



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

---

## **Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας**

### **Ενότητα 2<sup>η</sup> : Αιολική Ενέργεια**

Αναπλ. Καθηγητής: Γεώργιος Μαρνέλλος

**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**

---

## Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο **«Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας»** έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



## Περιεχόμενα

1.	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	4
1.1	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ .....	4
1.1.1	Ταχύτητα και Ενέργεια του Ανέμου.....	4
1.1.2	Συντελεστή ισχύος .....	6
1.1.3	Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου.....	8
1.1.4	Χάρτες Αιολικού Δυναμικού.....	11
1.1.5	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 .....	12
1.1.6	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	14
1.1.7	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	15
1.2	ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ.....	17
1.2.1	Ανάλυση τμημάτων .....	18
1.2.2	Τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα 19	
1.2.3	Ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών.....	21
1.2.4	Λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής .....	22
1.2.5	Τέσσερις περιοχές ταχυτήτων του ανέμου.....	24
1.2.6	Απόσταση ΑΓ .....	27
1.2.7	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	27
1.2.8	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	30
1.2.9	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	31
1.3	ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	33
1.3.1	ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ .....	34

# 1. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Το παγκόσμιο θεωρητικό δυναμικό της αιολικής ενέργειας εκτιμάται σήμερα σε 55 Gtoe και αντιστοιχεί στο 550 % του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου. Το τεχνικό δυναμικό, δηλαδή αυτό που θεωρείται τεχνολογικά εφικτό να αξιοποιηθεί εκτιμάται σε 5 Gtoe ή το 50 % του παγκόσμιου ενεργειακού ισοζυγίου.

## 1.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) “συλλαμβάνουν” την κινητική ενέργεια του ανέμου μέσω ενός δρομέα (άτρακτος και πτερύγια) που φέρει δύο ή περισσότερα πτερύγια και είναι συνδεδεμένος με μία ηλεκτρική γεννήτρια. Οι Α/Γ τοποθετούνται σε ψηλούς πύργους, γιατί η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει με το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Οι Α/Γ εγκαθίστανται, συνήθως, σε συστοιχίες, στα πλαίσια αιολικών πάρκων. Είναι αυτονόητο ότι όσο ισχυρότεροι άνεμοι επικρατούν στη θέση που εγκαθίσταται ένα αιολικό πάρκο, τόσο περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια θα παράγει αυτό, στη διάρκεια ενός έτους.

### 1.1.1 Ταχύτητα και Ενέργεια του Ανέμου

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

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

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

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

όπου:  $\dot{m} = \rho \times V \times A$  [kg/s] η μαζική παροχή του αέρα μέσω της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια του δρομέα,

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]: η πυκνότητα του αέρα (σε κανονικές συνθήκες – πίεση 1 atm και θερμοκρασία 25 °C – η πυκνότητα του αέρα είναι 1,225 Kg/m<sup>3</sup>)

$V$  [m/s]: η ταχύτητα του ανέμου και,

$A$  [m<sup>2</sup>]: 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, με ταχύτητα  $V$ , παίρνει τη μορφή:

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

από την οποία φαίνεται ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του και ευθέως ανάλογη της πυκνότητας του. Το αιολικό δυναμικό μίας θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου αξιολογείται στη βάση της ειδικής ισχύος  $p$  [ $W/m^2$ ] του ανέμου στην περιοχή αυτή, δηλαδή της ισχύος του ανέμου ανά μονάδα επιφάνειας που δυνητικά θα σαρώνεται από τα πτερύγια. Η ειδική ισχύς προκύπτει από τη διαίρεση της Εξίσωσης 3 με την επιφάνεια  $A^1$ , οπότε προκύπτει:

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

Από την ισχύ που διαθέτει ο άνεμος, λόγω της ταχύτητας του, μόνο ένα μέρος μπορεί να προσληφθεί από τα πτερύγια της Α/Γ (του δρομέα). Η ισχύς  $P_0$  που προσλαμβάνεται από τα πτερύγια είναι ίση με τη διαφορά της ισχύος του ανέμου πριν και μετά το δίσκο που σαρώνεται από αυτά. Αν μετά την Α/Γ η ταχύτητα του ανέμου έχει ελαττωθεί σε  $V_0$ , η ισχύς που προσέλαβαν τα πτερύγια είναι:

$$5. P_0 = \frac{1}{2}\dot{m}(V^2 - V_0^2) \quad [W]$$

όπου:  $V$  [ $m/s$ ] η ταχύτητα του ανέμου πριν από το επίπεδο που σαρώνουν τα πτερύγια.

$V_0$  [ $m/s$ ] η ταχύτητα του ανέμου μετά από αυτό.

Η Α/Γ αναχαιτίζει τη ροή του ανέμου σε όλη την έκταση που σαρώνεται από τα πτερύγια της, κατά την περιστροφή τους, παρά το γεγονός ότι διαθέτει συνήθως 2 – 3 πτερύγια, που καλύπτουν μόνο το 5 – 10 % της επιφάνειας αυτής. Αγνοώντας φαινόμενα ρευστοδυναμικής και εξετάζοντας μακροσκοπικά το επίπεδο που σαρώνεται από τα πτερύγια, η ταχύτητα στο επίπεδο αυτό είναι ίση με τη μέση τιμή  $V_{average}$  των ταχυτήτων του ανέμου, πριν και μετά το επίπεδο αυτό:

$$6. V_{average} = \frac{V+V_0}{2} \quad [m/s]$$

Οπότε η μαζική παροχή του ανέμου διαμέσου των πτερυγίων είναι:

$$7. \dot{m} = \rho \times A \times \frac{V+V_0}{2} \quad [kg/s]$$

και η ισχύς που προσλαμβάνεται από τα πτερύγια, γίνεται:

$$8. P_0 = \frac{1}{2}\rho \times A \times \frac{V+V_0}{2} \times (V^2 - V_0^2) \quad [W]$$

ή ισοδύναμα:

---

1. Η επιφάνεια που σαρώνεται από το δρομέα υπολογίζεται από τη σχέση:  $A = \frac{\pi}{4}D^2$  [ $m^2$ ]  
όπου  $D$  η διάμετρος του δρομέα (= 2 x μήκος πτερυγίου).

$$9. P_0 = \frac{1}{2} \rho \times A \times V^3 \times \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right)\left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2} \quad [W]$$

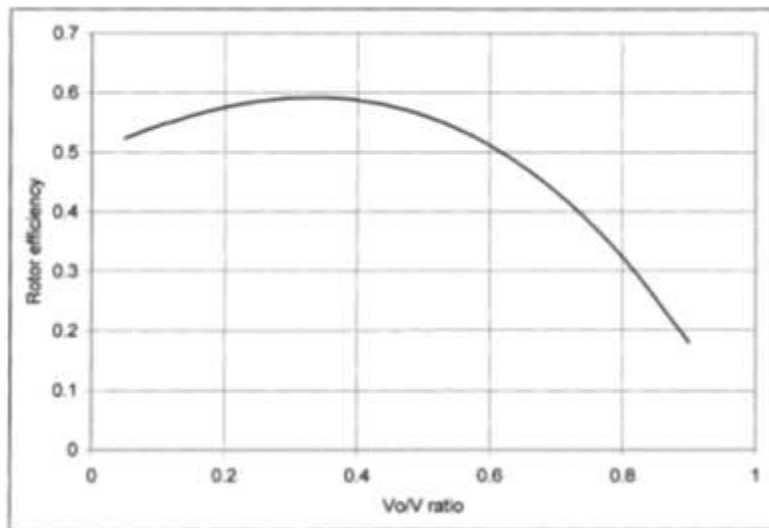
### 1.1.2 Συντελεστή ισχύος

Η παράσταση:

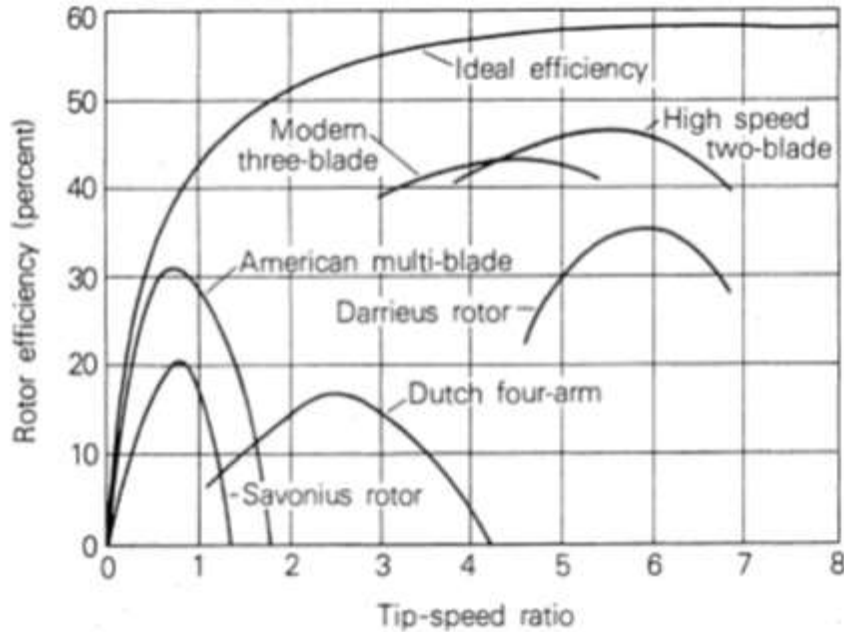
$$10. C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right)\left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2}$$

ορίζει το **συντελεστή ισχύος** (power coefficient)  $C_p$  του δρομέα ή αλλιώς την **απόδοση του δρομέα** (rotor efficiency). Η γραφική παράσταση της Εξίσωσης 10, ως προς το λόγο  $V_0/V$ , παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 και εμφανίζει απλό μέγιστο ίσο με 0,59, για  $V_0/V = 1/3$ . Η τιμή αυτή του 0,59 ή 59 % αποτελεί και τη **θεωρητική μέγιστη απόδοση** του δρομέα και ονομάζεται **απόδοση Betz** ή **όριο του Betz** (από το όνομα του φυσικού που απέδειξε την ύπαρξη του). Το όριο του Betz δηλώνει ότι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να προσληφθεί από τον άνεμο δεν μπορεί να ξεπεράσει το 59 % της ισχύος που αυτό μεταφέρει και η μέγιστη αυτή απόληψη ισχύος συμβαίνει όταν η ταχύτητα του ανέμου μετά την  $A/\Gamma$  είναι ίση με το 1/3 της ταχύτητας του ανέμου πριν από την  $A/\Gamma$ .

Στην πράξη, το όριο του Betz αποτελεί μία πολύ υψηλή τιμή απόδοσης, που δεν μπορεί να επιτευχθεί. Σε πραγματικές εφαρμογές, η απόδοση του δρομέα προσεγγίζει το 50 % για  $A/\Gamma$  υψηλής ταχύτητας δύο πτερυγίων και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ του 20 και του 40 % για συμβατικές  $A/\Gamma$  δύο ή τριών πτερυγίων.



Σχήμα 1. Μεταβολή του συντελεστή απόδοσης του δρομέα με τον λόγο των ταχυτήτων του ανέμου μετά και πριν την  $A/\Gamma$ .



Σχήμα 2 Τυπικές τιμές του συντελεστή απόδοσης τους δρομέα, συναρτήσει του λόγου TSR και για διάφορους τύπου Α/Γ.

Έτσι, με βάση τον ορισμό της Εξίσωσης 10, η ισχύς που παράγεται από την Α/Γ (Εξίσωση 9) δίνεται από τη σχέση:

$$11. P_o = C_p \frac{1}{2} \rho \times A \times V^3 \quad [W]$$

Ο συντελεστής απόδοσης του δρομέα επηρεάζεται από την ταχύτητα περιστροφής του σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, που προσπίπτει στην Α/Γ. Για να εκφραστεί η σχέση αυτή ορίζεται ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου προς τη γραμμική ταχύτητα του ανέμου (tip-speed ratio – TSR) ως εξής:

$$12. TSR = \frac{V_{tip}}{V} = \frac{\omega \times R}{V}$$

όπου R [m] το μήκος του πτερυγίου και  $\omega$  η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του. Μία τυπική απεικόνιση της μεταβολής της απόδοσης  $C_p$  του δρομέα με το λόγο TSR, για διάφορους τύπους Α/Γ, φαίνεται στο Σχήμα 2.

