

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ – ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΚΑΙ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ – ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

4ο Μάθημα

Διδάσκων: Αναπλ. Καθηγητής Ε. Αμανατίδης

13/11/2019

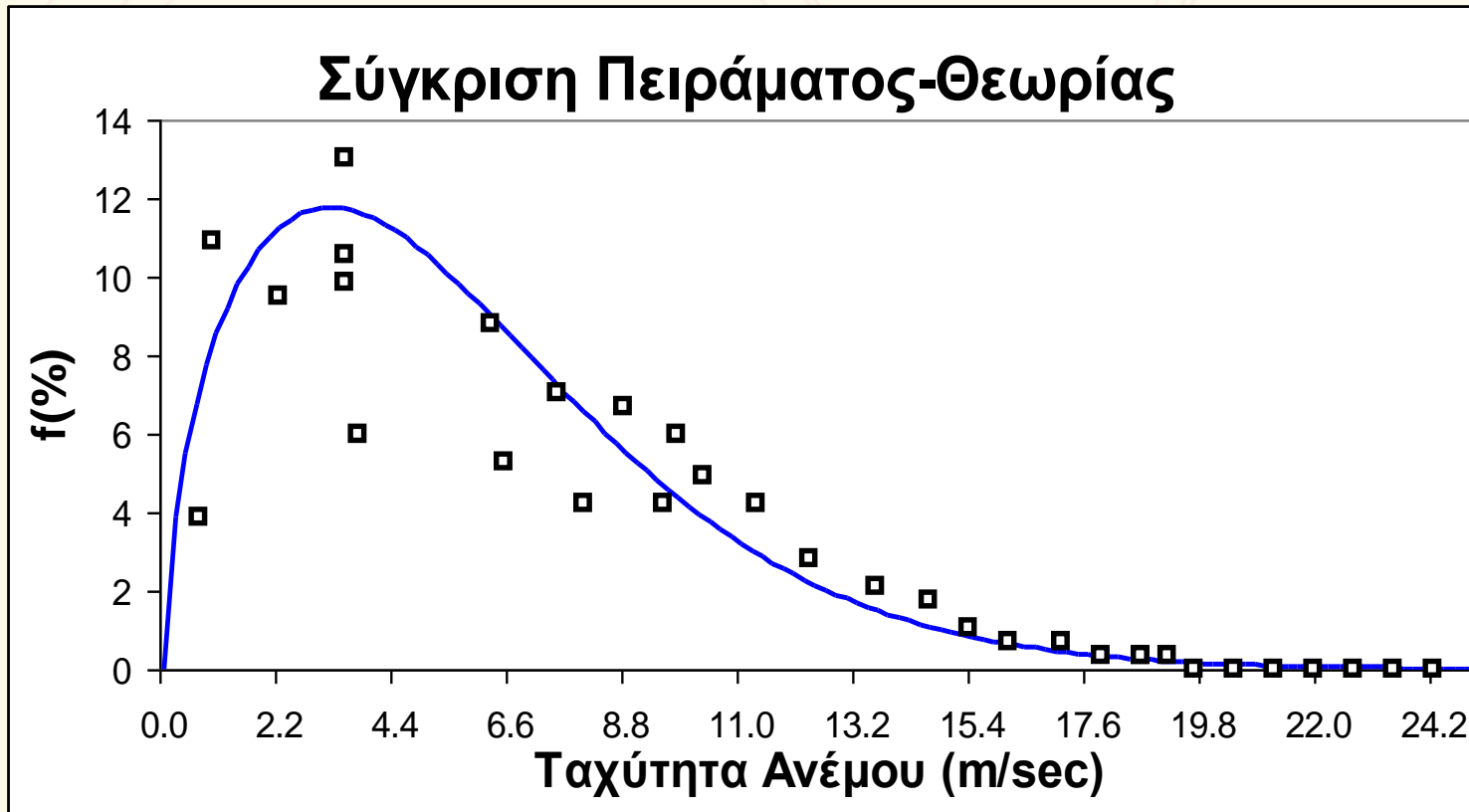
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

- Εκμετάλλευση Αιολικής Ενέργειας - Ανεμογεννήτριες
 - Λειτουργία και είδη ανεμογεννητριών
 - Συντελεστής Ισχύος – Θεωρία Δίσκου Ενέργειας
 - Μέγιστο Όριο Απόδοσης Betz
 - Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Α/Γ
 - Χαρακτηριστικές ταχύτητες
 - Πρακτικά στοιχεία επιλογής Α/Γ



Εκμετάλλευση Αιολικής Ενέργειας

Κατανομή Weibull – Παράδειγμα



- Τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ικανοποιητικά αν και εμφανίζονται αρκετές αποκλίσεις σε μικρές και μεσαίες ταχύτητες

Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

- Η ισχύς το ανέμου σε μέσα γεωγραφικά πλάτη δεν επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα
- Η ισχύς είναι ανάλογη της επιφάνειας σάρωσης
- Η ισχύς είναι συνάρτηση του κύβου της ταχύτητας

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

Θεωρώντας ότι ο αέρας διαπερνά κάθετα την επιφάνεια A με στιγμιαία ταχύτητα V ($V=S/t$)

$$m = \rho \cdot U = \rho \cdot A \cdot S = \rho \cdot A \cdot V \cdot t$$

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Διαθέσιμη Αιολική Ενέργεια

- Η μέση ταχύτητα του ανέμου σε διαστήματα T :

$$V = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt$$

- Η στιγμιαία ταχύτητα σε σχέση με την διακύμανση γύρω από την μέση τιμή:

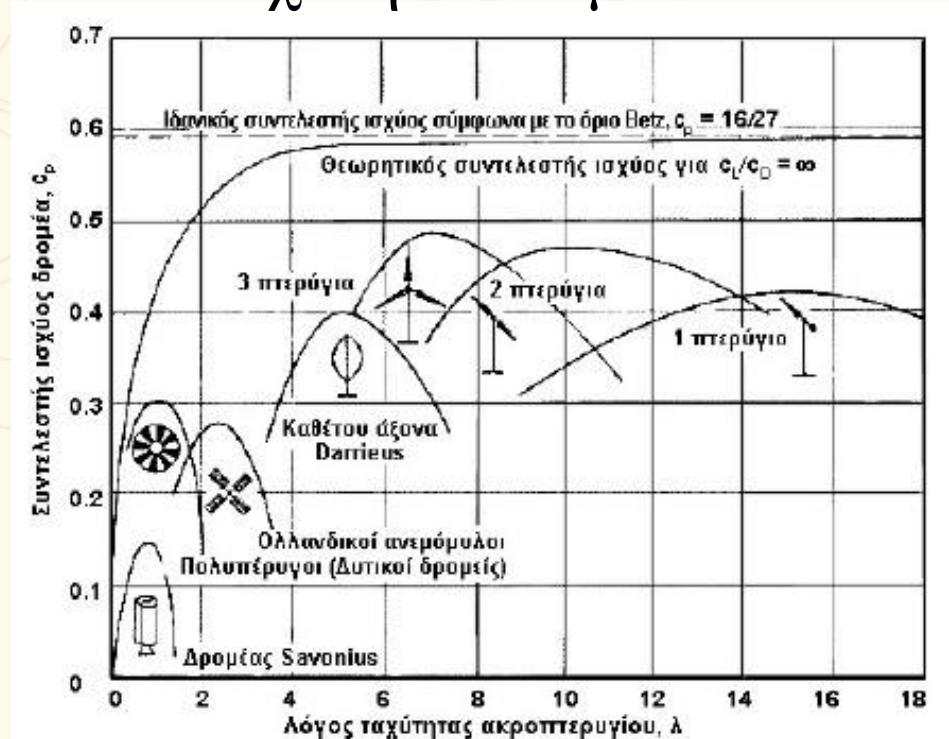
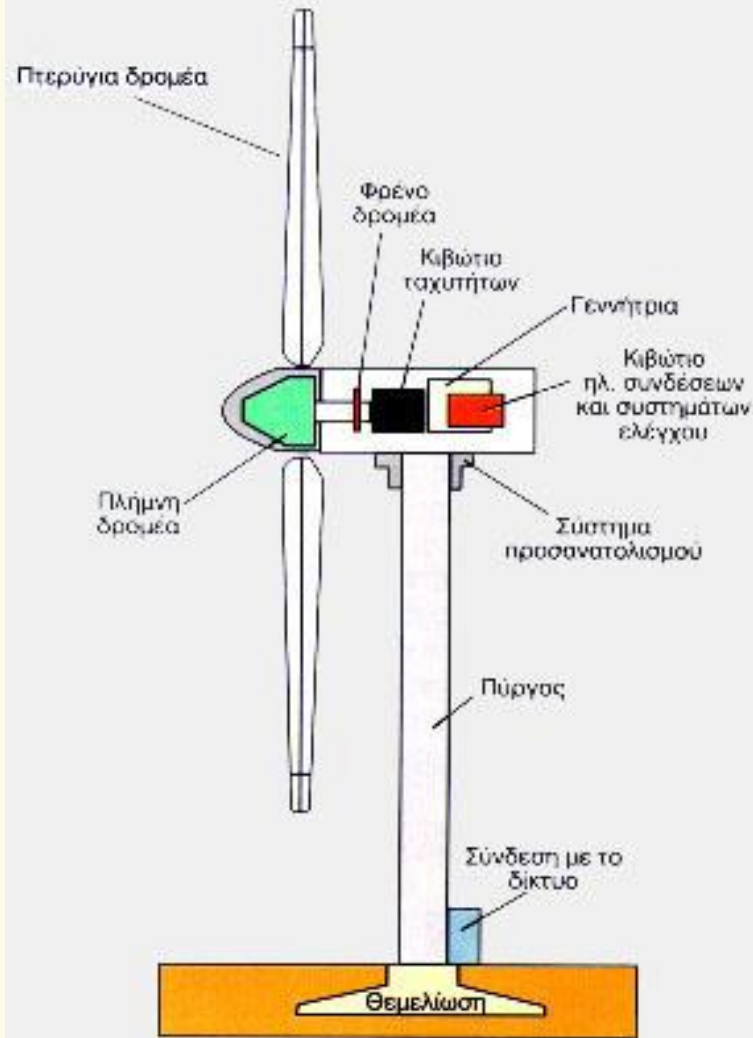
$$V(t) = \bar{V} + V'(t) = \bar{V} + \sigma_v$$

