



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Τεχνολογίες Ενέργειας και Περιβάλλοντος

Σημειώσεις Εργαστηριακού Μαθήματος

Δρ. Κολοκοτσά Διονυσία

Δρ. Σπυριδάκη Αθηνά

Δρ Γλυτσός Θόδωρος



Χανιά 2016

Πίνακας Περιεχομένων

1	<i>Εκπόνηση Μελέτης Αιολικού Δυναμικού</i>	3
1.1	Άνεμος	3
1.1.1	Εισαγωγή	3
1.1.2	Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου	4
1.2	Όργανα μέτρησης του πεδίου ανέμου	14
1.2.1	Όργανα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου	14
1.3	Υπολογισμός παρεχόμενης ενέργειας από αιολική μηχανή	19
1.4	Πειραματικό μέρος	22
1.4.1	Σκοπός του πειράματος	22
1.4.2	Οδηγίες για την πραγματοποίηση του πειράματος	24
1.4.3	Ανάλυση και Επεξεργασία των μετρήσεων	24
1.5	Βιβλιογραφικές αναφορές	25

1 Εκπόνηση Μελέτης Αιολικού Δυναμικού

Η αιολική ενέργεια είναι από τις πλέον γνωστές και από τις παλαιότερες ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας. Η τεχνολογία των ανεμόμυλων, με την βοήθεια των οποίων η ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, ήταν αρκετά γνωστή από αιώνες. Είναι ακόμα γνωστό ότι οι αρχαίοι Έλληνες ανέπτυξαν τους πολιτισμούς τους βασισμένοι στη δύναμη του ανέμου, ο οποίος κινούσε τα πλοία με τα οποία έκαναν το εμπόριο στον τότε γνωστό κόσμο.

Σήμερα, στη γενική τους μορφή, οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε άλλες πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική. Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη ως προς όλες της τις παραμέτρους πηγή ενέργειας. Για να καταστεί συνεπώς δυνατή η εκμετάλλευση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας μιας περιοχής, είναι απαραίτητη η μελέτη του αιολικού δυναμικού της.

1.1 Άνεμος

1.1.1 Εισαγωγή

Άνεμος καλείται ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος βρίσκεται σε κίνηση, σε σχέση με τη Γη. Λόγω του ότι η κίνηση αυτή είναι εντονότερη στο οριζόντιο επίπεδο, ως «άνεμος» χαρακτηρίζεται ο οριζόντιος άνεμος, αγνοώντας στον ορισμό αυτό την κατακόρυφη συνιστώσα.

Ο άνεμος είναι μέγεθος διανυσματικό. Όπως κάθε ρευστό που βρίσκεται σε κίνηση, καθορίζεται από το διάνυσμα της ταχύτητας κατά μέτρο (ένταση ανέμου) και τη φορά του (διεύθυνση ανέμου). Η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου εξαρτώνται από ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης, κ.ά.) καθώς και από τοπικούς παράγοντες

(ανάγλυφο περιοχής, ύπαρξη θάλασσας). Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης.

Η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα οφείλεται στο συνδυασμό της προσλαμβανόμενης από την ατμόσφαιρα και τη Γη ηλιακής ακτινοβολίας με την ανομοιομορφία του γήινου ανάγλυφου και την περιστροφή της Γης γύρω από το άξονά της. Οι δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα είναι οι:

- Δύναμη βαροβαθμίδας.
- Δύναμη Coriolis.
- Δύναμη τριβής.

Σε μια απλουστευμένη θεώρηση, μπορούμε να πούμε ότι οι άνεμοι της Γης παράγονται κυρίως από την άνιση θέρμανση της επιφάνειας της Γης από τον Ήλιο. Ο αέρας που έρχεται σε επαφή με θερμότερη γήινη επιφάνεια γίνεται θερμότερος από το γειτονικό του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η πυκνότητά του. Ο ελαφρύτερος αυτός αέρας κινείται ανοδικά και γειτονικές (ψυχρότερες, άρα βαρύτερες) αέριες μάζες έρχονται για να καταλάβουν το κενό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου.

1.1.2 Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

Η εκτίμηση του ανέμου μπορεί να γίνει μέσω μετρήσεων ή προσομοιώσεων. Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας που περικλείει ο άνεμος. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:

- Την ταχύτητα του ανέμου.
- Τη διεύθυνση του ανέμου.
- Την επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη.
- Το στροβιλισμό του ανέμου.
- Τη μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου.

1.1.2.1 Ταχύτητα (Ένταση) ανέμου

Στη Μετεωρολογία η ένταση του ανέμου εκφράζεται μέσω της ταχύτητας με την οποία αυτός κινείται. Οι συνηθέστερες μονάδες μέτρησης της ταχύτητας (ή έντασης) του ανέμου είναι τα m/s (ή km/h) και η κλίμακα Beaufort. Η αντιστοιχία μεταξύ της κλίμακας Beaufort και της ταχύτητας του ανέμου σε m/s παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1: Αντιστοιχία μεταξύ μέτρησης ανέμου σε m/s και σε κλίμακα Beaufort

Bf	Ταχύτητα (m/s)
0	0-0.2
1	0.3-1.5
2	1.6-3.3
3	3.4-5.4
4	5.5-7.9
5	8.0-10.7
6	10.8-13.8
7	13.9-17.1
8	17.2-20.7
9	20.8-24.4
10	24.5-28.4
11	28.5-32.6
12	>32.7

Η κλίμακα Beaufort, η οποία επινοήθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα από τον Άγγλο ναύαρχο Sir Francis Beaufort, είναι μία εμπειρική κλίμακα η οποία στηρίζεται στην αρχή της επίδρασης του ανέμου στην κατάσταση της θάλασσας ή σε διάφορα αντικείμενα της στεριάς και για ιστορικούς λόγους χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα.

Τα χαρακτηριστικά του ανέμου μεταβάλλονται συνεχώς, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η χρήση στατιστικών μεθόδων για τη μελέτη του. Έτσι, κατά τη μελέτη του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής απαιτούνται οι εξής υπολογισμοί:

- Υπολογισμός μέσων ετήσιων ταχυτήτων ανέμου
- Υπολογισμός μέσων μηνιαίων ταχυτήτων ανέμου
- Υπολογισμός μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου.