Τέλος, όπως φαίνεται από τη μέχρι τώρα ανάλυση, η ισχύς που μεταφέρεται από τον άνεμο (Εξισώσεις 2, 3 και 4), όπως και η ισχύς που προσλαμβάνεται από την Α/Γ (Εξισώσεις 5, 8, 9 και 11) επηρεάζεται από την πυκνότητα του αέρα. Όπως αναφέρθηκε, η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες (πίεση 1 atm και θερμοκρασία 25 °C) είναι 1,225 kg/m<sup>3</sup>. Θεωρώντας ότι ο αέρας προσεγγίζει τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων, στις συνήθεις συνθήκες που επικρατούν κοντά στην επιφάνεια της γης, η πυκνότητα του θα μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία και την πίεση, σύμφωνα με τη σχέση:

$$13. \rho = \frac{p}{RT} \quad [kg/m^3]$$

όπου  $p$ , η πίεση [Pa], T η απόλυτη θερμοκρασία [K] και R η παγκόσμια σταθερά των

αερίων [8,314 J/molK]. Στην πράξη, η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται σχεδόν ανεπαίσθητα με τη θερμοκρασιακή διακύμανση των εποχών του έτους, ενδέχεται όμως η μεταβολή της πυκνότητας να παίζει κάποιο ρόλο, στην περίπτωση της μεταβολής της με το υψόμετρο, από την επιφάνεια της θάλασσας. Με την αύξηση του υψομέτρου, η θερμοκρασία ελαττώνεται ανεπαίσθητά, η πίεση όμως ελαττώνεται αισθητά. Η συνδυασμένη επίδραση του υψομέτρου, στη μεταβολή της πυκνότητας του αέρα περιγράφεται από τη σχέση:

$$14. \rho = \rho_0 - 1,194 \times 10^{-4} \times H \quad [\text{kg/m}^3]$$

όπου:  $\rho_0$ : η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες (1,225 kg/m<sup>3</sup>).

H: το υψόμετρο [m].

Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται ότι σε ύψος 500 m, η πυκνότητα του αέρα έχει ελαττωθεί σε 1,165 kg/m<sup>3</sup>, δηλαδή κατά περίπου 5 %, επιφέροντας μία ανάλογη μείωση στην ισχύ που αυτός μεταφέρει.

### 1.1.3 Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου, σε έναν τόπο, μεταβάλλεται κάθε στιγμή και η κατανομή της μεταβάλλεται επίσης 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, η οποία ορίζεται από την εξίσωση:

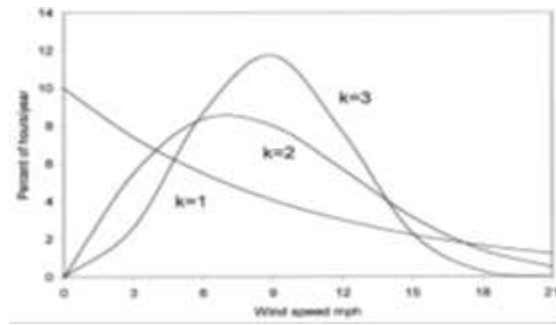
$$15. h_i = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V_i}{c}\right)^k} \quad [\%]$$

όπου:

- k: ο παράγοντας σχήματος της κατανομής Weibull [αδιάστατος].
- C: ο παράγοντας μεγέθους (έντασης) της κατανομής Weibull [m/s], ο οποίος συνδέεται με τη μέση ταχύτητα του ανέμου, σε κάθε γεωγραφικό τόπο.
- $h_i$  [%]: η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να είναι ίση με  $V_i$  [m/s] ή η % συχνότητα της ταχύτητας  $V_i$ .

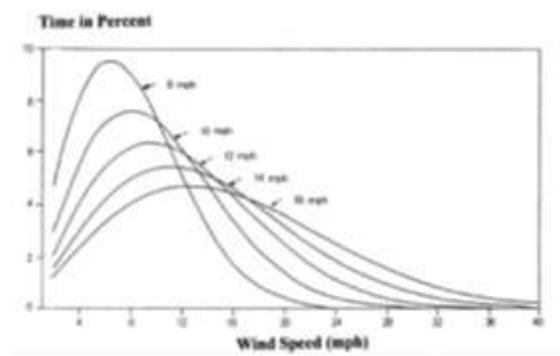
Έτσι, αν η πιθανότητα της  $V_i = 15$  m/s (54 km/h) είναι 0,08 ή 8 %, αυτό σημαίνει ότι το 8 % των ωρών του έτους η ταχύτητα του ανέμου έχει την παραπάνω τιμή και λαμβάνοντας υπόψη ότι το έτος έχει  $365 \times 24 = 8.760$  ώρες, ο άνεμος φυσά με ταχύτητα 15 m/s για  $0,08 \times 8.760 = 700$  ώρες κάθε έτος. Η γραφική απεικόνιση της κατανομής Weibull για τυπικές τιμές των σταθερών k και c παριστάνεται στα Σχήματα 3 και 4.



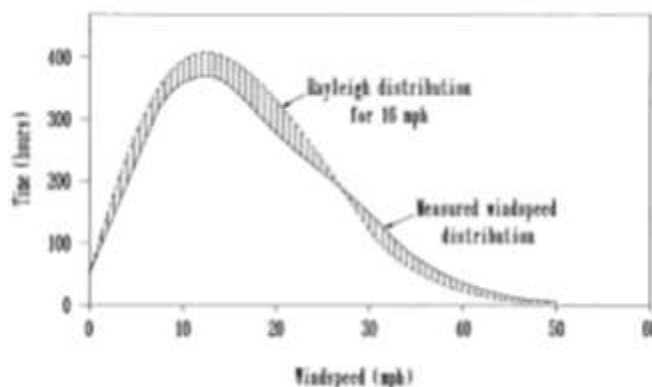


Σχήμα 3. Κατανομή Weibull για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου σχήματος  $k$

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 (οι τιμές αυτές της έντασης αφορούν σε τόπους με πραγματικό αιολικό ενδιαφέρον – χαμηλότερες ή ακόμη και υψηλότερες τιμές του  $c$  καθιστούν τους αντίστοιχους τόπους ασύμφορους, όσον αφορά στην πραγματική εκμετάλλευση του αιολικού τους δυναμικού) και η θεωρητική κατανομή Weibull πολύ λίγο αποκλίνει από την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου στις περιοχές αυτές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 4. Κατανομή Weibull για παράγοντα σχήματος  $k = 2$  και για διαφορετικές τιμές του παράγοντα έντασης  $c$



Σχήμα 5. Απόκλιση της θεωρητικής κατανομής Weibull (ή Rayleigh) από την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου σε περιοχή της Αγγλίας

Για  $k = 2$  η κατανομή Weibull μεταπίπτει στην κατανομή Rayleigh, με γενικό τύπο:

$$16. h_i = 2\lambda^2 V_i e^{-(\lambda V_i)^2} \quad [\%]$$

όπου  $\lambda = 1/c$  [s/m].

**Οι ετήσιες κατανομές ταχυτήτων του ανέμου χαρακτηρίζονται από:**

1. Την συχνότερη ή αλλιώς την **επικρατέστερη τιμή** της κατανομής, η οποία στην περίπτωση αυτή αναφέρεται σε εκείνη την ταχύτητα ανέμου  $V_i$ , που εμφανίζει τη υψηλότερη πιθανότητα (συχνότητα) εμφάνισης (αυτή που αντιστοιχεί στο μέγιστο της κατανομής).
2. Τη **μέση ετήσια ταχύτητα** του ανέμου, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$17. V_{ave} = \sum h_i V_i \quad [\text{m/s}]$$

και η οποία για κατανομή Weibull με παράγοντα σχήματος  $k \approx 2$  συνδέεται με την παράμετρο έντασης με τη σχέση:

$$18. V_{ave} = 0,90 \times c$$

3. Τη **μέση κυβική ταχύτητα** (root mean cube – rmc)  $V_{rmc}$ , η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$19. V_{rmc} = \sqrt[3]{\sum h_i V_i^3} \quad [\text{m/s}]$$

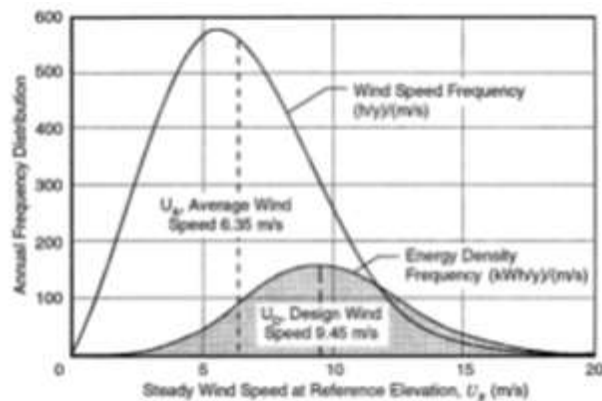
Για το λόγο ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας, η μέση κυβική ταχύτητα παρέχει ένα γρήγορο τρόπο υπολογισμού του ειδικού (ανά μονάδα επιφάνειας) αιολικού δυναμικού, μίας τοποθεσίας, μέσω της σχέσης:

$$20. \varepsilon = 365 \times 24 \times P_{rmc} \quad [\text{Wh/m}^2]$$

όπου:

$$21. P_{rmc} = \frac{1}{2} \rho V_{rmc}^3 \quad [\text{W/m}^2]$$

η ετήσια μέση κυβική ισχύς του ανέμου, στη συγκεκριμένη τοποθεσία.

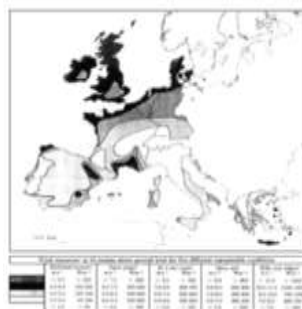


Σχήμα 6. Σχετική μετατόπιση κατανομής ταχυτήτων ανέμου και ενεργειακής κατανομής

Ενώ είναι σαφές ότι οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου παρέχουν τη δυνατότητα υψηλότερης ενεργειακής συγκομιδής, εντούτοις οι ταχύτητες εμφανίζονται σε χαμηλότερες συχνότητες από ότι οι χαμηλές ταχύτητες. Προκειμένου να γίνει αντιληπτό σε ποιο διάστημα ταχυτήτων ανέμου θα πρέπει να εστιάζεται η απόληψη αιολικής ενέργειας σε έναν τόπο, αντίστοιχα προς την ετήσια κατανομή ταχυτήτων, ορίζεται και η ετήσια κατανομή αιολικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6. Για το λόγο ότι οι υψηλότερες ταχύτητες ανέμου διαθέτουν υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο, η καμπύλη της κατανομής ενεργειών παρουσιάζει μέγιστο δεξιότερα του μέγιστου της κατανομής ταχυτήτων.

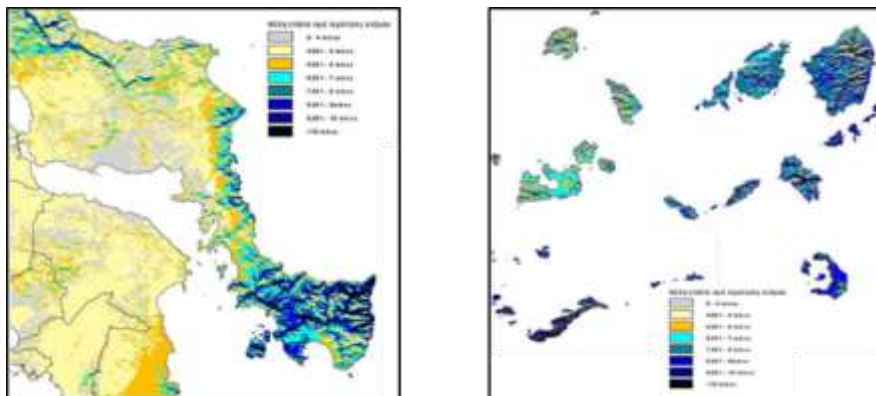
#### 1.1.4 Χάρτες Αιολικού Δυναμικού

Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου στηρίζεται πάντα σε επιτόπου μετρήσεις έντασης του ανέμου, ώστε να βελτιστοποιηθεί η χωροθεσία και το μέγεθος των Α/Γ, σε σχέση με την τοπική γεωγραφία, τις συχνότερες κατευθύνσεις του ανέμου και την κατανομή εντάσεων (ταχυτήτων) ανά κατεύθυνση. Μετρήσεις αυτού του τύπου και σε σειρές ετών έχουν πραγματοποιηθεί από κυβερνητικούς ή ερευνητικούς φορείς, με αποτέλεσμα να είναι πλέον διαθέσιμοι χάρτες αιολικού δυναμικού όπως αυτός του Σχήματος 7, για την Ευρώπη, ο οποίος έχει καταρτιστεί από το πανεπιστήμιο του Riso της Δανίας. Στο υπόμνημα των χαρτών αυτού του τύπου σημειώνονται οι εκτάσεις, σε στρέμματα, στις οποίες οι μέσες ετήσιες ταχύτητες ανέμου υπερβαίνουν κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Από τις μέσες αυτές ετήσιες τιμές ταχύτητας ανέμου και θεωρώντας ότι οι ταχύτητες ανέμου σε μία περιοχή ακολουθούν κατανομή Rayleigh, μπορούν να εξαχθούν χονδρικές εκτιμήσεις όσον αφορά στο αιολικό δυναμικό των περιοχών αυτών, όπως παρουσιάζεται στο Παράδειγμα 1.



