

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΑΠΕ



Γ. ΒΙΣΚΑΔΟΥΡΟΣ
Ι. Φραγκιαδάκης – Φ. Μαυροματάκης

ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ



ΑΙΟΛΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

- Ταχύτητα ανέμου – Παράγοντες που την καθορίζουν
- Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος από το έδαφος
- Κατανομή ταχυτήτων ανέμου
- Ενέργεια ανέμου

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση
 - Οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης
- Ρευστό σε κίνηση: καθορισμός του διανύσματος της ταχύτητας:
 - Μέτρο (ένταση ανέμου)
 - Φορά (διεύθυνση ανέμου)
- Εξάρτηση της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου από:
 - Ειδικούς παράγοντες (γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, πεδίο πίεσης, ...)
 - Τοπικούς παράγοντες (ανάγλυφο περιοχής, ύπαρξη θάλασσας,...)

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων (διαφορετική ακτινοβολία)



- Συνεχή κίνηση αερίων μαζών
 - Από τους πόλους προς τον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες)
 - Από τον ισημερινό προς τους πόλους (θερμές μάζες)

- Η περιστροφή της Γης



- Κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών προς Δυτικά
- Κίνηση θερμών μαζών σε μεγαλύτερο ύψος προς Ανατολικά

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Ανομοιομορφία θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας – ανομοιόμορφη ψύξη



- Ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας
- Πεδία στατικής πίεσης

- Ο συνδυασμός της προσλαμβανόμενης από την ατμόσφαιρα και την γη ηλιακή ακτινοβολία με την ανομοιομορφία του γήινου ανάγλυφου και την περιστροφή της γης γύρω από το άξονά της έχει ως συνέπεια την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα.

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

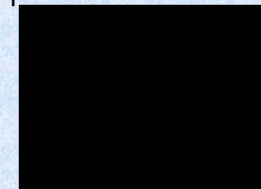
Δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

- Δύναμη βαροβαθμίδας
 - Βαροβαθμίδα είναι η διαφορά πίεσης μεταξύ σημείων που βρίσκονται στην ίδια κάθετο δύο διαδοχικών ισοβαρών, σε απόσταση ίση με τη μονάδα.
 - Αέριες μάζες κινούνται από περιοχές υψηλότερης προς περιοχές χαμηλότερης ατμοσφαιρικής πίεσης
 - Η βαροβαθμίδα είναι το αίτιο δημιουργίας του ανέμου.
 - Η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται υπό την επίδραση των άλλων δυνάμεων.

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

Δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

- Δύναμη Coriolis
 - Η περιστροφής της γης είναι από τους ισχυρότερους παράγοντες που επηρεάζουν την διεύθυνση του αέρα.
 - Η δύναμη που δρα λόγω περιστροφής της γης ονομάζεται δύναμη Coriolis ή εκτρεπτική.
 - Οι άνεμοι στρέφονται προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και αριστερά στο νότιο, σε σχέση με την αρχική διεύθυνση του ανέμου.
 - Η γωνία εκτροπής είναι ανάλογη με το γεωγραφικό πλάτος.



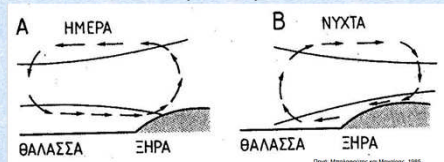
Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

Δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

■ Δύναμη τριβής

- Δημιουργούνται όταν ο άνεμος έρχεται σε επαφή με το ανάγλυφο του εδάφους.

- Θάλασσα και απόγεια αύρα



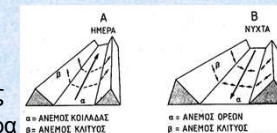
- Την ημέρα η ξηρά θερμαίνεται ταχύτερα από τη θάλασσα. Τη νύχτα η ξηρά ψύχεται ταχύτερα.

Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

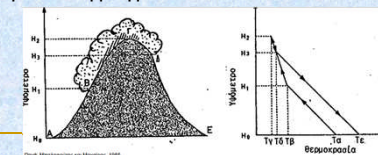
Δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

■ Δύναμη τριβής.