Μέση ταχύτητα Ανέμου

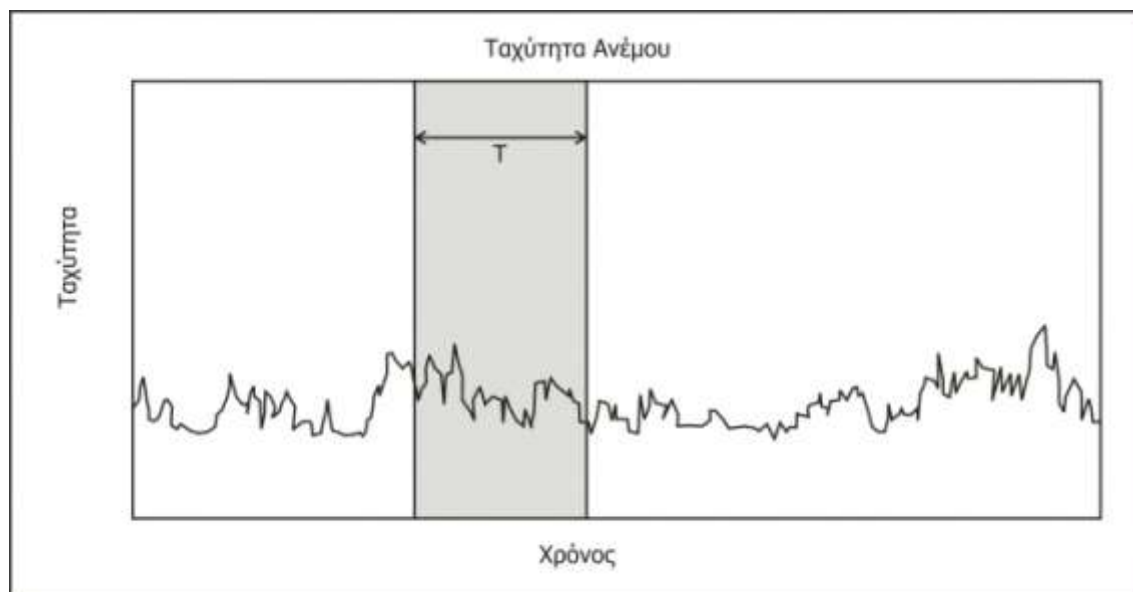
Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος (Σχήμα 1), το οποίο εμφανίζει σημαντικές μεταβολές μέσα σε μικρά χρονικά διαστήματα, ενώ χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ των μέσων τιμών που λαμβάνονται ανά sec και των μέσων ωριαίων τιμών. Οι διακυμάνσεις της μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες, ενώ υπάρχει και σημαντική εξάρτηση από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας και της διακύμανσης γύρω από την μέση τιμή:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (1)$$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου ορίζεται με βάση την παρακάτω σχέση για πειραματικές τιμές οι οποίες έχουν ληφθεί ανά δεκάλεπτο.

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(t) dt \quad V'(t) = 0 \quad \text{για } T = 10 \text{ min} \quad (2)$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι στιγμιαίες τιμές και η μέση τιμή του ανέμου.



Σχήμα 1: Μέση ταχύτητα του ανέμου.

Η διακύμανση της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή δίνεται από την:

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt \quad \text{για } T = 10 \text{ min} \quad (3)$$

Η τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου από τη μέση τιμή δίδεται από τη σχέση:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i^N (v_n - \bar{v})^2} \quad (4)$$

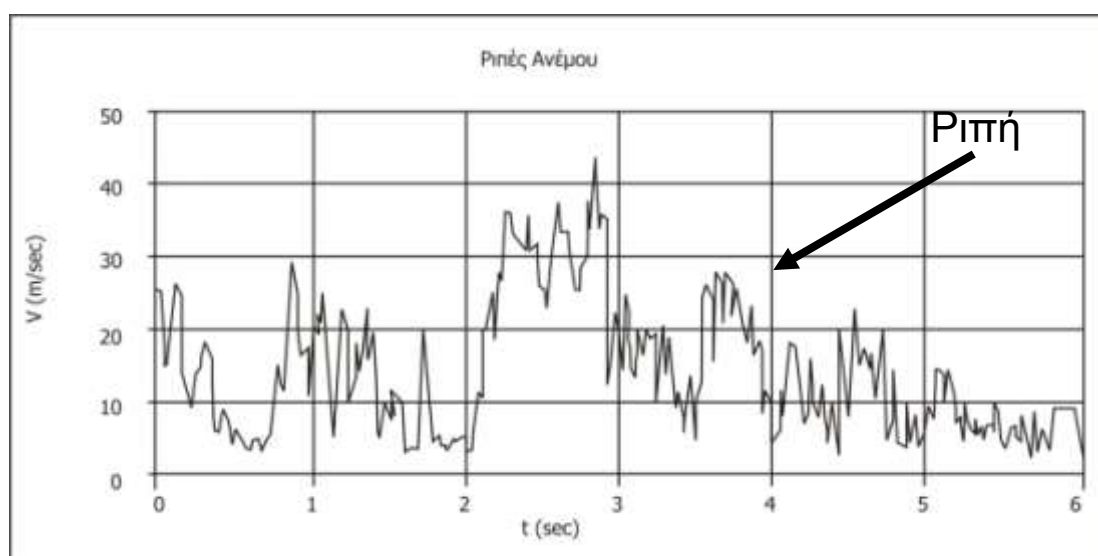
Μέγιστη Ταχύτητα Ανέμου

Ως μέγιστη ταχύτητα του ανέμου καλούμε την υψηλότερη τιμή της μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (ώρα, ημέρα, έτος, κλπ.). Η μέγιστη αυτή τιμή καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής. Εξαρτάται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Ανάλογα με τα δεδομένα που έχουμε, χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της μία από τις παρακάτω μεθόδους:

- Με δεδομένα ωριαίων τιμών της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται η μέγιστη ωριαία και στην συνέχεια η μέγιστη ημερήσια ταχύτητα του ανέμου.
- Για 20ετή και μεγαλύτερη χρονοσειρά ορίζουμε ως δείγμα μεγίστων ταχυτήτων ανέμου τις μέγιστες ετήσιες τιμές.
- Με τον στατιστικό νόμο των ακραίων τιμών εκτιμάται η μέγιστη ταχύτητα που αναμένεται να ξεπεραστεί κατά μέσο όρο μια φορά τουλάχιστον σ' ένα αριθμό ετών.

Ριπές Ανέμου

Ως ριπή του ανέμου ορίζεται η ξαφνική και μικρής διάρκειας (~20sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα. Ισχύει ο εμπειρικός κανόνας: η ριπή συνήθως υπερβαίνει τα 9m/sec και διαφέρει από τα συνήθη επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec.



