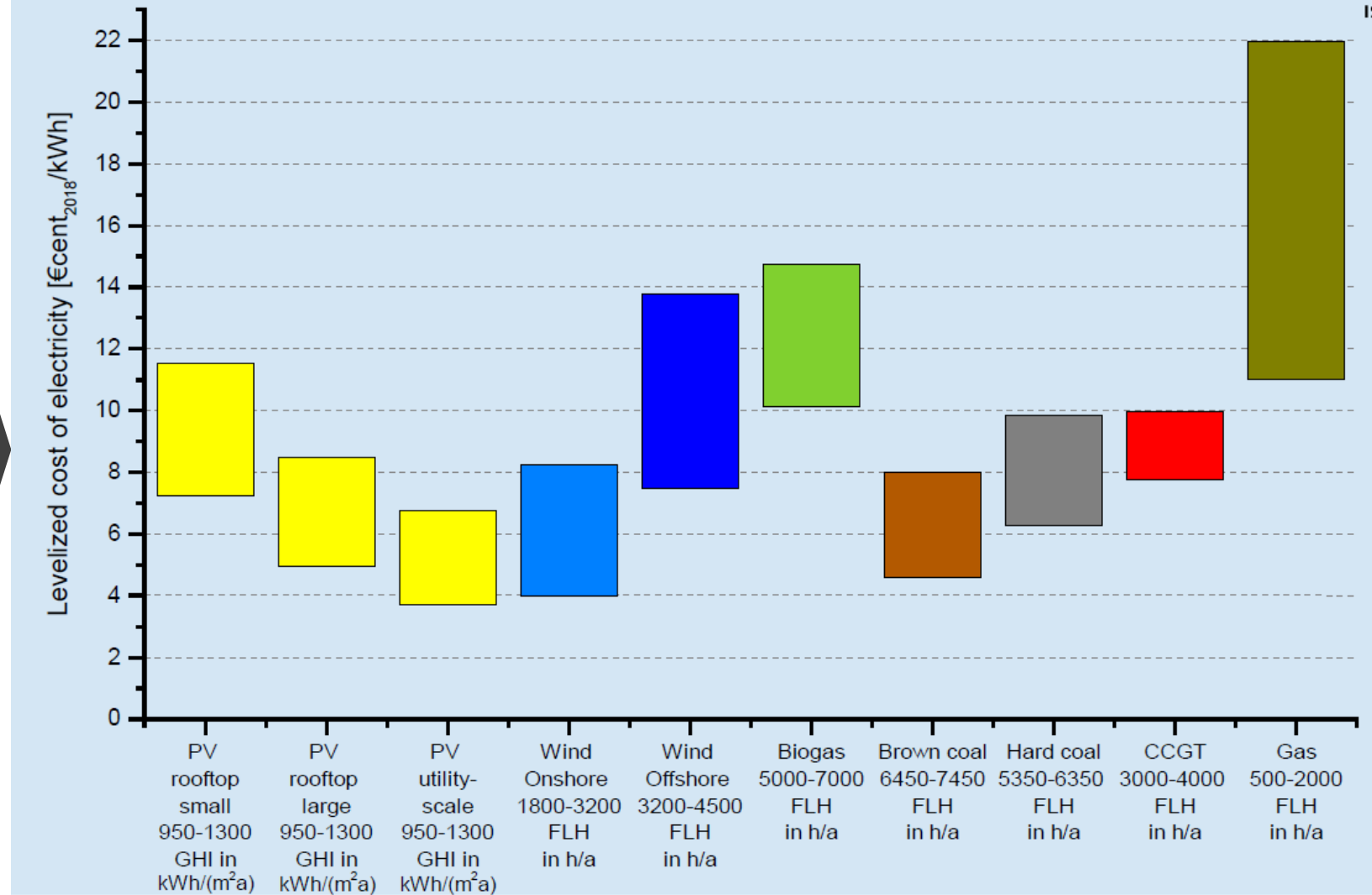


Figure 4: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at different locations in Germany in 2018. The value under the technology refers in the case of PV to solar irradiance (GHI) in kWh/(m²a); in the case of other technologies it reflects the number of full load hours of the power plant per year. Specific investments are taken into account with a minimum and maximum value for each technology. Additional assumptions are presented in Table 4-Table 6.

*FLA: Full Load Hours

Σύγκριση LCOE Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής 2024

Version: July 2024

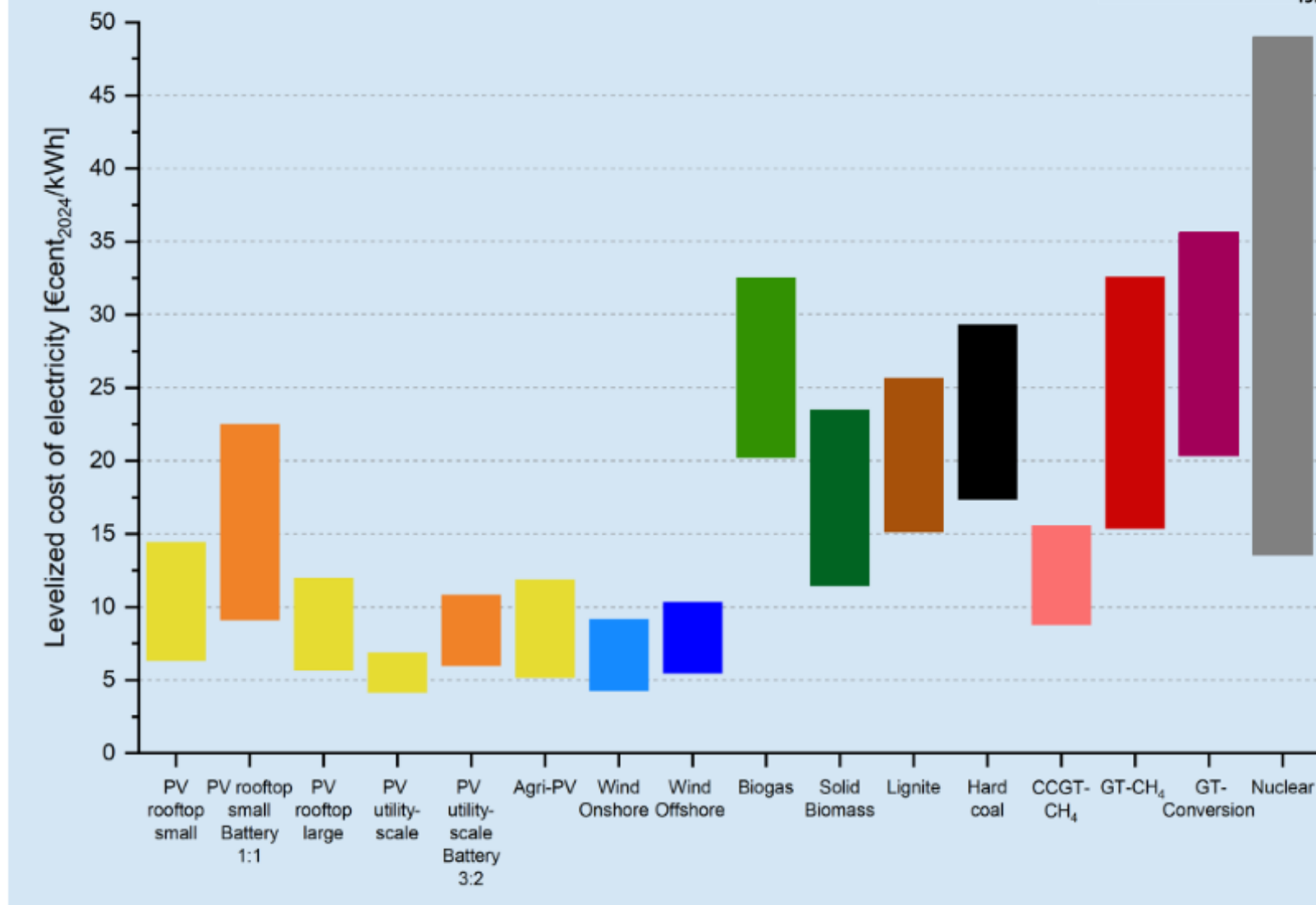
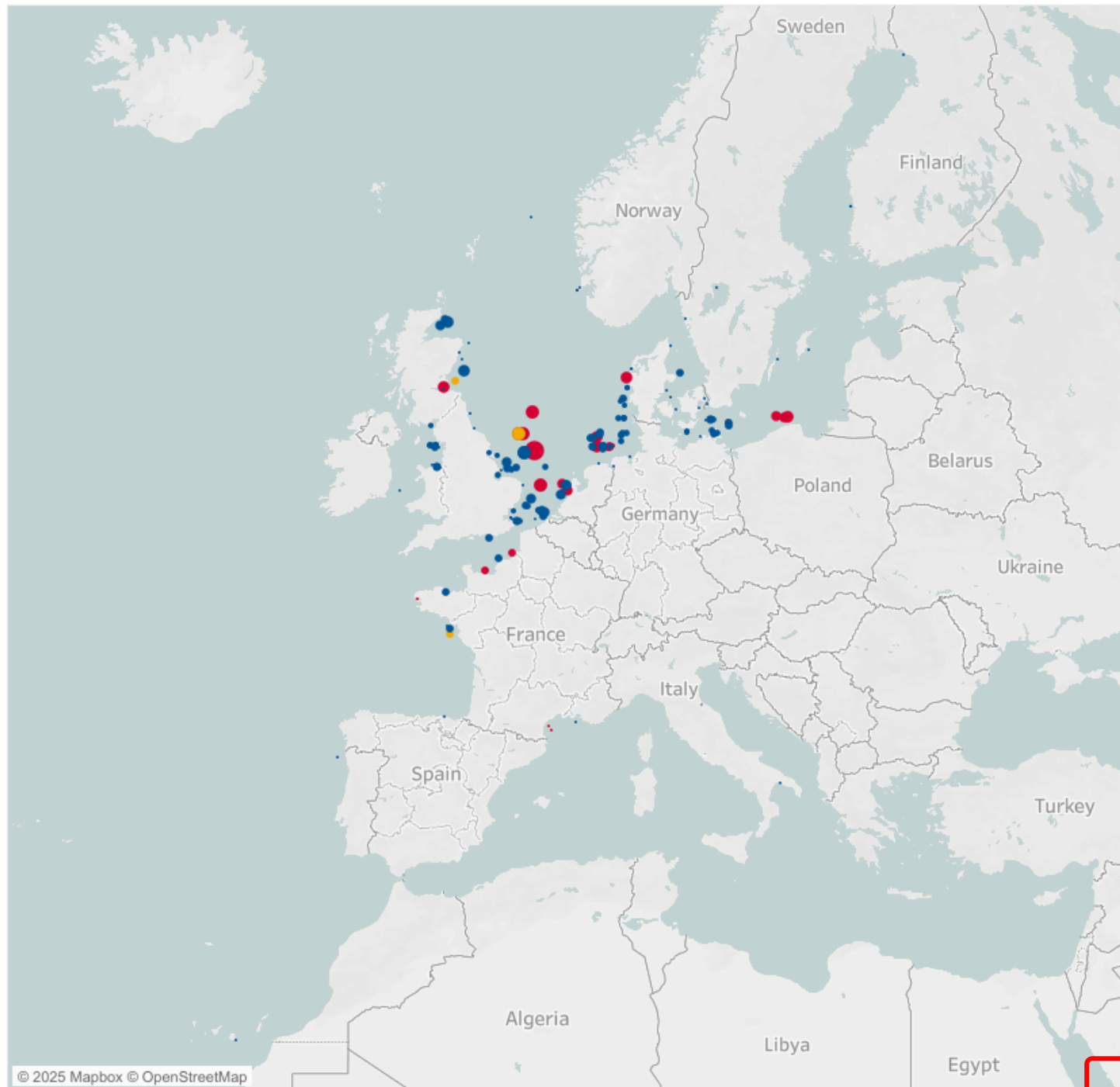


Figure 1: LCOE of renewable energy technologies and conventional power plants at locations in Germany in 2024. Specific investments are considered using a minimum and maximum value for each technology.