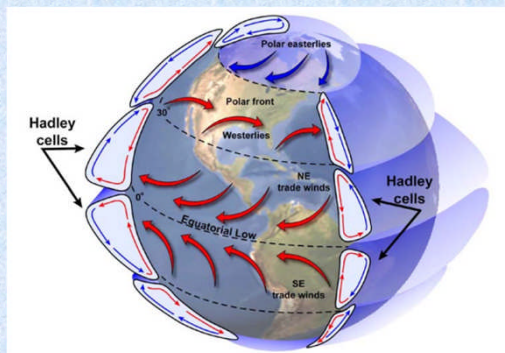
- Άνεμος βουνών και κοιλάδων
- Την ημέρα οι πλαγιές θερμαίνονται ταχύτερα από τον άξονα της κοιλάδας. Τη νύχτα οι πλαγιές ψύχονται ταχύτερα.



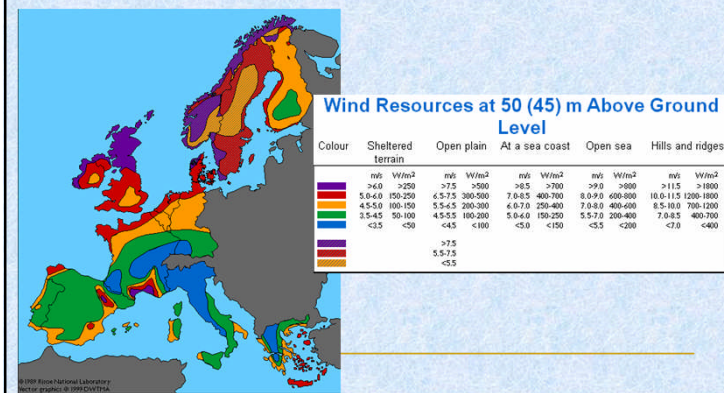
- Άνεμοι ορεινών φραγμών



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

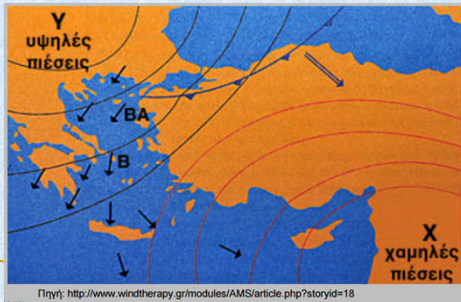


Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία



Τοπικοί Τοπικοί άνεμοι της Ελλάδας

- Οι κυριότεροι άνεμοι της ελληνικής περιοχής είναι οι ετησίες ή μελέμια. Είναι άνεμοι θερινοί, ξηροί, βόρειοι έως βορειοδυτικοί.

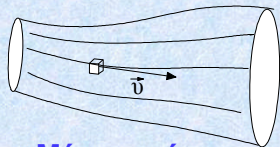


Χαρακτηριστικές Παράμετροι του Ανέμου

- Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης Αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:
 - Την ταχύτητα του ανέμου
 - Την διεύθυνση του ανέμου
 - Την επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη
 - Τον στροβιλισμό του ανέμου
 - Την μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου)

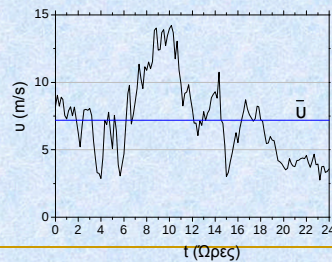
Ταχύτητα ανέμου

■ Ορισμός



■ Μέση τιμή

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$$



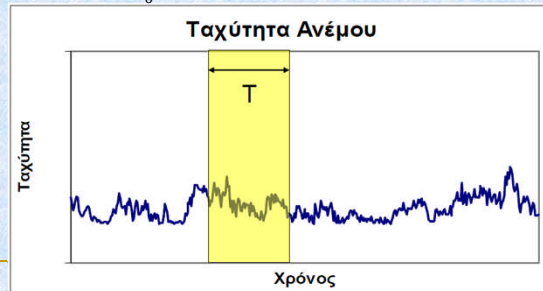
Μέση ταχύτητα του Ανέμου

- Ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος
- Σημαντικές μεταβολές μέσα σε χρονικό διάστημα(sec→h)
- Οι διακυμάνσεις μπορούν να θεωρηθούν τυχαίες
- 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:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t)$$