- Η μέση αιολική ισχύς σε χρόνο T είναι:

$$P_T = 0.5 \cdot A \cdot \rho \cdot V^3 \Rightarrow P_T = \frac{0.5 \cdot A \cdot \rho}{T} \cdot \int_0^T [V(t)]^3 dt$$

Λειτουργία και είδη ανεμογεννητριών

$$\lambda = \frac{\text{ταχύτητα ακρου}}{\text{ταχύτητα ανέμου}} = \frac{R\omega}{u}$$

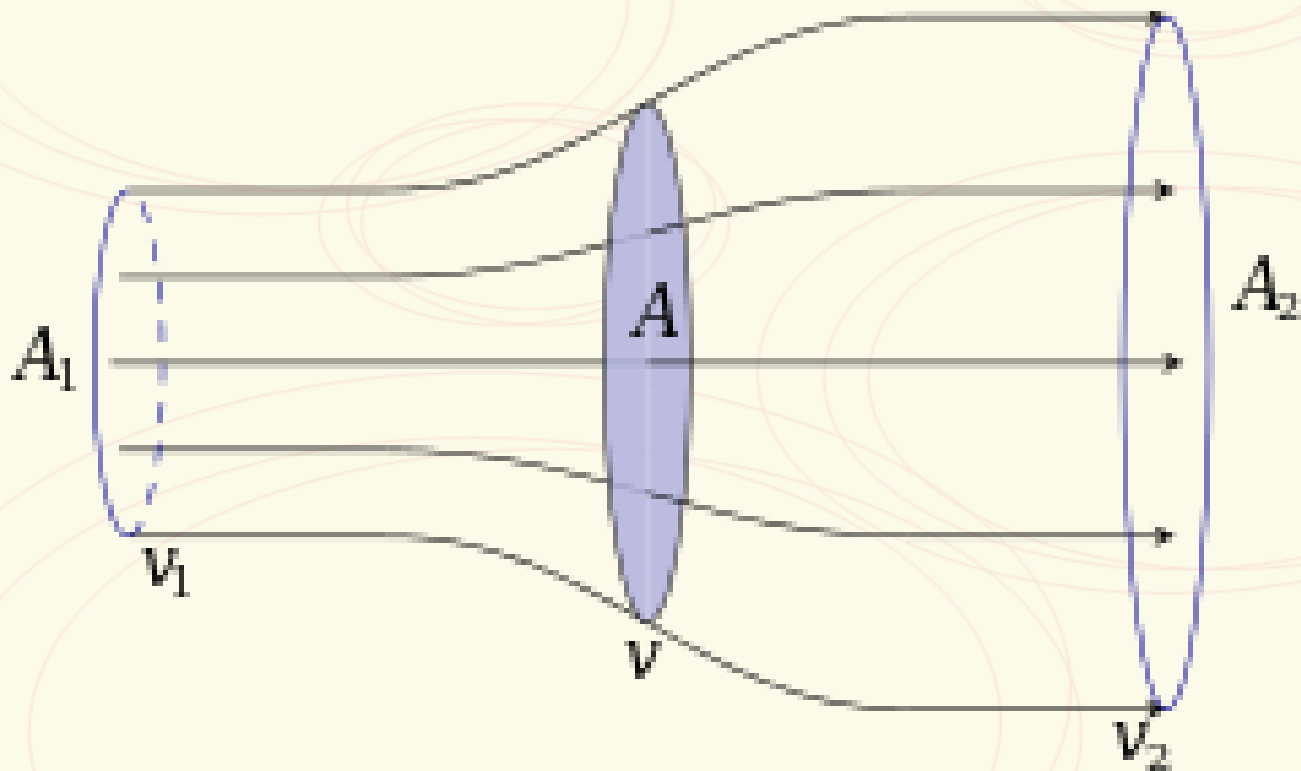


Μερικά από τα είδη ανεμογεννητριών που έχουν προταθεί

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Το μέγιστο ποσό της κινητικής ενέργειας που μπορεί να δεσμεύσει μια ιδανική αιολική μηχανή υπολογίστηκε από τον Betz
 - Ο Betz υπέθεσε ότι έχουμε μια ιδανική πτερωτή η οποία δεν φέρει το μηχανικό εξοπλισμό της πάνω στο άξονα περιστροφής και ο αριθμός των πτερυγίων μπορεί να είναι απεριόριστος, χωρίς να παρατηρείται αντίσταση από την διέλευση του αέρα από αυτά
 - Αυτές οι προϋποθέσεις επιτρέπουν να θεωρηθεί ότι:
 - Υπάρχουν ομοιόμορφες συνθήκες σε όλη την περιοχή σάρωσης της πτερωτής
 - Η ταχύτητα του αέρα, τόσο διαμέσου της πτερωτής όσο και μακριά από αυτή είναι αξονική
-

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας



Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

- Αρχή διατήρησης της μάζας

$$\dot{m} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = \rho \cdot A \cdot v = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (1)$$

όπου: ρ η πυκνότητα του ρευστού, A , A_1 και A_2 η διατομή του ροϊκού σωλήνα στον δίσκο ακτίνας, στο $-\infty$ και $+\infty$ και v , v_1 και v_2 η ταχύτητα πάνω στον δρομέα, στο $-\infty$ και $+\infty$

- Αρχή διατήρησης ορμής (F : ωστική δύναμη)

$$F_1 = F + F_2 \Rightarrow F = F_1 - F_2 = \dot{m} \cdot v_1 - \dot{m} \cdot$$

$$v_2 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} F = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (2)$$

όπου: v_1 η ταχύτητα πολύ πριν φτάσει ο αέρας στον δίσκο και v_2 η ταχύτητα πολύ μετά τον δίσκο

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

■ Αρχή διατήρησης της ενέργειας

$$P = \frac{dE}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v \Rightarrow P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2) \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v_2^2 \stackrel{(1)}{\Rightarrow} P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1^2 - v_2^2) \quad (4)$$

$$\stackrel{(3),(4)}{\Longrightarrow} v = \frac{1}{2} (v_1 + v_2) \quad (5)$$

- Συντελεστής αξονικής απαγωγής:

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} \stackrel{(5)}{\Rightarrow} v = v_1(1 - a) \text{ και } v_2 = v_1(1 - 2a) \quad (6)$$

- Ισχύς που δεσμεύεται από τον δίσκο:

$$\stackrel{(3),(6)}{\Longrightarrow} P_d = \rho \cdot A \cdot 2a(1 - a^2) \cdot v_1^3$$

Θεωρία Δίσκου Ενέργειας

■ Όριο του Betz

Συντελεστής Ισχύος: $C_p = 2\alpha(1 - \alpha^2)$

Μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος:

ονομάζεται όριο Betz και υπολογίζεται

όταν $dC_p/d\alpha=0$ (εμφανίζεται ακρότατο) $\rightarrow \alpha=1/3$

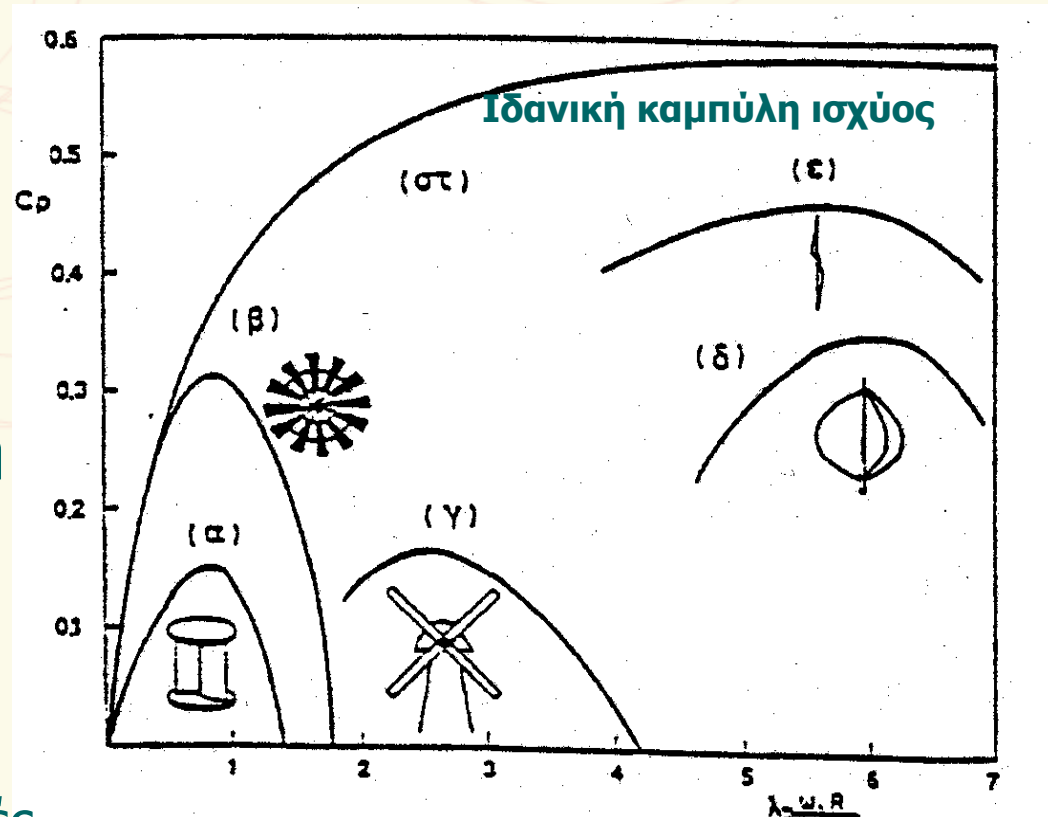
$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\%$$

$$P_{\max} = C_{P_{\max}} \cdot \bar{P} \quad (\text{όπου } \bar{P} \text{ η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς του ανέμου)}$$