Europe's Offshore Wind

37,401 MW connected to the grid

6,664 turbines connected

140 Wind Farms

13 countries

Status

Online	■
Partially online	■
Under construction	■

Technology

All

	MW Connected	Turbines Connected	Number of projects
United Kin..	16,577	2,921	47
Germany	9,121	1,639	33
Netherlands	4,739	670	10
Denmark	2,653	672	17
Belgium	2,261	399	11
France	1,596	229	6
Sweden	195	80	5
Norway	101	13	3
Finland	71	19	3
Italy	30	10	1
Ireland	25	7	1
Portugal	25	3	1
Spain	7	2	2

Last update: October 20, 2025

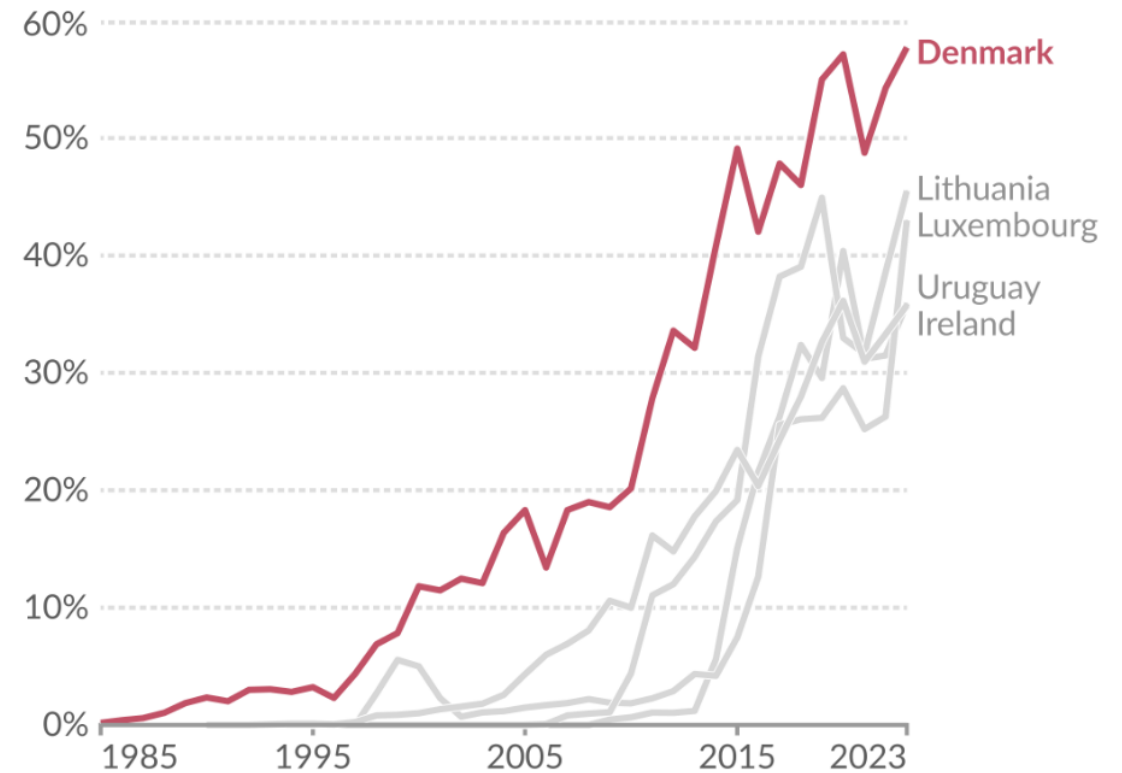
Συντελεστής Δυναμικότητας (Cf) Ανεμογεννητριών

- Το 2015, η Δανία κάλυψε πάνω από το 40% της ηλεκτρικής κατανάλωσης της, με ηλεκτρική ενέργεια που προήλθε από ανεμογεννήτριες (ΑΓ). Κερδήθηκαν 14.13 TWh από ανεμογεννήτριες εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος 5.07 GW. Ο συντελεστής δυναμικότητας του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στην Δανία ήταν **Cf = 0.32** ή 32%.
- $FullLoadHours = cf * 8760 = 0.32 * 8760 = 2803.2 h$
- Το 2023 κάλυψε κοντά στο 60% της κατανάλωσης με ΑΓ. Κερδήθηκαν 20.5 TWh από 7.026 GW. **Cf = 0.33** ή 33%

Share of electricity production from wind

Our World
in Data

Measured as a percentage of total electricity.



Data source: Ember (2024); Energy Institute (2024)

OurWorldinData.org/energy | CC BY

Αιολική Ενέργεια

- Πόση ενέργεια παράγει αυτή η «μεγάλη» ανεμογεννήτρια;
- Ποιο είναι το όριο παραγωγής μιας τέτοιας ανεμογεννήτριας;
- Ποιο είναι το ενεργειακό δυναμικό του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης;
- Ανεμογεννήτρια Enercon E-126



Capacity factor



Full power all year

$$c_f = 1$$



Switched off all year

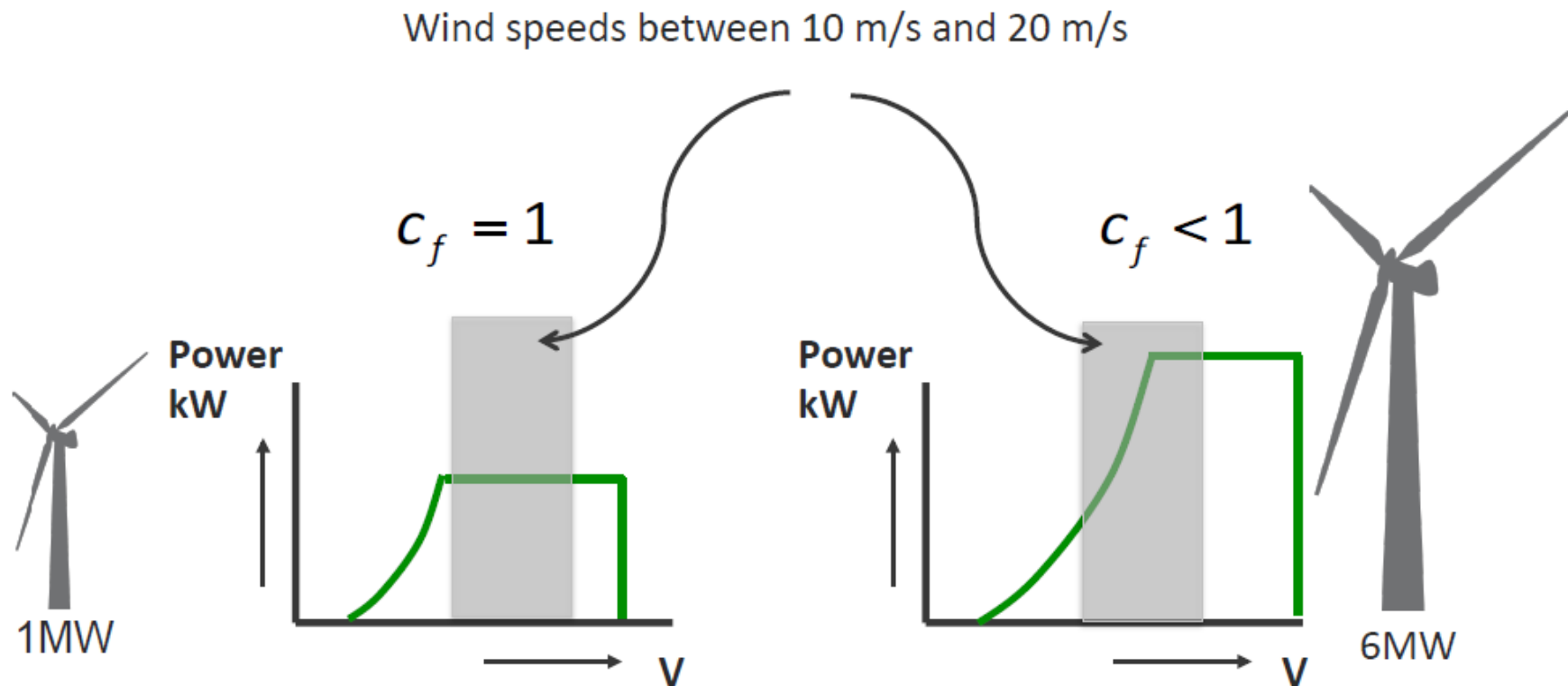
$$c_f = 0$$

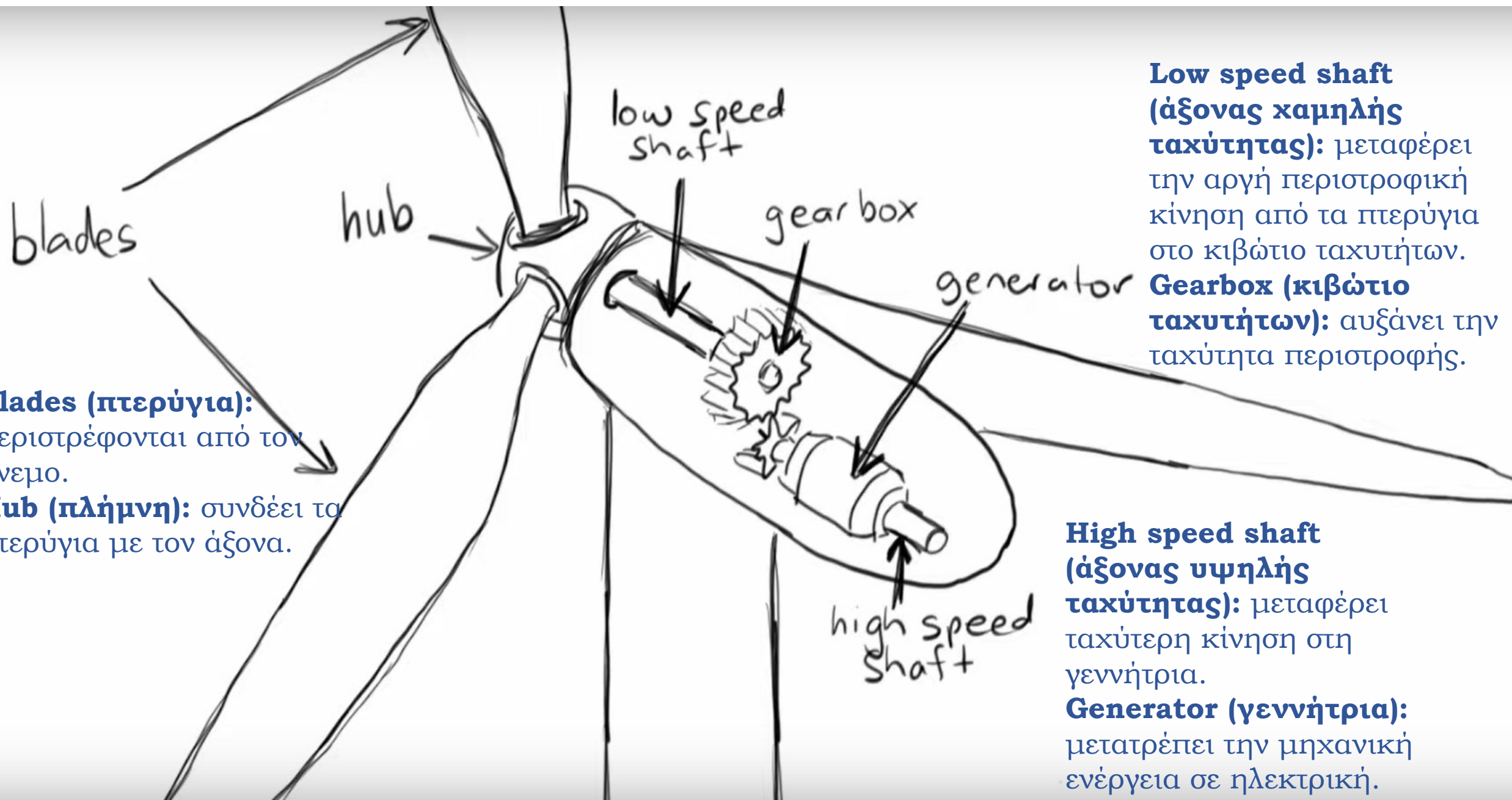
Συντελεστής Δυναμικότητας Ανεμογεννητριών