Μέση ταχύτητα του Ανέμου

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



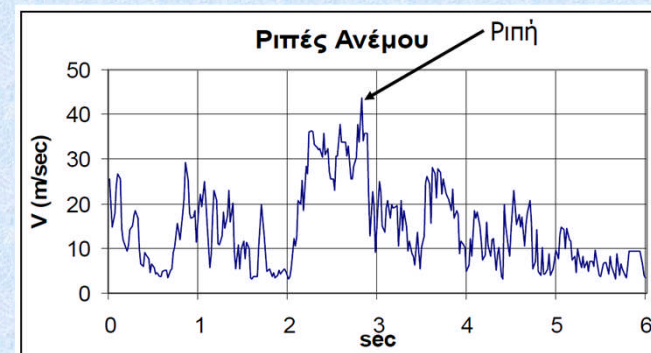
Μέγιστη Ταχύτητα του Ανέμου

- Καθορίζει την αντοχή μιας αιολικής μηχανής
- Εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της περιοχής και τα χαρακτηριστικά του εδάφους
- Υπολογίζεται:
 - 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.
 - Ο αριθμός των ετών καθορίζει και τον χρόνο ζωής της αιολικής μηχανής κάτω από κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Ριπή του Ανέμου

- Ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας (~20sec) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου μετά το πέρας της ριπής επανέρχεται στα προηγούμενα επίπεδα
- Εμπειρικός κανόνας: Η ριπή συνήθως ξεπερνά τα 9m/sec και διαφέρει από τα συνήθη επίπεδα περίπου κατά 4-5 m/sec
- Καθορίζει την κόπωση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας
- Αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30 sec θα πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη η αιολική μηχανή να τεθεί εκτός λειτουργίας

Ριπές του Ανέμου



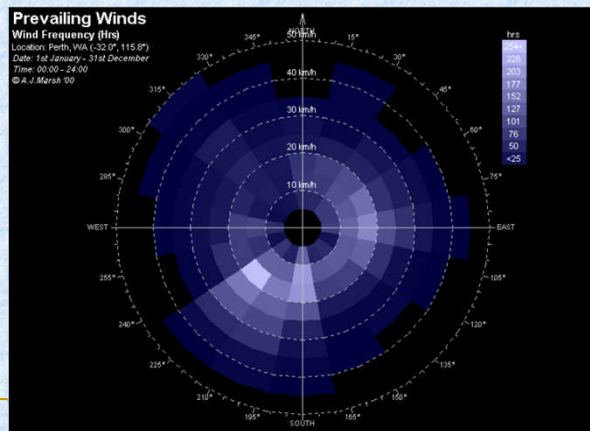
Διεύθυνση του Ανέμου

- Ως διεύθυνση του ανέμου ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο φυσά ο άνεμος σε σχέση με την θέση στην οποία μετράμε
- Η διεύθυνση του ανέμου «ταλαντώνεται» συνεχώς γύρω από μία μέση θέση εμφανίζοντας όμως μικρότερες διακυμάνσεις από την ταχύτητα του ανέμου
- Κύριες διευθύνσεις του ανέμου:
 - Οι διευθύνσεις του ανέμου που συνεισφέρουν τουλάχιστον 10% στην συνολική διαθέσιμη αιολική ενέργεια
 - Εξαρτώνται από τους προσανατολισμούς των τοποθεσιών, από την βλάστηση και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους (λόφοι, βουνά, κοιλάδες, κτίρια,...)