Σχήμα 2: Ριπές του Ανέμου

1.1.2.2 Διεύθυνση του ανέμου

Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος, σε σχέση με τη θέση στην οποία μετράμε. Μετριέται συνήθως σε

μοίρες (deg) ή λαμβάνει ονομασίες που αντιστοιχούν σε ολόκληρο κυκλικό τομέα, από τον αληθή Βορρά, κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Η διεύθυνση του ανέμου συμβολίζεται με τα αρχικά γράμματα της αντίστοιχης λέξης: στην Ελλάδα χρησιμοποιείται το ελληνικό αλφάβητο, ενώ στη διεθνή βιβλιογραφία το λατινικό. Για παράδειγμα, βόρειος άνεμος συμβολίζεται ως Β ή Ν, ο βορειοδυτικός άνεμος ως ΒΔ ή ΝW, κ.ο.κ. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται το εύρος κλίμακας (σε μοίρες) που αντιστοιχεί σε κάθε διεύθυνση ανέμου.

Πίνακας 2: Ονομασίες ανέμων ανά διεύθυνση

ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ (Αγγλικό ή ελληνικό αλφάβητο)	ΕΥΡΟΣ ΣΕ ΜΟΙΡΕΣ (deg)
Βόρειοι	N ή Β	337.5° - 22.5°
ΒορειοΑνατολικοί	NE ή ΒΑ	22.5° - 67.5°
Ανατολικοί	E ή Α	67.5° - 112.5°
ΝοτιοΑνατολικοί	SE ή ΝΑ	112.5° - 157.5°
Νότιοι	S ή Ν	157.5° - 202.5°
ΝοτιοΔυτικοί	SW ή ΝΔ	202.5° - 247.5°
Δυτικοί	W ή Δ	247.5° - 292.5°
ΒορειοΔυτικοί	NW ή ΒΔ	292.5° - 337.5°

Η διεύθυνση του ανέμου «ταλαντώνεται» συνεχώς γύρω από μία μέση θέση, εμφανίζοντας όμως μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα του ανέμου. Οι διευθύνσεις του ανέμου που συνεισφέρουν κατά τουλάχιστον 10% στην συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια ονομάζονται **κύριες διευθύνσεις του ανέμου**. Εξαρτώνται από τους προσανατολισμούς των τοποθεσιών, από την βλάστηση και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (λόφοι, βουνά, κοιλάδες, κτίρια, κ.ά.). Ως **επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου** ορίζονται οι διευθύνσεις που εμφανίζουν στην περιοχή που μελετάμε τη μεγαλύτερη συχνότητα. Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συχνά με την εποχή.

Ο χώρος μεταξύ του σημείου που εξετάζουμε και του σημείου του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος (επικρατούσα διεύθυνση) χαρακτηρίζεται ως **προσήμεμη περιοχή**. **Υπήνεμη** είναι η περιοχή που είναι προστατευόμενη από τον άνεμο. Συχνά είναι η αντίθετη της προσήμεμης. Επίσης μπορεί να είναι η περιοχή που εκτίθεται μεν σε ανέμους, αλλά με ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης.

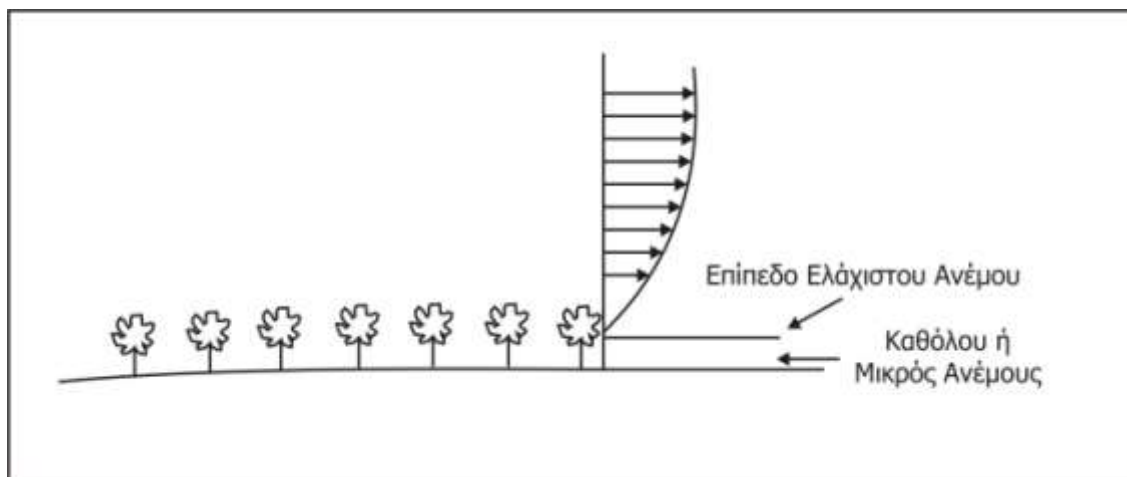
1.1.2.3 Ανατάραξη του αέρα

Η ένταση I της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως:

$$I = \frac{\sigma_v}{V} \quad (5)$$

όπου σ_v η τυπική απόκλιση.

Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος τραχύτητας z_0 . Το μήκος τραχύτητας z_0 (Σχήμα 3) εκφράζει το μέσο ύψος των στοιχείων μιας επιφάνειας, χωρίς να ληφθούν υπόψη το σχήμα των στοιχείων τραχύτητας αλλά και άλλες ιδιότητες τους, και επηρεάζει σημαντικά το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής.



Σχήμα 3: Μήκος τραχύτητας

Ένα πεδίο θεωρείται ομοιογενές όταν το μήκος τραχύτητας είναι μικρό σε σχέση με το ύψος της αιολικής μηχανής. Αντίθετα, όταν το μήκος τραχύτητας είναι μεγάλο, το πεδίο χαρακτηρίζεται ως ανομοιογενές.