Για $dC_p/d\alpha=0$ ($\alpha=1/3$) $\rightarrow v=2/3*v_1$ και $v_2=1/3*v_1$

Δυναμική συμπεριφορά αιολικής μηχανής

- Η ιδανική καμπύλη ισχύος τείνει ασυμπτωτικά στο όριο Betz
- Μεγάλες διαφορές στις διάφορες μηχανές:
 - (β) πολύπτερη αιολική μηχανή → μεγάλη διακύμανση του συντελεστή ισχύος και το C_p λαμβάνει μικρές τιμές
 - (ε) γρήγορη αιολική μηχανή με 2 πτερύγια → μικρή διακύμανση και μεγάλες τιμές



Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ

- Η μέγιστη αιολική ενέργεια που δεσμεύει μια ιδανική αιολική μηχανή είναι ένα τμήμα της κινητικής ενέργειας του ανέμου και ισούται με:

$$E_{\max} = C_p * E_{\text{wind}}, \text{ όπου } C_p = 0.59 \text{ το όριο του Betz}$$

- Η ηλεκτρική ισχύς που παίρνουμε από την αιολική μηχανή είναι:

$$P_{\text{electric}} = C_p n_{\text{gearbox}} n_{\text{generator}} n_{\text{accumulator}} P_{\text{wind}}$$

όπου: n_{gearbox} η απόδοση του πολλαπλασιαστή στροφών

$n_{\text{generator}}$ Η απόδοση της γεννήτριας

$n_{\text{accumulator}}$ η απόδοση των συσσωρευτών

- Η ετήσια αιολική ενέργεια είναι:

$$E_{\text{electric}} = P_{\text{electric}} T$$

όπου T ένα έτος

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ

Παράδειγμα

Ανεμογεννήτρια με διαμέτρου πτερωτής 60m τοποθετείται σε περιοχή με μέση ταχύτητα ανέμου 12 m/sec και μέση πυκνότητα αέρα 1.2 kg/m³. Υπολογίστε την συνολική απόδοση της εγκατάστασης καθώς και την ετήσια παραγωγή ενέργειας από την ανεμογεννήτρια αν γνωρίζεται ότι:

Ο συντελεστής ισχύος της Α/Γ είναι 0.44, το σύστημα πέδησης του δρομέα και ο πολλαπλασιαστής στροφών έχουν αποδόσεις 99.6% και 97.2% αντίστοιχα.

Επιπλέον, ο συντελεστής απόδοσης της γεννήτριας είναι 96.5% και η έξοδος της γεννήτριας περνά από διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα (μετατροπείς συχνότητας, φίλτρα αρμονικών, ..) με συνολική απόδοση 95.8%

Τέλος πριν παραδοθεί η ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο περνά από μετασχηματιστή για διόρθωση τάσης, με απόδοση 98%

Συνήθως οι απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου είναι της τάξης του 8%

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ

Λύση

$$\rightarrow P_{\text{wind}} = 0.5 * \rho * A * u^3 = \dots = 2931 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{\text{rotor}} = 2931 * 0.44 = 1290 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{\text{gear}} = 1290 * 0.996 * 0.972 = 1249 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{\text{generator} \rightarrow} = 1249 * 0.958 = 1197 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{\rightarrow \text{grid}} = 1197 * 0.98 = 1173 \text{ kW}$$

$$\rightarrow P_{\text{final}} = 1173 * 0.92 = 1079 \text{ kW}$$

Τελική απόδοση εγκατάστασης $n = 1079 \text{ kW} / 2931 \text{ kW} = 0.37$

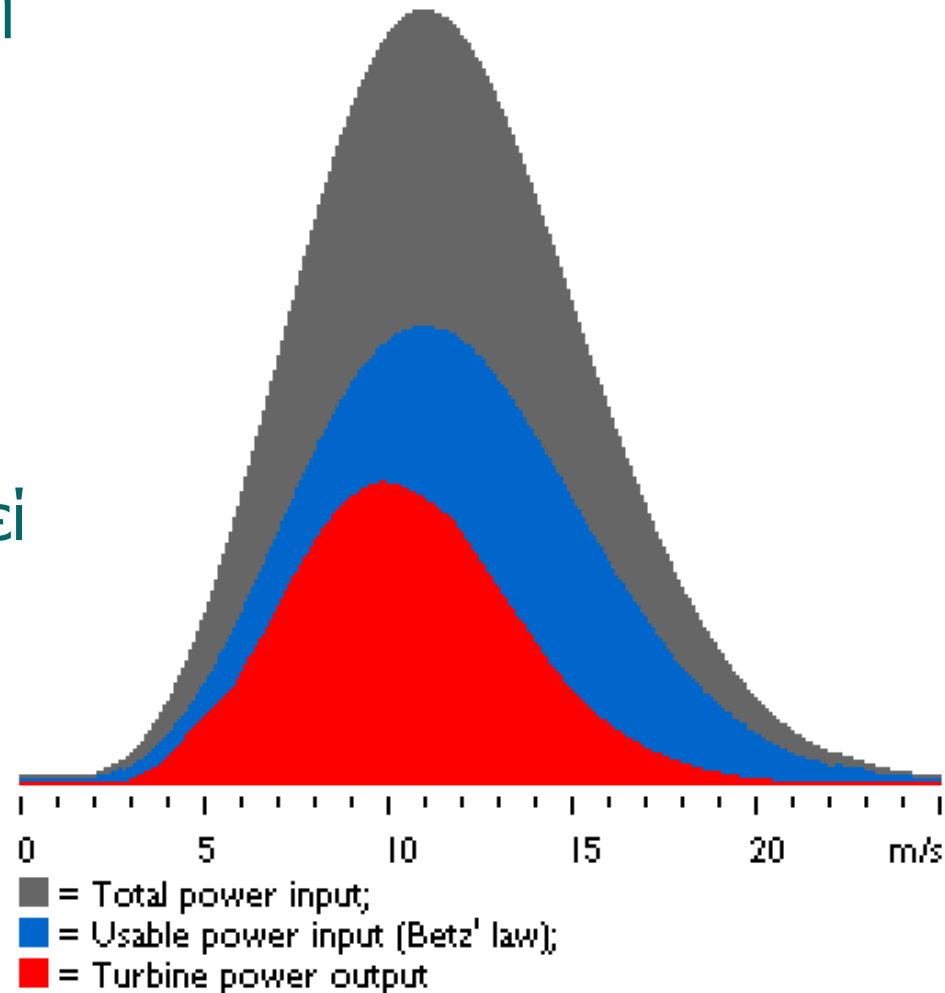
Τυπικές αποδόσεις 30 – 40 %, καλές για γρήγορες εκτιμήσεις παραγωγής ενέργειας από αιολικές μηχανές

Ετήσια ενέργεια: $E = P_{\text{final}} * 365 * 24 \text{ h} = 9,45 \times 10^6 \text{ KWh/year}$

