

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ταχύτητα και Ενέργεια του Ανέμου

Η κινητική ενέργεια μίας μάζας αέρα m που κινείται με ταχύτητα V , δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad [\text{J}] \quad 1.$$

Η ισχύς του (η ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) από τη σχέση:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}V^2 \quad [\text{W}] \quad 2.$$

όπου: $\dot{m} = \rho \times V \times A$ [kg/s] η μαζική παροχή αέρα μέσω της επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια, ρ [kg/m³] η πυκνότητα του αέρα (**1,225 Kg/m³** σε 1 atm και 25 °C), V [m/s] η ταχύτητα του ανέμου και A [m²] το εμβαδόν της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια του δρομέα

Οπότε, η εξίσωση που δίνει την **ισχύ του ανέμου**, που διέρχεται από μία επιφάνεια A , κάθετη στη διεύθυνση του:

$$P = \frac{1}{2} (\rho AV)V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \quad [\text{W}] \quad 3.$$

Η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του. Το αιολικό δυναμικό μίας τοποθεσίας αξιολογείται από την ειδική ισχύ p [W/m²] του ανέμου στην περιοχή αυτή, δηλαδή την ισχύ του ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας, που προκύπτει από τη διαίρεση της Εξίσωσης 3 με την επιφάνεια A :

$$p = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad [\text{W/m}^2] \quad 4.$$

Η επιφάνεια A που σαρώνεται από το δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad [\text{m}^2]$$

όπου D η διάμετρος του δρομέα (= 2 x μήκος πτερυγίου).

Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου, σε έναν τόπο, μεταβάλλεται κάθε στιγμή και από εποχή σε εποχή του έτους. Παρόλα αυτά, η κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους, επαναλαμβάνεται με πολύ μικρές αποκλίσεις από έτος σε έτος. Οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου, **στη διάρκεια ενός έτους**, περιγράφονται από την κατανομή πιθανοτήτων (ή συχνοτήτων) Weibull :

$$h_i = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V_i}{c}\right)^k} \quad [\%] \quad 15.$$

όπου: k ο παράγοντας σχήματος της κατανομής Weibull [αδιάστατος]

c ο παράγοντας μεγέθους (έντασης) της κατανομής Weibull [m/s]

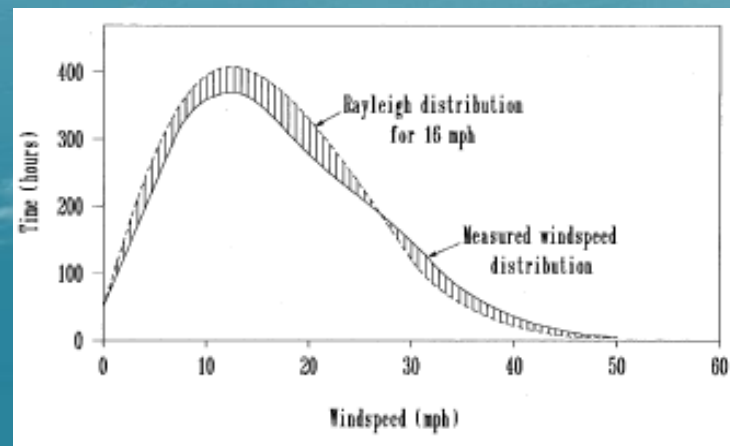
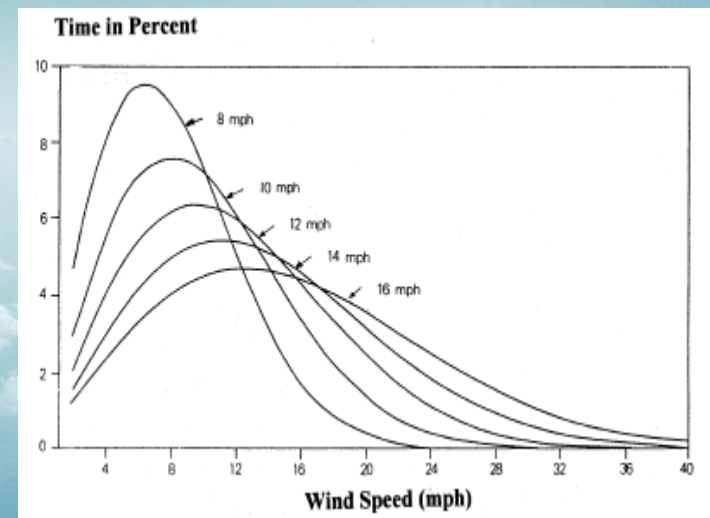
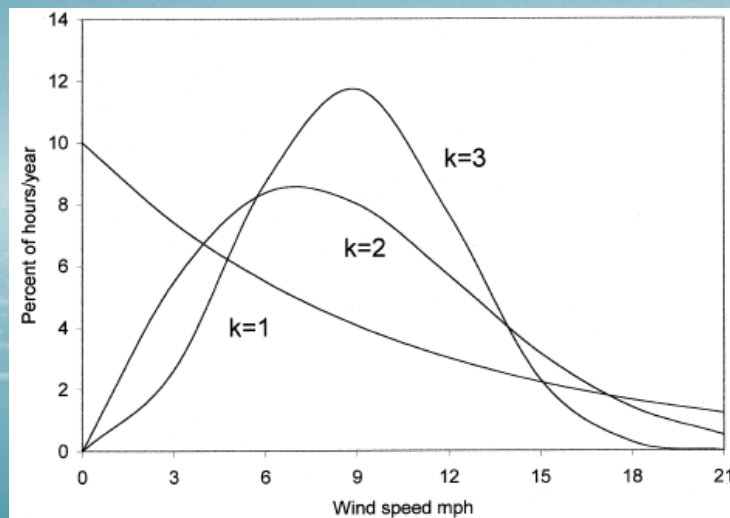
h_i [%] η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι ίση με V_i [m/s] ή η % συχνότητα της ταχύτητας V_i

Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

την κατανομή πιθανοτήτων (ή συχνοτήτων) Weibull :

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

15.