Οι τιμές του z_0 κυμαίνονται από 0.00001m (πάγος) ως 10 m (αστικές περιοχές). Εξαρτώνται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών και μεταβάλλονται με τις εποχές του έτους (φθινόπωρο, άνοιξη, εποχές συγκομιδής, κ.ο.κ.). Με βάση τα παραπάνω η ένταση της ανατάραξης δίδεται από τις σχέσεις:

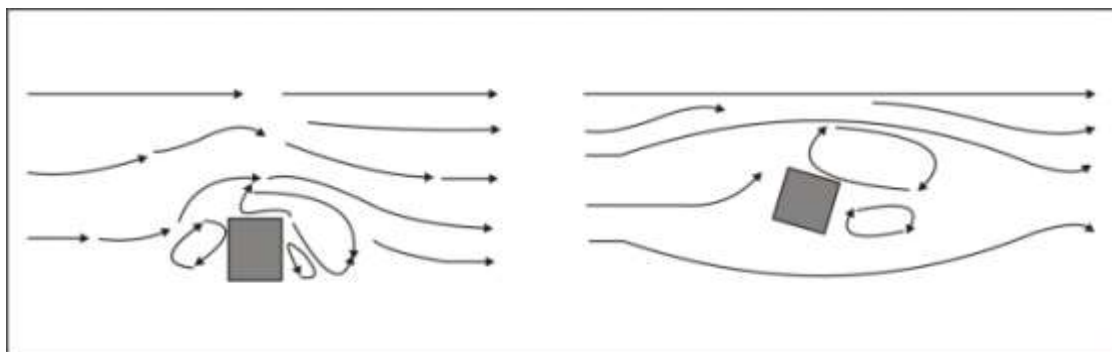
$$I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}}, \quad z_0 \leq 0,20m \quad (6)$$

$$I = \frac{-0.14 \ln z + 0.78}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad z_0 > 0,20m \quad (7)$$

Η ένταση της ανατάραξης είναι ένα από τα βασικά μεγέθη τα οποία πρέπει να γνωρίζει κανείς όταν πρόκειται να εγκαταστήσει μια αιολική μηχανή, γιατί δεν επιδρά μόνο στη συλλεγόμενη ισχύ, αλλά και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος καθώς αποτελεί σημαντική παράμετρο της εκτίμησης της κόπωσης των υλικών της αιολικής μηχανής.

1.1.2.4 Στροβιλισμός του αέρα

Η ανατάραξη του αέρα δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα λόγω της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους (Σχήμα 4). Τα εμπόδια στο έδαφος συχνά δημιουργούν οργανωμένους στροβίλους. Οι οργανωμένοι στρόβιλοι μπορούν να επηρεάσουν την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο αλλά και την εγκατάσταση της αιολικής μηχανής.



Σχήμα 4: Στροβιλισμός του αέρα

1.1.2.5 Καθ' ύψος κατανομή του ανέμου

Η κατανομή του ανέμου (wind profile) που ενδιαφέρει σε σχέση με την αιολική ενέργεια αναφέρεται στην μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος. Συνήθως ο άνεμος μετριέται σε ύψος 10m από το έδαφος. Όμως το ύψος στο οποίο λειτουργεί μια ανεμογεννήτρια είναι μεγαλύτερο, συνεπώς θα πρέπει να γίνει αναγωγή των τιμών του ανέμου στο ζητούμενο ύψος. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η καθ' ύψος κατανομή του ανέμου στις πρώτες λίγες εκατοντάδες μέτρα πάνω από το έδαφος. Η κατανομή αυτή του ανέμου επηρεάζει:

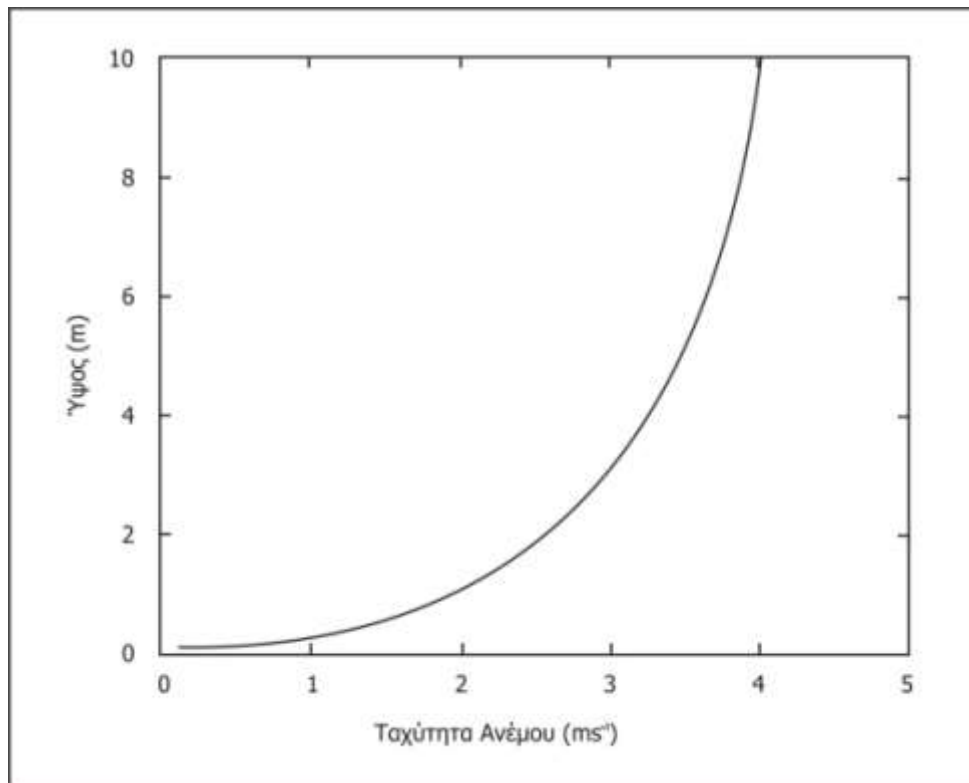
- Την αιολική ενέργεια που απορροφά η αιολική μηχανή.
- Την κόπωση της αιολικής μηχανής.
- Την αντοχή του πύργου στήριξης.

Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας με το ύψος δίνεται από την εξίσωση:

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_0 + z}{z_0} \quad (8)$$

όπου u^* η ταχύτητα τριβής που εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα και την επιφανειακή τάση Reynolds, k η σταθερά von Karman (σταθερά αναλογίας) και z_0 το μήκος τραχύτητας του εδάφους. Επομένως, εάν γνωρίζουμε την ταχύτητα του ανέμου, V_1 , στο ύψος z_1 , τότε μπορούμε να την υπολογίσουμε στο ύψος z_2 από τη σχέση:

$$V_2 = V_1 \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad (9)$$



Σχήμα 5: Κατανομή του ανέμου καθ' ύψος

Πίνακας 3: Οι τιμές του z_0 για διάφορες κατηγορίες τραχύτητας

Κατηγορία Τραχύτητας	Είδος εδάφους	z_0 (m)
0	Εξομαλυσμένο (θάλασσα, χιόνι, άμμος)	0.001-0.02
1	Μέτρια τραχύτητα (χαμηλή βλάστηση - καλλιέργειες, αγροτικές περιοχές)	0.02-0.30
2	Τραχύ έδαφος (Δάση, προάστια πόλεων)	0.30-2.00
3	Πολύ τραχύ έδαφος (αστικές περιοχές, ψηλά κτίρια)	2.0-10.0

1.2 Όργανα μέτρησης του πεδίου ανέμου

1.2.1 Όργανα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου

Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου ονομάζονται ανεμόμετρα ή ανεμογράφοι. Υπάρχει μεγάλο πλήθος τέτοιων οργάνων, που διαφέρουν ως προς την αρχή λειτουργίας, το κόστος και την ακρίβεια που παρέχουν. Η επιλογή του κατάλληλου οργάνου γίνεται με κριτήριο τις ανάγκες της ειδικής εφαρμογής στην οποία θα χρησιμοποιηθεί το όργανο (μετεωρολογικές παρατηρήσεις, παρατηρήσεις ρουτίνας, περιβαλλοντικές μελέτες κλπ).