- Στην ιδανική περίπτωση μιας ανεμογεννήτριας που λειτουργεί όλο το χρόνο σε πλήρη ισχύ, χωρίς διακοπή, ο συντελεστής δυναμικότητας είναι ίσος με 1.
- Αντιθέτως, εάν η ίδια ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί καθόλου κατά τη διάρκεια του έτους, ο συντελεστής δυναμικότητας είναι 0.
- Συνεπώς ο C_f , δεν αποτελεί μέτρο της ποιότητας του συστήματος!
- Δεν έχει σημασία πόσο καλή είναι μια ανεμογεννήτρια. Αν είναι πάντοτε απενεργοποιημένη, ο συντελεστής δυναμικότητας της ΑΓ είναι μηδέν.
- Γενικότερα, ο συντελεστής δυναμικότητας μιας ΑΓ αυξάνεται όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου της τοποθεσίας εγκατάστασης.

Συντελεστής δυναμικότητας ΑΓ διαφορετικής ονομαστικής ισχύος

Capacity factor





Low speed shaft (άξονας χαμηλής ταχύτητας): μεταφέρει την αργή περιστροφική κίνηση από τα πτερύγια στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Gearbox (κιβώτιο ταχυτήτων): αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής.

Blades (πτερύγια): περιστρέφονται από τον άνεμο.

Hub (πλήμνη): συνδέει τα πτερύγια με τον άξονα.

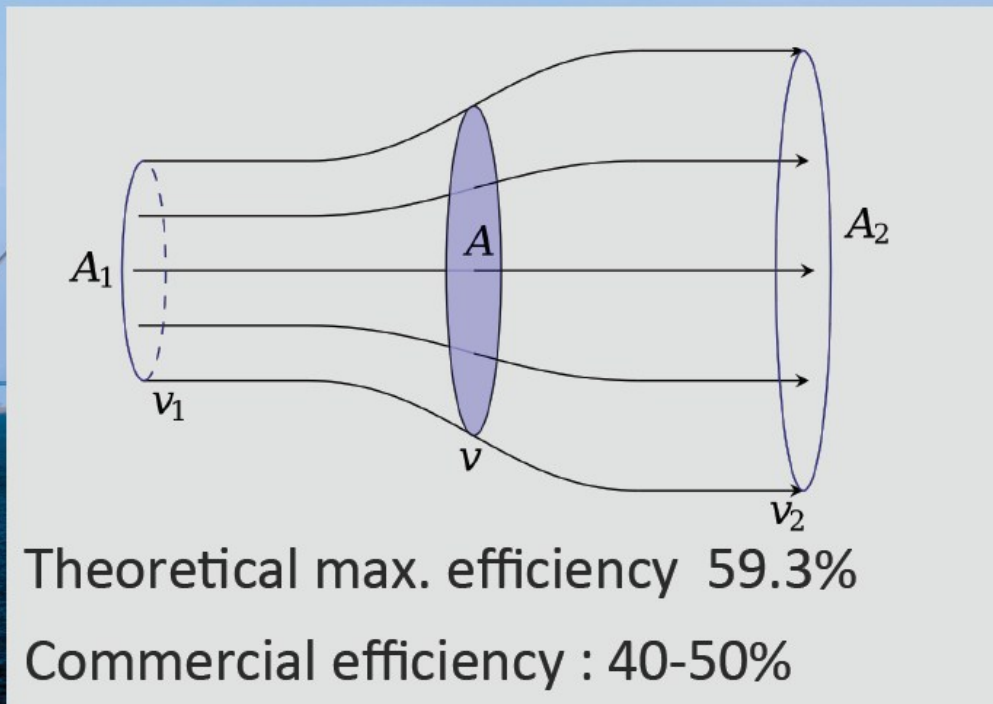
High speed shaft (άξονας υψηλής ταχύτητας): μεταφέρει ταχύτερη κίνηση στη γεννήτρια.

Generator (γεννήτρια): μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική.



- Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και, μέσω άξονα και κιβωτίου ταχυτήτων, η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια.
- Η απόδοσή της δεν φτάνει ποτέ το 100%, γιατί πάντα ένα μέρος του ανέμου συνεχίζει να περνά πίσω από τα πτερύγια.

Betz's Law



Ο νόμος του Betz

- Η απολαβή ενέργειας από τον άνεμο, δηλαδή από μια ροή ανέμου με ταχύτητα v , διαμέσου κάθετης κυκλικής επιφάνειας A , προκαλεί μείωση της ταχύτητας της ροής του ανέμου πίσω από το την επιφάνεια.
- Η νέα ροή μεγεθύνει την επιφάνεια δράσης σε εμβαδόν A_2 .
- Παρόμοια, μπροστά από την ανεμογεννήτρια λαμβάνει χώρα κάτι ανάλογο. Η επιφάνεια από την οποία δύναται να εξαχθεί ενέργεια από την ροή ανέμου με αρχική ταχύτητα v_1 , έχει εμβαδό A_1 .
- <https://www.youtube.com/watch?v=HJooZQUXr6o>

Από την Κινητική Ενέργεια του ανέμου Στην Ισχύ της Ανεμογεννήτριας

Κινητική Ενέργεια του Ανέμου

- Το εμβαδόν της επιφάνειας

$$A = \pi * (D/2)^2 \quad [m^2]$$

- Η ροή αέριας μάζας

$$mfr = \rho * A * v \quad [kg/s]$$

- Η κινητική ενέργεια

$$E_{kin} = 0.5 * m * v^2 \quad [J]$$

$$E_{kin} / t = 0.5 * mfr * v^2 \quad [J/s]$$

Ισχύς της Ανεμογεννήτριας

Η ισχύς του ανέμου

$$P_{wind} = 0.5 * \rho * A * v^3 \quad [W] \quad (3)$$

- Αυτή είναι η ισχύς που υπάρχει στον άνεμο, η οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί με τον Συντελεστή Ισχύος (**Cp, Power Coefficient**).
- Ο συντελεστής ισχύος περιγράφει την απόδοση μιας ΑΓ σε συγκεκριμένες ταχύτητες ανέμου και ορίζεται από την καμπύλη ισχύος της ΑΓ.

Η ισχύς της ΑΓ

$$P_{wt} = C_p * 0.5 * \rho * A * v^3 \quad [W] \quad (4)$$

Η πυκνότητα του αέρα (ρ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την πίεση και το υψόμετρο, αλλά για υπολογισμούς ανεμογεννητριών χρησιμοποιούμε συνήθως μια τυπική τιμή: ρ ≈ 1,225 kg/m³ σε θερμοκρασία 15 °C, πίεση 1 atm και στάθμη θάλασσας.

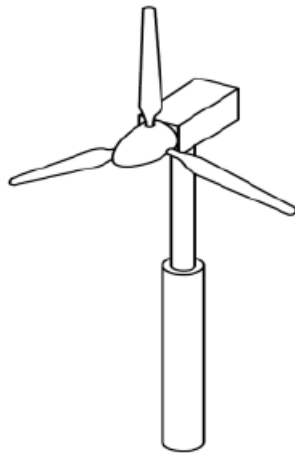


Μικρές ΑΓ

- Πρόσφατες τεχνολογικές βελτιώσεις έχουν αυξήσει τη συνολική ισχύ των μικρότερων ανεμογεννητριών.
- Αφορά ΑΓ με ονομαστική ισχύ μικρότερη ή ίση από 10kW.
- Η βασική αρχή λειτουργίας είναι ίδια για όλες τις ΑΓ. Η κινητική ενέργεια από τον άνεμο μετατρέπεται σε ροπή που περιστρέφει μια γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρική ισχύ.

Μικρές ΑΓ

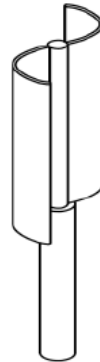
Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα
(HAWT)



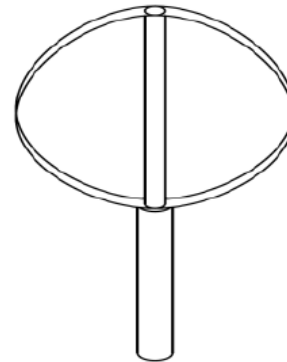
HAWT

Είναι πιο αποδοτικές.

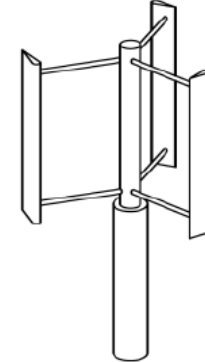
Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα
(VAWT)