Σχήμα 7. Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ευρώπης

Από το Σχήμα 7 φαίνεται ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι περιοχές υψηλής έντασης αιολικού δυναμικού περιλαμβάνουν το σύνολο σχεδόν της Ιρλανδίας και της Μεγάλης Βρετανίας, τη βόρεια ακτογραμμή της ηπειρωτικής Ευρώπης, από την Γαλλία έως το σύνολο της Δανικής χερσονήσου, η Γαλικία και τα Πυρηναία, στην Ισπανία, η νότια Γαλλία και τα Ελληνικά νησιά.



Σχήμα 8. Χάρτες αιολικού δυναμικού της Νότιας Εύβοιας και των Κυκλάδων

Ειδικότερα για την Ελλάδα, το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας έχει καταρτίσει αναλυτικούς χάρτες αιολικού δυναμικού της Ελληνικής επικράτειας και τους έχει αναρτήσει στον ιστοτόπο:

[http://www.cres.gr/kape/images/maps/img\\_pre.htm](http://www.cres.gr/kape/images/maps/img_pre.htm).

Παραδείγματα των χαρτών αυτών, για τις περιοχές υψηλού αιολικού ενδιαφέροντος δίνονται στο Σχήμα 8.

### 1.1.5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Στη Νότια Εύβοια<sup>2</sup> 16.000 στρέμματα έχουν μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 11,5 m/s. Θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές αυτές ακολουθεί κατανομή Rayleigh να σχεδιαστούν οι κατανομές ταχυτήτων και ενέργειας και να υπολογιστεί το ετήσιο ειδικό δυναμικό αιολικής ενέργειας.

#### ΛΥΣΗ

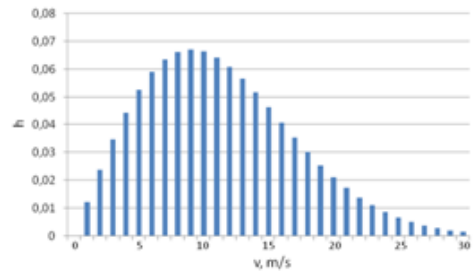
Η κατανομή Rayleigh είναι η κατανομή Weibull για παράγοντα σχήματος  $k = 2$ , για την οποία ισχύει:

$$c = V_{ave}/0,9 = 11,5/0,9 = 12,8 \text{ m/s}$$

Από την κατανομή Rayleigh για  $\lambda = 1/c = 0,078 \text{ s/m}$ , οι συχνότητες των ταχυτήτων στις περιοχές αυτές είναι:

<sup>2</sup> [www.cres.gr/kape/images/maps/img\\_pre.htm](http://www.cres.gr/kape/images/maps/img_pre.htm) (οι ταχύτητες ανέμου έχουν μετρηθεί σε ύψος 10 m).

$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$
1	0,0122	11	0,0642	21	0,0173
2	0,0239	12	0,0609	22	0,0139
3	0,0348	13	0,0566	23	0,0110
4	0,0444	14	0,0516	24	0,0086
5	0,0526	15	0,0463	25	0,0067
6	0,0590	16	0,0409	26	0,0051
7	0,0635	17	0,0355	27	0,0038
8	0,0662	18	0,0303	28	0,0028
9	0,0671	19	0,0255	29	0,0021
10	0,0664	20	0,0211	30	0,0015



Η αντίστοιχη κατανομή (ειδικής) ενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$e_i = (24 \times 365) \times h_i \times P_i = 8760 \times h_i \times (1/2 \times \rho \times v_i^3) \text{ [kWh/m}^2\text{/έτος]}$$

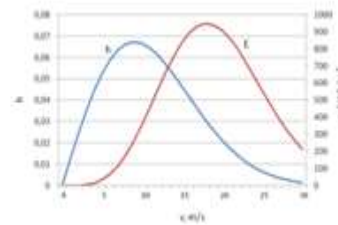
όπου:

$P_i$ : η ειδική ισχύς [Watt/m<sup>2</sup>].

$\rho$ : η πυκνότητα του αέρα (κατά παραδοχή στην επιφάνεια της θάλασσας,

$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ).

$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$ kWh/m <sup>2</sup> /έτος	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$ kWh/m <sup>2</sup> /έτος	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$ kWh/m <sup>2</sup> /έτος
1	0,1	11	458,6	21	858,2
2	1,0	12	564,2	22	794,3
3	5,0	13	666,8	23	720,3
4	15,3	14	760,1	24	640,4
5	35,2	15	838,7	25	558,5
6	68,3	16	898,0	26	478,1



7	116,9	17	935,0	27	401,9
8	181,9	18	948,4	28	331,9
9	262,6	19	938,6	29	269,3
10	356,2	20	907,5	30	214,9

14.226

**Το μέσο ετήσιο ειδικό δυναμικό αιολικής ενέργειας υπολογίζεται από την μέση κυβική ταχύτητα:**

$$v_{\text{rnc}} = (0,0122 \times 1^3 + 0,0239 \times 2^3 + \dots + 0,0021 \times 29^3 + 0,0015 \times 30^3)^{1/3} = 13,8 \text{ m/s}$$

Έτσι, η μέση ετήσια ειδική ισχύς είναι:

$$\rho_{\text{rnc}} = 1/2 \times \rho \times v_{\text{rnc}}^3 = 1,62 \text{ kW/m}^2$$

**και το μέσο ετήσιο δυναμικό αιολικής ενέργειας είναι:**

$$\epsilon_{\text{rnc}} = \rho_{\text{rnc}} \times 24 \times 365 = 14.226 \text{ kWh/m}^2$$

Από τα αποτελέσματα φαίνεται η εξαιρετική προσέγγιση της μέσης κυβικής ταχύτητας για τον υπολογισμό του ετήσιου ειδικού αιολικού δυναμικού μίας τοποθεσίας.

## 1.1.6 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Για τις ίδιες περιοχές της Νότιας Εύβοιας να σχεδιαστούν οι κατανομές ταχυτήτων και ενέργειας και να υπολογιστεί το ετήσιο ειδικό δυναμικό αιολικής ενέργειας, αν οι ταχύτητες του ανέμου ακολουθούν κατανομή Weibull με παράγοντα σχήματος  $k = 1,75$  και  $2,25$ .

### ΛΥΣΗ

Για τις κατανομές Weibull για παράγοντα σχήματος κοντά στην τιμή 2, ισχύει:

$$c = V_{\text{mean}}/0,9 = 11,5/0,9 = 12,8 \text{ m/s}$$

Από την κατανομή Weibull για  $k = 1,75$ , οι συχνότητες των ταχυτήτων και ειδικών ενεργειών στις περιοχές αυτές είναι:

$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$
1	0,0200	11	0,0567	21	0,0183	1	0,1	11	405,0	21	909,2
2	0,0328	12	0,0533	22	0,0155	2	1,4	12	494,5	22	884,2
3	0,0427	13	0,0495	23	0,0130	3	6,2	13	583,5	23	847,3
4	0,0503	14	0,0454	24	0,0108	4	17,3	14	668,0	24	800,6
5	0,0558	15	0,0411	25	0,0089	5	37,4	15	744,3	25	746,4
6	0,0595	16	0,0368	26	0,0073	6	69,0	16	809,2	26	687,0
7	0,0615	17	0,0326	27	0,0059	7	113,2	17	860,5	27	624,7
8	0,0620	18	0,0287	28	0,0048	8	170,4	18	896,5	28	561,3
9	0,0613	19	0,0249	29	0,0038	9	239,6	19	916,4	29	498,6
10	0,0594	20	0,0214	30	0,0030	10	318,8	20	920,4	30	438,1

15.269

ενώ για  $k = 2,25$ , οι συχνότητες των ταχυτήτων και ειδικών ενεργειών είναι:

$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$h_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$	$v_i, \text{ m/s}$	$e_i$
1	0,007265	11	0,071512	21	0,015391	1	0,0	11	510,7	21	764,8
2	0,017071	12	0,068323	22	0,01164	2	0,7	12	633,5	22	665,0
3	0,027695	13	0,063623	23	0,008609	3	4,0	13	750,0	23	562,0
4	0,038318	14	0,0578	24	0,006227	4	13,2	14	851,0	24	461,9
5	0,048281	15	0,051263	25	0,004404	5	32,4	15	928,3	25	369,3
6	0,057027	16	0,04441	26	0,003046	6	66,1	16	976,0	26	287,3
7	0,064106	17	0,037594	27	0,00206	7	118,0	17	991,0	27	217,6
8	0,069197	18	0,031106	28	0,001363	8	190,1	18	973,3	28	160,5
9	0,072124	19	0,025161	29	0,000881	9	282,1	19	926,0	29	115,3
10	0,072857	20	0,0199	30	0,000557	10	390,9	20	854,2	30	80,7

13.176

και παριστάνονται στο ακόλουθα διαγράμματα. Η μέση κυβική ταχύτητα για τις τρεις τιμές του παράγοντα σχήματος είναι:

$$k = 1,75 \quad V_{\text{rnc}} = 14,2 \text{ m/s}$$

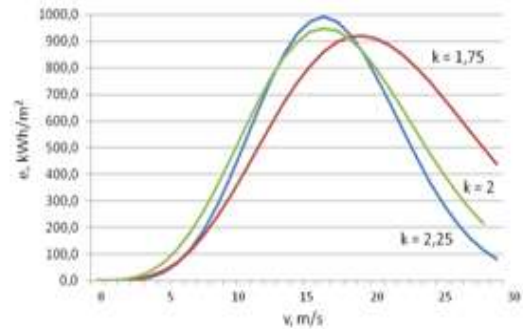
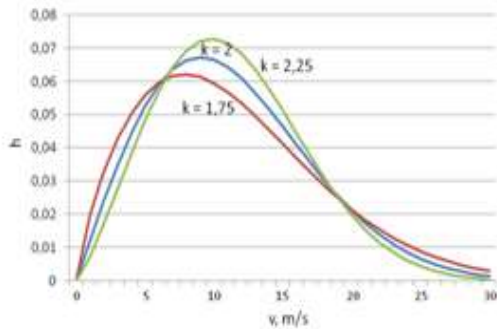
$$k = 2,00 \quad V_{\text{rnc}} = 13,8 \text{ m/s}$$

$$k = 2,25 \quad V_{\text{rnc}} = 13,5 \text{ m/s}$$

$$\text{και η μέση ετήσια ειδική ισχύς:} \quad k = 1,75 \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,74 \text{ kW/m}^2$$

$$k = 2,00 \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,62 \text{ kW/m}^2$$

$$k = 2,25 \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,50 \text{ kW/m}^2$$



Οπότε, το μέσο ετήσιο δυναμικό αιολικής ενέργειας διαμορφώνεται στις τιμές:

$$k = 1,75 \quad \epsilon_{\text{rmc}} = 15.269 \text{ kWh/m}^2$$

$$k = 2,00 \quad \epsilon_{\text{rmc}} = 14.226 \text{ kWh/m}^2$$

$$k = 2,25 \quad \epsilon_{\text{rmc}} = 13.176 \text{ kWh/m}^2$$

Από τα παραπάνω σχήματα φαίνεται ότι η αύξηση της τιμής του παράγοντα σχήματος για την ίδια τιμή του παράγοντα έντασης, μετατοπίζει την κατανομή συχνοτήτων προς χαμηλότερες τιμές ταχύτητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη κατανομής ειδικών ενεργειών να ελαττώνεται. Επίσης ελαττώνεται και η μέση κυβική ταχύτητα η οποία με τη σειρά της ελαττώνει και το ειδικό ετήσιο αιολικό δυναμικό της συγκεκριμένης θέσης.

### 1.1.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Εκτός από τα 16.000 στρέμματα του Παραδείγματος 1, στη Νότια Εύβοια υπάρχουν και οι ακόλουθες εκτάσεις:

26.000 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10,7 m/s

44.500 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,8 m/s

69.500 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,0 m/s

Θεωρώντας ότι η ταχύτητα του ανέμου στις περιοχές αυτές ακολουθεί κατανομή Rayleigh να σχεδιαστούν οι κατανομές ταχυτήτων και ενέργειας και να υπολογιστεί το ετήσιο ειδικό δυναμικό αιολικής ενέργειας.