Διεύθυνση του Ανέμου

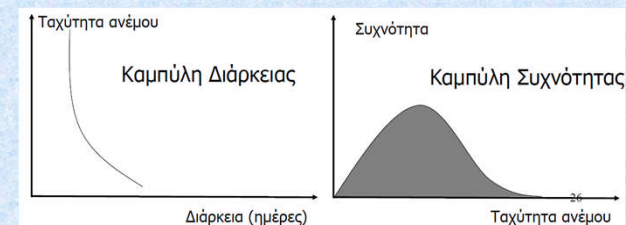
- Επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου
 - Οι διευθύνσεις που εμφανίζουν στην περιοχή που μελετάμε την μεγαλύτερη συχνότητα
 - Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συχνά με την εποχή
- Προσήνεμη – Υπήνεμη Περιοχή
 - Προσήνεμη: Ο χώρος μεταξύ του σημείου που θέλουμε να εγκαταστήσουμε την αιολική μηχανή και του σημείου του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος (επικρατούσα διεύθυνση)
 - Υπήνεμη: Η περιοχή που είναι προστατευόμενη από τον άνεμο. Συχνά είναι η αντίθετη της προσήνεμης. Περιοχή που εκτίθεται σε ανέμους με ελάχιστη συχνότητα εμφάνισης

Διεύθυνση του Ανέμου - Ροδόγραμμα



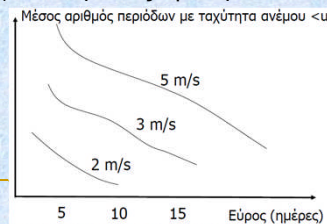
Στατιστική μελέτη του ανέμου

- Για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής απαιτούνται αναλυτικά δεδομένα της κατανομής συχνότητων των διαφόρων ταχυτήτων του ανέμου και μάλιστα κατά διεύθυνση ώστε να μπορέσουμε να προσδιορίσουμε τις κύριες διευθύνσεις του ανέμου



Καμπύλες διαστημάτων νηνεμίας

- Η μελέτη των διαδοχικών ημερών ή ωρών με νηνεμία ή χαμηλές ταχύτητες του ανέμου παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον γιατί προσδιορίζουν την περίοδο όπου μια αιολική μηχανή βρίσκεται εκτός λειτουργίας
- Καθορίζουν τα συστήματα υποστήριξης των αιολικών μηχανών (συσσωρευτές, ηλεκτρικό δίκτυο, ...)



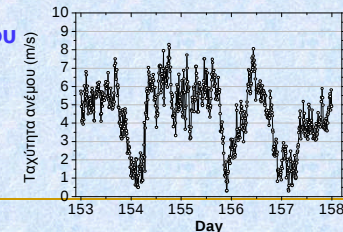
Μέση τιμή χρονοσειράς τιμών ταχύτητας ανέμου

■ Μέση τιμή

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v dt = \int_0^T v \cdot \left(\frac{dt}{T \cdot dv} \right) dv \Rightarrow \bar{v} = \int_0^T v f(v) dv$$

Μέση τιμή ταχύτητας ανέμου
(Διακριτές τιμές)

$$\bar{v} = \sum_{i=1} v_i f_i(v) \cdot \delta v_i$$



Συνάρτηση κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων

$$f(v) = \frac{dp}{dv} = \frac{dt}{T \cdot dv}$$

- Όπου

$$p(v) = \frac{dt}{T}$$

- η πιθανότητα εύρεσης της ταχύτητας v στο διάστημα T . dt = ο χρόνος κατά τον οποίο ο άνεμος είχε ταχύτητα v , στο χρονικό διάστημα T .

Κατανομή Weibull

- Για να καταλήξουμε σε ασφαλή αποτελέσματα για την εγκατάσταση μιας αιολικής μηχανής απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις
- Το κόστος των μετρήσεων και η αναπόφευκτη καθυστέρηση του έργου σε συνδυασμό με την συχνή ελλειψη μακροχρόνιων μετρήσεων στις περιοχές που ενδιαφερόμαστε οδηγούν στην χρήση ημιεμπειρικών μοντέλων
- Τα μοντέλα αυτά μπορούν να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να εκτιμηθεί η ενέργεια που μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο

Προσέγγιση της συνάρτησης κατανομής της πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας ανέμου με τη συνάρτηση Weibull