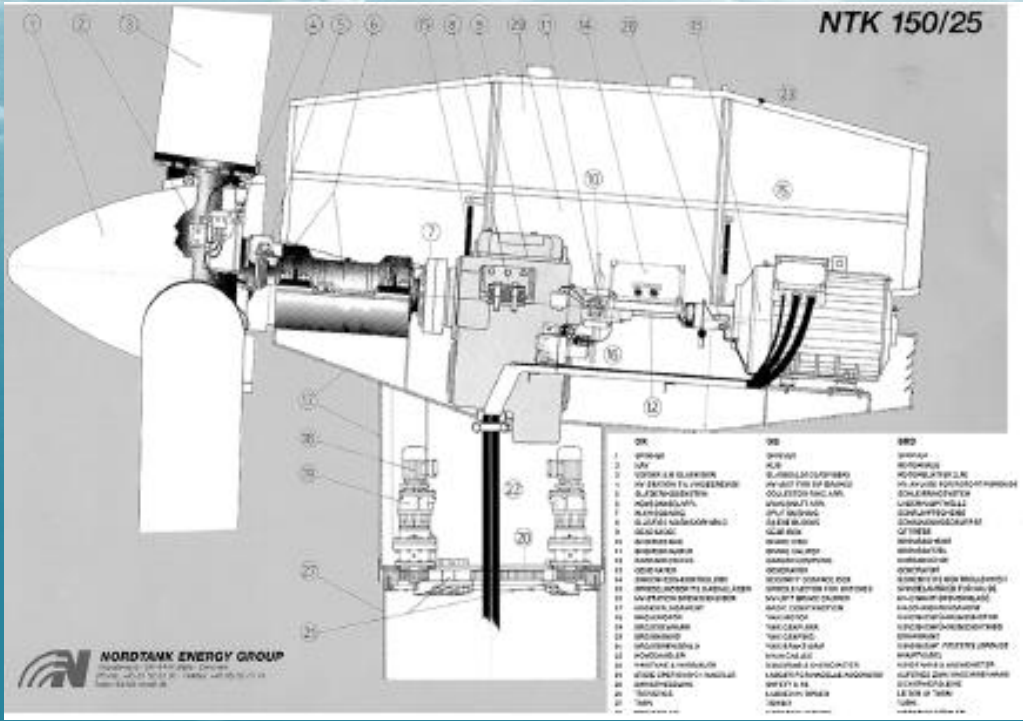


Η πραγματική κατανομή της ταχύτητας των ανέμων, στους περισσότερους τόπους της γης ακολουθούν κατανομή Weibull με $k \approx 2$ και παράγοντα έντασης $c = 5 - 25$ m/s (σε τόπους με πραγματικό αιολικό ενδιαφέρον – χαμηλότερες ή ακόμη και υψηλότερες τιμές του c καθιστούν τους αντίστοιχους τόπους ασύμφορους, για την πραγματική εκμετάλλευσης του αιολικού τους δυναμικού. Η θεωρητική κατανομή Weibull πολύ λίγο αποκλίνει από την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

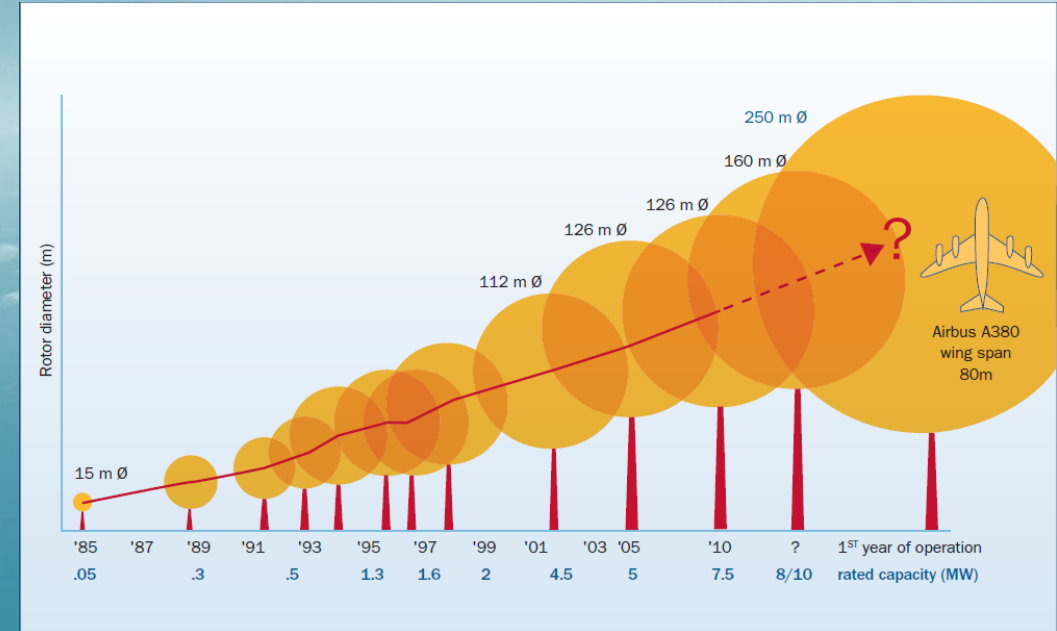
Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) διακρίνονται σε οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα δεν χρειάζονται σύστημα διεύθυνσης που να τις στρέφει απέναντι στην κατεύθυνση του ανέμου, όμως έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και προβλήματα όσον αφορά στην κλιμάκωση του μεγέθους τους. Έτσι, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν κυριαρχήσει στις σχετικές εφαρμογές και αποτελούνται από :

- τον πύργο
 - τον ρότορα που αποτελείται από την πλήμνη και συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, που στηρίζονται σε αυτή
 - το θάλαμο που περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, το φρένο και την ηλεκτρογεννήτρια και
 - το σύστημα προσανατολισμού του θαλάμου και του ρότορα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου
- ενώ για τη διάθεση της παραγόμενης ισχύος η Α/Γ συνοδεύεται από συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, που δίνουν στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα τα κατάλληλα χαρακτηριστικά (τάση και συχνότητα).



ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι Α/Γ για κεντρική παραγωγή ισχύος έχουν ονομαστική ισχύ από 100 kW έως λίγα MW, ενώ μικρότερες Α/Γ (400 W έως 100 kW) χρησιμοποιούνται για τη μερική κάλυψη ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων (μη διασυνδεδεμένων με το δίκτυο) καταναλώσεων. Η μεγαλύτερη Α/Γ που βρίσκεται σήμερα σε λειτουργία έχει διάμετρο πτερυγίων 126 m, σε πύργο ύψους 135 m (συνολικό ύψος 198 m) και ονομαστική ισχύ 7 MW, μετρημένη σε ταχύτητα ανέμου 14 m/s. Ο **πύργος** στηρίζει το θάλαμο και την πλήμνη της Α/Γ και το ύψος του εξυπηρετεί την αποκομιδή αιολικής ενέργειας σε κατά το δυνατόν μεγαλύτερη απόσταση από το έδαφος, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη.



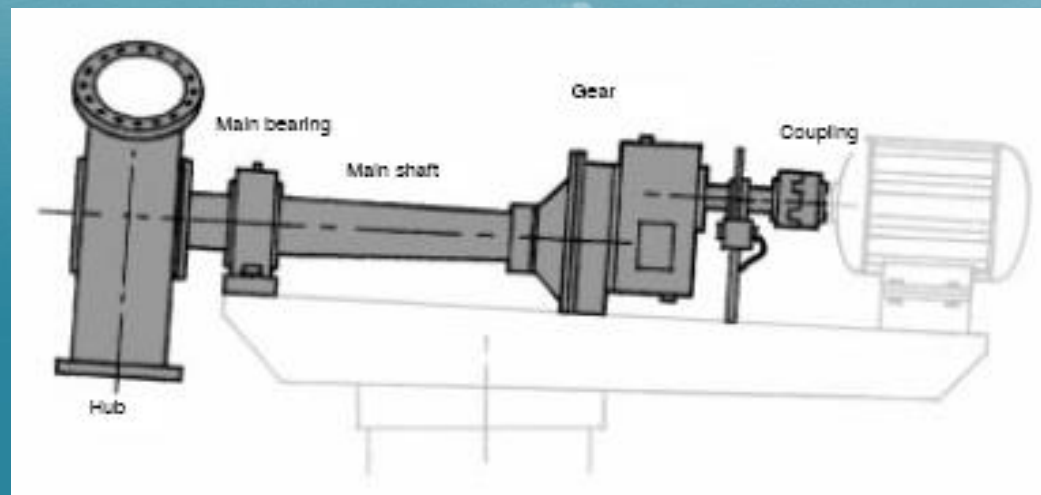
Τα **πτερύγια** κατασκευάζονται από συνθετικά υλικά μεγάλης αντοχής και μικρού ειδικού βάρους, ώστε να αντέχουν στις ροπές και να τις ελαχιστοποιούν. **Ειδικά η σύνδεση των πτερυγίων με την πλήμνη δέχεται τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις και αποτελεί το πιο ευαίσθητο σημείο της όλης κατασκευής.** Προκείμενου οι τάσεις αυτές να συγκρατηθούν κάτω από ένα όριο και να αποφευχθεί η αποκόλληση των πτερυγίων, η ταχύτητα περιστροφής της ελέγχεται από μηχανικό φρένο, στο εσωτερικό του θαλάμου. Σε περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων, η περιστροφή του ρότορα σταματά και η το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων στρέφεται, μαζί με όλο τον θάλαμο, παράλληλα στην κατεύθυνση του ανέμου.

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, περιορίζεται από μηχανικό φρένο. Σε πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου (συνήθως πάνω από 30-35 m/s – 100-120 χλμ/ώρα). Εκτός από το μηχανικό φρένο:

- το επίπεδο περιστροφής του ρότορα εκτρέπεται (ο θάλαμος της Α/Γ γυρίζει κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου)
- μόνο τα πτερύγια (και όχι ο θάλαμος) περιστρέφονται, ώστε ο άνεμος να μην προσπίπτει στην εμπρόσθια επιφάνεια τους αλλά στην ακμή τους
- ή περιστρέφονται τόσο ο θάλαμοςόσο και τα πτερύγια, ώστε να εκθέτουν την ακμή τους στη διεύθυνση του ανέμου

Επίσης, διαθέτουν κιβώτιο ταχυτήτων, στον άξονα που συνδέει την πλήμνη με τον ηλεκτροκινητήρα. Με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, το κιβώτιο “ανεβάζει ταχύτητα” με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αντίσταση του ηλεκτροκινητήρα στην περιστροφή και η ταχύτητα περιστροφής να μειώνεται. Η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα (το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη ροπή περιστροφής του ρότορα) κυμαίνεται στο 75 – 85.