#### ΛΥΣΗ

Ο παράγοντας έντασης, στις τέσσερις περιπτώσεις είναι:

$$\text{μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου } 11,5 \text{ m/s} \quad c = V_{\text{mean}}/0,9 = 11,5/0,9 = 12,8 \text{ m/s}$$

$$\text{μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου } 10,7 \text{ m/s} \quad c = V_{\text{mean}}/0,9 = 10,7/0,9 = 11,9 \text{ m/s}$$

$$\text{μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου } 9,8 \text{ m/s} \quad c = V_{\text{mean}}/0,9 = 9,8/0,9 = 10,9 \text{ m/s}$$

μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,0 m/s

$$c = V_{\text{mean}}/0,9 = 9,0/0,9 = 10,0 \text{ m/s}$$

Οι συχνότητες των ταχυτήτων και ειδικών ενεργειών για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10,7 m/s είναι:

$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$
1	0,0140	11	0,0661	21	0,0131	1	0,1	11	472,2	21	652,0
2	0,0275	12	0,0613	22	0,0101	2	1,2	12	568,4	22	579,3
3	0,0398	13	0,0556	23	0,0077	3	5,8	13	655,9	23	503,4
4	0,0505	14	0,0495	24	0,0058	4	17,4	14	728,9	24	428,0
5	0,0593	15	0,0432	25	0,0042	5	39,8	15	782,3	25	356,3
6	0,0658	16	0,0370	26	0,0031	6	76,3	16	813,3	26	290,5
7	0,0700	17	0,0311	27	0,0022	7	128,9	17	820,7	27	232,2
8	0,0720	18	0,0257	28	0,0015	8	197,7	18	805,3	28	182,0
9	0,0718	19	0,0209	29	0,0011	9	280,8	19	769,4	29	139,9
10	0,0697	20	0,0167	30	0,0007	10	374,2	20	716,9	30	105,6

ενώ για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,8 m/s, οι συχνότητες των ταχυτήτων και ειδικών ενεργειών είναι:

$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$
1	0,016726	11	0,066873	21	0,00859	1	0,1	11	477,6	21	426,8
2	0,032617	12	0,060089	22	0,006261	2	1,4	12	557,1	22	357,7
3	0,046905	13	0,052721	23	0,004479	3	6,8	13	621,5	23	292,4
4	0,058955	14	0,045214	24	0,003144	4	20,2	14	665,7	24	233,2
5	0,068306	15	0,037933	25	0,002166	5	45,8	15	686,9	25	181,6
6	0,074705	16	0,031153	26	0,001465	6	86,6	16	684,6	26	138,2
7	0,078106	17	0,025058	27	0,000973	7	143,7	17	660,6	27	102,8
8	0,078656	18	0,01975	28	0,000635	8	216,1	18	618,0	28	74,8
9	0,076668	19	0,015259	29	0,000406	9	299,9	19	561,6	29	53,2
10	0,072574	20	0,01156	30	0,000256	10	389,4	20	496,2	30	37,0

και για μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,0 m/s, οι συχνότητες των ταχυτήτων και ειδικών ενεργειών είναι:

$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$h_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$	$v_i$ , m/s	$e_i$
1	0,019801	11	0,065603	21	0,005105	1	0,1	11	468,5	21	253,7
2	0,038432	12	0,056863	22	0,003479	2	1,6	12	527,2	22	198,8
3	0,054836	13	0,047975	23	0,002319	3	7,9	13	565,5	23	151,4
4	0,068172	14	0,03944	24	0,001513	4	23,4	14	580,7	24	112,2
5	0,07788	15	0,03162	25	0,000965	5	52,2	15	572,6	25	80,9
6	0,083721	16	0,024738	26	0,000603	6	97,0	16	543,7	26	56,8
7	0,085768	17	0,018896	27	0,000368	7	157,8	17	498,1	27	38,9
8	0,084367	18	0,014099	28	0,00022	8	231,8	18	441,2	28	26,0
9	0,080074	19	0,01028	29	0,000129	9	313,2	19	378,3	29	16,9
10	0,073576	20	0,007326	30	0,000000	10	394,8	20	314,5	30	10,7

και παριστάνονται στο ακόλουθα διαγράμματα.

**Οι αντίστοιχες μέσες κυβικές ταχύτητες είναι:**

$$V_{\text{mean}} = 11,5 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{mc}} = 13,8 \text{ m/s}$$



$$V_{\text{mean}} = 10,7 \text{ m/s} \quad V_{\text{rnc}} = 13,0 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{mean}} = 9,8 \text{ m/s} \quad V_{\text{rnc}} = 11,9 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{mean}} = 9,0 \text{ m/s} \quad V_{\text{rnc}} = 11,0 \text{ m/s}$$

### Αντίστοιχα η μέση ετήσια ειδική ισχύς:

$$V_{\text{mean}} = 11,5 \text{ m/s} \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,74 \text{ kW/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 10,7 \text{ m/s} \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,34 \text{ kW/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 9,8 \text{ m/s} \quad \rho_{\text{rnc}} = 1,04 \text{ kW/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 9,0 \text{ m/s} \quad \rho_{\text{rnc}} = 0,81 \text{ kW/m}^2$$

### Και το μέσο ετήσιο δυναμικό:

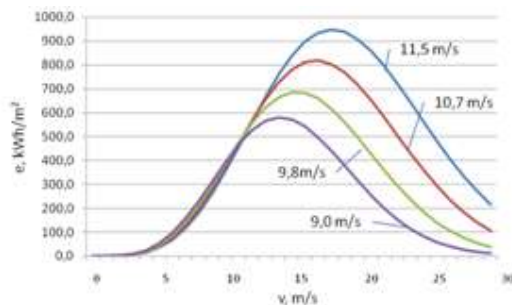
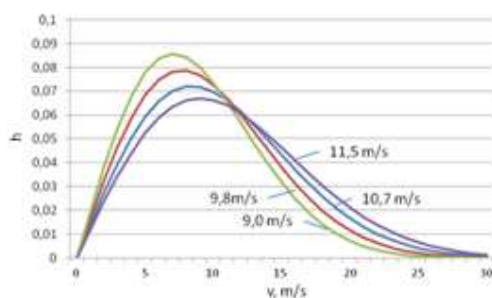
$$V_{\text{mean}} = 11,5 \text{ m/s} \quad \epsilon_{\text{rnc}} = 14.226 \text{ kWh/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 10,7 \text{ m/s} \quad \epsilon_{\text{rnc}} = 11.725 \text{ kWh/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 9,8 \text{ m/s} \quad \epsilon_{\text{rnc}} = 9,137 \text{ kWh/m}^2$$

$$V_{\text{mean}} = 9,0 \text{ m/s} \quad \epsilon_{\text{rnc}} = 7.117 \text{ kWh/m}^2$$

από τα οποία φαίνεται ότι μία ελάττωση της μέσης ταχύτητας κατά 20 %, ελαττώνει το διαθέσιμο δυναμικό κατά 50 %.



## 1.2 ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) διακρίνονται σε οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα (Σχήμα 9). Οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα έχουν το πλεονέκτημα να μην χρειάζονται σύστημα διεύθυνσης που να τις στρέφει απέναντι στην κατεύθυνση του ανέμου, όμως έχουν συνήθως χαμηλότερο βαθμό απόδοσης και παρουσιάζουν προβλήματα όσον αφορά στην κλιμάκωση του μεγέθους τους και την προστασία τους σε πολύ ισχυρούς ανέμους. Έτσι, οι Α/Γ οριζόντιου άξονα έχουν κυριαρχήσει στις σχετικές εφαρμογές. Οι Α/Γ οριζόντιου άξονα αποτελούνται από τα παρακάτω τμήματα:

- τον πύργο,

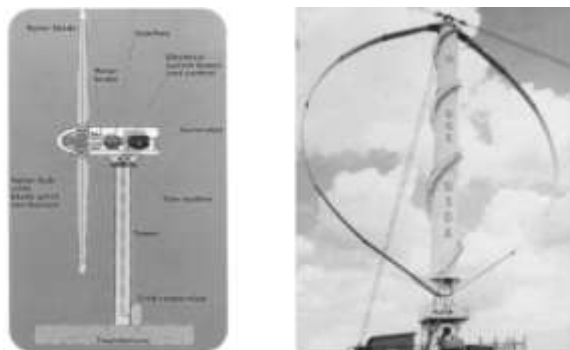
- τον ρότορα που αποτελείται από την πλήμνη και συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, που στηρίζονται σε αυτή,
- το θάλαμο (Σχήμα 10) που περιέχει το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, το φρένο και την ηλεκτρογεννήτρια και,
- το σύστημα προσανατολισμού του θαλάμου και του ρότορα κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου.

Ενώ για τη διάθεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στον τελικό καταναλωτή (το ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας, στα διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα ή τον αυτόνομο χρήστη), η Α/Γ συνοδεύεται από συστήματα ηλεκτρονικών ισχύος, που δίνουν στο παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα τα χαρακτηριστικά (τάση και συχνότητα) που το καθιστούν κατάλληλο για την τελική χρήση.

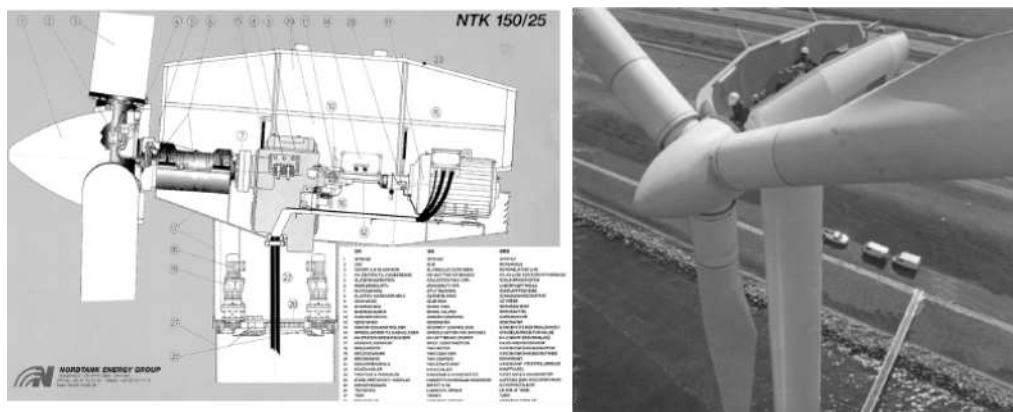
Οι Α/Γ για κεντρική παραγωγή ισχύος (συνήθως διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο) έχουν ονομαστική ισχύ στην περιοχή των 100 kW έως λίγα MW, ενώ μικρότερες Α/Γ (400 W έως 100 kW) χρησιμοποιούνται για τη μερική κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών απομονωμένων (μη διασυνδεδεμένων με το δίκτυο) καταναλώσεων (κεραίες τηλεπικοινωνίας, στρατιωτικές ή ερευνητικές εγκαταστάσεις ή ακόμη και οικιών ή οικισμών σε απομακρυσμένες περιοχές). 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.

### 1.2.1 Ανάλυση τμημάτων

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. Στις Α/Γ μικρής ονομαστικής ισχύος το ύψος του πύργου μπορεί να είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το μήκος των πτερυγίων, ενώ για Α/Γ πάνω από 500 kW, το ύψος του πύργου τείνει να είναι οριακά μεγαλύτερο από μήκος των πτερυγίων. Το κυριότερο πρόβλημα όσον αφορά στη διαστασιολόγηση του πύργου είναι η αντοχή του στη ροπή που του ασκεί ο άνεμος καθώς και στις δονήσεις που υφίσταται από την περιστροφή των πτερυγίων. Κρίσιμο σημείο ως προς το σχεδιασμό του είναι η όλη διάταξη να αποφεύγει τα φαινόμενα συντονισμού, σε όλο το εύρος πιθανών ανέμων της περιοχής.



Σχήμα 9. Ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα



Σχήμα 10. Ο θάλαμος Α/Γ οριζόντιου άξονα

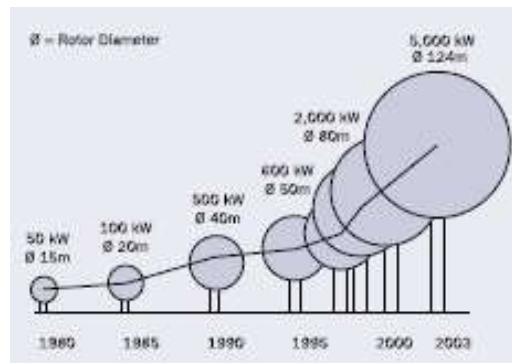
Τα **πτερύγια**, στις σύγχρονες Α/Γ, κατασκευάζονται από εποξειδικά συνθετικά υλικά μεγάλης αντοχής και μικρού ειδικού βάρους, ώστε να αντέχουν στις ροπές που αναπτύσσονται και να τις ελαχιστοποιούν. Ειδικά η σύνδεση των πτερυγίων με την πλήμνη δέχεται τις υψηλότερες μηχανικές τάσεις και αποτελεί το 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, που βρίσκεται 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.

Όπως αναφέρθηκε, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, σε υψηλές ταχύτητες ανέμου, περιορίζεται από μηχανικό φρένο. Ο περιορισμός της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα αποσκοπεί στο να περιοριστούν η φυγόκεντρες δυνάμεις στις συνδέσεις των πτερυγίων με την πλήμνη και να αποφευχθεί η θραύση των συνδέσεων αυτών και η αποκόλληση των πτερυγίων. Σε πολύ μεγάλες, μάλιστα, ταχύτητες ανέμου (συνήθως πάνω από 30-35 m/s – 100-120 χλμ/ώρα) Εκτός από το μηχανικό φρένο, την πράξη εμφανίζονται τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα.