Ενέργεια από τον άνεμο

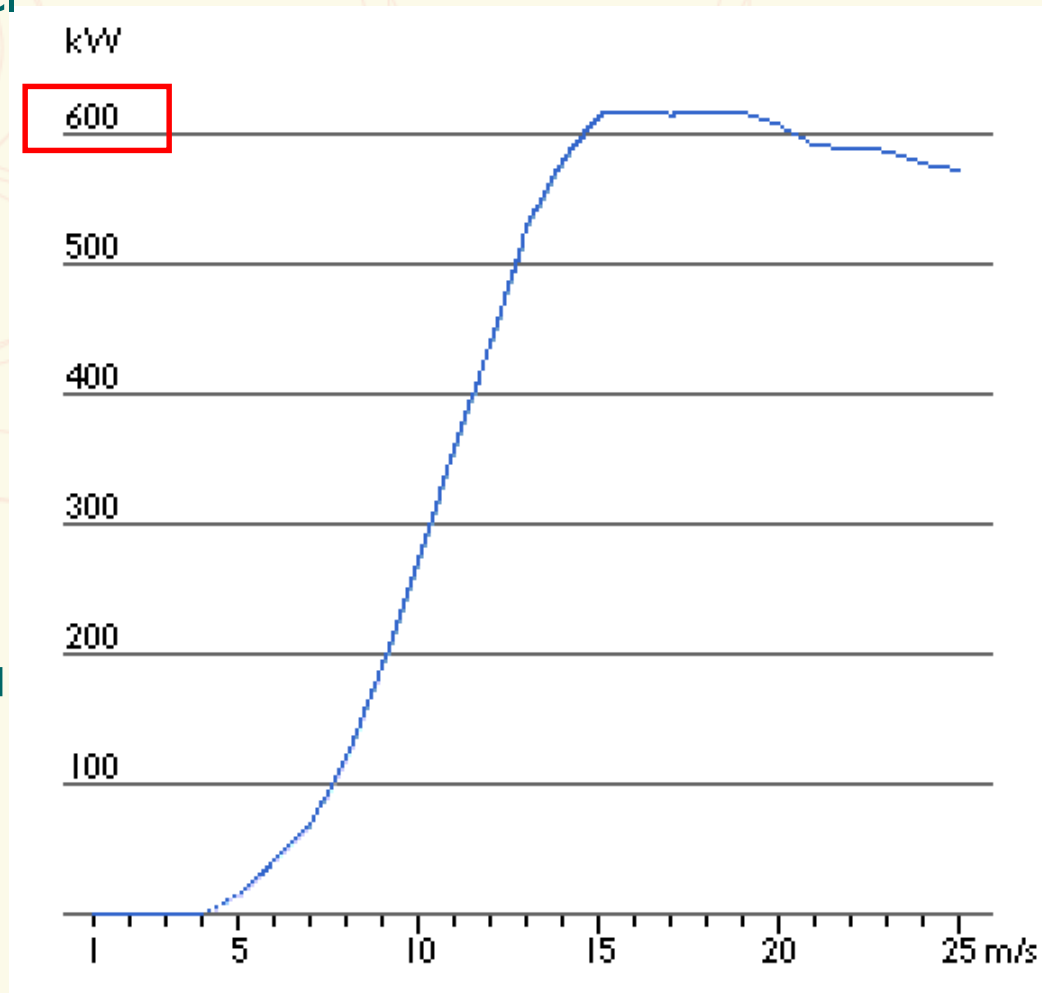
- Με βάση την κατανομή Weibull υπολογίζεται η συνολική διαθέσιμη αιολική ισχύ σε W/sqm (γκρι περιοχή)
- Με βάση το όριο του Betz ($=0.59$) υπολογίζεται η μέγιστη ισχύς του ανέμου που θεωρητικά μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική (μπλε περιοχή)
- Με βάση την συνολική απόδοση της εκάστοτε Α/Γ υπολογίζεται η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται

Power of the Wind



Ενέργεια από τον άνεμο

- Η καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ δείχνει πως μεταβάλλεται παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ της μηχανής για διάφορες τιμές της ταχύτητας του ανέμου.
- Συχνά η καμπύλη δημιουργείται από επί τόπου μετρήσεις και χρήση ανεμόμετρων
- Λόγω της διακύμανσης του ανέμου συχνά υπάρχει αβεβαιότητα στις μετρήσεις (π.χ. $\pm 3\%$ σφάλμα στην ταχύτητα του ανέμου $\rightarrow \pm 9\%$ στην αιολική ενέργεια)



Ενέργεια από τον άνεμο

■ Συντελεστής χωρητικότητας (Capacity factor)

Ένας άλλος τρόπος για να τη ετήσια παραγωγή ενέργειας από μία Α/Γ είναι ο υπολογισμός του συντελεστή χωρητικότητας για την μηχανή εγκατεστημένη σε συγκεκριμένη τοποθεσία.

Ορίζεται ως το κλάσμα της ετήσιας παραγωγής ενέργειας προς την ετήσια μέγιστη θεωρητική παραγωγή ενέργειας.

Παράδειγμα: Αν μία Α/Γ 600kW παράγει 1.800.000 kWh/year ο συντελεστής χωρητικότητας είναι:

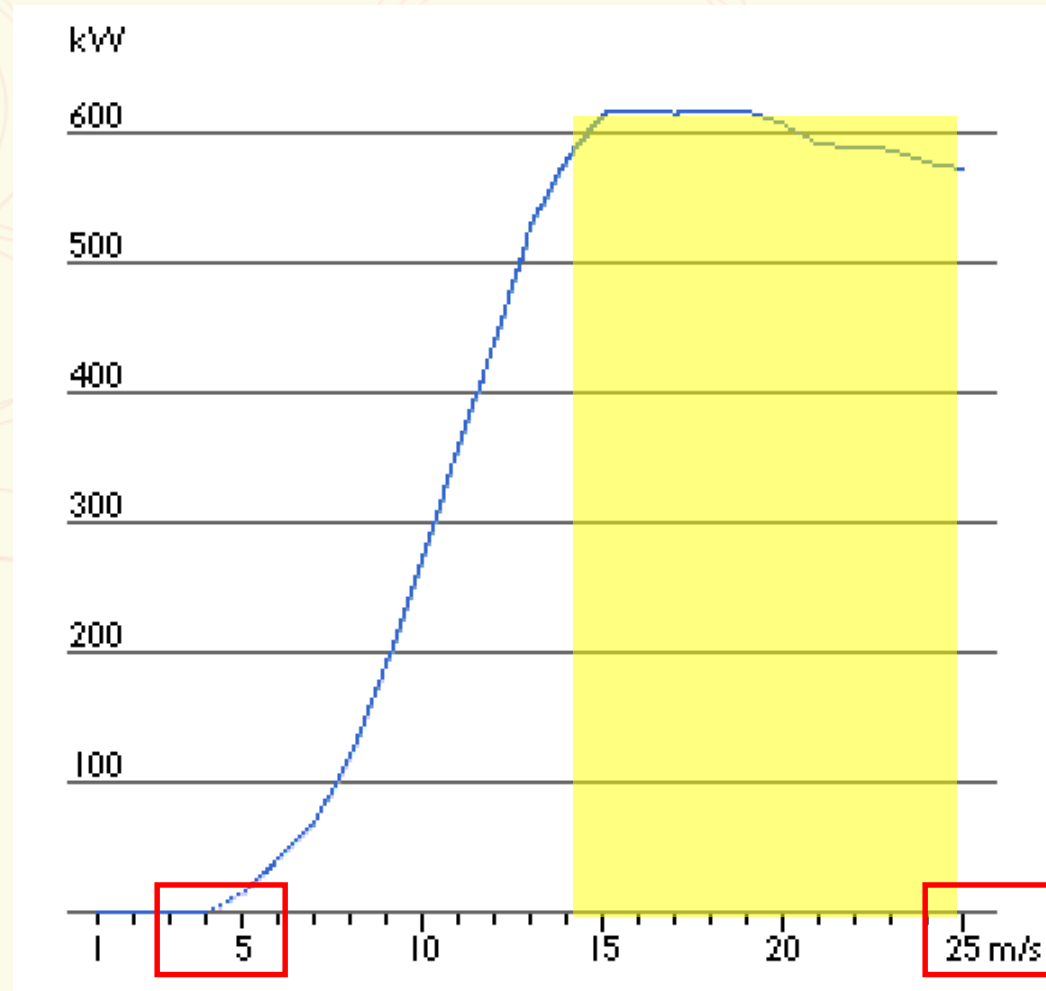
$$\rightarrow 1800000 / (365.25 * 24 * 600) = 1800000 / 5259600 = 0.285 = 34.2\%$$

Ο συντελεστής χωρητικότητας κυμαίνεται από 0-100%, αλλά συνήθως έχει τιμές μεταξύ 20% και 70%, με συχνότερη τιμή 30-40%

Χαρακτηριστικές ταχύτητες

Υπάρχουν τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες που διαμορφώνουν την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ

- Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{in})
- Η ονομαστική ταχύτητα (V_R)
- Η ταχύτητα εξόδου (V_{out})