Σχήμα 6: Τύποι ανεμομέτρων. α) ανεμόμετρο κυπέλλων, β) ανεμόμετρο έλικας, γ) ηχητικό ανεμόμετρο.

Η λειτουργία των ανεμομέτρων βασίζεται σε μία από τις παρακάτω αρχές λειτουργίας:

- Α) Στην πίεση/δύναμη που ασκεί ο άνεμος σε μία επιφάνεια.
- Β) Στην απαγωγή θερμότητας από μία επιφάνεια λόγω του ανέμου.
- Γ) Στην κίνηση του αέρα.

Ανάλογα με την αρχή λειτουργίας του, ένα ανεμόμετρο μπορεί να είναι κυπέλλου, έλικας, ηχητικό, Doppler, θερμού σύρματος, κ.ά.. Βασικά μεγέθη τα οποία

χαρακτηρίζουν κάθε ανεμόμετρο είναι η σταθερά απόστασης και το κατώτερο όριο λειτουργίας (τιμή κατωφλίου). Τα μεγέθη αυτά ορίζονται ως εξής:

Σταθερά απόστασης: Είναι η διαδρομή που πρέπει να διανύσει μία αέρια μάζα διαμέσου του οργάνου, ώστε αυτό να ανταποκριθεί κατά 63% ($1-1/e$) της συνολικής μεταβολής από τη αρχική στην τελική κατάσταση. Η σταθερά αυτή πολλές φορές αναφέρεται και σαν χρονική σταθερά του οργάνου.

Κατώτερο όριο λειτουργίας: Είναι η μικρότερη τιμή της ταχύτητας του ανέμου που μπορεί να καταγραφεί από το όργανο.

Σημαντικές επίσης παράμετροι, στην επιλογή ενός ανεμομέτρου, είναι η ακρίβεια που παρέχει και ο ρυθμός καταγραφής των πειραματικών μετρήσεων.

Παρακάτω περιγράφεται ο τύπος ανεμομέτρου θερμού σύρματος που θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος:

Ανεμόμετρα θερμού σύρματος: Τα ανεμόμετρα θερμού σύρματος (Hot-Wire Anemometers, HWA) χρησιμοποιούν έναν αισθητήρα από πολύ λεπτό μεταλλικό νήμα (διαστάσεων περίπου: μήκος = έως 1mm, διάμετρος = 2,5μm έως 5μm), κατασκευασμένου από πλατίνα, βολφράμιο ή κράματα πλατίνας-ιριδίου. Είναι αρκετά εύθραυστα και για το λόγο αυτό σε υψηλές ταχύτητες ροής είναι προτιμότερη η χρήση άλλου τύπου ανεμομέτρου. Το σύρμα θερμαίνεται με ηλεκτρικό ρεύμα. Υπάρχουν δύο μέθοδοι οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου: η μέθοδος σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος (CCA) και η μέθοδος σταθερής θερμοκρασίας (CTA), η οποία είναι μεταγενέστερη και γενικά πιο ευρέως αποδεκτή.

Στη μέθοδο σταθερού ρεύματος η ένταση του ρεύματος διατηρείται σταθερή, ενώ μεταβάλλεται η ηλεκτρική αντίστασή του. Πιο συγκεκριμένα, το μεταλλικό σύρμα συνδέεται σε σειρά με μια ωμική αντίσταση πολύ μεγαλύτερη από τη δική του. Με τον τρόπο αυτό η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει παραμένει σταθερή, παρά τη μεταβολή της ωμικής του αντίστασης με τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου. Η έξοδος της διάταξης είναι η πτώση τάσης στα άκρα του σύρματος. Με την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού

προκαλείται μείωση της θερμοκρασίας του σύρματος, λόγω απαγωγής θερμότητας από αυτό. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση της ωμικής του αντίστασης και συνεπώς της τάσης στα άκρα του. Με τη μείωση όμως της θερμοκρασίας του, θα ελαττώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά του από το ρευστό (του οποίου τη θερμοκρασία θεωρούμε σταθερή) έως ότου επέλθει θερμική ισορροπία. Τότε η παραγόμενη θερμότητα θα ισούται με την παραγόμενη θερμότητα από την ηλεκτρική αντίσταση του σύρματος. Μέρος της παραγόμενης θερμότητας αποθηκεύεται στο ίδιο το σύρμα, ενώ η υπόλοιπη απάγεται από το ρευστό. Στα ανεμόμετρα αυτά η σταθερά απόκρισης δεν είναι πολύ χαμηλή, ενώ εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού.

Στη μέθοδο σταθερής θερμοκρασίας η θερμοκρασία του σύρματος διατηρείται σταθερή με τη βοήθεια ενός ηλεκτρονικού συστήματος ανάδρασης, δηλαδή με ανατροφοδότηση της εξόδου του συστήματος στην είσοδό του. Έτσι, η τάση (και άρα η ένταση του ρεύματος) μεταβάλλονται με τις διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου. Αναλυτικότερα, το θερμό σύρμα συνδέεται ως ένας από τους 4 κλάδους μιας γέφυρας Wheatstone. Κατά τη διέλευση του ρευστού, λόγω των διακυμάνσεων της ταχύτητάς του, μεταβάλλεται στιγμιαία η θερμοκρασία και άρα η ωμική αντίσταση του σύρματος. Έτσι, μεταβάλλεται και η τάση στα άκρα του σύρματος. Ένας ενισχυτής τάσης χρησιμοποιείται για να διατηρεί τη γέφυρα σε ισορροπία και σταθερή τη θερμοκρασία του σύρματος. Πιο συγκεκριμένα, αν για παράδειγμα η ταχύτητα του ρευστού αυξηθεί, για να διατηρηθεί σταθερή η θερμοκρασία του σύρματος, θα πρέπει να αυξηθεί η παραγόμενη θερμότητα από το σύρμα, ώστε να αντισταθμιστεί η θερμότητα που απάγεται από το ρευστό. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αύξησης της έντασης του ρεύματος, η οποία γίνεται από τον ενισχυτή τάσης. Αντίθετα, στην περίπτωση μείωσης της ταχύτητας του ρευστού, θα πρέπει η ένταση του ρεύματος να μειωθεί. Η μέθοδος αυτή ανταποκρίνεται πολύ καλύτερα στις γρήγορες μεταβολές της ταχύτητας του ρευστού, σε σχέση με τη μέθοδο σταθερού ρεύματος.