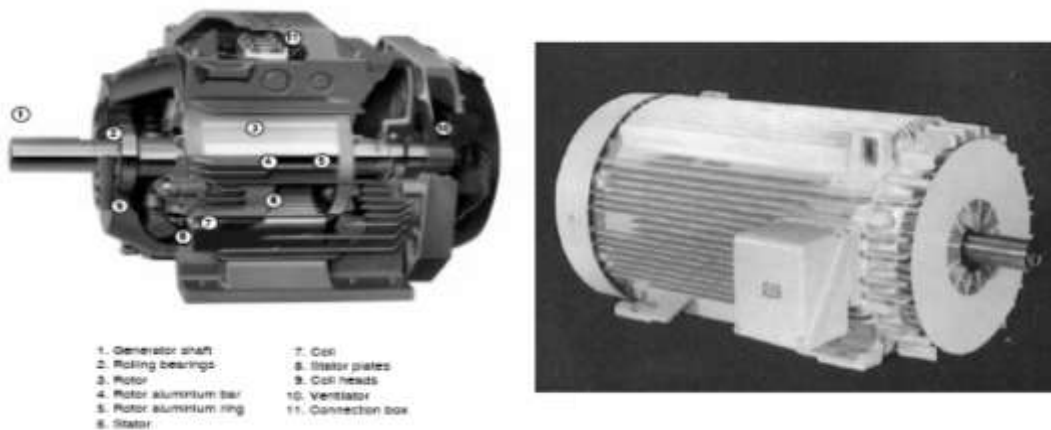
### 1.2.2 Τέσσερις περιπτώσεις ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα

- Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα δεν υφίσταται κανέναν έλεγχο και αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου – η περίπτωση αυτή αφορά μικρές Α/Γ σχεδιασμένες έτσι ώστε να αντέχουν σε οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου.

- Στην δεύτερη περίπτωση, το επίπεδο περιστροφής του ρότορα εκτρέπεται (ο θάλαμος της Α/Γ γυρίζει κάθετα στην κατεύθυνση του ανέμου) από τη διεύθυνση την κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μία ορισμένη τιμή, προκειμένου ο ρότορας να προστατευτεί από τις ισχυρές ροπές που αναπτύσσονται
- Στην Τρίτη περίπτωση, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, μόνο τα πτερύγια (και όχι ο θάλαμος ) περιστρέφονται, ώστε ο άνεμος να μην προσπίπτει στην εμπρόσθια επιφάνεια τους αλλά στην ακμή τους και με τον τρόπο αυτό η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ελέγχεται και παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της ταχύτητας του ανέμου, σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων του ανέμου.
- Στην τέταρτη περίπτωση, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου περιστρέφονται τόσο ο θάλαμος, ώστε να εκτρέψει το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων από τη διεύθυνση της κάθετη στην ταχύτητα του ανέμου, όσο και τα πτερύγια, ώστε να εκθέτουν την ακμή τους στη διεύθυνση του ανέμου.



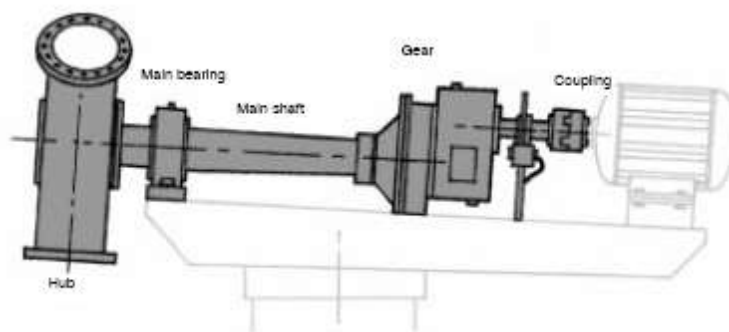
Σχήμα 11(α). Κλιμάκωση μεγέθους Α/Γ



Σχήμα 11(β). Ηλεκτροκινητήρας

Επίσης, οι σύγχρονες Α/Γ διαθέτουν και 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 της πλήμνης, και η ταχύτητα περιστροφής της τελευταίας να περιορίζεται. Ο τυπικός **ηλεκτροκινητήρας** των Α/Γ φαίνεται στο Σχήμα 11, και παράγει ηλεκτρική ισχύ εκμεταλλευόμενος το επαγωγικό ρεύμα που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή ενός πηνίου σε σταθερό μαγνητικό πεδίο. Η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα (το πηλίκο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη ροπή περιστροφής του ρότορα) κυμαίνεται στο διάστημα 75 – 85 %, εξαρτάται από το μέγεθος και την τεχνολογία του και λαμβάνει τις τιμές αυτές σε συγκεκριμένο εύρος ταχυτήτων περιστροφής του πηνίου (το οποίο είναι συνδεδεμένο, μέσω του άξονα και του κιβωτίου ταχυτήτων, με την πλήμη του ρότορα (Σχήμα 12).



Σχήμα 12. Σύστημα μετάδοσης της περιστροφικής κίνησης της πλήμνης στον ηλεκτροκινητήρα, με τη μεσολάβηση άξονα και κιβωτίου ταχυτήτων

### 1.2.3 Ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών

Δεν υπάρχει μία παγκοσμίως αναγνωρισμένη μέθοδος εκτίμησης της ονομαστικής ισχύος των Α/Γ. Αυτό συμβαίνει γιατί η ηλεκτρική ισχύς που παράγει η Α/Γ εξαρτάται από το τετράγωνο του μήκους των πτερυγίων της και από την Τρίτη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου (Εξίσωση 11). Οπότε, με σταθερό μήκος πτερυγίων, μία Α/Γ παράγει διαφορετική ισχύ σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Έτσι, θα έπρεπε να οριστεί και μία “παγκόσμια” ονομαστική ταχύτητα ανέμου, στην οποία θα συγκρίνονταν και θα αξιολογούνταν οι ονομαστικές ικανότητες παραγωγής ισχύος των διαφόρων Α/Γ. Ονομαστικές ταχύτητες ανέμου πράγματι ορίζονται για τις διάφορες Α/Γ και οι τιμές τους κυμαίνονται στο διάστημα 10 – 15 m/s, όμως δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν την σύγκριση της ικανότητας παραγωγής ισχύος μεταξύ των Α/Γ. Ακόμη και αν καθιερώνονταν μία “παγκόσμια” τιμή για την ονομαστική ταχύτητα, έστω τα 12 m/s, αν μία Α/Γ παρήγαγε μεγαλύτερη ισχύ από μία άλλη, στην ταχύτητα αυτή, αυτό δεν εξασφαλίζει ότι θα παρήγαγε μεγαλύτερη ισχύ και σε

οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα ανέμου, γιατί αυτό εξαρτάται από πολλά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά, όπως η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, η περιοχή γωνιακών ταχυτήτων (στροφών ανά λεπτό) που μεγιστοποιεί την απόδοση του ηλεκτροκινητήρα, το είδος του κιβωτίου ταχυτήτων κ.α.

Για να αποφευχθεί η σύγχυση, οι κατασκευαστές Α/Γ αναφέρουν μόνο το μήκος των πτερυγίων, ως χαρακτηριστικό μέγεθος των προϊόντων τους. Με τον τρόπο όμως αυτό δεν δίνεται κανένα στοιχείο όσον αφορά τη μέγιστη ταχύτητα ανέμου στην οποία η Α/Γ μπορεί να λειτουργεί και τη μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα της. Έτσι, τείνει να υιοθετηθεί παγκοσμίως ένας τρόπος κατάταξης των Α/Γ, ο οποίος να εκφράζεται με δύο αριθμούς από τους οποίους ο πρώτος δηλώνει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει ο ηλεκτροκινητήρας και ο δεύτερος τη διάμετρο του ρότορα. Για παράδειγμα, μία Α/Γ με χαρακτηριστικό ζεύγος τιμών 300/30 σημαίνει ότι φέρει ηλεκτροκινητήρα 300 kW και διάμετρο πτερυγίων 30 m.

Ένας δεύτερος τρόπος έκφρασης της ονομαστικής δυναμικότητας των Α/Γ και της κατάταξης τους ανάλογα με το μέγεθος τους είναι η Δυναμικότητα Ειδικής Κατάταξης (Specific Rated Capacity – SRC), η οποία ορίζεται από το λόγο:

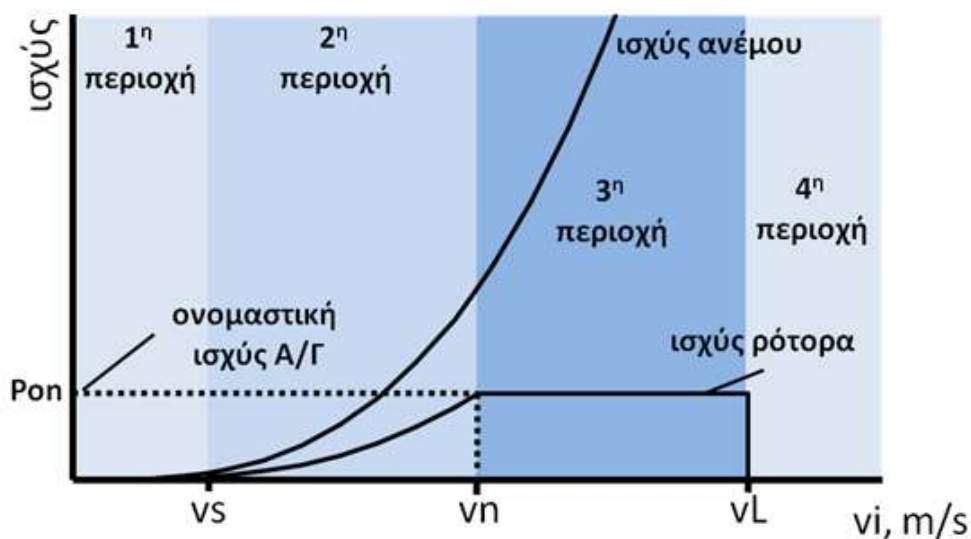
$$22. \text{ SRC} = \frac{\text{δυναμικότητα ηλεκτροκινητήρα [kW]}}{\text{εμβαδόν που σαρώνεται από τα πτερύγια [m}^2\text{]}}$$

Οπότε, μία Α/Γ 300/30 παρουσιάζει λόγο SRC ίσο με  $300/(\pi \times 15^2) = 0,42 \text{ kW/m}^2$ . Οι τιμές του λόγου SRC αυξάνονται με την αύξηση του μήκους των πτερυγίων και κυμαίνονται στο διάστημα  $0,2 \text{ kW/m}^2$ , για διάμετρο πτερυγίων 10 m έως περίπου  $0,5 \text{ kW/m}^2$ , για διάμετρο πτερυγίων 40 m. Σε πολύ μεγάλες Α/Γ, με διάμετρο πτερυγίων ακόμη και πάνω από 100 m, οι τιμές του λόγου SRC μπορούν να ξεπεράσουν ακόμη και το  $1 \text{ kW/m}^2$ .

#### 1.2.4 Λειτουργία με μεταβλητή ταχύτητα περιστροφής

Όπως αναφέρθηκε, για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση  $C_p$  του ρότορα μεταβάλλεται με το λόγο TSR της γραμμικής ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου (Εξίσωση 12), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Οπότε, προκειμένου η απόδοση της Α/Γ να διατηρείται σταθερή, στη μέγιστη της τιμή, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα θα πρέπει να μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου, προκειμένου ο λόγος TSR να λαμβάνει κάθε φορά την τιμή που μεγιστοποιεί την απόδοση. Η πράξη έχει δείξει ότι οι Α/Γ με

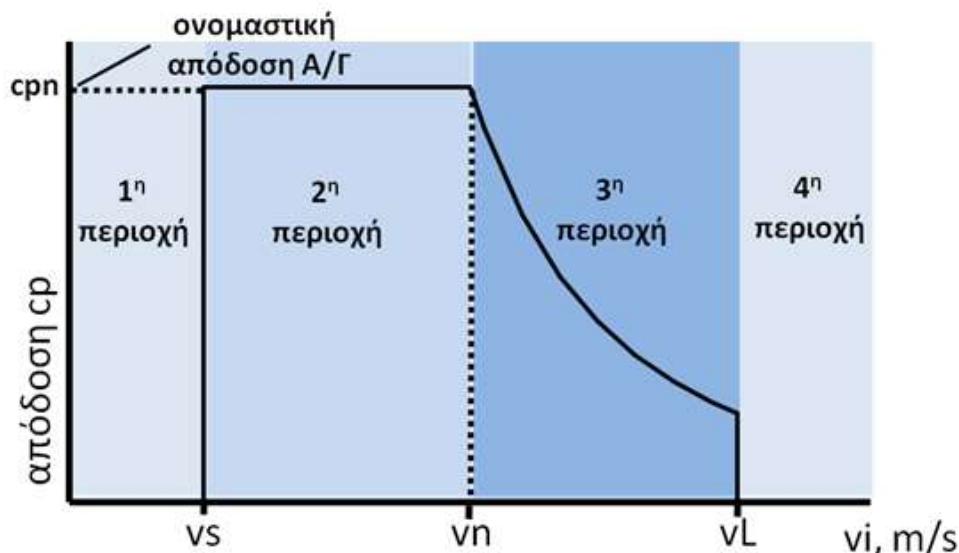
μεταβλητή και ελεγχόμενη ταχύτητα περιστροφής, προσλαμβάνουν 20 – 30 % περισσότερη ενέργεια από τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας περιστροφής ή τις Α/Γ στις οποίες η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται, χωρίς η αύξηση αυτή να ελέγχεται, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου.