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

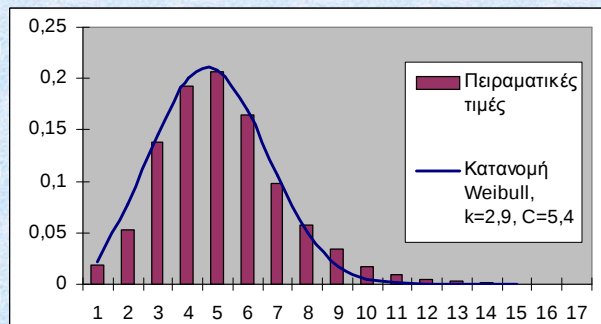
- c = Παράγων κλίμακας, (m/s)
- Αύξηση της c προκαλεί μετατόπιση της συνάρτησης Weibull σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας ανέμου
- $c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})}$ όπου $\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} \cdot e^{-x} dx$
- k = Παράγων μορφής (Συνήθως στο διάστημα 1 -2)
- Αύξηση της k προκαλεί αύξηση στο ύψος της κατανομής και μικρή μετατόπιση της συνάρτησης Weibull σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας ανέμου
- Για $k > 3 \rightarrow$ Προς Κανονική Κατανομή

Τυπικές τιμές c και k για μερικές τοποθεσίες και τιμές της συνάρτησης Γ

Τοποθεσία	k	c
Σητεία	1,32	5,53
Ηράκλειο	1,63	4,72
Χανιά	1,52	4,60
Κύθηρα	1,27	5,78
Μήλος	1,41	5,86
Ρόδος	2,15	7,24
Θήρα	1,20	5,20

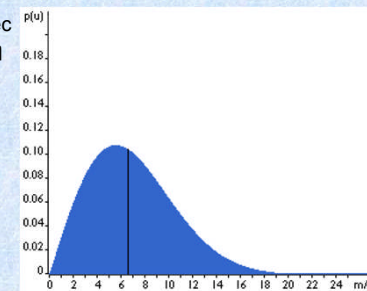
n	$\Gamma(n)$
1.00	1.0000
1.10	0.9514
1.20	0.9182
1.30	0.8975
1.40	0.8873
1.50	0.8862
1.60	0.8935
1.70	0.9086
1.80	0.9314
1.90	0.9618
2.00	1.0000

Παράδειγμα προσρμογής καμπύλης Weibull στα πειραματικά δεδομένα



Κατανομή Weibull

- Ο μέσος της κατανομής = 6.6m/sec (ίσα εμβαδά) $\rightarrow$ Τον μισό χρόνο η ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή μικρότερη από 6.6m/sec και τον άλλο μισό μεγαλύτερη από 6.6m/sec
- Μέση τιμή ανέμου: 7m/sec
- Η συχνότερη τιμή: 5.5m/sec
- Η μορφή της κατανομής διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο του εδάφους, ...

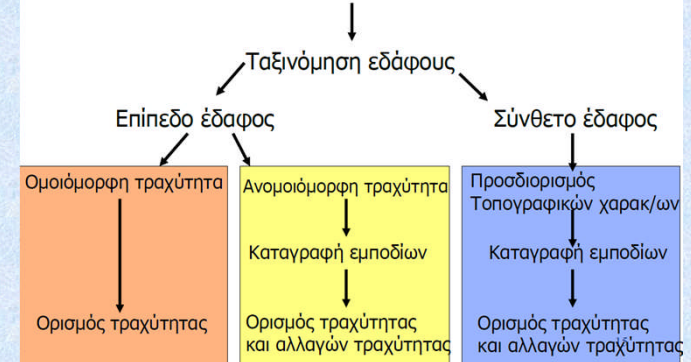


Τραχύτητα εδάφους

- Ο ρόλος της διεύθυνσης του ανέμου στην επιλογή μιας θέσης για εγκατάσταση είναι σημαντικός για το καθορισμό της τραχύτητας του εδάφους
- Κατά την διάρκεια της επιλογής θα πρέπει να προσδιοριστεί η τραχύτητα του εδάφους σε σχέση με τις επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου και στην συνέχεια να εκτιμηθεί το αιολικό δυναμικό της θέσης