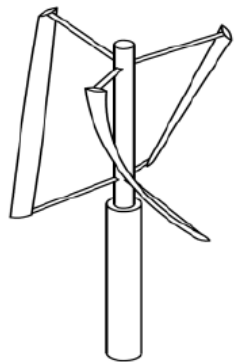
SAVONIUS VAWT



DARRIEUS VAWT

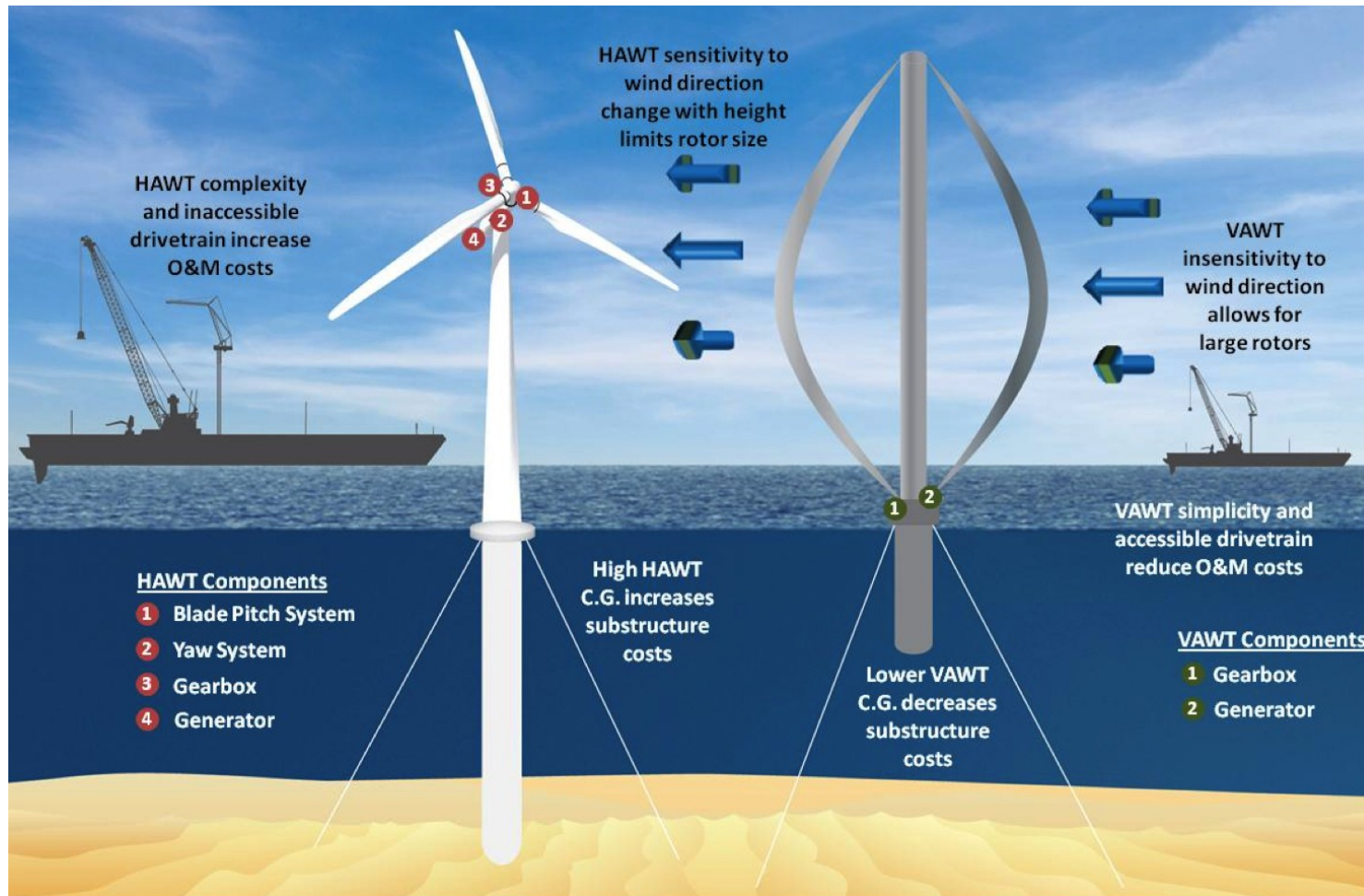


H-BLADE VAWT



GORLOV VAWT

Είναι απλούστερες και πιο ευέλικτες, αλλά λιγότερο αποδοτικές και λιγότερο διαδεδομένες σε μεγάλες εφαρμογές.



HAWT vs VAWT

- Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HWT) είναι οι πιο διαδεδομένες και είναι πιο αποδοτικές από ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα (VWT) ειδικά όταν εκτίθενται σε στρωτούς ανέμους υψηλών ταχυτήτων.
- Λειτουργούν ωστόσο ανεπαρκώς σε τυρβώδεις ανέμους με ασταθείς κατευθύνσεις. Αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο στην ισχύ εξόδου αυτών των ανεμογεννητριών.

Μικρές ΑΓ κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα

- Ωστόσο, οι μικρές ανεμογεννήτριες, είναι συχνά εκτεθειμένες σε ριπές και στροβιλισμούς, δεδομένου ότι εγκαθίστανται συνήθως σε ετερογενή τοπία κοντά σε αστική επιφάνεια.
- Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα τελευταία χρόνια οι VWT να έχουν κερδίσει σημαντικό έδαφος έναντι των HWT, κυρίως γιατί **δεν επηρεάζονται από ριπές και τις ξαφνικές αλλαγές κατεύθυνσης του ανέμου και επειδή ενσωματώνονται με σχετική ευκολία σε κτήρια.**



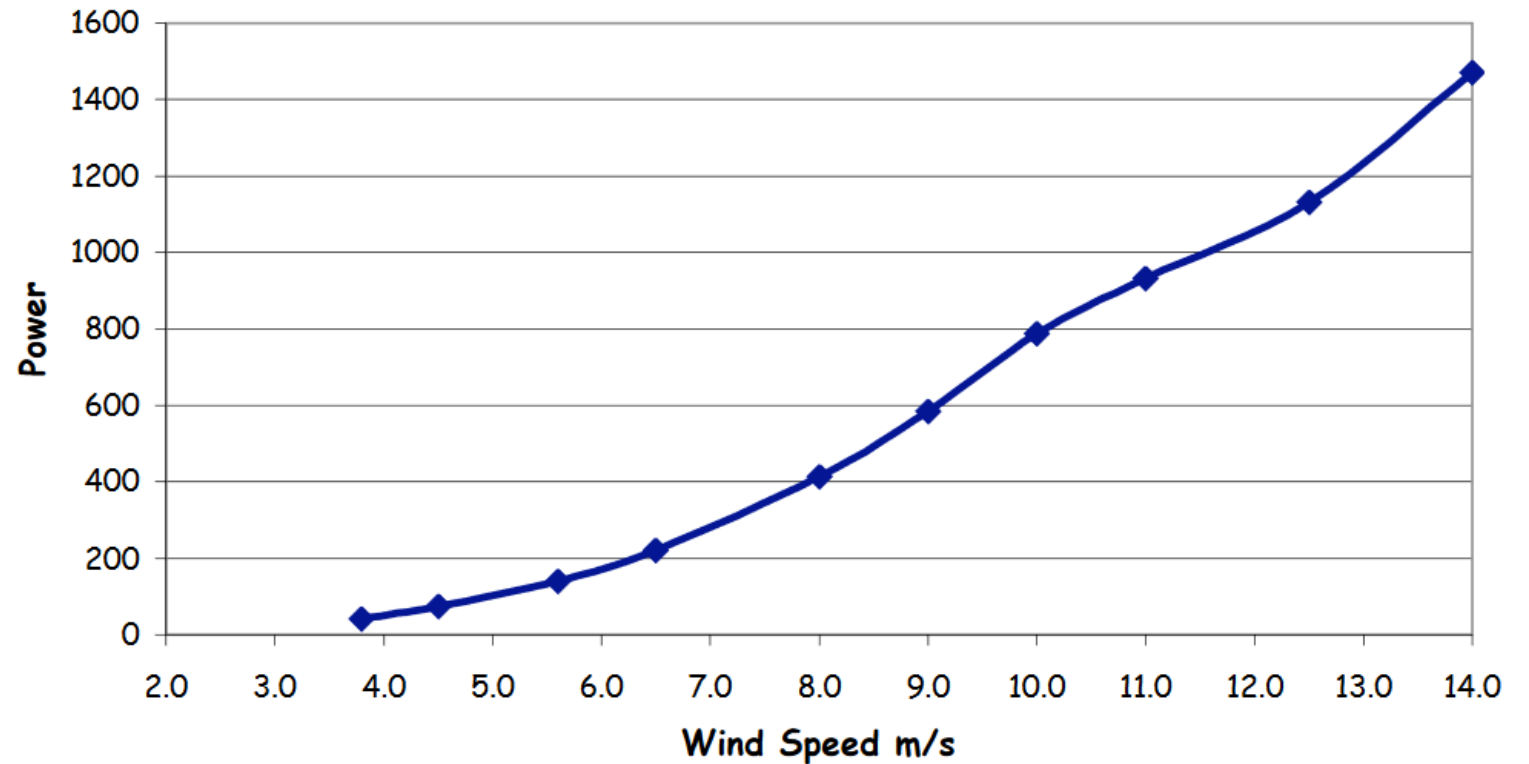
Μικρές ΑΓ και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

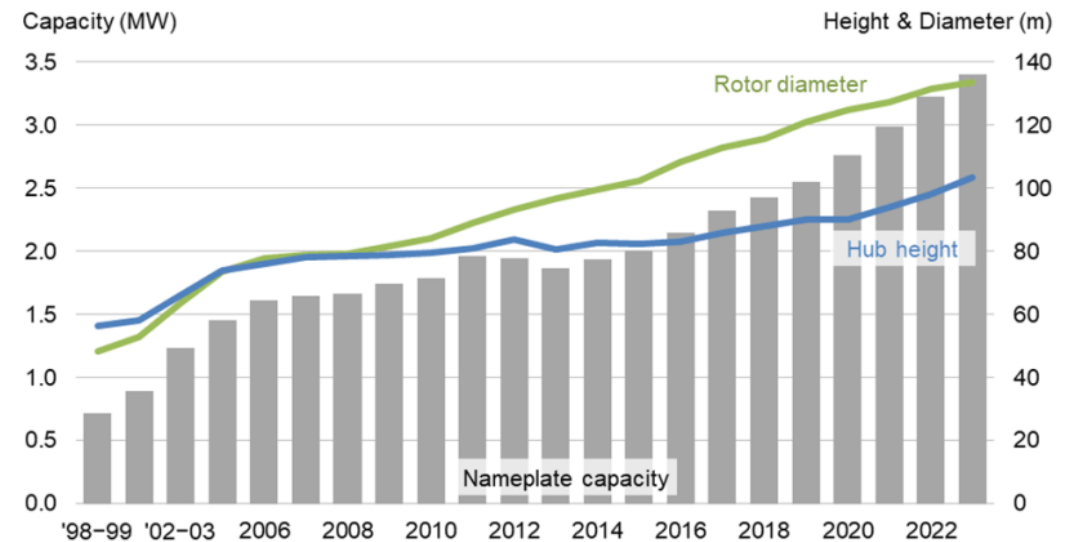
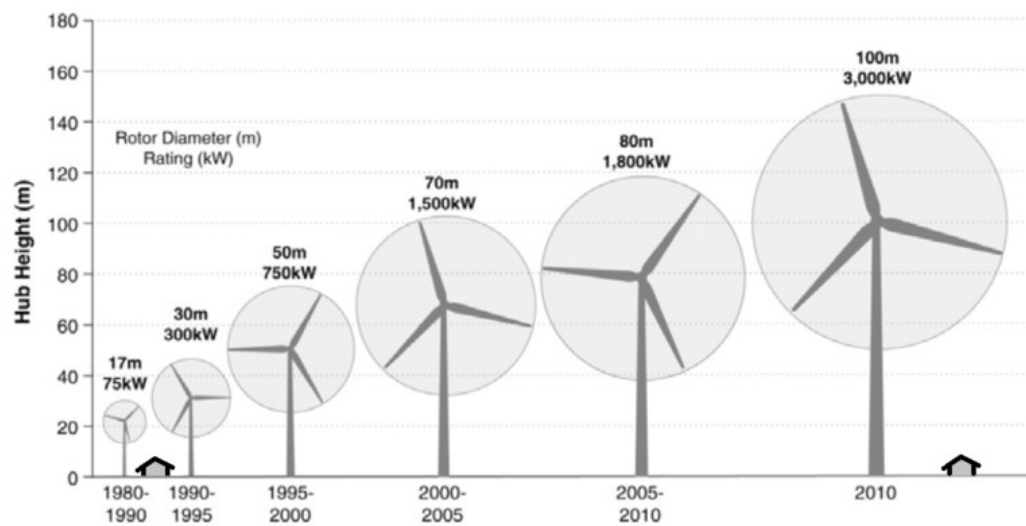
- Οι μικρές ανεμογεννήτριες συνδυάζονται συνήθως με συστήματα **συσσωρευτών** ή ηλεκτρικούς **θερμοσίφωνες** για την αποθήκευση πλεονάζουσας ενέργειας.
- Αυτά τα συστήματα επηρεάζουν τον φόρτο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, προσθέτοντας επιπλέον **πολυπλοκότητα** στο ήδη δύσκολο έργο της εκτίμησης της ισχύος εξόδου μιας ΑΓ σε τυρβώδες περιβάλλον.
- Βιβλιογραφία που να περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ο τυρβώδης άνεμος σε αστικό περιβάλλον επηρεάζει την παραγωγικότητα των μικρό-ανεμογεννητριών είναι ελάχιστη.