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

Προκειμένου η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα να αυξάνεται με την ταχύτητα του ανέμου με τέτοιο τρόπο ώστε ο λόγος TSR να παραμένει στην τιμή που βελτιστοποιεί την απόδοση, θα πρέπει η Α/Γ να διαθέτει ένα σύστημα ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα. Σήμερα υπάρχουν δύο τύποι συστημάτων ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής. Στο πρώτο, η βέλτιστη τιμή TSR της συγκεκριμένης Α/Γ και για την ταχύτητα ανέμου με τη μέγιστη ενέργεια στο διάγραμμα κατανομής της ενέργειας του ανέμου (η τιμή TSR που βελτιστοποιεί την απόδοση αποτελεί χαρακτηριστικό της κάθε Α/Γ και μεταβάλλεται ελαφρά με την ταχύτητα του ανέμου) αποθηκεύεται στον υπολογιστή του συστήματος. Ταυτόχρονα η Α/Γ φέρει σύστημα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου, και για κάθε τιμή της τελευταίας ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής, ώστε η τιμή TSR να συμπίπτει με τη μέγιστη. Στον δεύτερο τύπο, η Α/Γ φέρει σύστημα που κάθε στιγμή επιχειρεί να μεταβάλει διαφορικά (κατά μία απειροελάχιστη τιμή) την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Αν κατά την απειροελάχιστη αυτή μεταβολή, το σύστημα διαγνώσει διαφορική αύξηση της παραγόμενης ισχύος τότε συνεχίζει τη μεταβολή προς την ίδια κατεύθυνση (αν δηλαδή η απειροελάχιστη αύξηση της ταχύτητας περιστροφής οδήγησε σε απειροελάχιστη αύξηση της ισχύος, τότε το σύστημα συνεχίζει να αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής) Αντίθετα, αν διαγνώσει ελάττωση της ισχύος,

τότε μεταβάλλει την κατεύθυνση της μεταβολής (π.χ. αν η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής τείνει να ελαττώσει την παραγόμενη ισχύ, τότε το σύστημα επιχειρεί βαθμιαία ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής. Με τον τρόπο αυτό η Α/Γ λειτουργεί στη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής.



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

### 1.2.5 Τέσσερις περιοχές ταχυτήτων του ανέμου

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:**

- Η **πρώτη περιοχή** εκτείνεται από την νηνεμία (ταχύτητα ανέμου ίση με το μηδέν,  $v_i = 0$  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 ( $P_{oi} = 0$  kW) και ο συντελεστής απόδοσης είναι επίσης μηδέν ( $c_p = 0$ ).
- 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 A/G, η οποία επίσης αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της A/G). Σε αυτή την περιοχή ταχυτήτων ανέμου, η ταχύτητα περιστροφής της A/G 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 τρόπου που περιγράφηκαν παραπάνω.

- **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  $P_{oi} = \text{σταθερό}$ ).
- **Η τέταρτη περιοχή** περιλαμβάνει τις ταχύτητες που είναι μεγαλύτερες από την οριακή ταχύτητα της A/G ( $v_L < v_i$ ). Ο ρότορας είναι ακινητοποιημένος, στην περιοχή αυτή πολύ ισχυρών ανέμων, και το επίπεδο περιστροφής των πτερυγίων του έχει στραφεί παράλληλα στη διεύθυνση τους.

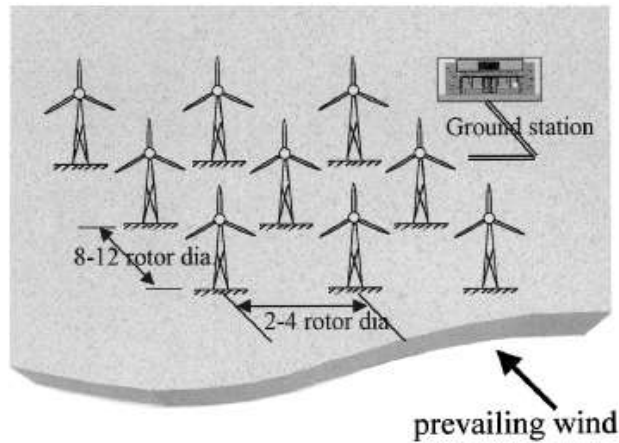
Η μεταβολή της ισχύος που προσλαμβάνει ο ρότορας από τον άνεμο (απολήψιμη ισχύς), ως προς την ταχύτητα του ανέμου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 13, στο οποίο εμφανίζονται οι τέσσερις παραπάνω περιοχές. Στην πρώτη περιοχή με  $v_i < v_s$  (όπου  $v_i$  η ταχύτητα του ανέμου), η απολήψιμη ισχύς είναι 0. Στην δεύτερη περιοχή με  $v_s < v_i < v_n$ , η απολήψιμη ισχύς δίνεται από τη σχέση:

$$23. P^*_{oi} = c_{pn} \times P_i \text{ [kw/m}^2\text{]}$$

όπου  $P^*_{oi}$  η ειδική (ανά μονάδα επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια) ισχύς που προσλαμβάνει ο ρότορας,  $c_{pn}$  η ονομαστική απόδοση του ρότορα και  $P_i$  η ειδική ισχύς που μεταφέρει ο άνεμος. Δηλαδή αν η  $c_{pn}$  είναι 40 %, στη δεύτερη περιοχή η ισχύς που προσλαμβάνει ο άνεμος είναι, για κάθε ταχύτητα ανέμου μεταξύ  $v_s$  και  $v_n$ , ίση με το 40 % της ισχύος του ανέμου. Στην τρίτη περιοχή, με  $v_n < v_i < v_L$ , η ισχύς που προσλαμβάνει ο ρότορας είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική ισχύ του ρότορα, ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Στην περιοχή αυτή, η απόδοση του ρότορα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$24. c_{pn} = 100 \times P^*_{oi}/P_i \text{ [%]}$$

Στην τέταρτη περιοχή των πολύ ισχυρών ανέμων και πάνω από την οριακή ταχύτητα αντοχής της A/G ( $v_i > v_L$ ), ο ρότορας εξαναγκάζεται να σταματήσει και η ισχύς που προσλαμβάνει μηδενίζεται.



Σχήμα 15. Βέλτιστη χωροθέτηση Α/Γ αιολικό πάρκο

Στο Σχήμα 14 παριστάνεται η μεταβολή της απόδοσης  $c_p$  του ρότορα, με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου και επίσης διακρίνονται οι τέσσερις παραπάνω περιοχές. Στην πρώτη και την τέταρτη περιοχή (δηλαδή για πολύ ασθενείς και πολύ ισχυρούς ανέμους) ο ρότορας είναι ακινητοποιημένος και η απόδοση του είναι μηδέν. Στη δεύτερη περιοχή (που ονομάζεται και περιοχή **σταθερής απόδοσης**) η απόδοση του ρότορα είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή. Στην τρίτη περιοχή (που ονομάζεται και περιοχή **σταθερής ισχύος**) η ισχύς που προσλαμβάνει ο ρότορας είναι σταθερή και ίση με την ονομαστική της τιμή (βλ. Σχήμα 13) και η απόδοση  $c_p$  ελαττώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι, **στην ονομαστική ταχύτητα  $v_n$  του ανέμου (χαρακτηριστική για κάθε Α/Γ), τόσο η απόδοση όσο και η παραγόμενη ισχύς έχουν τις ονομαστικές τους τιμές. Δηλαδή για  $v_i = v_n$ ,  $c_p = c_{pn}$  και  $P^*_{oi} = P_{on}$ .**

### Απόσταση Α/Γ

Κατά την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου ή μίας συστάδας Α/Γ, οι Α/Γ θα πρέπει να τοποθετούνται σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόληψη αιολικής ενέργειας. Οι αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ εξαρτώνται από τη μορφολογία του εδάφους, την κατανομή ταχυτήτων του ανέμου από τις διάφορες κατευθύνσεις και το μέγεθος των Α/Γ. Οι βέλτιστες αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ έχει βρεθεί να κυμαίνονται από 8 έως 12 διαμέτρους πτερυγίων στην κατεύθυνση του ανέμου και 2 έως 4 διαμέτρους πτερυγίων, στην κάθετη διεύθυνση ως προς αυτή του ανέμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15.

## 1.2.6 Απόσταση Α/Γ

Κατά την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου ή μίας συστάδας Α/Γ, οι Α/Γ θα πρέπει να τοποθετούνται σε συγκεκριμένες μεταξύ τους αποστάσεις, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόληψη αιολικής ενέργειας. Οι αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ εξαρτώνται από τη μορφολογία του εδάφους, την κατανομή ταχυτήτων του ανέμου από τις διάφορες κατευθύνσεις και το μέγεθος των Α/Γ. Οι βέλτιστες αποστάσεις μεταξύ των Α/Γ έχει βρεθεί να κυμαίνονται από 8 έως 12 διαμέτρους πτερυγίων στην κατεύθυνση του ανέμου και 2 έως 4 διαμέτρους πτερυγίων, στην κάθετη διεύθυνση ως προς αυτή του ανέμου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 15.

## 1.2.7 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

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. Εάν ο λόγος ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου, που μεγιστοποιεί την απόδοση είναι 5,5, να υπολογιστεί επίσης η κατανομή της γωνιακής ταχύτητας του πτερυγίου, στο εύρος ταχυτήτων ανέμου, που η ανεμογεννήτρια λειτουργεί. Δίνονται:

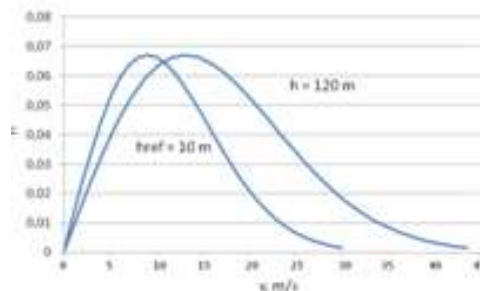
τραχύτητα εδάφους	$a = 0,15$	ταχύτητα αποσύνδεσης	$v_1 = 25 \text{ m/s}$
ταχύτητα έναρξης	$v_s = 5 \text{ m/s}$	ονομαστική απόδοση δρομέα	$C_{p,n} = 45 \%$
ονομαστική ταχύτητα	$v_n = 15 \text{ m/s}$	απόδοση ηλεκτροκινητήρα	$\eta_{el} = 85 \%$

### ΛΥΣΗ

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

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

Ενώ στο Σχήμα φαίνεται η μετατόπιση της κατανομής ταχυτήτων του ανέμου προς υψηλότερες τιμές ταχύτητας, με την αύξηση του ύψους της Α/Γ.



h <sub>i</sub>	v <sub>i</sub> , m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	h <sub>i</sub>	v <sub>i</sub> , m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	h <sub>i</sub>	v <sub>i</sub> , m/s	v <sub>hi</sub> , 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

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<sub>hi</sub>: η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος της Α/Γ, που υπολογίστηκε προηγουμένως.

P<sub>hi</sub>: 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/m<sup>3</sup>).

C<sub>p</sub>: η απόδοση της ΑΓ, η οποία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή (C<sub>p</sub>n) μεταξύ της ταχύτητας έναρξης και της ονομαστικής ταχύτητας – η τιμή μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας αποσύνδεσης υπολογίζεται από το πηλίκο P<sub>oi</sub><sup>\*</sup>/P<sub>hi</sub>

P<sub>oi</sub><sup>\*</sup>: η ειδική (ανά μονάδα επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια) ισχύς του δρομέα (της πτερωτής), η οποία υπολογίζεται από το γινόμενο C<sub>p</sub> x P<sub>hi</sub> και παραμένει σταθερή μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας αποσύνδεσης – η σταθερή αυτή τιμή υπολογίζεται από την ονομαστική ταχύτητα και την απόδοση της Α/Γ ( = ½ x ρ x C<sub>p</sub>n x v<sub>n</sub><sup>3</sup> = ½ x 1,225 x 0,45 x 15<sup>3</sup> = 0,93 kW/m<sup>2</sup>).

A: η επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους.

P<sub>oi</sub>: 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 x P<sub>oi</sub><sup>\*</sup>).

h<sub>i</sub>: η συχνότητα (πιθανότητα) της ταχύτητας ανέμου v<sub>hi</sub>.

t<sub>i</sub>: οι ώρες του έτους κατά τις οποίες ο άνεμος έχει ταχύτητα v<sub>hi</sub> (h<sub>i</sub> x 24 x 365).