Το είδος του αισθητήρα, δηλαδή το σχήμα και το υλικό κατασκευής του καθορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή. Ανάλογα με τι θέλουμε να μετρήσουμε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ανεμόμετρα HWA που διαθέτουν αισθητήρα μονοδιάστατης, δισδιάστατης ή τρισδιάστατης ροής.

B) Όργανα μέτρησης της διεύθυνσης του ανέμου

Τα όργανα για τη μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου ονομάζονται ανεμοδείκτες και συνήθως συνοδεύουν τα ανεμόμετρα. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ξεχωριστό όργανο για τη μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου, αλλά ο προσδιορισμός της γίνεται από τις μετρούμενες συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου.

Οι ανεμοδείκτες αποτελούνται συνήθως από ένα κινητό τμήμα το οποίο, λόγω της αεροδυναμικής του σχήματός του, προσανατολίζεται πάντοτε προς τη διεύθυνση του ανέμου. Το κινητό τμήμα στηρίζεται σε άξονα περιστροφής, στο άλλο άκρο του οποίου υπάρχει ηλεκτρική διάταξη που παράγει κατάλληλο σήμα ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου. Η ηλεκτρική διάταξη μπορεί να αποτελείται από μεταβαλλόμενη ηλεκτρική αντίσταση ή ζεύγη φωτοδιόδων που λειτουργούν ως πομπός και δέκτης. Η κατεύθυνση του βέλους του ανεμοδείκτη καθορίζει το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Γενικά ένας ανεμοδείκτης πρέπει:

- Να γυρίζει γύρω από τον άξονα περιστροφής του με την ελάχιστη δυνατή τριβή.
- Να είναι σωστά ισορροπημένος, αλλιώς θα παρουσιάζει συστηματικό σφάλμα προς μια συγκεκριμένη διεύθυνση.
- Να έχει σχεδιαστεί ώστε να παράγει τη μέγιστη ροπή, για δεδομένη μεταβολή στη διεύθυνση του ανέμου, σε σχέση με τη ροπή αδράνειας.
- Να μη συντονίζεται με τις φυσικές ταλαντώσεις του ανέμου, να έχει γρήγορη απόκριση στις διακυμάνσεις της διεύθυνσης του ανέμου.

Χαρακτηριστικό μέγεθος των ανεμοδεικτών είναι η **απόσταση υστέρησης**, η οποία ορίζεται ως ο χρόνος που χρειάζεται ο ανεμοδείκτης για να καλύψει το 50% της απόστασης, από το αρχικό σημείο που βρίσκεται, μέχρι το τελικό σημείο της περιστροφής του, όπου θα είναι πλέον προσανατολισμένος κατά τον πνέοντα άνεμο. Η απόσταση υστέρησης είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου.

Από τους κυριότερους τύπους ανεμοδεικτών είναι οι ανεμοδείκτες μεταβλητής ηλεκτρικής αντίστασης, που είναι ευρέως διαδεδομένοι εξαιτίας της ικανοποιητικής τους ακρίβειας καθώς και οι ανεμοδείκτες φωτοδιόδων, που έχουν περιορισμένη εφαρμογή, λόγω περιορισμένης ακρίβειας.

Γ) Τοποθέτηση ανεμομέτρων και ανεμοδεικτών

Για να λαμβάνονται αξιόπιστες μετρήσεις, ανεπηρέαστες από τοπικούς παράγοντες, αλλά και για να είναι δυνατή η συγκρισιμότητα μεταξύ των μετρήσεων από διαφορετικούς σταθμούς, η τοποθέτηση των οργάνων πρέπει να ακολουθεί κάποιους κανόνες, που προτείνονται από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό. Έτσι, τα όργανα πρέπει να τοποθετούνται σε ύψος 10m από την επιφάνεια του εδάφους, το οποίο θα πρέπει να είναι απαλλαγμένο φυσικών ή τεχνητών εμποδίων. Ένα εμπόδιο θεωρείται ότι δεν επηρεάζει τις ανεμολογικές μετρήσεις αν η απόστασή του από το όργανο μέτρησης είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του εμποδίου.

Στις περιπτώσεις ύπαρξης εμποδίων είναι απαραίτητο να τροποποιηθεί το ύψος τοποθέτησης των οργάνων, έτσι ώστε οι μετρήσεις να είναι όσο το δυνατό απαλλαγμένες από τις τοπικές συνθήκες και να αντιπροσωπεύουν την ευρύτερη περιοχή. Για παράδειγμα, σε μια θέση χωρίς σημαντικά εμπόδια, τα οποία κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα γύρω από το όργανο, τα κύπελλα του ανεμογράφου πρέπει να τοποθετηθούν σε ένα “ενεργό ύψος” $h + 10m$, όπου h είναι το μέσο ύψος των εμποδίων.

Η τοποθέτηση οργάνων στην οροφή κτιρίων μπορεί να προκαλέσει σημαντικό σφάλμα στις μετρήσεις, καθώς το ίδιο το κτίριο διαταράσσει σημαντικά τη ροή του αέρα, ανάλογα με το μέγεθος και το σχήμα του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αν τοποθετηθεί ανεμόμετρο στην οροφή ενός κτιρίου και κοντά στην υπήνεμη πλευρά του, το σφάλμα στις μετρήσεις για μικρές ταχύτητες του ανέμου μπορεί να

φτάσει το 50%, ενώ για ταχύτητες 5m/s το 25%. Για απομονωμένο και μεγάλου ύψους κτίριο, ο ιστός ή ο πύργος που θα υψωθεί στην οροφή θα πρέπει να έχει ύψος ίσο τουλάχιστον με το $\frac{1}{2}$ ή τα $\frac{3}{4}$ του κτιρίου.