Αιολικά Πάρκα

Περιεχόμενα

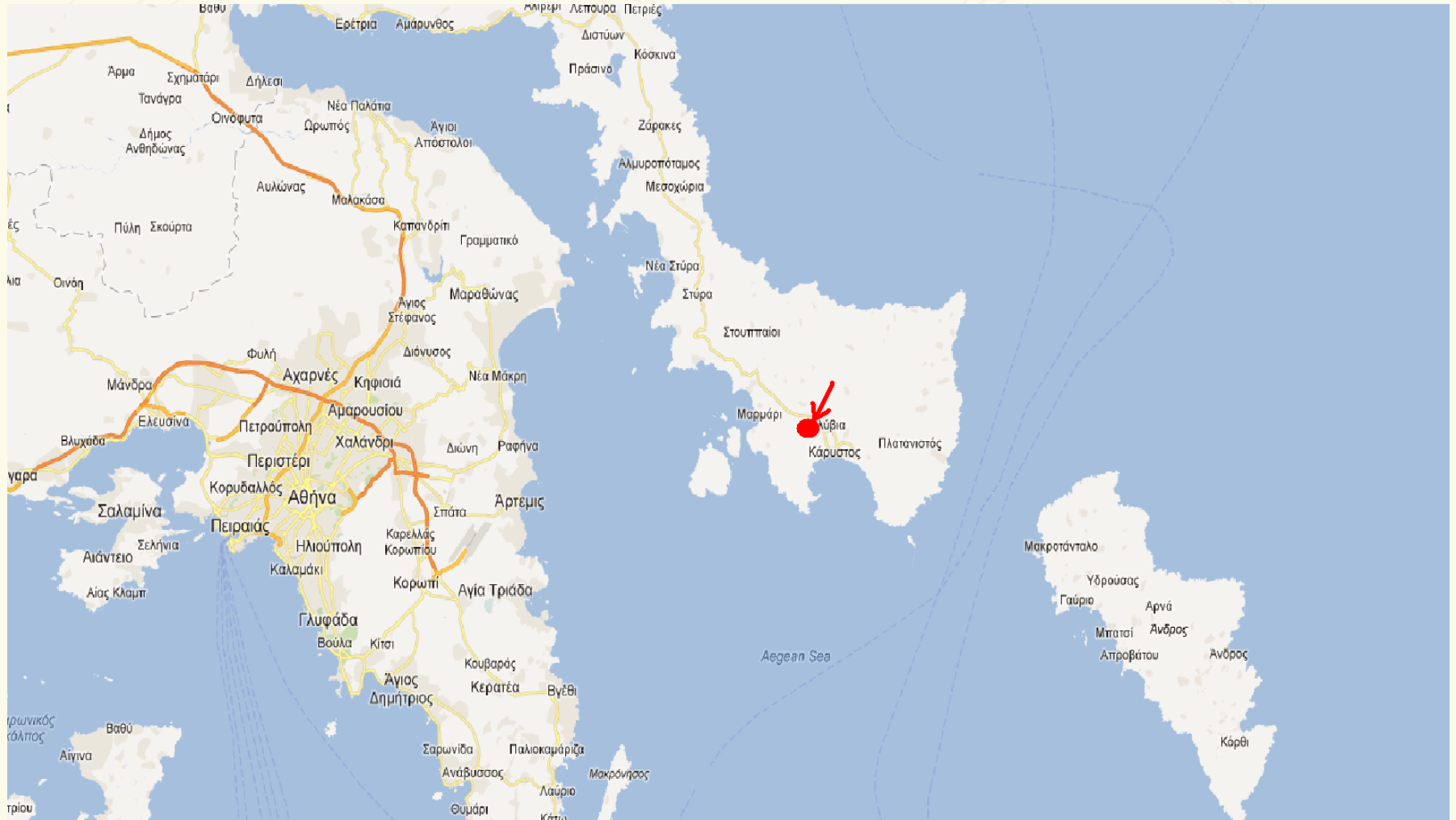
- ❑ Χωροθέτηση και δυναμικό
- ❑ Επιλογή Ανεμογεννήτριας
- ❑ Ηλεκτρομηχανολογικό διάγραμμα εγκατάστασης
- ❑ Σενάριο αποθήκευσης ενέργειας
- ❑ Κόστος εγκατάστασης και εκτίμηση παραγωγής ενέργειας

Αιολικό Πάρκο 6 MW

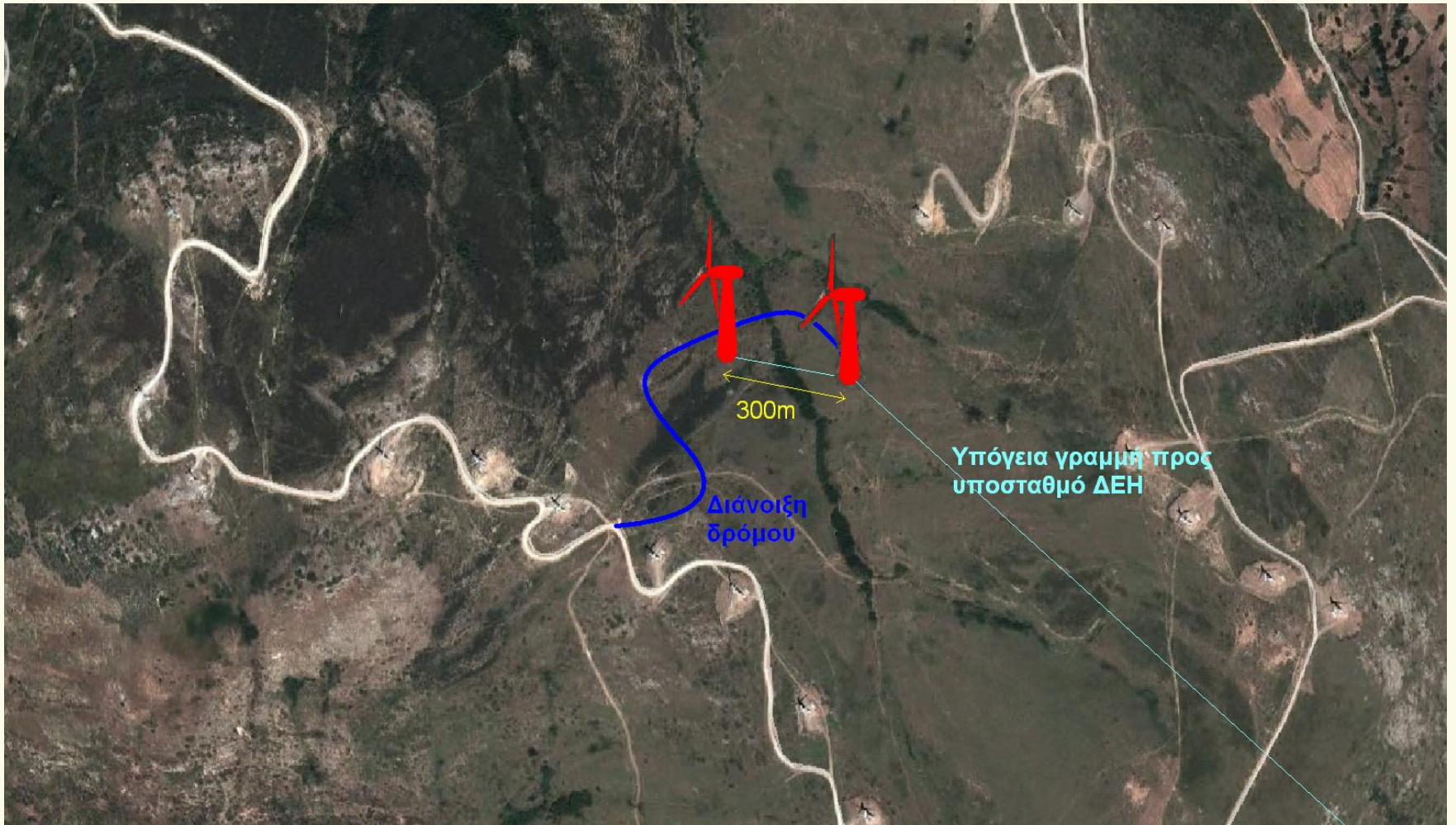
Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας:

- Η απόσταση των ανεμογεννητριών πρέπει να είναι 3 φορές τη διάμετρο της φτερωτής.
 - Απόσταση τουλάχιστον 500m στο επίπεδο της θάλασσας από κατοικημένη περιοχή.
 - Εύκολη προσβασιμότητα
 - Σχετικά κοντινή απόσταση από τον υποσταθμό της ΔΕΗ.
 - Κατάλληλο αιολικό δυναμικό.
-

Περιοχή Ν. Εύβοια, Δήμος Κατσαρωνίου



Τοποθεσία Σπάτα-Μπούρλαρι



Επιπλέον Πλεονεκτήματα

- Αντιπροσωπεία σε απόσταση 70km, για άμεση προμήθεια ανταλλακτικών.
- Ήδη υπάρχον δίκτυο της ΔΕΗ.
- Αρκετά φαρδύς δρόμος για τη μεταφορά των φτερών(55m).



Αιολικό Δυναμικό

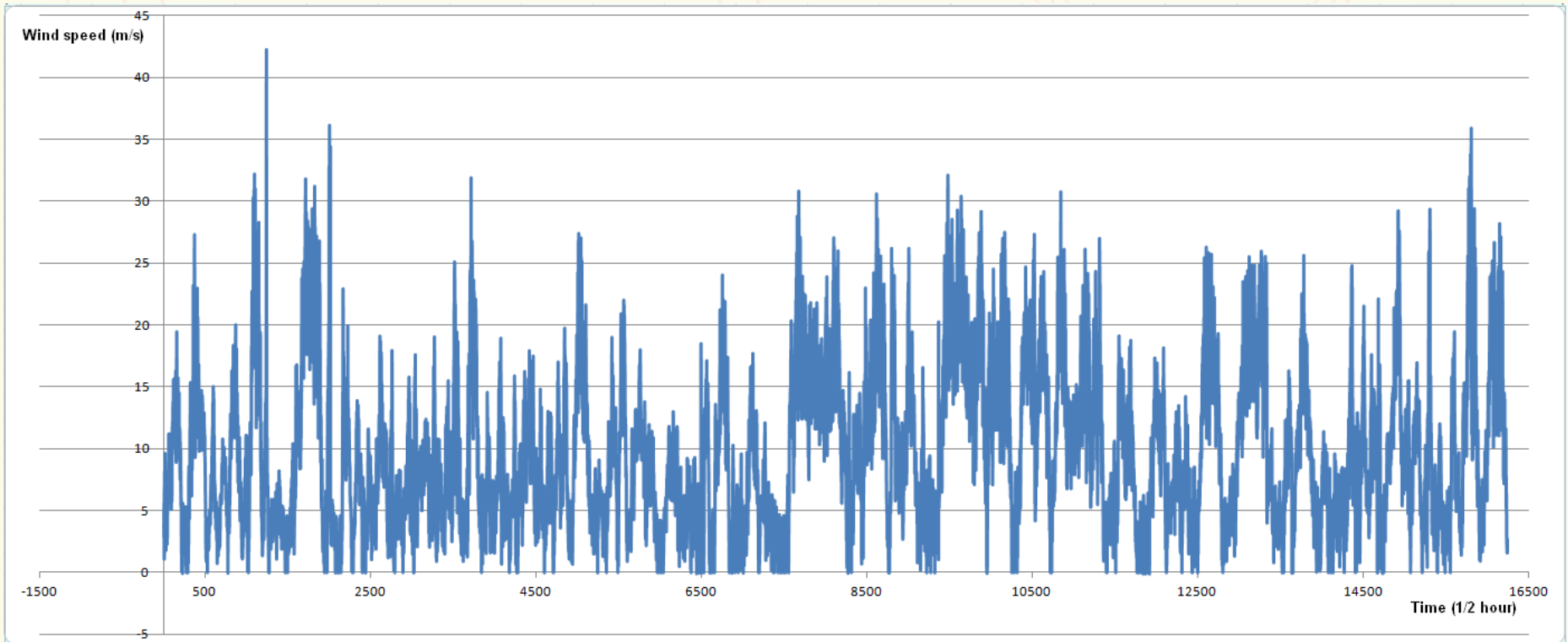
- Η κατασκευή και λειτουργία αιολικού πάρκου με βάση τις απαιτήσεις του Κ.Α.Π.Ε. και της Ρ.Α.Ε. προϋποθέτουν 4ετή ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής.
 - Για την καταγραφή των στοιχείων αυτών χρησιμοποιήθηκε μετεωρολογικός σταθμός WeatherHawk 18952 520 Wireless Weather Station.
 - Επεξεργασία δεδομένων, κατασκευή 4ετούς διαγράμματος-Καταλληλότητα περιοχής
-