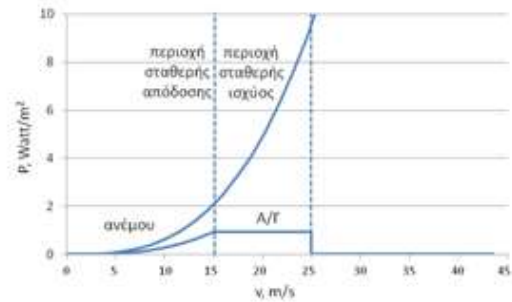
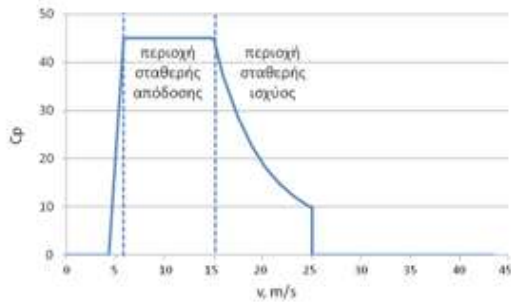
E<sub>oi</sub>: η ενέργεια που προσλαμβάνει ο δρομέας στο σύνολο των ωρών του έτους, στις οποίες η ταχύτητα του ανέμου είναι v<sub>hi</sub> (t<sub>i</sub> x P<sub>oi</sub>).

nel: η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα της Α/Γ.

Eel: η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την Α/Γ (= nel x Eoi).

$v_{hi}$ m/s	Phi kW/m <sup>2</sup>	Cp %	P*oi kW/m <sup>2</sup>	A m <sup>2</sup>	Poi MW	hi %	ti h	Eoi MWh	nel %	Eel MWh
0,0	0,0	0,0	-	12463	-	0,000	0	-	-	-
1,5	0,0	0,0	-	12463	-	0,012	107	-	-	-
2,9	0,0	0,0	-	12463	-	0,024	209	-	-	-
4,4	0,1	0,0	-	12463	-	0,035	305	-	-	-
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	10,9	0,0	-	12463	-	0,030	266	-	-	-
27,6	12,9	0,0	-	12463	-	0,026	223	-	-	-
29,0	15,0	0,0	-	12463	-	0,021	185	-	-	-
30,5	17,4	0,0	-	12463	-	0,017	151	-	-	-
31,9	20,0	0,0	-	12463	-	0,014	122	-	-	-
33,4	22,8	0,0	-	12463	-	0,011	97	-	-	-
34,8	25,9	0,0	-	12463	-	0,009	76	-	-	-
36,3	29,3	0,0	-	12463	-	0,007	58	-	-	-
37,7	32,9	0,0	-	12463	-	0,005	44	-	-	-
39,2	36,9	0,0	-	12463	-	0,004	33	-	-	-
40,6	41,1	0,0	-	12463	-	0,003	25	-	-	-
42,1	45,7	0,0	-	12463	-	0,002	18	-	-	-
43,6	50,6	0,0	-	12463	-	0,001	13	-	-	-
								<b>53917,8</b>		<b>45830,1</b>

Στα σχήματα που ακολουθούν παριστάνονται ο συντελεστής απόδοσης Cp του δρομέα καθώς και η ισχύς του ανέμου και του δρομέα, ως προς τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου. Στα Σχήματα αυτά διακρίνονται οι περιοχές σταθερής απόδοσης (μεταβλητής ταχύτητας του δρομέα) και σταθερής ισχύος.



Η ειδική ονομαστική δυναμικότητα (specific rated capacity, SRC) της Α/Γ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$SRC = \frac{\text{ονομαστική ισχύς του κινητήρα}}{\text{εμβαδόν σάρωσης}} = \frac{12.000}{\pi \times 63^2} = 0,96 \text{ kW/m}^2$$

(η ονομαστική ισχύς του ηλεκτροκινητήρα επιλέγεται ελαφρά μεγαλύτερη της ισχύος που υπολογίζεται να παράγει στην περιοχή σταθερής ισχύος, προκειμένου να μην λειτουργεί οριακά στην περιοχή αυτή – εδώ επιλέχθηκε να είναι  $12.000 \text{ kW} > 11.600 \text{ kW}$ ) ενώ η κατανομή της γωνιακής ταχύτητας των πτερυγίων είναι:

$v_{hi}$ , m/s	$v_{tip}$ , m/s	$\omega$ , rpm	$v_{hi}$ , m/s	$v_{tip}$ , m/s	$\omega$ , rpm
0,0	-	-	16,0	79,8	12,1
1,5	-	-	17,4	87,8	13,3
2,9	-	-	18,9	95,8	14,5
4,4	-	-	20,3	103,7	15,7
5,8	31,9	4,8	21,8	111,7	16,9
7,3	39,9	6,0	23,2	119,7	18,1
8,7	47,9	7,2	24,7	127,7	19,3
10,2	55,8	8,4	26,1	135,7	20,5
11,6	63,8	9,6	27,6	-	-
13,1	71,8	10,8	29,0	-	-

όπου:

- $v_{tip}$ : η ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου ( $= 5,5 \times v_{hi}$ ).
- $\omega$ : η γωνιακή ταχύτητα του πτερυγίου ( $= (60 \text{ sec/min}) \times v_{tip} / (2 \times \pi \times \text{ακτίνα πτερυγίου})$ ).

## 1.2.8 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

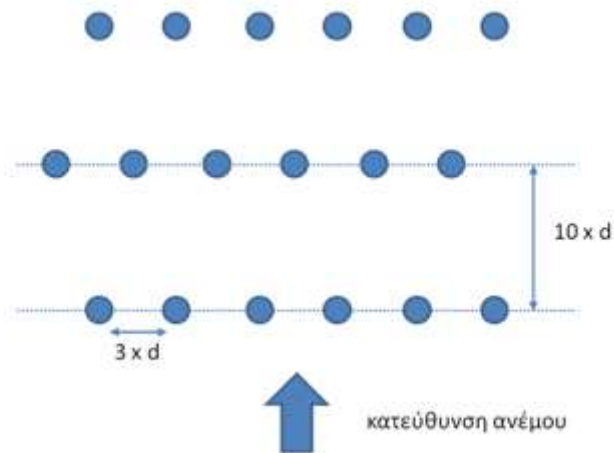
Να εκτιμηθεί το πλήθος των Α/Γ του Παραδείγματος 4 που μπορούν να χωροθετηθούν στη συνολική έκταση του Παραδείγματος 1 και η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή του αιολικού πάρκου.

### ΛΥΣΗ

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται όπως φαίνεται στο Σχήμα, όπου  $d = 126 \text{ m}$ , η διάμετρος του δρομέα. Έτσι, η επιφάνεια που απαιτείται για κάθε Α/Γ είναι:

$$E = 3 \times d \times 10 \times d = 3 \times 126 \times 10 \times 126 = 476.280 \text{ m}^2 = 476,2 \text{ στρ}$$

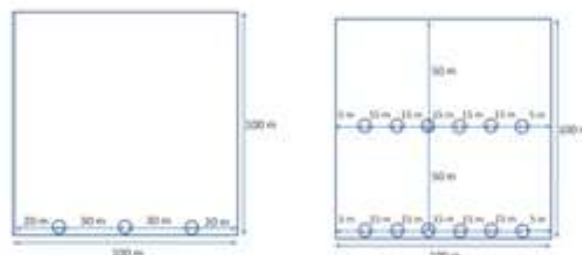
(η κατεύθυνση ανέμου που θα επιλεγεί για τη χωροθέτηση των Α/Γ του αιολικού πάρκου, αφορά σε εκείνη την κατεύθυνση από την οποία αναμένεται η μεγαλύτερη απόληψη ισχύος) Οπότε στα 16.000 στρ του Παραδείγματος 1 μπορούν να χωροθετηθούν  $16.000/476,2 = 34$  ΑΓ και η συνολική παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από αυτές θα είναι:  $34 \times 45.830,1 = 1.558.223$  MWh = 1.558,2 GWh και αντιστοιχεί στο 3 % της εγχώριας ηλεκτρικής κατανάλωσης.



### 1.2.9 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Ιδιώτης διαθέτει 10 στρέμματα (100 x 100 m) στην περιοχή μέσης ταχύτητας ανέμου 11,5 m/s, της νότιας Εύβοιας του Παραδείγματος 1. Ποία αναμένεται να είναι η ετήσια ηλεκτροπαραγωγή αν χρησιμοποιήσει την έκταση αυτή για την εγκατάσταση αιολικού πάρκου. Να θεωρηθεί ότι η κατεύθυνση του ανέμου που οδηγεί στη μέγιστη απόληψη ισχύος είναι κάθετη στη μία πλευρά της έκτασης. Δίνονται:  
 ταχύτητα εδάφους  $a = 0,15$  ταχύτητα αποσύνδεσης  $v_1 = 25$  m/s  
 ταχύτητα έναρξης  $v_s = 5$  m/s ονομαστική απόδοση δρομέα  $C_{pn} = 45$  %  
 ονομαστική ταχύτητα  $v_n = 15$  m/s απόδοση ηλεκτροκινητήρα  $\eta_{el} = 85$  %  
 ύψος Α/Γ  $3 \times$  διάμετρο πτερυγίων

### ΛΥΣΗ



Για να μεγιστοποιηθεί η δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής στην συγκεκριμένη

έκταση θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί η επιφάνεια που θα σαρώνεται από τις Α/Γ που θα εγκατασταθούν. Επίσης, οι Α/Γ που θα εγκατασταθούν δεν θα πρέπει να επηρεάζουν το αιολικό δυναμικό, στις εκτάσεις που περιβάλουν τα 10 αυτά στρέμματα. Έτσι, μία ή περισσότερες Α/Γ θα πρέπει να τοποθετηθούν στην εμπρόσθια πλευρά του οικοπέδου με βάση την κατεύθυνση του ανέμου που οδηγεί στη μέγιστη απόληψη ισχύος και δεν θα πρέπει να επηρεάζουν το αιολικό πεδίο σε απόσταση μεγαλύτερη των 100 m, κατάντη (πίσω από την Α/Γ). Θεωρώντας ότι μία Α/Γ επηρεάζει το αιολικό πεδίο, πίσω της, σε απόσταση 10 φορές τη διάμετρο των πτερυγίων της, η διάμετρος αυτή θα είναι, το μέγιστο, 10 m. Επίσης η απόσταση μεταξύ των Α/Γ, σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση του ανέμου που οδηγεί στη μέγιστη απόληψη ισχύος, είναι 3 φορές η διάμετρος των πτερυγίων, δηλαδή μπορούν να τοποθετηθούν 3 Α/Γ διαμέτρου 10 m, σε μία σειρά στην εμπρόσθια πλευρά της έκτασης, όπως φαίνεται στο σχήμα (οι Α/Γ απέχουν από το αριστερό και δεξιό άκρο της έκτασης περισσότερο από το ½ των 30 m που απαιτεί η χωροθέτηση τους). συνολική έκταση που σαρώνεται από τα πτερύγια των Α/Γ της παραπάνω διάταξης είναι:

$$3 \times \pi \times 5^2 = 235,5 \text{ m}^2$$

Μία δεύτερη εναλλακτική χωροθέτησης Α/Γ στη συγκεκριμένη έκταση είναι η αυτή που φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί και περιλαμβάνει Α/Γ με διάμετρο πτερυγίων 5 m, στην οποία η συνολική έκταση που σαρώνεται από τα πτερύγια των Α/Γ είναι επίσης:

$$12 \times \pi \times 2,5^2 = 235,5 \text{ m}^2$$

οπότε το αποτέλεσμα, όσον αφορά στην παραγωγή ενέργειας δεν αναμένεται να είναι διαφορετικό, από τη στιγμή που οι Α/Γ διατηρούν τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στην εκφώνηση του παραδείγματος. Για τον υπολογισμό της ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται η χωροθεσία του πρώτου σχήματος, γιατί οι υψηλότερες Α/Γ εκμεταλλεύονται τον ίδιο άνεμο σε μεγαλύτερο ύψος.