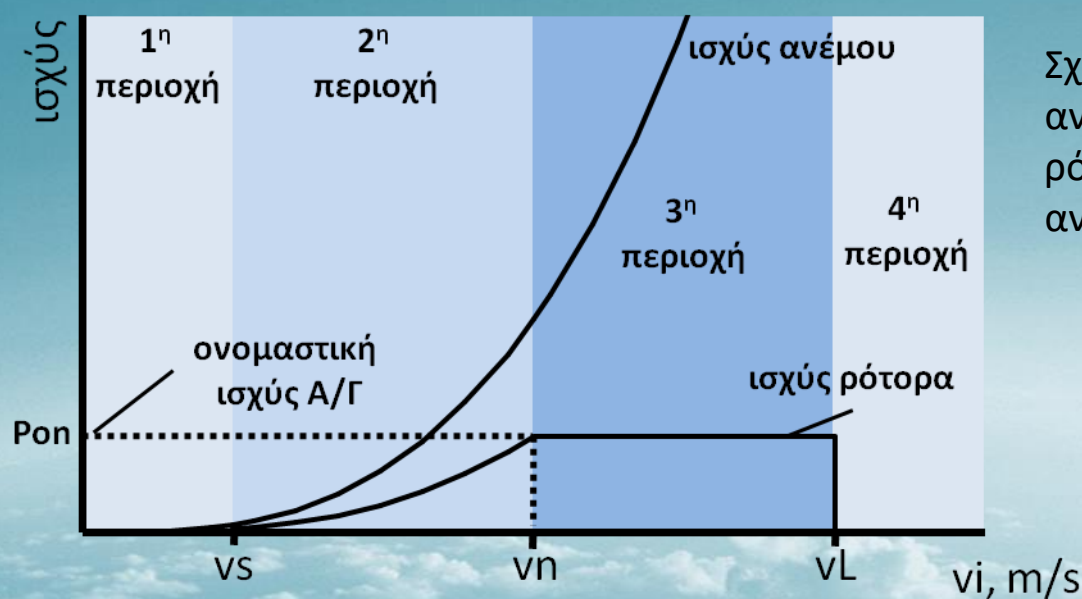


Λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής

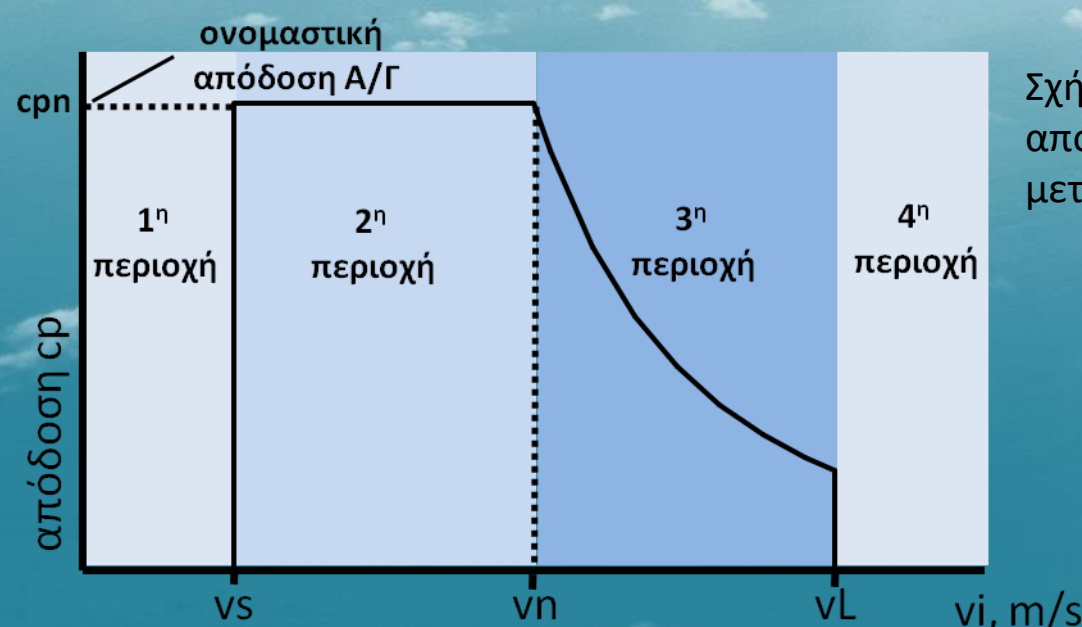
Με βάση τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα, **ορίζονται τέσσερις περιοχές ταχυτήτων του ανέμου, σε κάθε μία από τις οποίες η Α/Γ παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά:**