WeatherHawk 18952 520 Wireless Weather Station



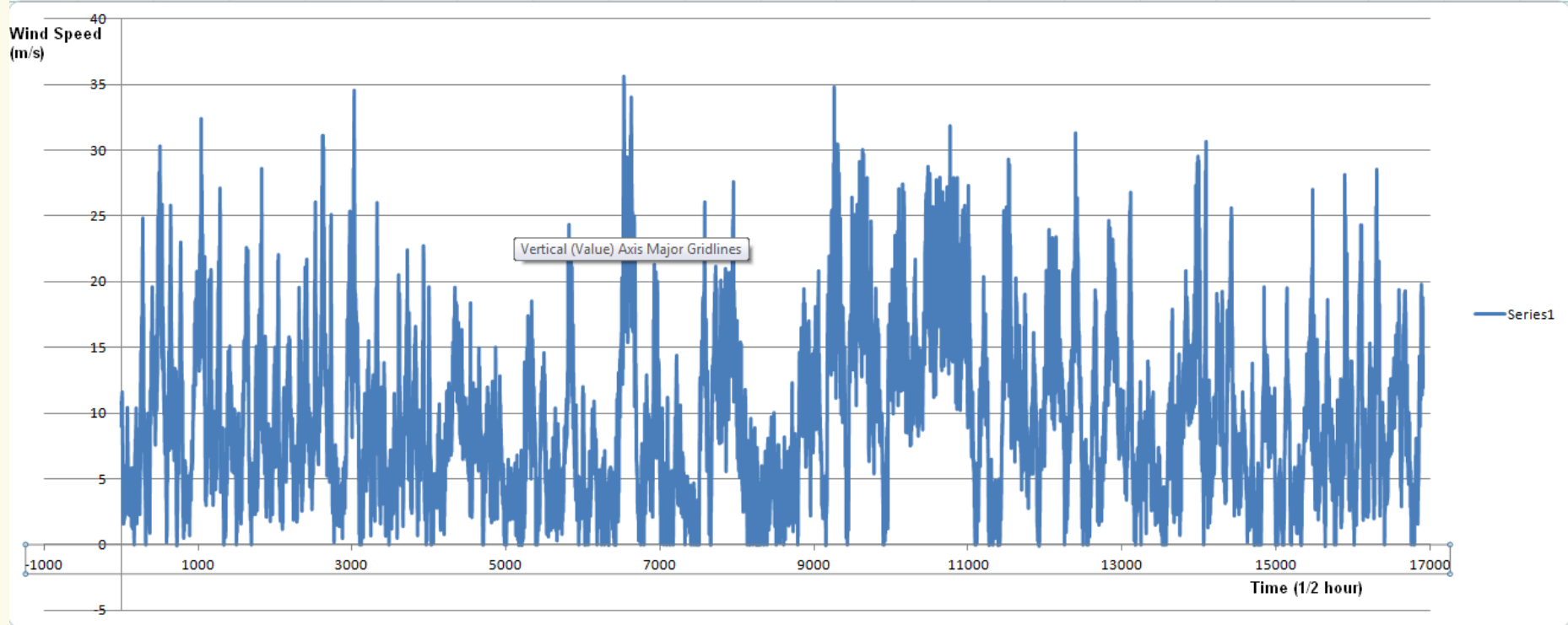
- Ύψος Ιστού 60m
- Καταγραφή ταχύτητας, διεύθυνσης και ριπών ανέμου ανά 30min
- Ασύρματη επικοινωνία και καταχώριση των στοιχείων σε βάση δεδομένων

Καμπύλη Ταχύτητας Ανέμου 2008



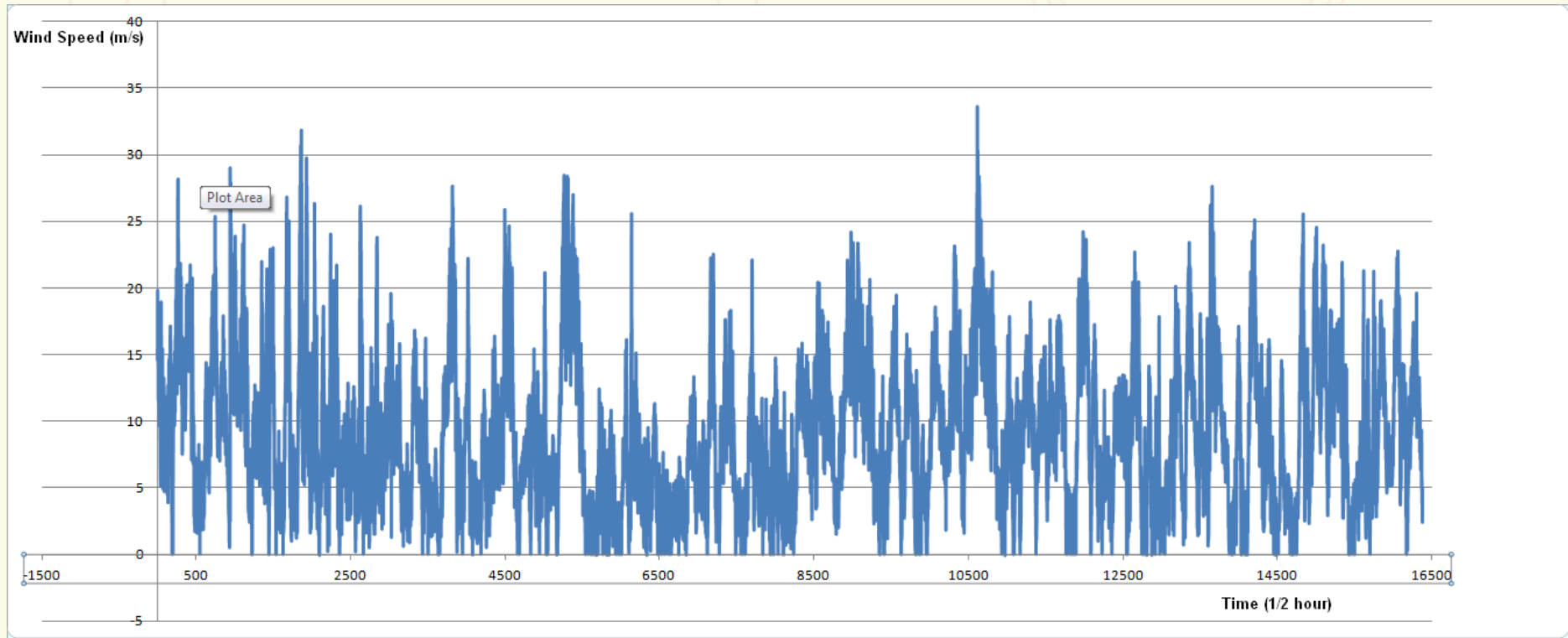
• Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου: 9,77 m/s