Το ύψος των Α/Γ είναι:

$$Y = 3 \times 10 \text{ m} = 30 \text{ m}$$

και η κατανομή ταχυτήτων ανέμου του θα πρέπει να αναχθεί στο ύψος την Α/Γ, μέσω της εξίσωσης:

$$v_h = v \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^a \leftrightarrow v_h = v \left( \frac{30}{10} \right)^{0,15}$$

Ενώ στο Σχήμα φαίνεται η μετατόπιση της κατανομής ταχυτήτων του ανέμου προς υψηλότερες τιμές ταχύτητας, με την αύξηση του ύψους της Α/Γ.

hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s
0,0122	1	1,2	0,0642	11	13,0	0,0173	21	24,8
0,0239	2	2,4	0,0609	12	14,1	0,0139	22	25,9
0,0348	3	3,5	0,0566	13	15,3	0,0110	23	27,1
0,0444	4	4,7	0,0516	14	16,5	0,0086	24	28,3
0,0526	5	5,9	0,0463	15	17,7	0,0067	25	29,5
0,0590	6	7,1	0,0409	16	18,9	0,0051	26	30,7
0,0635	7	8,3	0,0355	17	20,0	0,0038	27	31,8



hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s	hi	vi, m/s	v <sub>hi</sub> , m/s
0,0662	8	9,4	0,0303	18	21,2	0,0028	28	33,0
0,0671	9	10,6	0,0255	19	22,4	0,0021	29	34,2
0,0664	10	11,8	0,0211	20	23,6	0,0015	30	35,4

Ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής ενέργειας φαίνεται στον Πίνακα που ακολουθεί.

v <sub>hi</sub> m/s	Phi kW/m <sup>2</sup>	Cp %	P*oi kW/m <sup>2</sup>	A m <sup>2</sup>	Poi MW	hi %	ti h	Eoi MWh	nel %	Eel MWh
0,0	0,0	0,0	0,00	79	0,0	0,000	0	0,0	85	0
1,2	0,0	0,0	0,00	79	0,0	0,012	107	0,0	85	0
2,4	0,0	0,0	0,00	79	0,0	0,024	209	0,0	85	0
3,5	0,0	0,0	0,00	79	0,0	0,035	305	0,0	85	0
4,7	0,1	0,0	0,00	79	0,0	0,044	389	0,0	85	0,0
5,9	0,1	45,0	0,06	79	0,0	0,053	460	2,0	85	1,7
7,1	0,2	45,0	0,10	79	0,0	0,059	516	4,0	85	3,4
8,3	0,3	45,0	0,15	79	0,0	0,064	556	6,8	85	5,8
9,4	0,5	45,0	0,23	79	0,0	0,066	580	10,5	85	9,0
10,6	0,7	45,0	0,33	79	0,0	0,067	588	15,2	85	12,9
11,8	1,0	45,0	0,45	79	0,0	0,066	582	20,6	85	17,5
13,0	1,3	45,0	0,60	79	0,0	0,064	563	26,6	85	22,6
14,1	1,7	45,0	0,78	79	0,1	0,061	533	32,7	85	27,8
15,3	2,2	42,2	0,93	79	0,1	0,057	495	36,2	85	30,7
16,5	2,8	33,8	0,93	79	0,1	0,052	452	33,0	85	28,1
17,7	3,4	27,4	0,93	79	0,1	0,046	406	29,6	85	25,2
18,9	4,1	22,6	0,93	79	0,1	0,041	358	26,1	85	22,2
20,0	4,9	18,9	0,93	79	0,1	0,035	311	22,7	85	19,3
21,2	5,9	15,9	0,93	79	0,1	0,030	266	19,4	85	16,47568
22,4	6,9	13,5	0,93	79	0,1	0,026	223	16,3	85	13,86456
23,6	8,0	11,6	0,93	79	0,1	0,021	185	13,5	85	11,49329
24,8	9,3	10,0	0,93	79	0,1	0,017	151	11,0	85	9,38806
25,9	10,7	0,0	0	79	0,0	0,014	122	0,0	85	0
27,1	12,2	0,0	0	79	0,0	0,011	97	0,0	85	0
28,3	13,9	0,0	0	79	0,0	0,009	76	0,0	85	0
29,5	15,7	0,0	0	79	0,0	0,007	58	0,0	85	0
30,7	17,6	0,0	0	79	0,0	0,005	44	0,0	85	0
31,8	19,8	0,0	0	79	0,0	0,004	33	0,0	85	0
33,0	22,0	0,0	0	79	0,0	0,003	25	0,0	85	0
34,2	24,5	0,0	0	79	0,0	0,002	18	0,0	85	0
35,4	27,1	0,0	0	79	0,0	0,001	13	0,0	85	0
<b>326,3</b>										<b>277,3</b>

### 1.3 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:

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

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:

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

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:

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

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

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

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

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

### 1.3.1 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

Στις εκτάσεις της Νότιας Εύβοιας των Παραδειγμάτων 1 και 3, πρόκειται να εγκατασταθούν αιολικά πάρκα από Α/Γ ονομαστικής ισχύος 2 MW. Για κάθε μία από τις παρακάτω κατηγορίες εκτάσεων:

1<sup>η</sup> κατηγορία: 16.000 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 11,5 m/s,

2<sup>η</sup> κατηγορία: 26.000 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 10,7 m/s,

3<sup>η</sup> κατηγορία: 44.500 στρ μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου 9,8 m/s,

4<sup>η</sup> 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 αποσύνδεσης  $v_l = 25 \text{ m/s}$   
 ταχύτητα έναρξης  $v_s = 5 \text{ m/s}$ , ονομαστική απόδοση δρομέα  $C_{rn} = 45 \%$   
 ονομαστική ταχύτητα  $v_n = 15 \text{ m/s}$  απόδοση ηλεκτροκινητήρα  $\eta_{el} = 85 \%$   
 ύψος Α/Γ  $100 \text{ m}$

## ΛΥΣΗ

Αρχικά υπολογίζονται οι κατανομές ταχυτήτων του ανέμου, στις παραπάνω κατηγορίες περιοχών και σε ύψος  $100 \text{ m}$ .

	1 <sup>η</sup> κατηγορία		2 <sup>η</sup> κατηγορία	3 <sup>η</sup> κατηγορία	4 <sup>η</sup> κατηγορία
$v_i, \text{ m/s}$	$v_{hi}, \text{ m/s}$	$h_i$	$h_i$	$h_i$	$h_i$
1	1,4	0,0122	0,0140	0,0167	0,0198
2	2,8	0,0239	0,0275	0,0326	0,0384
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
19	26,8	0,0255	0,0209	0,0153	0,0103
20	28,3	0,0211	0,0167	0,0116	0,0073
21	29,7	0,0173	0,0131	0,0086	0,0051
22	31,1	0,0139	0,0101	0,0063	0,0035
23	32,5	0,0110	0,0077	0,0045	0,0023
24	33,9	0,0086	0,0058	0,0031	0,0015
25	35,3	0,0067	0,0042	0,0022	0,0010
26	36,7	0,0051	0,0031	0,0015	0,0006
27	38,1	0,0038	0,0022	0,0010	0,0004
28	39,6	0,0028	0,0015	0,0006	0,0002
29	41,0	0,0021	0,0011	0,0004	0,0001
30	42,4	0,0015	0,0007	0,0003	0,0000

Στη συνέχεια υπολογίζεται η διάμετρος των πτερυγίων, ώστε η ονομαστική ισχύς των Α/Γ να είναι  $2 \text{ MW}$ , 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 (Poi – έκτη στήλη) να είναι ίση με 2 MW. Έτσι, η τιμή των 2.151 m<sup>2</sup>, 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.

vhi, m/s	Pi, kW/m2	Cp, %	P*oi, kW/m2	A,m2	Poi, MW
1,4	0,0	0,0	0,00	2151	0,0
2,8	0,0	0,0	0,00	2151	0,0
4,2	0,0	0,0	0,00	2151	0,0
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
25,4	10,1	0,0	0	2151	0,0
26,8	11,8	0,0	0	2151	0,0
28,3	13,8	0,0	0	2151	0,0
29,7	16,0	0,0	0	2151	0,0
31,1	18,4	0,0	0	2151	0,0
32,5	21,0	0,0	0	2151	0,0
33,9	23,9	0,0	0	2151	0,0
35,3	27,0	0,0	0	2151	0,0
36,7	30,3	0,0	0	2151	0,0
38,1	34,0	0,0	0	2151	0,0
39,6	37,9	0,0	0	2151	0,0

vhi, m/s	Pi, kW/m <sup>2</sup>	Cp, %	P*oi, kW/m <sup>2</sup>	A, m <sup>2</sup>	Poi, MW
41,0	42,1	0,0	0	2151	0,0
42,4	46,6	0,0	0	2151	0,0

Από τη στιγμή που η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια είναι 2.151 m<sup>2</sup>, 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:

$$(10 \times 52,3) \times (3 \times 52,3) = 82.204 \text{ m}^2 = 82,2 \text{ στρ}$$

Οπότε το πλήθος των Α/Γ που μπορούν να εγκατασταθούν στις κατηγορίες εκτάσεων της Νότιας Εύβοιας είναι:

$$1^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 16.000 / 82,2 = 195$$

$$2^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 26.000 / 82,2 = 316$$

$$3^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 44.500 / 82,2 = 541$$

$$4^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 69.500 / 82,2 = 845$$

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

vhi, m/s	Poi, MW	1 <sup>η</sup> κατηγορία		2 <sup>η</sup> κατηγορία		3 <sup>η</sup> κατηγορία		4 <sup>η</sup> κατηγορία	
		hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh	hi	Eel, MWh
1,4	0,0	0,0122	0,0	0,014	0,0	0,0167	0,0	0,0198	0,0
2,8	0,0	0,0239	0,0	0,0275	0,0	0,0326	0,0	0,0384	0,0
4,2	0,0	0,0348	0,0	0,0398	0,0	0,0469	0,0	0,0548	0,0
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
25,4	0,0	0,0303	0,0	0,0257	0,0	0,0198	0,0	0,0141	0,0
26,8	0,0	0,0255	0,0	0,0209	0,0	0,0153	0,0	0,0103	0,0

	1 <sup>η</sup> κατηγορία		2 <sup>η</sup> κατηγορία		3 <sup>η</sup> κατηγορία		4 <sup>η</sup> κατηγορία		
<b>28,3</b>	0,0	0,0211	0,0	0,0167	0,0	0,0116	0,0	0,0073	0,0
<b>29,7</b>	0,0	0,0173	0,0	0,0131	0,0	0,0086	0,0	0,0051	0,0
<b>31,1</b>	0,0	0,0139	0,0	0,0101	0,0	0,0063	0,0	0,0035	0,0
<b>32,5</b>	0,0	0,011	0,0	0,0077	0,0	0,0045	0,0	0,0023	0,0
<b>33,9</b>	0,0	0,0086	0,0	0,0058	0,0	0,0031	0,0	0,0015	0,0
<b>35,3</b>	0,0	0,0067	0,0	0,0042	0,0	0,0022	0,0	0,0010	0,0
<b>36,7</b>	0,0	0,0051	0,0	0,0031	0,0	0,0015	0,0	0,0006	0,0
<b>38,1</b>	0,0	0,0038	0,0	0,0022	0,0	0,0010	0,0	0,0004	0,0
<b>39,6</b>	0,0	0,0028	0,0	0,0015	0,0	0,0006	0,0	0,0002	0,0
<b>41,0</b>	0,0	0,0021	0,0	0,0011	0,0	0,0004	0,0	0,0001	0,0
<b>42,4</b>	0,0	0,0015	0,0	0,0007	0,0	0,0003	0,0	0,0000	0,0
			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.

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

$$1^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 7.705,6 \text{ MWh/έτος/ΑΓ} \times 195 \text{ ΑΓ} = 1.502,6 \text{ GWh/έτος}$$

$$2^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 7.705,8 \text{ MWh/έτος/ΑΓ} \times 316 \text{ ΑΓ} = 2.435,0 \text{ GWh/έτος}$$

$$3^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 7.538,6 \text{ MWh/έτος/ΑΓ} \times 541 \text{ ΑΓ} = 4.078,4 \text{ GWh/έτος}$$

$$4^{\text{η}} \text{ κατηγορία: } 7.182,5 \text{ MWh/έτος/ΑΓ} \times 845 \text{ ΑΓ} = \underline{6.077,6 \text{ GWh/έτος}}$$

$$14.093,7 \text{ GWh/έτος}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ηλεκτρική παραγωγή αντιστοιχεί στο 25 % της ετήσιας εγχώριας ηλεκτρικής κατανάλωσης. Το κόστος εγκατάστασης των Α/Γ, στα παραπάνω πεδία είναι:

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

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

$$\text{Ολικό κόστος Α/Γ: } K_{\text{ΑΓ,ολ.}} = 1.014,4 \times 2.000 = 2,03 \text{ εκ. €}$$

**Αρχικό κόστος αιολικού πάρκου:**

$$\begin{aligned}
1^{\text{η}} \text{ περιοχή } K_{\text{ΑΠ}} &= 195 \times 2,03 = 396 \text{ εκ. } \text{€} \\
2^{\text{η}} \text{ περιοχή } K_{\text{ΑΠ}} &= 316 \times 2,03 = 641 \text{ εκ. } \text{€} \\
3^{\text{η}} \text{ περιοχή } K_{\text{ΑΠ}} &= 541 \times 2,03 = 1,10 \text{ δις } \text{€} \\
4^{\text{η}} \text{ περιοχή } K_{\text{ΑΠ}} &= 845 \times 2,03 = \underline{1,72 \text{ δις } \text{€}} \\
&\qquad\qquad\qquad 3,85 \text{ δις } \text{€}
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
1^{\text{η}} \text{ περιοχή } & 396 \text{ εκ. } \text{€} / (1.502,6 \text{ GWh/έτος} \times 10) \text{ GWh} = 26,3 \text{ €} \\
2^{\text{η}} \text{ περιοχή } & 641 \text{ εκ. } \text{€} / (2.435,0 \text{ GWh/έτος} \times 10) \text{ GWh} = 26,3 \text{ €} \\
3^{\text{η}} \text{ περιοχή } & 1,10 \text{ δις } \text{€} / (4.078,4 \text{ GWh/έτος} \times 10) \text{ GWh} = 26,9 \text{ €} \\
4^{\text{η}} \text{ περιοχή } & 1,72 \text{ δις } \text{€} / (6.077,6 \text{ GWh/έτος} \times 10) \text{ GWh} = 28,2 \text{ €}
\end{aligned}$$

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