Όταν οι μετρήσεις γίνονται για ειδικούς σκοπούς (μελέτη του οριακού στρώματος) και χρησιμοποιούνται ανεμόμετρα σε διάφορα ύψη, θα πρέπει το κατώτερο να τοποθετηθεί σε ύψος τουλάχιστον πενταπλάσιο από το ύψος τραχύτητας και το έδαφος να μην έχει εμπόδια σε απόσταση 50 ως 100 φορές μεγαλύτερη από το ύψος του υψηλότερου ανεμομέτρου.

1.3 Υπολογισμός παρεχόμενης ενέργειας από αιολική μηχανή

Το πρώτο βήμα για τον υπολογισμό της παρεχόμενης ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια είναι ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Αρχικά υπολογίζεται η διαθέσιμη αιολικής ισχύς, που προκύπτει από την κινητική ενέργεια του ανέμου. Με χρήση στιγμιαίων ταχυτήτων του ανέμου έχουμε για τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου ότι:

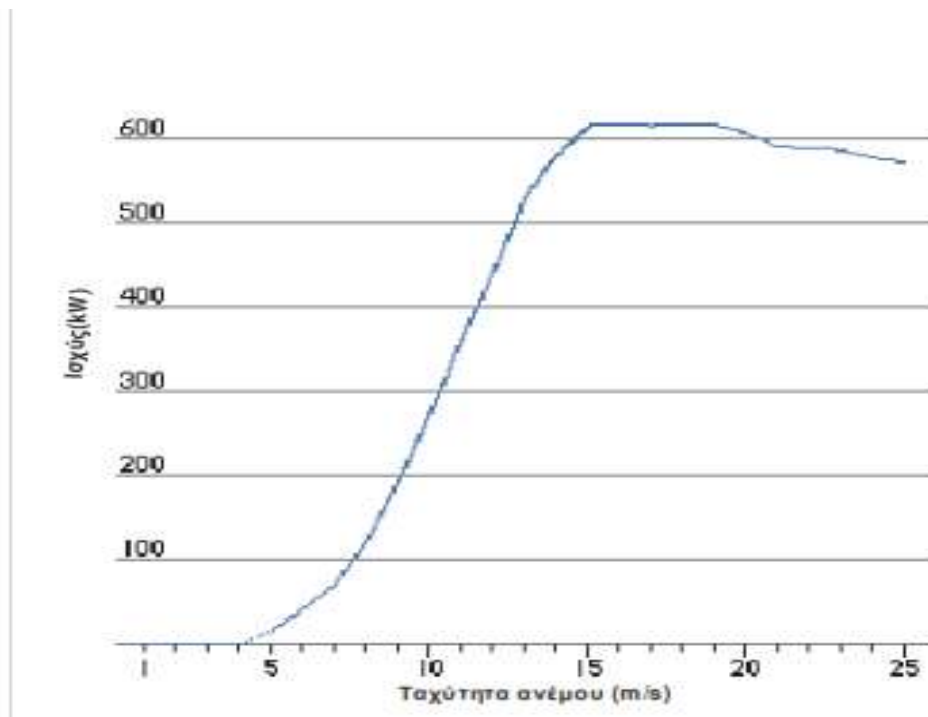
$$P = 0.5 \rho A V^3$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και A η επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια της γεννήτριας σε m^2 .

Στην πραγματικότητα επειδή ο αέρας εξακολουθεί να έχει ταχύτητα μετά τη διέλευση του από την πτερωτή της ανεμογεννήτριας, η διαθέσιμη αιολική ενέργεια δεν απορροφάται όλη, αλλά απορροφάται το 59.3% αυτής (νόμος του Betz). Η παραπάνω συνθήκη ισχύει για κάθε ανεμογεννήτρια, ανεξάρτητα από το είδος της και τα υλικά κατασκευής της. Άρα η διαθέσιμη αιολική ισχύς πρέπει να πολλαπλασιαστεί για κάθε ομάδα ταχυτήτων επί 0.593.

Μια τυπική ανεμογεννήτρια έχει περιοχή λειτουργίας για ταχύτητες ανέμου από περίπου 4 μέχρι 24 m/s, με καθορισμένη μη γραμμική χαρακτηριστική (Σχήμα

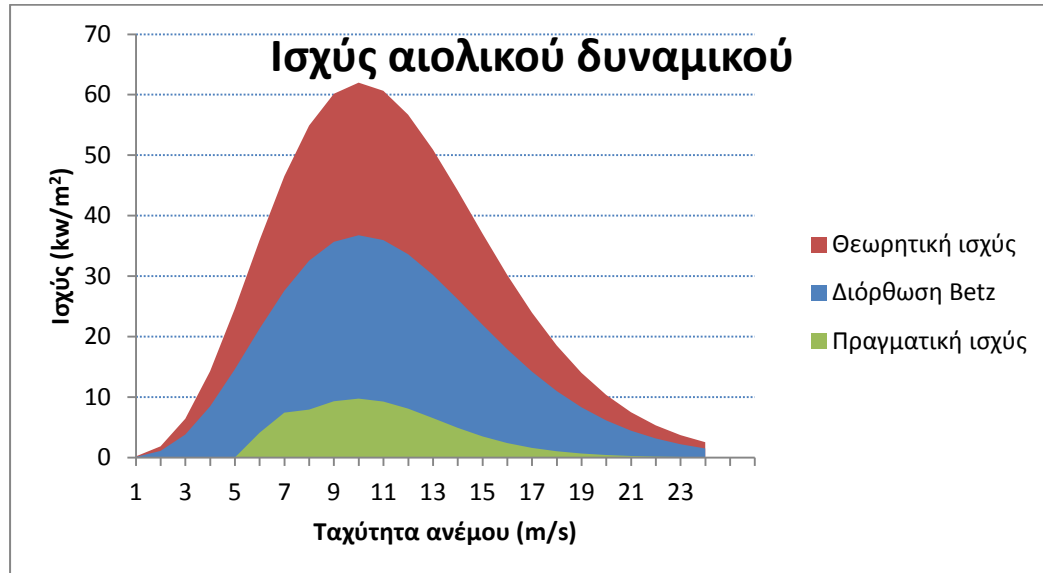
13). Κάθε ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από την καμπύλη απόδοσής της (καμπύλη ισχύος). Η ισχύς που παράγει μια ανεμογεννήτρια αυξάνεται με την άνοδο της ταχύτητας του ανέμου, μέχρι μια ορισμένη τιμή, πέρα από την οποία η απόδοση παραμένει σταθερή, ανεξάρτητα από περεταίρω αυξήσεις της ταχύτητας του ανέμου. Η παραγόμενη ισχύς ελαττώνεται ξανά όταν η ένταση του ανέμου υπερβεί τα 23-24m/s. Εξαιτίας του μεγάλου φορτίου κατά τη διάρκεια μεγάλων ταχυτήτων ανέμου στις περιπτώσεις αυτές η αιολική εγκατάσταση αποσυνδέεται, π.χ. μέσω μετακίνησης της φτερωτής με τέτοιο τρόπο, ώστε ο δρομέας να περιέλθει σε θέση αποκλεισμού του ανέμου.