Καμπύλη Ταχύτητας Ανέμου 2009



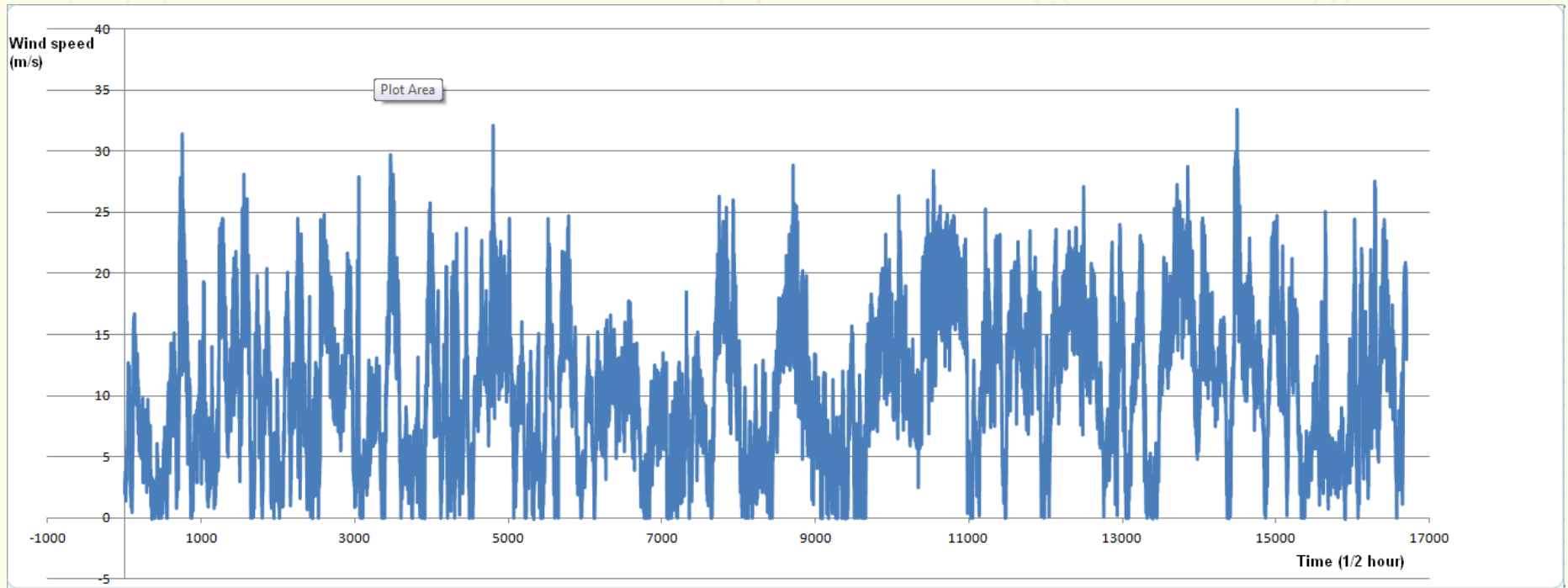
• Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου: 9,39 m/s

Καμπύλη Ταχύτητας Ανέμου 2010



• Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου: 8,88 m/s

Καμπύλη Ταχύτητας Ανέμου 2011



•Μέση Ετήσια Ταχύτητα Ανέμου: 10.59 m/s

Επιλογή Ανεμογεννήτριας

Με βάση:

- ✓ Την αξιοπιστία
 - ✓ Τη ζητούμενη ισχύ
 - ✓ Την απόδοση
 - ✓ Τη χωροθέτηση
 - ✓ Την άμεση προμήθεια ανταλλακτικών
 - ✓ Την εύκολη συντήρηση
- Επιλέχθηκαν 2 ανεμογεννήτριες τυπου:
-

Vestas V112-3.0 MW



- Αξιοπιστία στην αγορά
 - Ύψος πυλώνα 112m
 - Ασύγχρονου τύπου γεννήτρια
 - Υδραυλικό pitch
 - Ηλεκτρικό Yaw
 - 44% απόδοση σε ταχύτητες κοντά στις μέσες τιμές ταχυτήτων
-

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

•Operating data

- Rated power 3,000 kW
- Cut-in wind speed 3 m/s
- Rated wind speed 12 m/s
- Cut-out wind speed 25 m/s
- Max. altitude 1,500 m
- Operational temperature range standard range -20°C to 40°C

•Sound power

- 7 m/s 100 dB(A)
- 8 m/s 102.8 dB(A)
- 10 m/s 106.5 dB(A)
- By 95% rated power 106.5 dB(A)

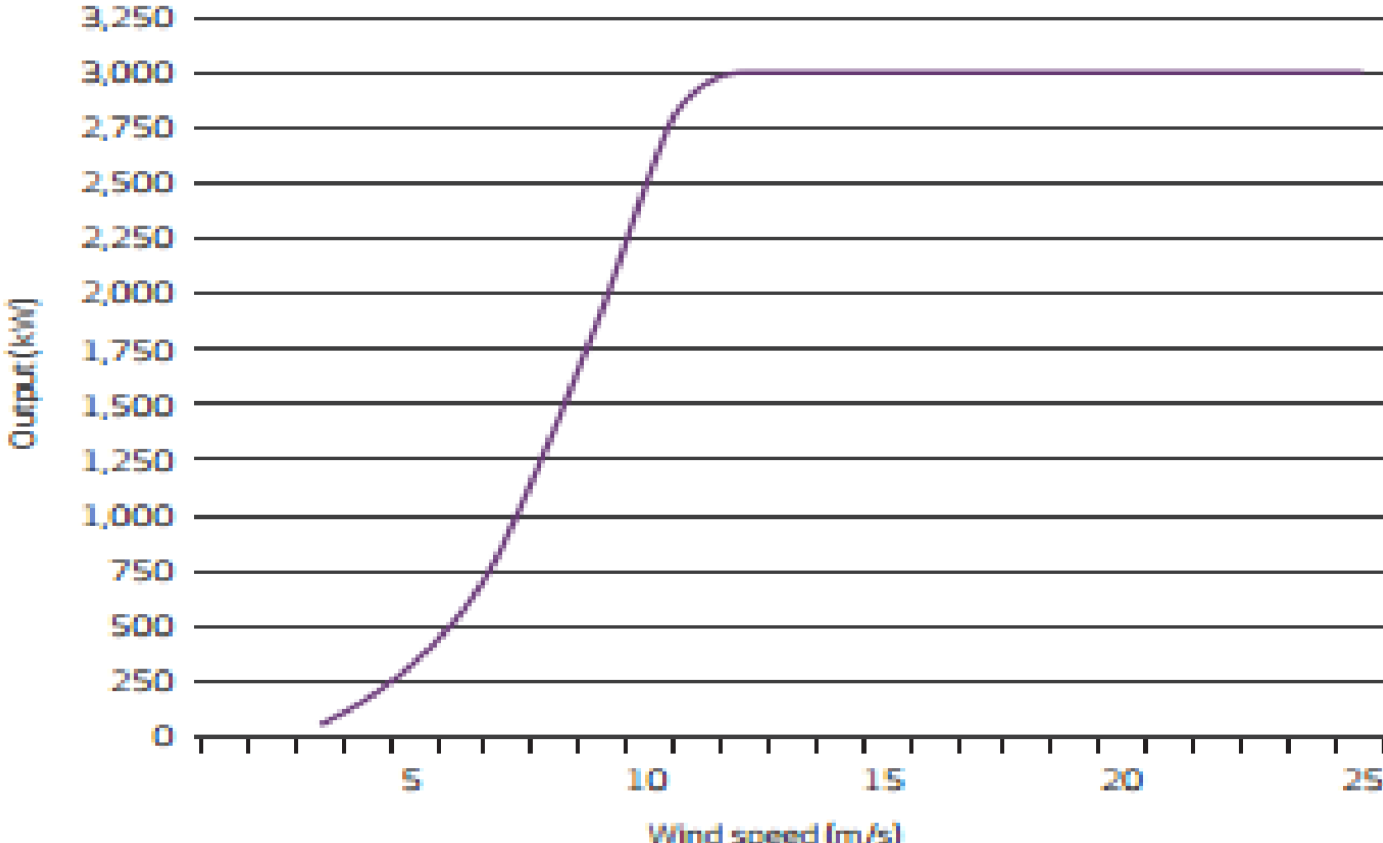
•Rotor

- Rotor diameter 112 m
- Swept area 9,852 m²



Καμπύλη Ισχύος-Ταχύτητας Ανέμου

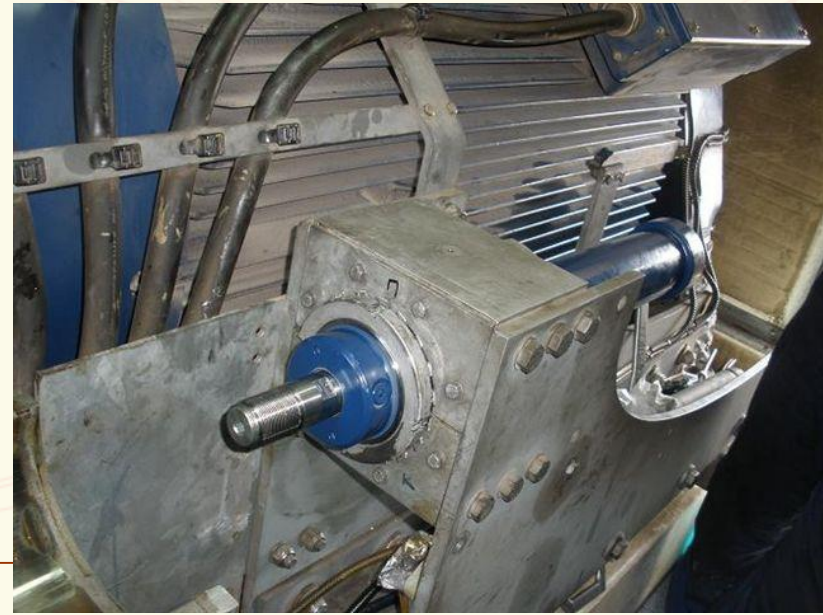
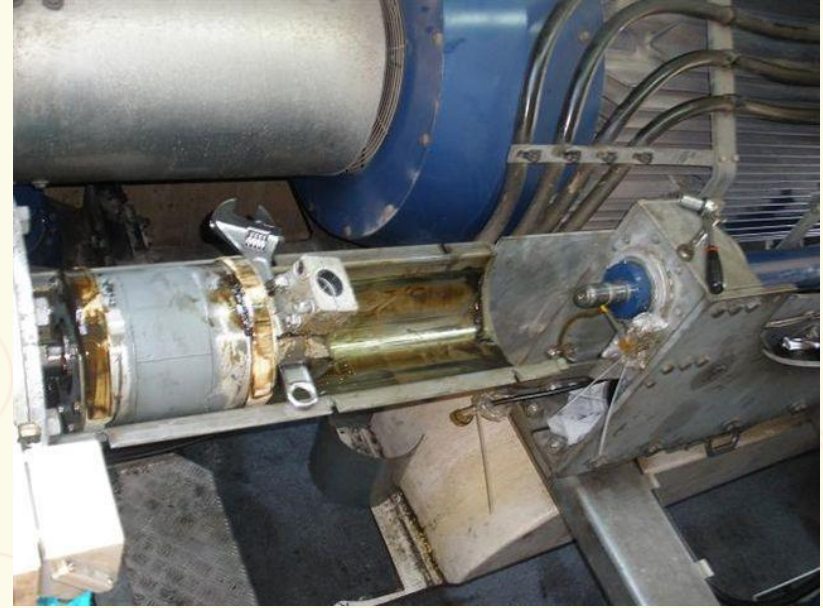
Power curve V112-3.0 MW