- 1. Η πρώτη περιοχή** εκτείνεται από την νηνεμία (ταχύτητα ανέμου ίση με το μηδέν, $v_i = 0 \text{ m/s}$) έως την ταχύτητα ανέμου που ο ρότορας ξεκινά την περιστροφή του ($0 < v_i < v_s$). Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται **ταχύτητα έναρξης, v_s** , και λαμβάνει τιμές στην περιοχή των 5 m/s . **Για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από τη v_s , ο ρότορας παραμένει ακίνητος, η ισχύς που προσλαμβάνει από τον άνεμο είναι μηδέν ($P_{oi} = 0 \text{ kW}$) και ο συντελεστής απόδοσης είναι επίσης μηδέν ($c_p = 0$).**
- 2. Η δεύτερη περιοχή** εκτείνεται από την ταχύτητα έναρξης περιστροφής του ρότορα έως την **ονομαστική ταχύτητα, v_n** , της Α/Γ ($v_s < v_i < v_n$), η οποία λαμβάνει τιμές στην περιοχή ταχυτήτων ανέμου των 15 m/s . Μεταξύ της ταχύτητας (άνεμου) έναρξης και της ονομαστικής ταχύτητας ανέμου (η οποία είναι χαρακτηριστική της κάθε Α/Γ), η Α/Γ λειτουργεί με σταθερό συντελεστή απόδοσης c_p , ίσο με την ονομαστικής της απόδοση ($c_p = c_{pn}$, όπου c_{pn} η ονομαστική απόδοση της Α/Γ, η οποία επίσης αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της Α/Γ). Σε αυτή την περιοχή ταχυτήτων ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ αυξάνεται αναλογικά με την ταχύτητα του ανέμου, έτσι ώστε η τιμή του TSR να παραμένει σταθερή στην τιμή που μεγιστοποιεί την απόδοση c_p , και ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής γίνεται με έναν από τους δύο τρόπους που περιγράφηκαν παραπάνω.
- 3. Η τρίτη περιοχή** ταχυτήτων του ανέμου εκτείνεται από την ονομαστική ταχύτητα v_n , έως την **οριακή ταχύτητα, v_L** , στην οποία το φρένο ακινητοποιεί εκ νέου τον ρότορα και ο θάλαμος στρέφεται έτσι ώστε το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων να βρεθούν παράλληλα στη διεύθυνση του ανέμου ($v_n < v_i < v_L$). Στην περιοχή αυτή ταχυτήτων του ανέμου, ο ρότορας περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα, προσλαμβάνοντας από τον άνεμο σταθερή ισχύ ($P^*_{oi} = \text{σταθερό και } P_{oi} = \text{σταθερό}$).
- 4. Η τέταρτη περιοχή** περιλαμβάνει τις ταχύτητες που είναι μεγαλύτερες από την οριακή ταχύτητα της Α/Γ ($v_L < v_i$). Ο ρότορας είναι ακινητοποιημένος, στην περιοχή αυτή πολύ ισχυρών ανέμων, και το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων του έχει στραφεί παράλληλα στη διεύθυνση τους.

Λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής



Σχήμα 13. Μεταβολή της ισχύος του ανέμου και της ισχύος που προσλαμβάνει ο ρότορας, με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου.



Σχήμα 14. Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης c_p , του ρότορα, ως προς τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου

Cr	η απόδοση της ΑΓ, η οποία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή ($C_{p\eta}$) μεταξύ της ταχύτητας έναρξης και της ονομαστικής ταχύτητας – η τιμή μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας αποσύνδεσης υπολογίζεται από το πηλίκο P_{oi}^*/P_{hi}
P_{oi}^*	η ειδική (ανά μονάδα επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια) ισχύς του δρομέα (της πτερωτής), η οποία υπολογίζεται από το γινόμενο $C_r \times P_{hi}$ και παραμένει σταθερή μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας αποσύνδεσης – η σταθερή αυτή τιμή υπολογίζεται από την ονομαστική ταχύτητα και την ονομαστική απόδοση της Α/Γ ($= \frac{1}{2} \times \rho \times C_{p\eta} \times v_n^3 = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 0,45 \times 15^3 = 0,93 \text{ kW/m}^2$)
A	η επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους
P_{oi}	η ισχύς που προσλαμβάνει ο δρομέας και υπολογίζεται από το γινόμενο της ειδικής ισχύος του δρομέα και της επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια του ($A \times P_{oi}^*$)
v_{hi}	η συχνότητα (πιθανότητα) της ταχύτητας ανέμου v_{hi}
t_i	οι ώρες του έτους κατά τις οποίες ο άνεμος έχει ταχύτητα v_{hi} ($t_i \times 24 \times 365$)
E_{oi}	η ενέργεια που προσλαμβάνει ο δρομέας στο σύνολο των ωρών του έτους, στις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι v_{hi} ($t_i \times P_{oi}$)
n_{el}	η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα της Α/Γ
E_{el}	η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ ($= n_{el} \times E_{oi}$)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Να υπολογιστεί η ονομαστική δυναμικότητα και η ενέργεια που παράγεται σε ένα έτος από ανεμογεννήτρια ύψους 120 m και διαμέτρου 126 m, εάν αυτή τοποθετηθεί στο αιολικό πεδίο του Παραδείγματος 1. Δίνονται:

τραχύτητα εδάφους	$a = 0,15$
ταχύτητα έναρξης	$v_s = 5 \text{ m/s}$
ονομαστική ταχύτητα	$v_n = 15 \text{ m/s}$
ταχύτητα αποσύνδεσης	$v_l = 25 \text{ m/s}$
ονομαστική απόδοση δρομέα	$C_{pn} = 45 \%$
απόδοση ηλεκτροκινητήρα	$\eta_{el} = 85 \%$

ΛΥΣΗ

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας, σε ένα έτος η κατανομή ταχυτήτων ανέμου του Παραδείγματος 1 θα πρέπει να αναχθεί στο ύψος την Α/Γ, μέσω της εξίσωσης:

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

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

hi	vi, m/s	v _{hi} , m/s	hi	vi, m/s	v _{hi} , m/s	hi	vi, m/s	v _{hi} , m/s
0,0122	1	1,5	0,0642	11	16,0	0,0173	21	30,5
0,0239	2	2,9	0,0609	12	17,4	0,0139	22	31,9
0,0348	3	4,4	0,0566	13	18,9	0,0110	23	33,4
0,0444	4	5,8	0,0516	14	20,3	0,0086	24	34,8
0,0526	5	7,3	0,0463	15	21,8	0,0067	25	36,3
0,0590	6	8,7	0,0409	16	23,2	0,0051	26	37,7
0,0635	7	10,2	0,0355	17	24,7	0,0038	27	39,2
0,0662	8	11,6	0,0303	18	26,1	0,0028	28	40,6
0,0671	9	13,1	0,0255	19	27,6	0,0021	29	42,1
0,0664	10	14,5	0,0211	20	29,0	0,0015	30	43,6