Καμπύλη Ισχύος ΑΓ

- Θεωρητικά, η **απόδοση** μιας ανεμογεννήτριας σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου εξάγεται από την καμπύλη ισχύος.





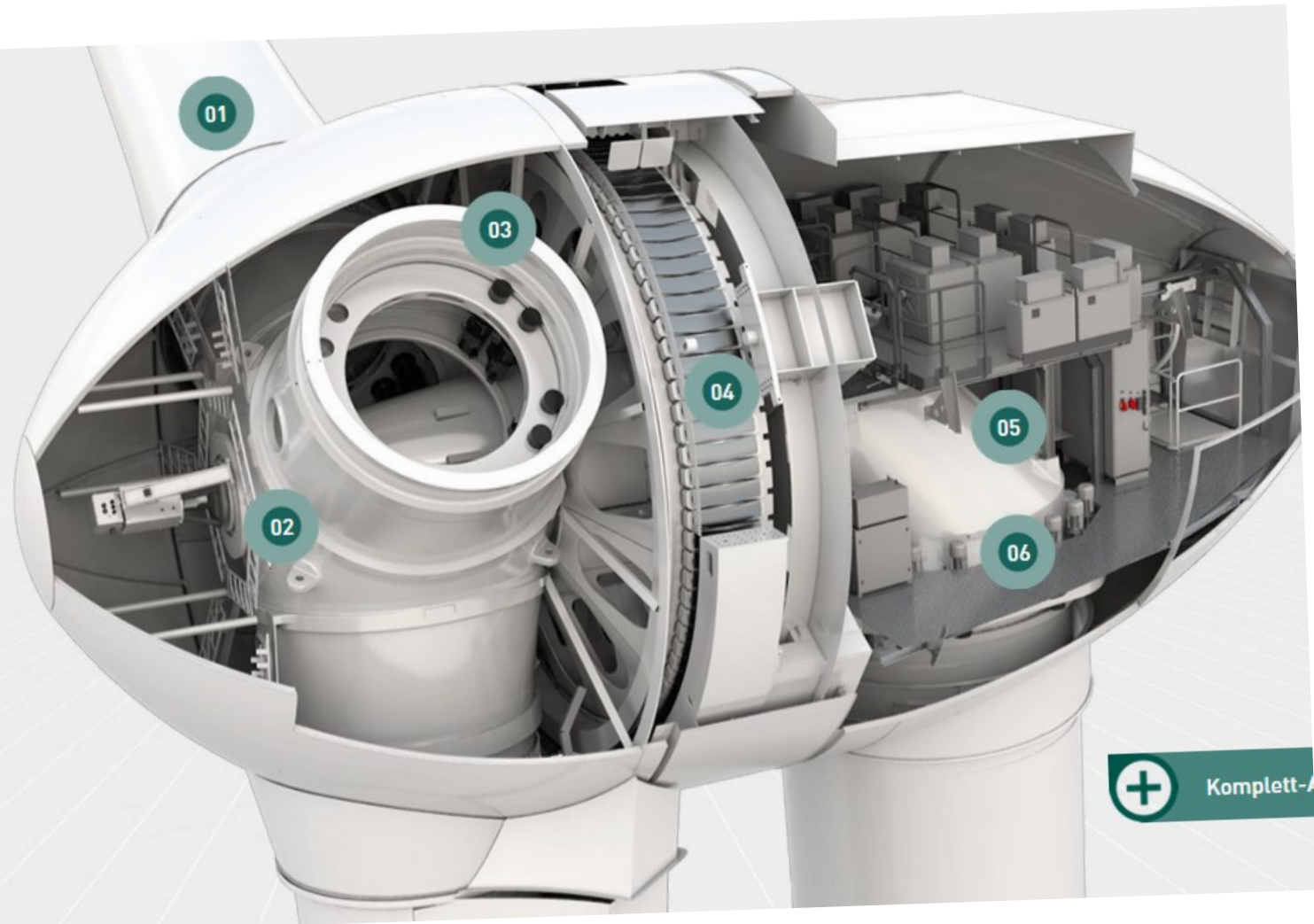

 Average turbine hub height, rotor diameter, and nameplate capacity for land-based wind projects from the [Land-Based Wind Market Report: 2024 Edition](#).

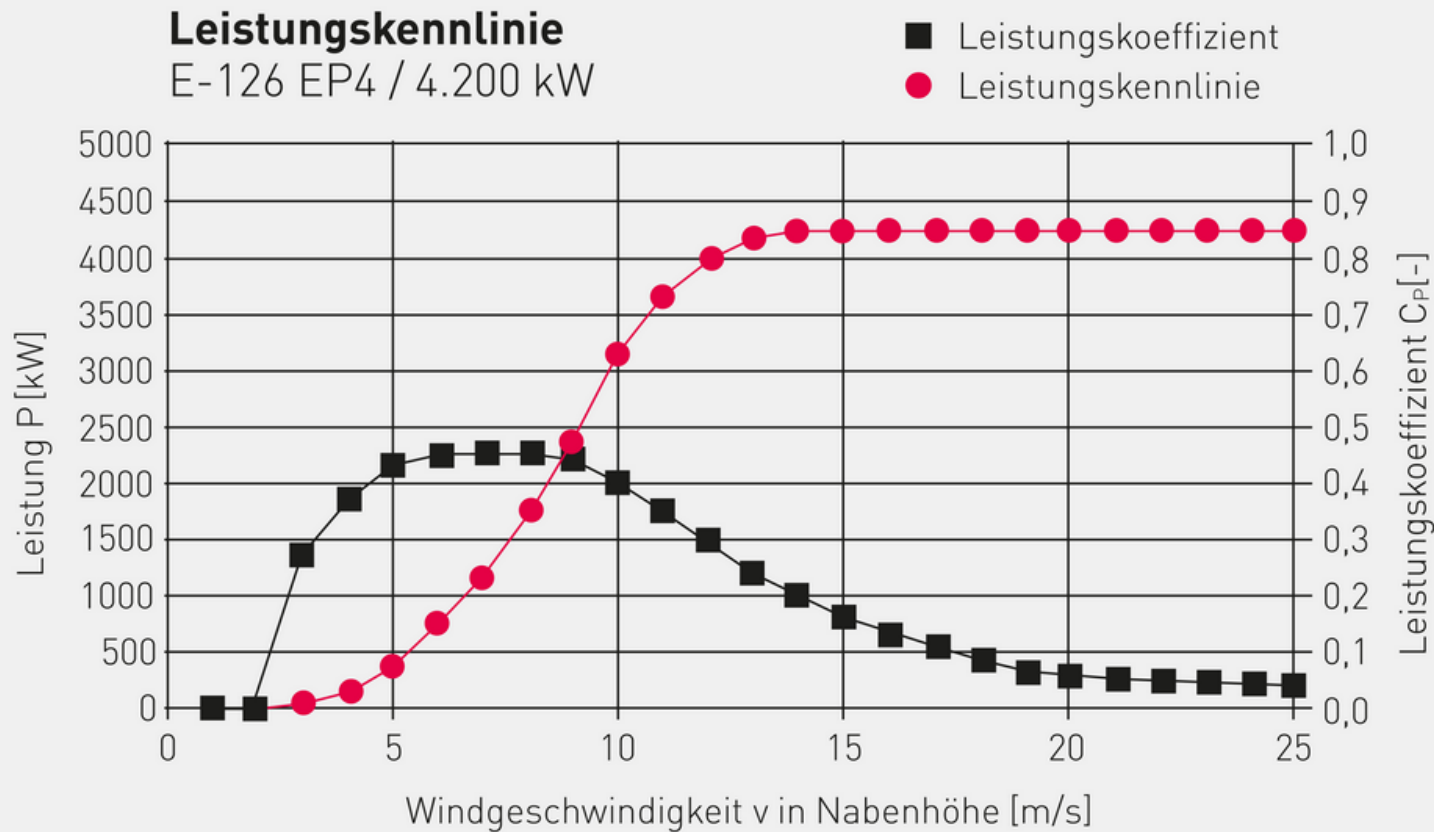
E-126 EP4

Smart, effizient, leistungsstark - ENERCONs neue Anlage der 4 MW Plattform für mittlere Windstandorte.



Zu den technischen Daten





Εκτίμηση Ισχύος της ΑΓ

- Διάμετρος Πτερυγίων

$$D = 126 \text{ m} \Rightarrow A = 12469 \text{ m}^2$$

- Πυκνότητα αέρα

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

- Μέση ταχύτητα ανέμου

$$v = 10 \text{ m/s}$$

- Συντελεστής Ισχύος για v

$$C_p = 0.41$$

- Ισχύς στον άνεμο

$$P_{\text{wind}} = 0.5 * 1.225 * 12469 * 10^3$$

$$P_{\text{wind}} = 7.64 \text{ MW}$$

- Ισχύς ανεμογεννήτριας

$$P_{\text{turbine}} = C_p * P_{\text{wind}} = 3.132 \text{ MW}$$

Μια διαμόρφωση ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας με μετατροπή ισχύος πλήρους κλίμακας