Σχήμα 7: Χαρακτηριστική ισχύος σύγχρονης ανεμογεννήτριας με ονοματική ισχύ 600 kW

Ο υπολογισμός της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδει μια ανεμογεννήτρια γίνεται με πολλαπλασιασμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, ανά κλάση ταχύτητας ανέμου (όπως προκύπτει από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της), επί το σύνολο των ωρών λειτουργίας στη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και αθροίζοντας τις επιμέρους τιμές ενέργειας. Συνήθως η

παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται στο 40-45% της κατά Betz διαθέσιμης αιολικής ενέργειας.



Σχήμα 8: Θεωρητική τιμή διαθέσιμης αιολικής ισχύος (κόκκινο), διόρθωση λόγω ορίου Betz (μπλε) και πραγματική (παραγόμενη) ηλεκτρική ισχύς ανεμογεννήτριας 600 kW (πράσινο).

1.4 Πειραματικό μέρος

1.4.1 Σκοπός του πειράματος

Η άσκηση αυτή έχει ως σκοπό την εξοικείωση των φοιτητών με τα όργανα μέτρησης του αιολικού πεδίου (ανεμόμετρο), καθώς και με τους υπολογισμούς που απαιτούνται για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Οι φοιτητές θα κάνουν εκτίμηση της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από μία ανεμογεννήτρια.

Για τις μετρήσεις θα χρησιμοποιηθεί ένα φορητό ανεμόμετρο θερμού σύρματος (AP 471 S1) συνδεδεμένο με ένα φορητό καταγραφικό (DO9847) 3 καναλιών. Το συγκεκριμένο ανεμόμετρο μπορεί να μετρήσει ταχύτητες ανέμου μεταξύ 0,1m/s – 40m/s. Διαθέτει επίσης αισθητήρα θερμοκρασίας, με δυνατότητα μέτρησης από -30 °C έως +110°C.



(α)



(β)

Σχήμα 9: (α) Ανεμόμετρο AP 471 S1 και (β) καταγραφικό (DO9847)

Ζητείται να υπολογιστεί η ενέργεια που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια τοποθετημένη σε αιολικό πάρκο, ονομαστικής ισχύος 600kW. Οι τιμές της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας αναγράφονται στον Πίνακα 8. Η διάμετρος της έλικας είναι 44m και βρίσκεται σε ύψος 85m.

Πίνακας 8: Κατανομή ταχυτήτων και ισχύς ανά κλάση ταχύτητας της ανεμογεννήτριας

Εύρος ταχυτήτων (m/s)	Ισχύς (kW)
[0-1)	0
[1-2)	0
[2-3)	0
[3-4)	0
[4-5)	0
[5-6)	45
[6-7)	100
[7-8)	135
[8-9)	206
[9-10)	287
[10-11)	371
[11-12)	450
[12-13)	514
[13-14)	558
[14-15)	582
[15-16)	594
[16-17)	598
[17-18)	600
[18-19)	600
[19-20)	600
[20-21)	600
[21-22)	600
[22-23)	600
[23-24)	600
[24-25)	0
[25-26)	0

1.4.2 Οδηγίες για την πραγματοποίηση του πειράματος

Συνδέστε το ανεμόμετρο με το καταγραφικό στην είσοδο Α.

1. Ανοίξτε το καταγραφικό και διαβάστε τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου.

Καταγράψτε τις τιμές έντασης του ανέμου για χρονικό διάστημα 10 min, με βήμα μέτρησης 10s, συναρτήσει της ώρας λήψης της μέτρησης.

1.4.3 Ανάλυση και Επεξεργασία των μετρήσεων

2. Θεωρώντας ότι η έλικα μιας ανεμογεννήτριας βρίσκεται σε ύψος 85m, κάντε αναγωγή των μετρήσεών σας στο ύψος αυτό, χρησιμοποιώντας τη σχέση (9) των εργαστηριακών σημειώσεων.

3. Σχεδιάστε τη χρονοσειρά των τιμών που μετρήσατε και υπολογίστε τη μέγιστη, την ελάχιστη και τη μέση τιμή της ανεγμένης στο ύψος της ανεμογεννήτριας ταχύτητας ανέμου. Να υπολογιστεί, από τη σχέση (5), η ανατάραξη του αέρα για την παραπάνω περίοδο μετρήσεων.

Πώς αξιολογείτε το αιολικό δυναμικό της περιοχής των μετρήσεών σας;

4. Υπολογίστε τη διαθέσιμη αιολική ισχύ (σε W) για κάθε τιμή ταχύτητας του ανέμου. Για τον υπολογισμό της, θα χρησιμοποιήσετε τη σχέση:

$$P = 0.5 \rho A V^3$$

όπου $\rho=1,2929 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του αέρα και A το εμβαδόν της περιοχής που σαρώνεται από την περιστρεφόμενη έλικα της ανεμογεννήτριας.

5. Υπολογίστε (σε kWh) τη διαθέσιμη αιολική ενέργεια κατά το συνολικό χρονικό διάστημα μετρήσεων. Ο υπολογισμός γίνεται προσθέτοντας τις τιμές ισχύος ανά ταχύτητα ανέμου και πολλαπλασιάζοντας το άθροισμα επί το χρονικό διάστημα της μέτρησης.

6. Υπολογίστε την κατά Betz τιμή διαθέσιμης αιολικής ενέργειας κατά το ίδιο χρονικό διάστημα.
7. Να γίνει ο υπολογισμός της θεωρητικής τιμής της παραγόμενης ενέργειας, βάσει της ονομαστικής ισχύος και της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας.
8. Να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων στα ερωτήματα (6) και (7).

1.5 Βιβλιογραφικές αναφορές

- Εργαστηριακές Εφαρμογές Ήπιων Μορφών Ενέργειας, Ι. Κ. Καλδέλλης, Κ. Α. Καβαδίας, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης
- Εργαστηριακές Σημειώσεις Εργαστηρίου Φυσικής της Ατμόσφαιρας, <http://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php>
- Σημειώσεις Ατμοσφαιρικής Τεχνολογίας, Α. Μπάη, Δ. Μελά, Δ. Μπαλή, ΑΠΘ, 2011