* Αν δεν αναφέρεται διαφορετικά οι πιθανότητα (συχνότητα) hi της κάθε ταχύτητα ανέμου vi, υπολογίζεται είτε από την κατανομή Weibull με k = 2, είτε με την κατανομή Rayleigh, **με βάση την τιμή της ταχύτητα vi και όχι τη vhi.**

Η Α/Γ ξεκινά τη λειτουργία της σε ταχύτητα ανέμου 5 m/s και ως την ονομαστική τιμή ταχύτητας των 15 m/s διατηρεί σταθερό τον συντελεστή απόδοσης του δρομέα. Για τιμές ταχύτητας μεγαλύτερες των 15 m/s και ως την ταχύτητα αποσύνδεσης των 25 m/s, η Α/Γ παράγει σταθερή ισχύ. Ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής ενέργειας φαίνεται στον Πίνακα που ακολουθεί, όπου:

v_{hi} η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της Α/Γ, που υπολογίστηκε προηγουμένως
 P_{hi} η ειδική **ισχύς του ανέμου** ανά μονάδα επιφάνειας, στο ύψος της Α/Γ, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{hi} = \frac{1}{2} \rho v_{hi}^3$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα (κατά προσέγγιση 1,225 kg/m³)

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

v_{hi} m/s	Phi kW/m ²	Cp %	P*oi kW/m ²	A m ²	Poi MW	hi %	ti h	Eoi MWh	nel %	Eel MWh
4,4										
5,8	0,1	45,0	0,05	12463	0,7	0,044	389	261,7	85	222,5
7,3	0,2	45,0	0,11	12463	1,3	0,053	460	604,7	85	514,0
8,7	0,4	45,0	0,18	12463	2,3	0,059	516	1172,3	85	996,4
10,2	0,6	45,0	0,29	12463	3,6	0,064	556	2005,6	85	1704,7
11,6	1,0	45,0	0,43	12463	5,4	0,066	580	3121,1	85	2652,9
13,1	1,4	45,0	0,61	12463	7,7	0,067	588	4505,0	85	3829,3
14,5	1,9	45,0	0,84	12463	10,5	0,066	582	6112,1	85	5195,3
16,0	2,5	37,3	0,93	12463	11,6	0,064	563	6520,1	85	5542,1
17,4	3,2	28,7	0,93	12463	11,6	0,061	533	6178,2	85	5251,5
18,9	4,1	22,6	0,93	12463	11,6	0,057	495	5742,9	85	4881,4
20,3	5,1	18,1	0,93	12463	11,6	0,052	452	5242,0	85	4455,7
21,8	6,3	14,7	0,93	12463	11,6	0,046	406	4702,4	85	3997,0
23,2	7,7	12,1	0,93	12463	11,6	0,041	358	4148,5	85	3526,2
24,7	9,2	10,1	0,93	12463	11,6	0,035	311	3601,1	85	3061,0
26,1										
								53917,8		45830,1

* Η πρώτη γραμμή του Πίνακα είναι κενή γιατί η vhi είναι μικρότερη από την ταχύτητα έναρξης και η τελευταία γραμμή είναι κενή γιατί η vhi είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα αποκοπής. Και στις δύο περιπτώσεις ο ρότορας είναι ακίνητος και δεν λαμβάνει ισχύ από τον άνεμο.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Το αρχικό κόστος μίας αιολικής εγκατάστασης (ενός αιολικού πάρκου) διακρίνεται στο κόστος των Α/Γ και στο κόστος των περιφερειακών συστημάτων και των εργασιών εγκατάστασης (θεμελίωσης και ανέγερσης των πύργων, διασύνδεση με το δίκτυο, διαμόρφωση του χώρου, οδοποιία, διαμόρφωση χώρου, αντικεραυνική προστασία, μελέτη και επίβλεψη κ.α.). Το κόστος των Α/Γ είναι συνάρτηση της ισχύος τους και υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τη σχέση:

$$\kappa_{ΑΓ} = \frac{870000}{621 + P_n^{2,05}} + 740 \quad [€/kW] \quad 25.$$

όπου $\kappa_{ΑΓ}$ το **ειδικό κόστος** Α/Γ [€/kW] και P_n η ονομαστική δυναμικότητα της ΑΓ [kW] (η ονομαστική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα). Έτσι το **κόστος** μίας Α/Γ είναι:

$$K_{ΑΓ} = \kappa_{ΑΓ} \times P_n \quad [€] \quad 26.$$

Λαμβάνοντας υπόψη και τα κόστη των περιφερειακών συστημάτων (επιμερισμένα ανά Α/Γ) και τα κόστη εγκατάστασης, το **ολικό ειδικό κόστος** μίας Α/Γ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\kappa_{ΑΓ,ολ.} = \kappa_{ΑΓ} \times 3,971 \times P_n^{-0,14} \quad [€/kW] \quad 27.$$

και το **ολικό κόστος** μίας Α/Γ, από τη σχέση:

$$K_{ΑΓ,ολ.} = \kappa_{ΑΓ,ολ.} \times P_n \quad [€] \quad 28.$$

ενώ το **αρχικό κόστος του αιολικού πάρκου** από τη σχέση:

$$K_{ΑΠ} = v \times K_{ΑΓ,ολ.} \quad [€] \quad 29.$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Στις εκτάσεις της Νότιας Εύβοιας του Παραδείγματος 1, πρόκειται να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα από Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2 MW, στις παρακάτω κατηγορίες εκτάσεων:

1 ^η κατηγορία:	16.000 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 11,5 m/s
2 ^η κατηγορία:	26.000 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10,7 m/s
3 ^η κατηγορία:	44.500 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,8 m/s
4 ^η κατηγορία:	69.500 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,0 m/s