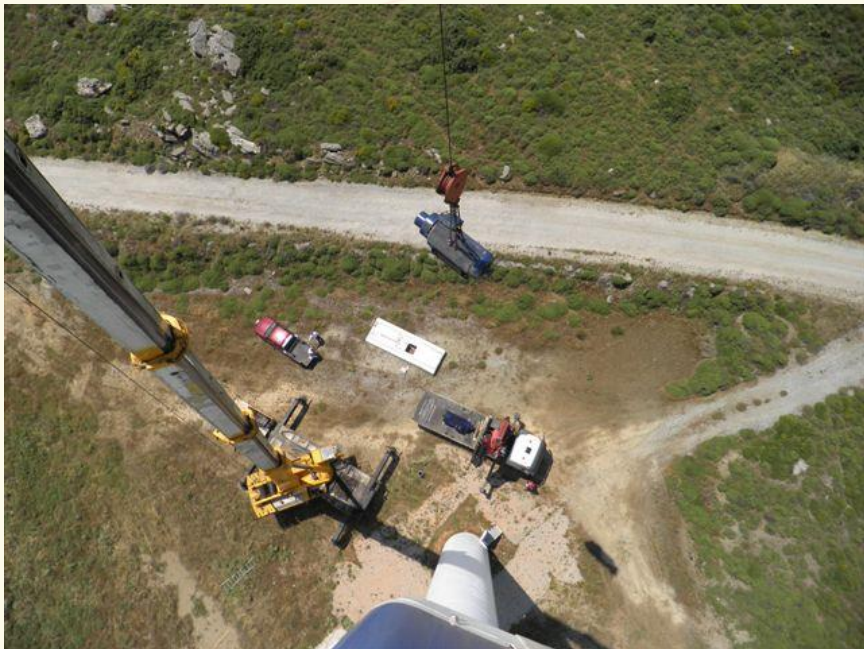
Συνήθη Προβλήματα

- Γεννήτρια
 - Γρανάζι
 - Πυκνωτές
 - Αντλία pitch
 - 4ετή εγγύηση με άμεση αντικατάσταση, για όλα τα κινητά και αναλώσιμα μέρη MONO της νασέλλας καθώς και για όλους τους αυτοματισμούς και τα ηλεκτρονικά.
 - Μετά την εγγύηση τα λειτουργικά έξοδα υπολογίζονται σε ~ 3 % αρχικής επένδυσης
-

Αντικατάσταση Pitch Cylinder



Αντικατάσταση γεννήτριας



Αντικατάσταση Γραναζιού



- Αντικατάσταση ανεμοδείκτη



Κοστολόγηση του Έργου

	Τιμή
Ενοικίαση έκτασης 2,000 m ²	700 €/έτος
Διαμόρφωση οικοπέδου, εσκαφή και μπετόν αρμέ για βάσεις πυλώνων	130,000 €
Αγορά, στήσιμο και μεταφορά πυλώνων	245,000 €
Αγορά 2 ανεμογεννητριών Vestas V-112 3,0 MW και έξοδα μεταφοράς	4,950,000 €
Καλωδιώσεις, ασφάλειες, πίνακες και διακόπτες SF6	77.250 €
Μετεωρολογικός ιστός WeatherHawk 18952	10.000 €
Εσκαφές και φρεάτια για γραμμή προς υποσταθμό ΔΕΗ	40,000 €
Διάνοιξη δρόμου	17,250 €
Αμοιβή Μηχανικού για μελέτη και επίβλεψη	17,000 €
ΣΥΝΟΛΟ	5,500,500 €

Πρόβλεψη Παραγωγής-Απόσβεση Επένδυσης

➤ Για την πρόβλεψη της παραγωγής συντάσουμε έναν αλγόριθμο στην Fortran που με βάση τις ταχύτητες ανέμου για τα έτη 2008, 2009, 2010, 2011 και την καμπύλη ισχύος σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου της ανεμογεννήτριας Vestas V112, υπολογίζει την απόδοση του πάρκου σε kWh.

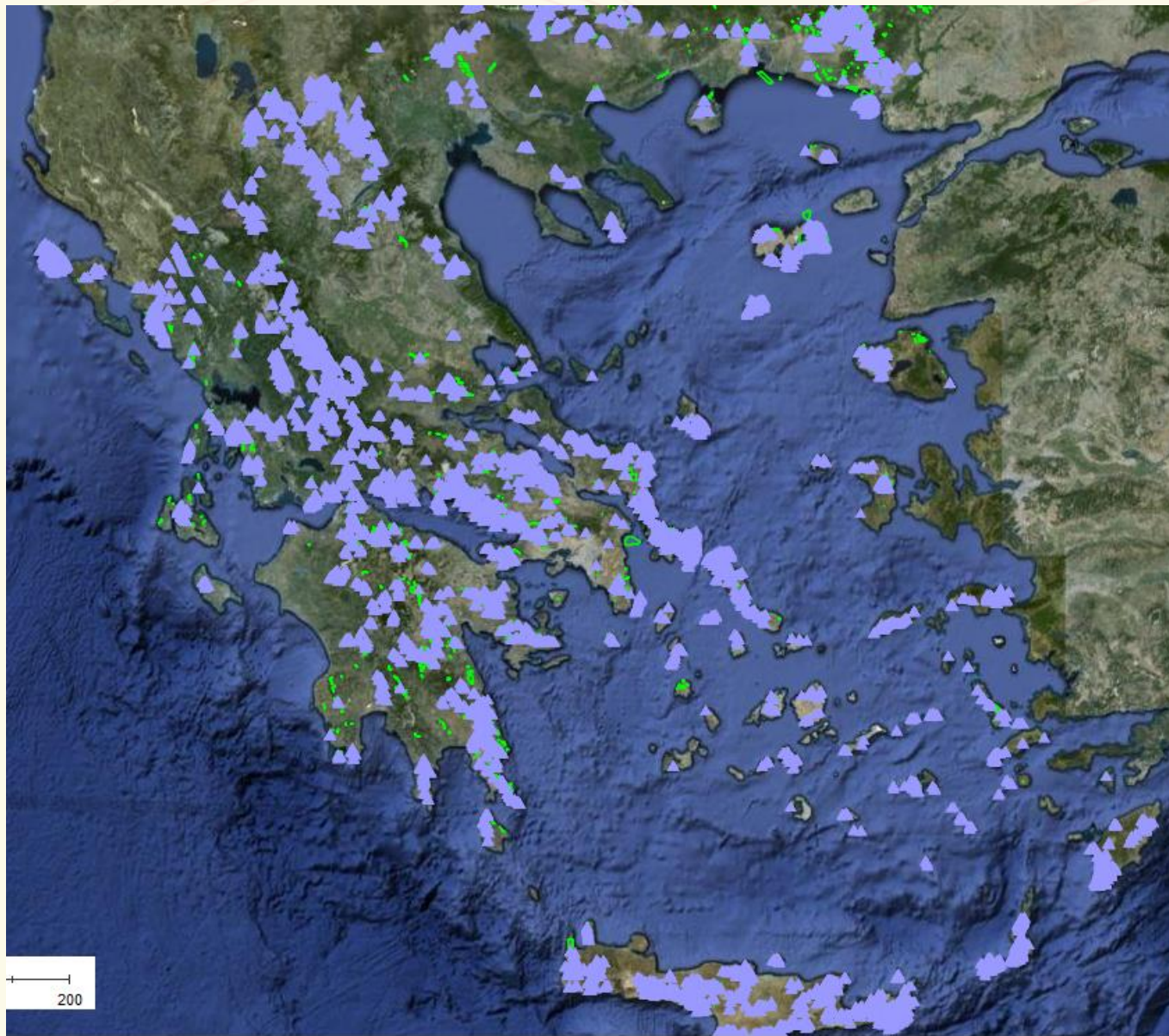
✓ Με βάση τα δεδομένα $1W \rightarrow 3,5 \text{ kWh}$ ετησίως

✓ Τελικά η παραγωγή προβλέπεται στις 21,000,000 kWh ετησίως.

✓ Θεωρώντας ότι η ΔΕΗ πληρώνει 0,09 € την kWh τα έσοδα προ φόρων από την πώληση ενέργειας είναι ~1.9 Μ€

✓ **Απόσβεση επένδυσης σε 4-5 έτη**

Τρέχουσα Κατάσταση στον Ελληνικό Χώρο



1800 MW
εγκατεστημένα
μέχρι το τέλος
του 2017