Τραχύτητα εδάφους

Εξεύρεση επικρατουσών διευθύνσεων του ανέμου



Τραχύτητα εδάφους

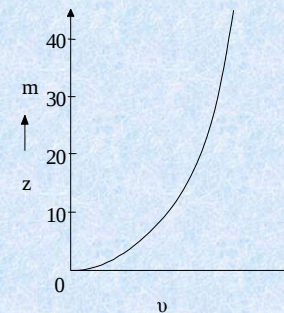
- Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους
- Τα μεγέθη που εκφράζουν την τραχύτητα του εδάφους είναι το μήκος τραχύτητας z_0 και η κλάση (κατηγορία) τραχύτητας
- Το μήκος τραχύτητας μπορεί να αλλάζει με τις εποχές (εποχές, συγκομιδή, ...)
- Το μήκος τραχύτητας ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών

Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος από το έδαφος

$$v = v_{\text{ref}} \cdot \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_{\text{ref}}/z_0)}$$

z_{ref} = το ύψος αναφοράς, όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι v_{ref} (Θέση ανεμομέτρου). Συνήθως, $z_{\text{ref}} = 10 \text{ m}$.

z_0 = το μέσο ύψος του διαταραγμένου στρώματος του αέρα, εξ αιτίας των ανωμαλιών του εδάφους (Μήκος τραχύτητας).



Τυπικές τιμές μήκους τραχύτητας

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος εδάφους	Z ₀ (m)
0	Πηλώδες έδαφος, Πάγος	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
0	Ήρεμη θάλασσα	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
0	Αμμώδες έδαφος	$10^{-4} - 10^{-3}$
0	Χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	$4.9 \cdot 10^{-3}$
1	Χέρσο έδαφος	$10^{-3} - 0.01$
1	Χλοερό έδαφος	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο έδαφος	0.021
2	Χαμηλή βλάστηση, Στέπα	0.032
2	Υψηλά χόρτα	0.039
2	Σποβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1-0.3
2	Δάση με χαμηλά δένδρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δένδρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

Τραχύτητα εδάφους

- Κατηγορία τραχύτητας 1: Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις. Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι
- Κατηγορία τραχύτητας 2: Καλλιερημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 1000m μεταξύ τους και μερικά σπίτια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή κυματώδες με δέντρα και σπίτια
- Κατηγορία τραχύτητας 3: Συνδυασμός δάσους και καλλιερημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περιχώρα της πόλης. Τα εμπόδια είναι κοντά μεταξύ τους σε αποστάσεις μικρότερες από μερικές εκατοντάδες μέτρα

Ανατάραξη του αέρα

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

$$[u'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u dt = \int_0^T (u(t) - \bar{u})^2 dt \quad , \quad T = 10 \text{min}$$

- Η ένταση I της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως

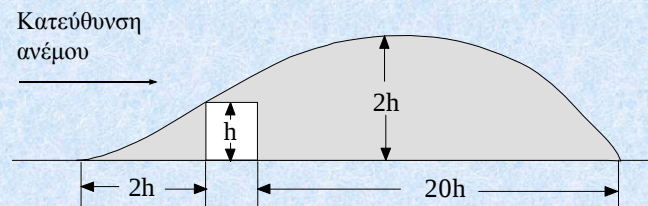
$$(\sigma_v \text{ η τυπική απόκλιση}): I = \frac{\sigma_v}{\bar{u}}$$

- 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 στην συλλεγόμενη ισχύ, αλλά και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος

Στροβιλισμός του αέρα

- Η ανατάραξη του αέρα δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα λόγω της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους
- Τα εμπόδια στο έδαφος συχνά δημιουργούν οργανωμένους στροβίλους
- Οι οργανωμένοι στρόβιλοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την όλη εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής

Επίδραση μεμονωμένων εμποδίων στη ροή του ανέμου



Στροβιλισμός του αέρα