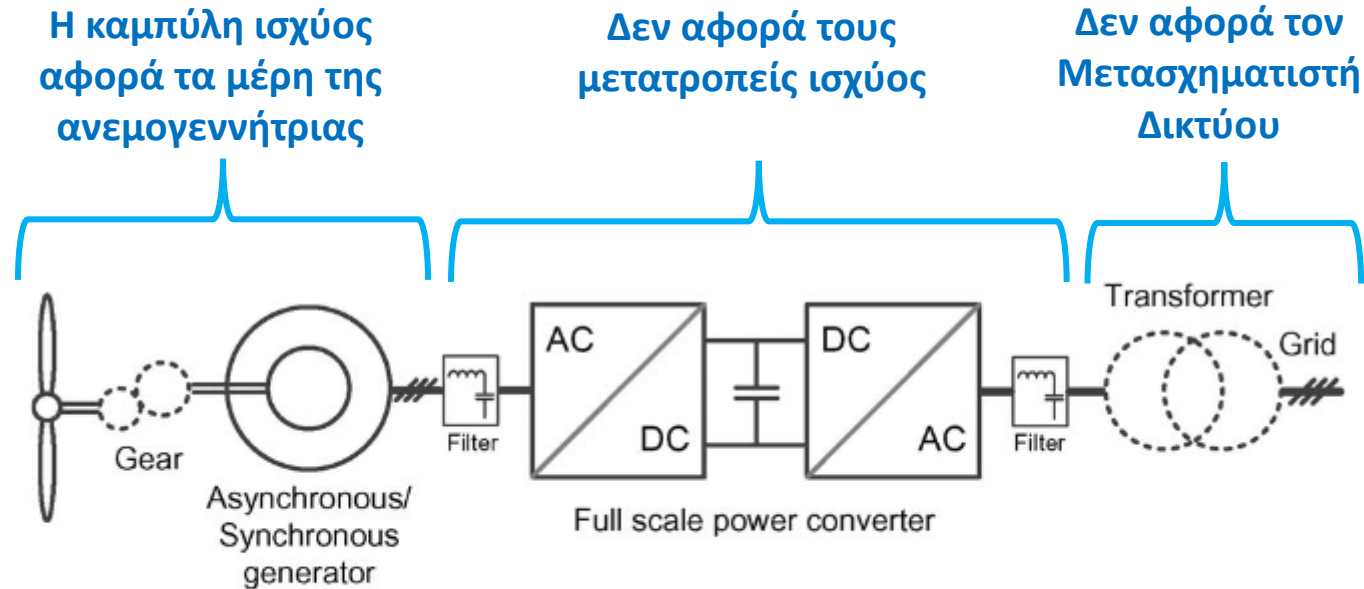
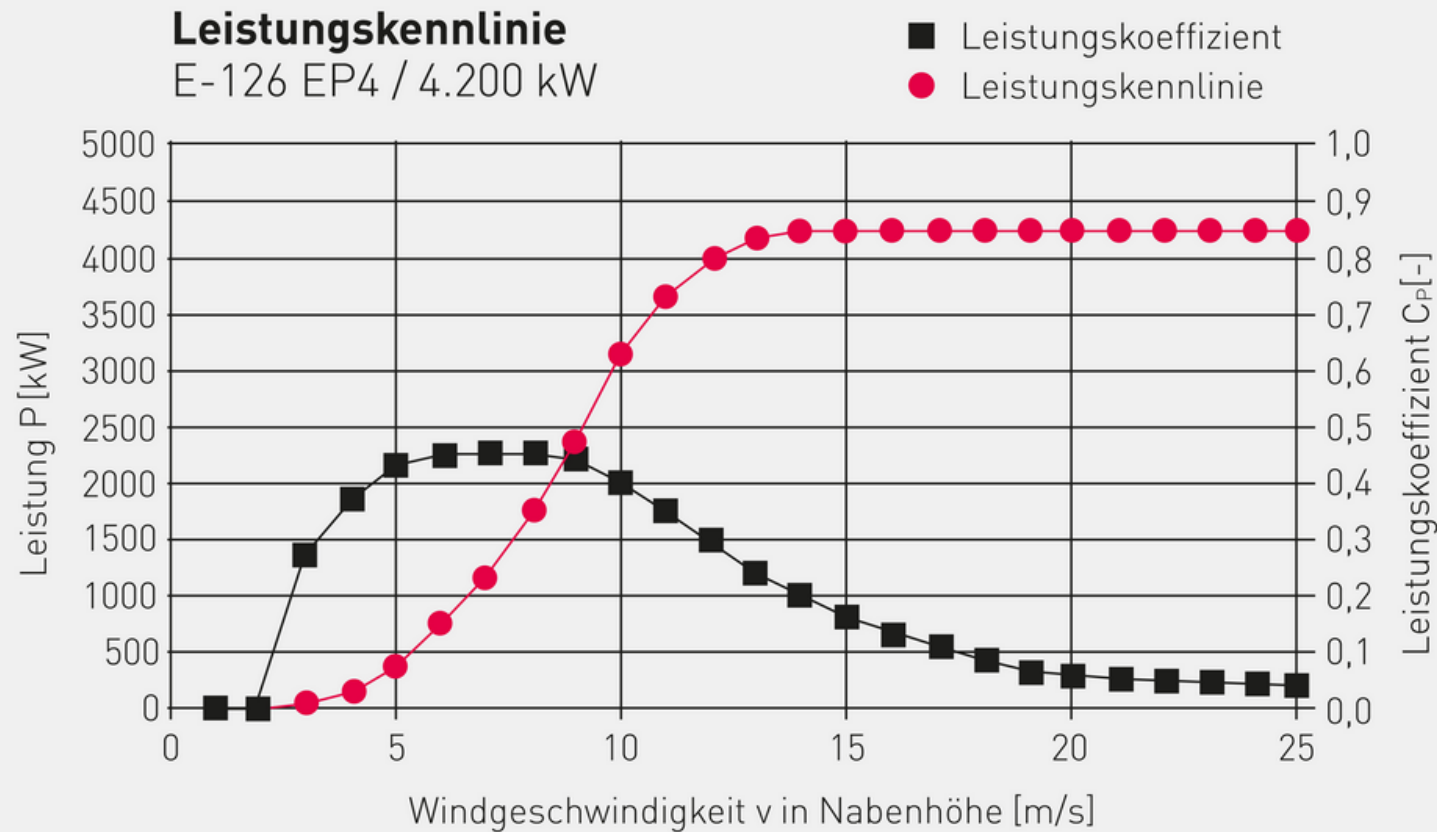


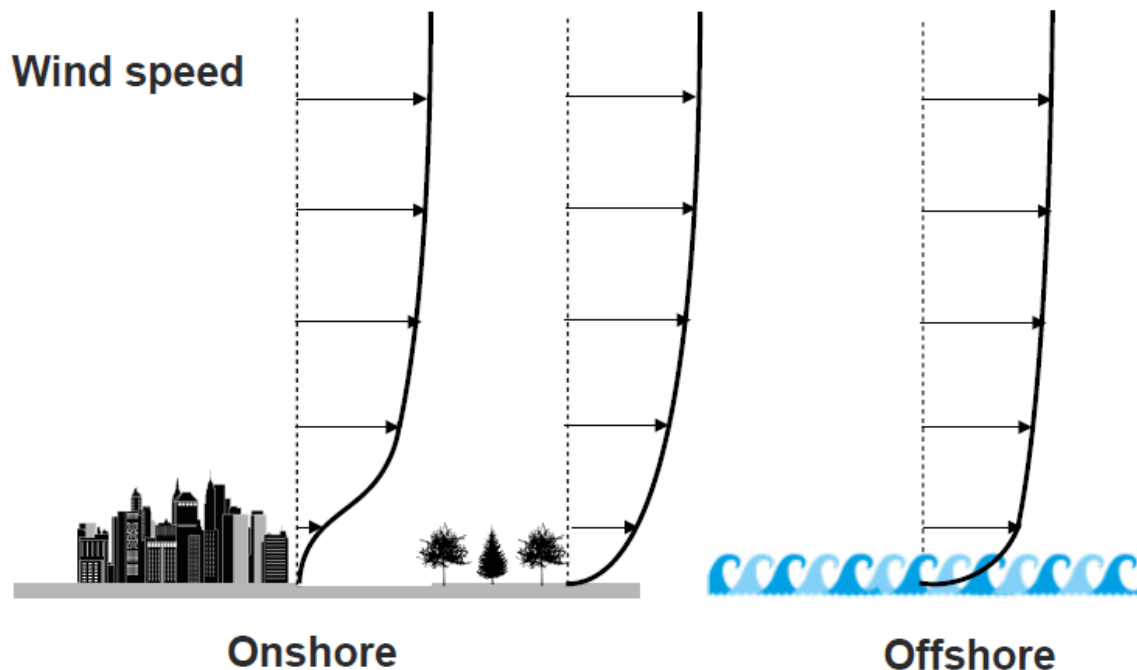
Fig. 6 Variable speed wind turbine with full-scale power converter.



Καμπύλη ισχύος της ΑΓ

- Σε πολύ μικρές ταχύτητες, δεν υπάρχει αρκετός άνεμος για να περιστρέψει τα πτερύγια της ΑΓ.
- Η ταχύτητα ανέμου στην οποία ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται είναι συνήθως περίπου 3 - 4 m/s
- Κάτω από αυτήν την τιμή, δεν παράγεται ενέργεια.
- Αντιθέτως, όταν ο άνεμος είναι πολύ ισχυρός, οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στον δρομέα και στα πτερύγια είναι πολύ μεγάλες και διακόπτεται η παραγωγή ενέργειας, συνήθως μετά τα 25 m/s.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια επιβάλλει επίσης ένα όριο στη ισχύ καθώς πέρα από μια ορισμένη ταχύτητα ανέμου, η ισχύς περιορίζεται σε μια σταθερή τιμή.
- Αυτή η τιμή ονομάζεται «**ονομαστική ισχύς**» και τυπικά συμβαίνει για ταχύτητες ανέμου από 15 έως 25 m/s.

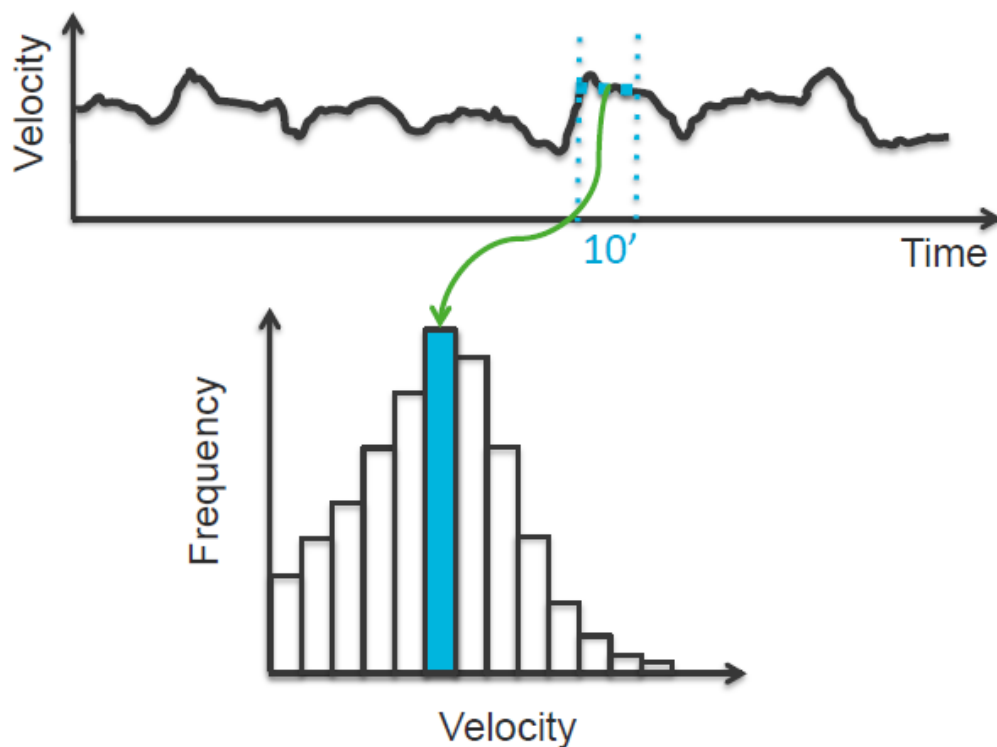
Effect of the terrain on the wind speed



Προφίλ Ταχυτήτων Ανέμου
Συναρτήσεσι του Υψομέτρου

- Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται από το μηδέν κοντά στο έδαφος σε μια ορισμένη τιμή στην ατμόσφαιρα.
- Το ακριβές προφίλ εξαρτάται εντούτοις από την τοπογραφία.
- Πάνω από τη θάλασσα, η ταχύτητα αυξάνεται πολύ πιο απότομα.
- Αυτό σημαίνει ότι η υπεράκτια ταχύτητα του ανέμου είναι πιο ομοιόμορφη όσο ανεβαίνουμε σε υψόμετρο.
- Αντιθέτως, σε αστικό περιβάλλον, ο άνεμος επιβραδύνεται από την παρουσία κτιρίων, δέντρων και λοιπών εμποδίων.
- Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του ανέμου σταθεροποιείται σε πολύ μεγαλύτερο υψόμετρο.
- Γενικά, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες επωφελούνται από πολύ ισχυρότερους και ομοιόμορφους στρωτούς ανέμους.