να υπολογιστούν: το πλήθος των Α/Γ που θα χωροθετηθούν σε αυτές
η ετήσια ηλεκτρική παραγωγή, από την κάθε κατηγορία εκτάσεων
το κόστος εγκατάστασης (αρχική επένδυση) των αιολικών πάρκων, στην
κάθε κατηγορία εκτάσεων
την τιμή διάθεσης της ηλεκτρικής MWh, από τα αιολικά πάρκα της κάθε
κατηγορίας, ώστε η αρχικές επενδύσεις να αποπληρωθούν σε 10 έτη

Η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές αυτές ακολουθεί κατανομή Rayleigh και δίνονται:

τραχύτητα εδάφους	$a = 0,15$
ταχύτητα έναρξης	$v_s = 5 \text{ m/s}$
ονομαστική ταχύτητα	$v_n = 15 \text{ m/s}$
ταχύτητα αποσύνδεσης	$v_l = 25 \text{ m/s}$
ονομαστική απόδοση δρομέα	$C_{pn} = 45 \%$
απόδοση ηλεκτροκινητήρα	$\eta_{el} = 85 \%$
ύψος Α/Γ	100 m

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Αρχικά υπολογίζονται οι κατανομές ταχυτήτων του ανέμου, στις παραπάνω περιοχές και σε ύψος 100 m.

		1 ^η κατηγορία	2 ^η κατηγορία	3 ^η κατηγορία	4 ^η κατηγορία
vi, m/s	vhi, m/s	hi	hi	hi	hi
3	4,2	0,0348	0,0398	0,0469	0,0548
4	5,7	0,0444	0,0505	0,0590	0,0682
5	7,1	0,0526	0,0593	0,0683	0,0779
6	8,5	0,0590	0,0658	0,0747	0,0837
7	9,9	0,0635	0,0700	0,0781	0,0858
8	11,3	0,0662	0,0720	0,0787	0,0844
9	12,7	0,0671	0,0718	0,0767	0,0801
10	14,1	0,0664	0,0697	0,0726	0,0736
11	15,5	0,0642	0,0661	0,0669	0,0656
12	17,0	0,0609	0,0613	0,0601	0,0569
13	18,4	0,0566	0,0556	0,0527	0,0480
14	19,8	0,0516	0,0495	0,0452	0,0394
15	21,2	0,0463	0,0432	0,0379	0,0316
16	22,6	0,0409	0,0370	0,0312	0,0247
17	24,0	0,0355	0,0311	0,0251	0,0189
18	25,4	0,0303	0,0257	0,0198	0,0141

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος των πτερυγίων, ώστε η ονομαστική ισχύς των Α/Γ να είναι 2 MW, στα συγκεκριμένα αιολικά πεδία (κατηγορίες περιοχών).

Σημειώνεται ότι οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου v_{hi} , του παραπάνω Πίνακα είναι ανεξάρτητες του πεδίου και αυτό που μεταβάλλεται από κατηγορία σε κατηγορία περιοχών είναι η συχνότητα με την οποία εμφανίζεται η κάθε ταχύτητα ανέμου.

Η κάθε ταχύτητα ανέμου “μεταφέρει” μία συγκεκριμένη ειδική ισχύ (δεύτερη στήλη του Πίνακα που ακολουθεί) από την οποία η Α/Γ μπορεί να προσλάβει ένα μέρος της (P^*_{oi} - τέταρτη στήλη) ανάλογα με το συντελεστή απόδοσης της Α/Γ (τρίτη στήλη) και την περιοχή ταχυτήτων ανέμου (αν δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται στην περιοχή σταθερής απόδοσης ή στην περιοχή σταθερής ισχύος).

Η ειδική ισχύς που προσλαμβάνει η Α/Γ (P^*_{oi}) πολλαπλασιάζεται με την επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια της (πέμπτη στήλη), η οποία υπολογίζεται έτσι ώστε στην περιοχή σταθερής ισχύος η ονομαστική ισχύς της Α/Γ (P_{oi} – έκτη στήλη) να είναι ίση με 2 MW. Έτσι, η τιμή των 2.151 m², για την επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια προέκυψε από το πηλίκο:

$$A = 2 \text{ MW} / 0,93 \text{ kW/m}^2 = 2.151 \text{ m}^2$$

και είναι ανεξάρτητη του πεδίου στο οποίο θα εγκατασταθεί η Α/Γ.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

vhi, m/s	Pi, kW/m2	Cp, %	P*oi, kW/m2	A,m2	Poi, MW
5,7	0,1	45,0	0,05	2151	0,1
7,1	0,2	45,0	0,10	2151	0,2
8,5	0,4	45,0	0,17	2151	0,4
9,9	0,6	45,0	0,27	2151	0,6
11,3	0,9	45,0	0,40	2151	0,9
12,7	1,3	45,0	0,57	2151	1,2
14,1	1,7	45,0	0,78	2151	1,7
15,5	2,3	40,5	0,93	2151	2,0
17,0	3,0	31,2	0,93	2151	2,0
18,4	3,8	24,5	0,93	2151	2,0
19,8	4,7	19,6	0,93	2151	2,0
21,2	5,8	16,0	0,93	2151	2,0
22,6	7,1	13,2	0,93	2151	2,0
24,0	8,5	11,0	0,93	2151	2,0

Από τη στιγμή που η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια είναι 2.151 m², η διάμετρος τους είναι:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}} = 52,3 \text{ m}$$

Η έκταση που απαιτεί μία τέτοια Α/Γ για την εγκατάσταση της, κατά μέσο, όρο είναι (10 x 52,3) x (3 x 52,3) = 82.204 m² = 82,2 στρ. Οπότε το πλήθος των Α/Γ που μπορούν να εγκατασταθούν στις κατηγορίες εκτάσεων της Νότιας Εύβοιας είναι:

1 ^η κατηγορία:	16.000 / 82,2 = 195	2 ^η κατηγορία:	26.000 / 82,2 = 316
3 ^η κατηγορία:	44.500 / 82,2 = 541	4 ^η κατηγορία:	69.500 / 82,2 = 845

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Η ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγει μία Α/Γ εγκατεστημένη σε μία από τις παραπάνω περιοχές, στη διάρκεια ενός έτους θα είναι:

		1 ^η κατηγορία		2 ^η κατηγορία		3 ^η κατηγορία		4 ^η κατηγορία	
vhi, m/s	Poi, MW	hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh
5,7	0,1	0,0444	35,4	0,0505	40,2	0,0590	46,9	0,0682	54,3
7,1	0,2	0,0526	81,8	0,0593	92,2	0,0683	106,2	0,0779	121,1
8,5	0,4	0,059	158,6	0,0658	176,8	0,0747	200,8	0,0837	225,0
9,9	0,6	0,0635	271,0	0,07	298,7	0,0781	333,3	0,0858	366,0
11,3	0,9	0,0662	421,7	0,072	458,7	0,0787	501,1	0,0844	537,4
12,7	1,2	0,0671	608,6	0,0718	651,2	0,0767	695,4	0,0801	726,3
14,1	1,7	0,0664	826,1	0,0697	867,2	0,0726	902,9	0,0736	915,4
15,5	2,0	0,0642	956,1	0,0661	984,4	0,0669	995,9	0,0656	977,0
17,0	2,0	0,0609	907,1	0,0613	913,1	0,0601	895,0	0,0569	847,0
18,4	2,0	0,0566	843,1	0,0556	828,2	0,0527	785,3	0,0480	714,6
19,8	2,0	0,0516	768,6	0,0495	737,3	0,0452	673,5	0,0394	587,5
21,2	2,0	0,0463	689,6	0,0432	643,5	0,0379	565,0	0,0316	471,0
22,6	2,0	0,0409	609,2	0,037	551,1	0,0312	464,0	0,0247	368,5
24,0	2,0	0,0355	528,8	0,0311	463,2	0,0251	373,2	0,0189	281,5
		7705,6		7705,8		7538,6		7192,5	

Από τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι οι συγκεκριμένες Α/Γ είναι περισσότερο κατάλληλες στην κατηγορία πεδίων 2, με μέση ταχύτητα ανέμου 10,7 m/s. Αυτό συμβαίνει γιατί η κατανομή ταχυτήτων του ανέμου είναι μετατοπισμένη προς χαμηλότερες τιμές, σε σχέση το πεδίο 1, στην περιοχή δηλαδή που η Α/Γ είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί τον άνεμο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 7

Έτσι, η συνολική ετήσια ηλεκτροπαραγωγή σε κάθε κατηγορία πεδίων θα είναι:

1 ^η κατηγορία:	7.705,6 MWh/έτος/ΑΓ x 195 ΑΓ = 1.502,6 GWh/έτος
2 ^η κατηγορία:	7.705,8 MWh/έτος/ΑΓ x 316 ΑΓ = 2.435,0 GWh/έτος
3 ^η κατηγορία:	7.538,6 MWh/έτος/ΑΓ x 541 ΑΓ = 4.078,4 GWh/έτος
4 ^η κατηγορία:	7.182,5 MWh/έτος/ΑΓ x 845 ΑΓ = <u>6.077,6 GWh/έτος</u>
	14.093,7 GWh/έτος

Το κόστος εγκατάστασης των Α/Γ, στα παραπάνω πεδία είναι:

Ειδικό κόστος Α/Γ:

$$K_{ΑΓ} = \frac{870000}{621 + 2000^{2,05}} + 740 = 740,4 \text{ €/kW}$$

Ειδικό ολικό κόστος Α/Γ:

$$K_{ΑΓ,ολ.} = 740,4 \times 3,971 \times 2.000^{-0,14} = 1.014,4 \text{ €/kW}$$

Ολικό κόστος Α/Γ:

$$K_{ΑΓ,ολ.} = 1.014,4 \times 2.000 = 2,03 \text{ εκ. €}$$

Αρχικό κόστος αιολικού πάρκου:

1 ^η περιοχή	$K_{ΑΠ} = 195 \times 2,03 =$	396 εκ. €
2 ^η περιοχή	$K_{ΑΠ} = 316 \times 2,03 =$	641 εκ. €
3 ^η περιοχή	$K_{ΑΠ} = 541 \times 2,03 =$	1,10 δις €
4 ^η περιοχή	$K_{ΑΠ} = 845 \times 2,03 =$	<u>1,72 δις €</u>
		3,85 δις €

Τέλος, η τιμή διάθεσης της ηλεκτρικής MWh, προκειμένου η αρχική να αποσβεστεί σε 10 έτη είναι:

$$1^{\text{η}} \text{ περιοχή } 396 \text{ εκ. €} / (1.502,6 \text{ GWh/έτος} \times 10) \text{ GWh} = 26,3 \text{ €}$$

$$2^{\text{η}} \text{ περιοχή } 26,3 \text{ €}$$

$$3^{\text{η}} \text{ περιοχή } 26,9 \text{ €}$$

$$4^{\text{η}} \text{ περιοχή } 28,2 \text{ €}$$

Δείχνοντας η μέση ταχύτητα ανέμου, πάνω από το όριο των 9 m/s δεν επιδρά σημαντικά στην οικονομική αποτελεσματικότητα των επενδύσεων σε αιολική ενέργεια.