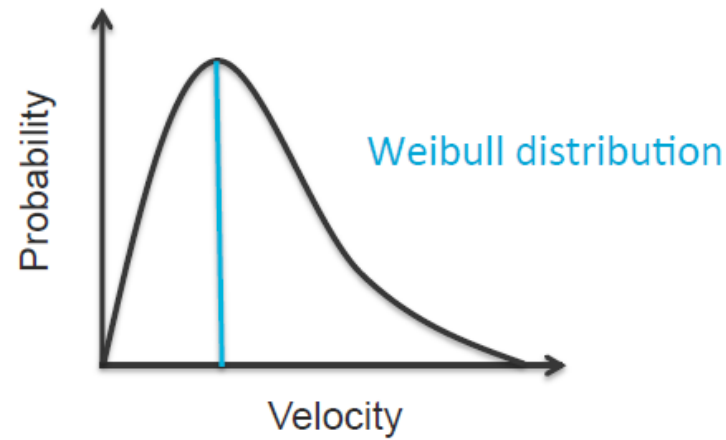
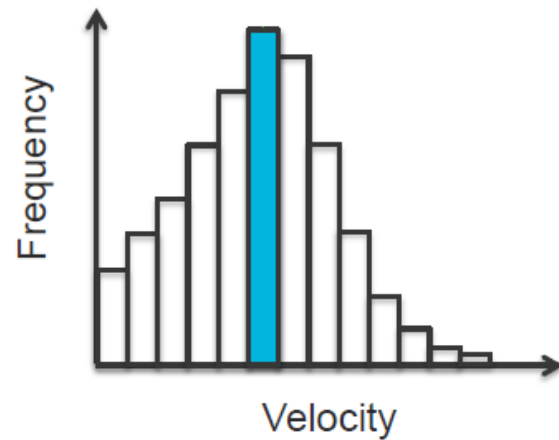
Wind characteristics



Μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου

- Μετρώντας την ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία μπορούμε και παρατηρούμε την εξέλιξη της ταχύτητας σε βάθος χρόνου.
- Στατιστικά, θεωρούμε την ταχύτητα του αέρα σταθερή, για διαστήματα έως 10 λεπτά.
- Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να υπολογίσουμε μια μέση ταχύτητα από την οποία δημιουργούμε ένα ιστόγραμμα.
- Το ιστόγραμμα δείχνει πόσο συχνά ο αέρας φυσάει με μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου.

Wind characteristics



- Το ιστόγραμμα περιγράφεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια από μια συνεχής **συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας** ([Probability Density Function](#)).
- Μας δείχνει την πιθανότητα εμφάνισης μιας συγκεκριμένης ταχύτητας ανέμου.
- Μπορούμε να δείξουμε ότι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ακολουθεί την [κατανομή Weibull](#).

Εκτίμηση πιθανότητας της
ταχύτητας ανέμου

Οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, **στη διάρκεια ενός έτους**, περιγράφονται από την κατανομή πιθανοτήτων (ή συχνοτήτων) Weibull :

$$h_i = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V_i}{c}\right)^k} \quad [\%] \quad (5)$$

όπου:

k ο παράγοντας **σχήματος** της κατανομής Weibull , συνήθως $k=2$

c ο παράγοντας **μεγέθους** (έντασης) της κατανομής Weibull [m/s], συνήθως $c=5$

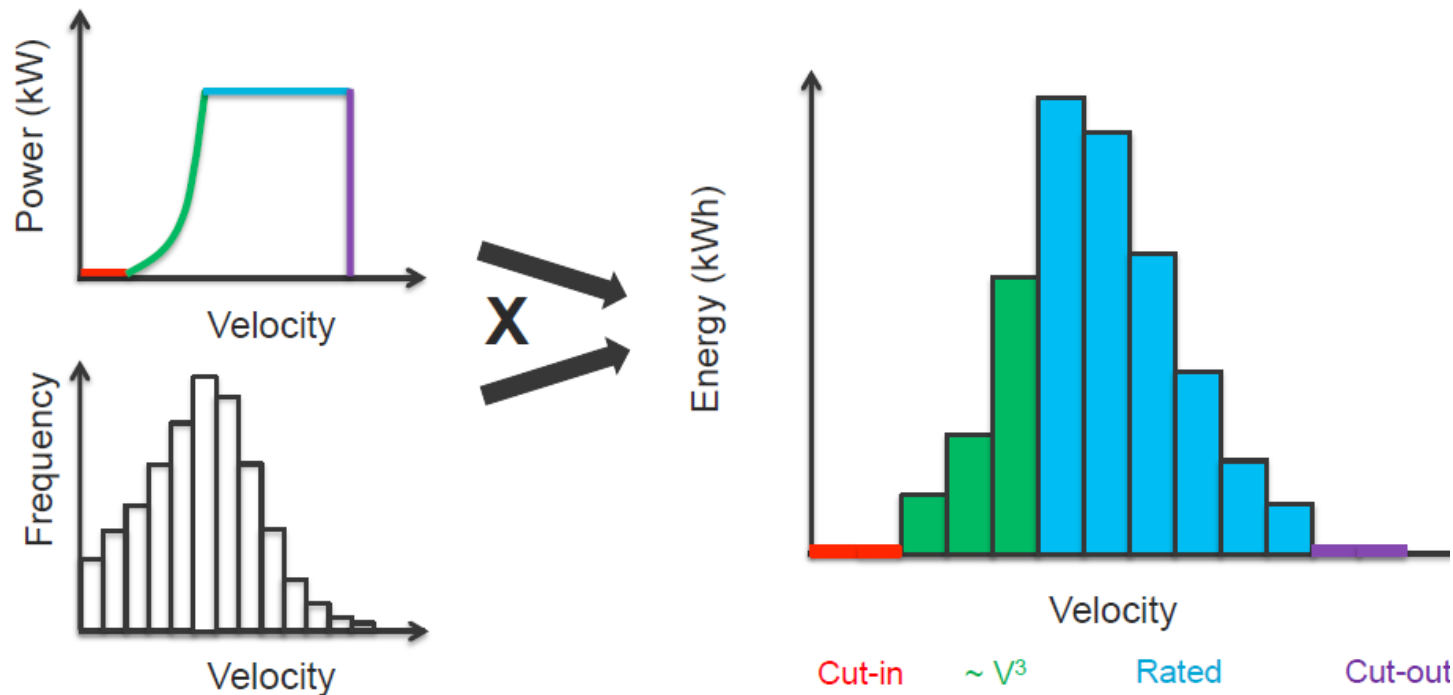
h_i [%] είναι η πιθανότητα, η ταχύτητα του ανέμου να είναι ίση με **V_i [m/s]**

Πρέπει να χρησιμοποιηθεί, η αναγόμενη στο εκάστοτε ύψος ΑΓ, ταχύτητα ανέμου V_h

$$v_h = v \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^a \Leftrightarrow v_h = v \left(\frac{120}{10} \right)^{0,15}$$

Έτσι, αν η πιθανότητα της $V_h = 15 \text{ m/s}$ είναι 0,08 ή 8 % και λαμβάνοντας υπόψη ότι το έτος έχει 8.760 ώρες, ο άνεμος φυσά με ταχύτητα 15 m/s για $0,08 \times 8.760 = 700$ ώρες κάθε έτος.

Energy yield of one wind turbine



- Εφόσον γνωρίζουμε την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, γνωρίζουμε την παραγόμενη ισχύς από την ΑΓ για κάθε ταχύτητα ανέμου.
- Γνωρίζουμε επίσης τα χαρακτηριστικά του ανέμου στη θέση της ΑΓ υπό μορφή ιστογράμματος ταχυτήτων (ή κατανομής συχνοτήτων).
- Το προϊόν αυτών των δύο καμπυλών δίνει, **για κάθε ταχύτητα ανέμου, τη συνολική ισχύ που παράγεται.**
- Μηδέν, για ταχύτητες κάτω από την ταχύτητα cut-in και πάνω από την ταχύτητα cut-out.
- Θετικές τιμές για τις υπόλοιπες ταχύτητες.
- Εάν το ιστόγραμμα περιέχει τα χαρακτηριστικά του ανέμου για ένα ολόκληρο έτος, τότε το ολοκλήρωμα της καμπύλης στην δεξιά πλευρά δίνει τη συνολική ετήσια παραγωγή της ΑΓ.

Εκτίμηση της ενεργειακής
συγκομιδής από ΑΓ

Παράδειγμα εκτίμησης ετήσιας Ενεργειακής Συγκομιδής
με κατανομή Weibull για πολύ μικρή ΑΓ
ονομαστικής ισχύος 1000W με A=2.01m2 σε ύψος 10m

vi, m/s	hi	vhi, m/s	Pi, W/m2	Cp, %	P*oi, W/m2	Poi, W	ti, h	Eoi, kWh	Eel, kWh
0	0.0000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0	0.0
1	0.0250	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	219	0.0	0.0
2	0.0481	2.0	4.9	0.0	0.0	0.0	422	0.0	0.0
3	0.0678	3.0	16.5	0.0	0.0	0.0	594	0.0	0.0
4	0.0827	4.0	39.2	45.0	17.6	35.5	724	25.7	23.1
5	0.0922	5.0	76.6	45.0	34.5	69.3	808	56.0	50.4
6	0.0963	6.0	132.3	45.0	59.5	119.7	844	100.9	90.9
7	0.0953	7.0	210.1	45.0	94.5	190.0	835	158.6	142.8
8	0.0901	8.0	313.6	45.0	141.1	283.7	789	223.8	201.5
9	0.0817	9.0	446.5	45.0	200.9	403.9	716	289.1	260.2
10	0.0714	10.0	612.5	45.0	275.6	554.0	625	346.5	311.8
11	0.0602	11.0	815.2	33.8	275.6	554.0	527	292.2	263.0
12	0.0491	12.0	1058.4	26.0	275.6	554.0	430	238.3	214.4
13	0.0388	13.0	1345.7	20.5	275.6	554.0	340	188.1	169.3
14	0.0297	14.0	1680.7	16.4	275.6	554.0	260	143.9	129.5
15	0.0220	15.0	2067.2	13.3	275.6	554.0	193	106.8	96.2
16	0.0159	16.0	2508.8	0.0	0.0	0.0	139	0.0	34 0.0

Εκτίμηση ενεργειακής «συγκομιδής» από ΑΓ

- Και χωρίς αυτές τις πληροφορίες, είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ενεργειακή απόδοση χρησιμοποιώντας τον **συντελεστή δυναμικότητας Cf**.
- Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι ένας δείκτης του χρόνου κατά τον οποίο μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί με πλήρη ισχύ.
- Εφόσον γνωρίζουμε την ονομαστική ισχύ της ΑΓ, μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε αυτήν την τιμή με τον συντελεστή δυναμικότητας και με τον αριθμό των ωρών σε ένα χρόνο, για να πάρουμε μια πρόχειρη εκτίμηση της ενεργειακής συγκομιδής σε Wh ανά έτος.
- Οι τυπικές τιμές των συντελεστών δυναμικότητας κυμαίνονται από 0,25 έως 0,45 οπότε:

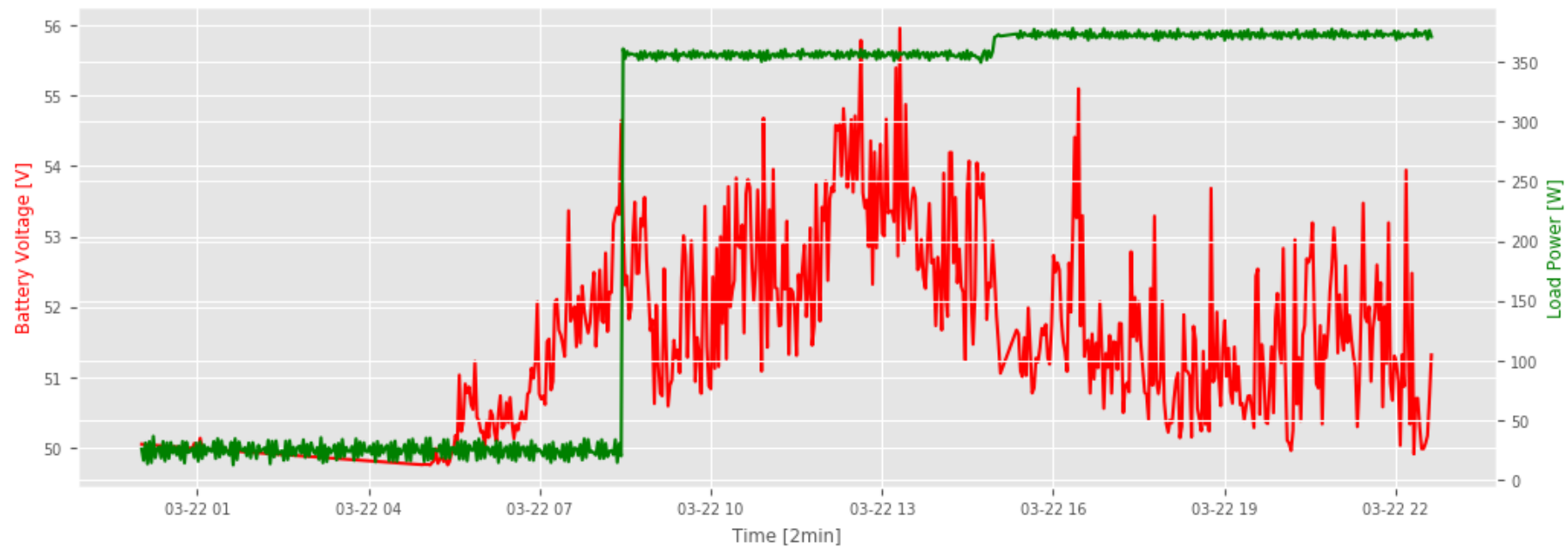
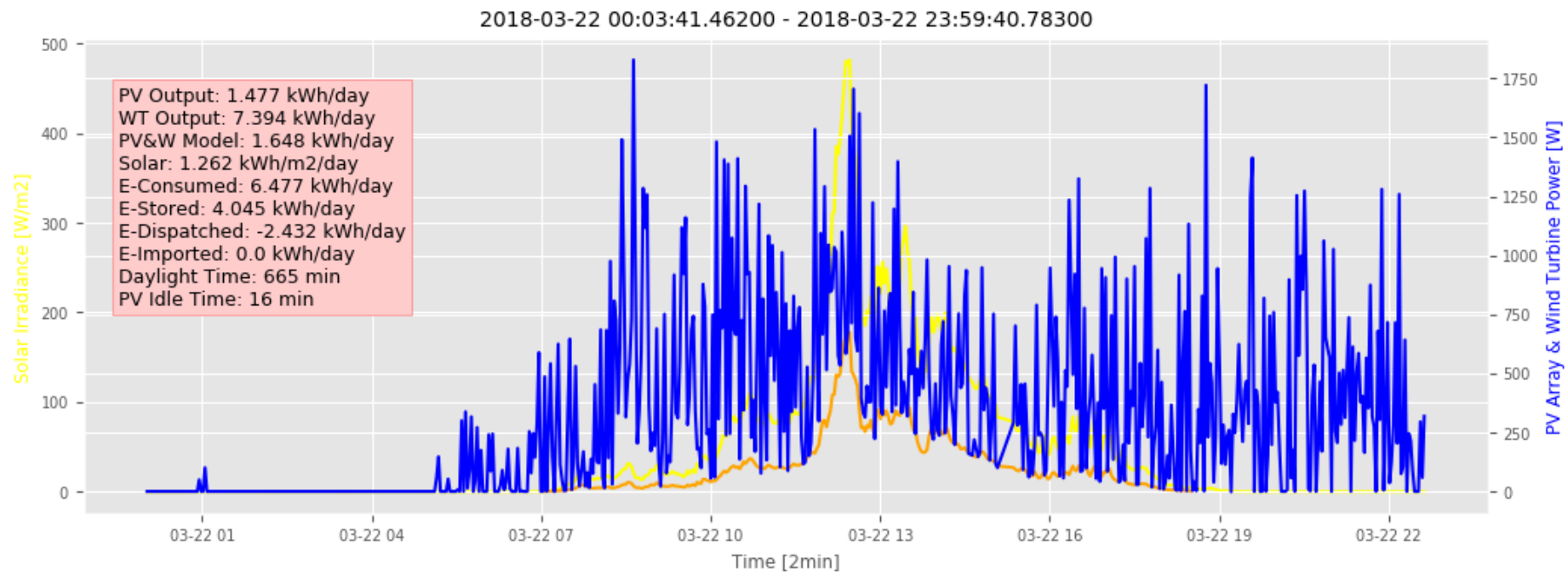
$$\text{Energ_Yield} = 8760 * \text{Installed_Power} * \text{Cf} \quad (6)$$

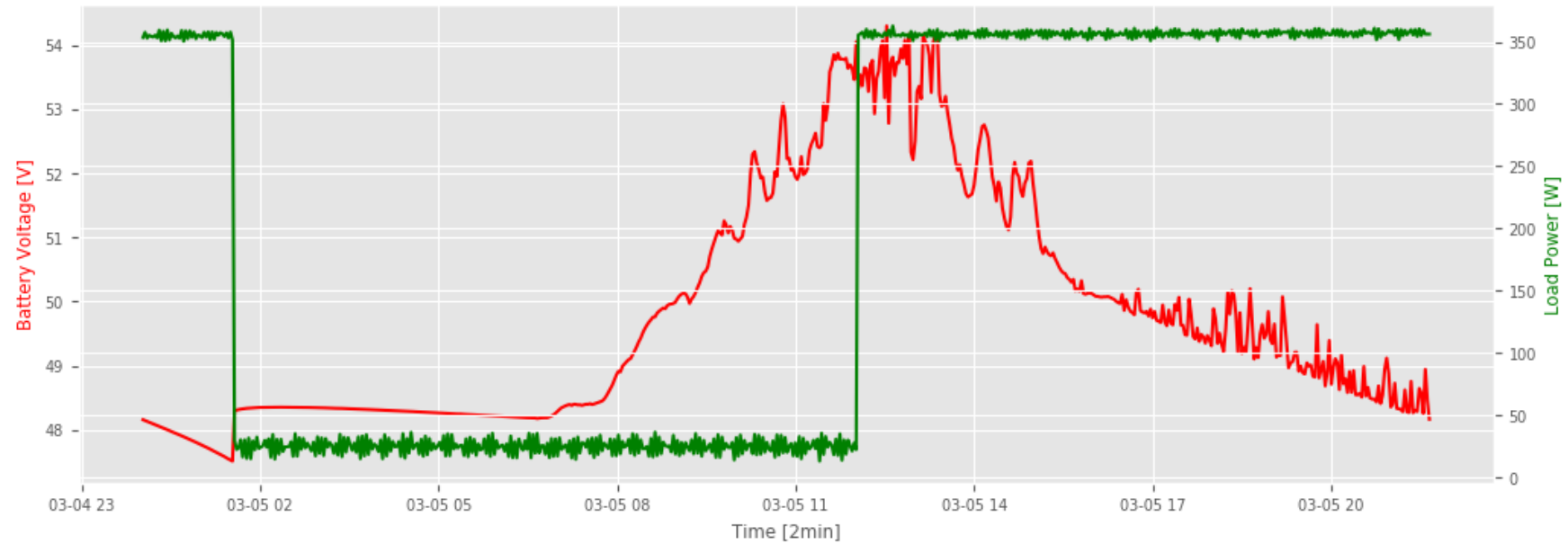
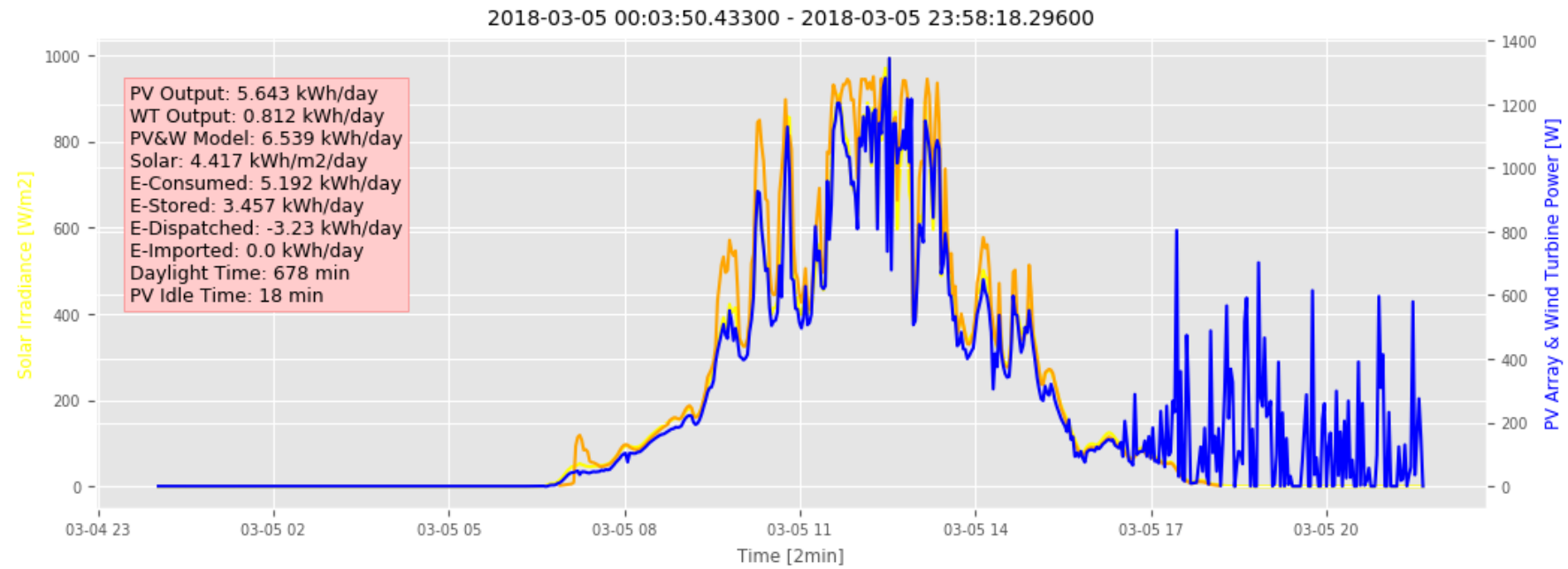
Παράδειγμα Cf σε εγκατάσταση πολύ μικρής ΑΓ στο Εργαστήριο ΜΣΠΕ

- Η ονομαστική ισχύς της ΑΓ που βρίσκεται εγκατεστημένη στο Εργαστήριο ΜΣΠΕ είναι 1000W.
- Η ΑΓ απέδωσε, τον τελευταίο χρόνο, 50.91 kWh ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ο συντελεστής δυναμικότητας είναι:

$$Cf = 50910 / (1000 * 8760) = 0.006$$

- Όπου 365 ημέρες * 24 ώρες ανά ημέρα = 8760 ώρες ανά έτος
- Συνεπώς, κατά την διάρκεια μόνο **52 ωρών σε ένα έτος** η ΑΓ μας παράγει ηλεκτρική ενέργεια με τη μέγιστη δυναμικότητα.





Άσκηση 1

- Μια ΑΓ ονομαστικής ισχύος 8MW παράγει αυτήν την ισχύ όταν η ταχύτητα ανέμου προσεγγίζει τα 16 m/s. Ποια θα είναι (θεωρητικά), η ισχύς της ΑΓ όταν ταχύτητα ανέμου θα είναι 8 m/s;

Άσκηση 2

- Πόση ενέργεια είναι δυνατόν να εξαχθεί «περίπου» από μια ΑΓ ονομαστικής ισχύος 10kW, όταν αυτή τοποθετηθεί σε περιοχή με συντελεστή δυναμικότητας 35% και μέση ταχύτητα ανέμου 6m/s, σε ένα έτος ;