



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας

Ενότητα 6: Αιολικό Δυναμικό

Ελευθέριος Αμανατίδης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Περιεχόμενα ενότητας

- Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία
- Παράμετροι Ανέμου
 - Ταχύτητα (Μέση, Μέγιστη, Ριπή)
 - Διεύθυνση
 - Ανατάραξη
 - Στροβιλισμός
 - Μεταβολή με ύψος
- Στατιστική μελέτη ανέμου
 - Κατανομή Weibull
- Αιολικό Δυναμικό σε Ελλάδα και Ευρώπη



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

- Ατμοσφαιρικός αέρας σε κίνηση → 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, ...)
- Η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία οφείλεται κυρίως στην ηλιακή ακτινοβολία και στην περιστροφή της Γης



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

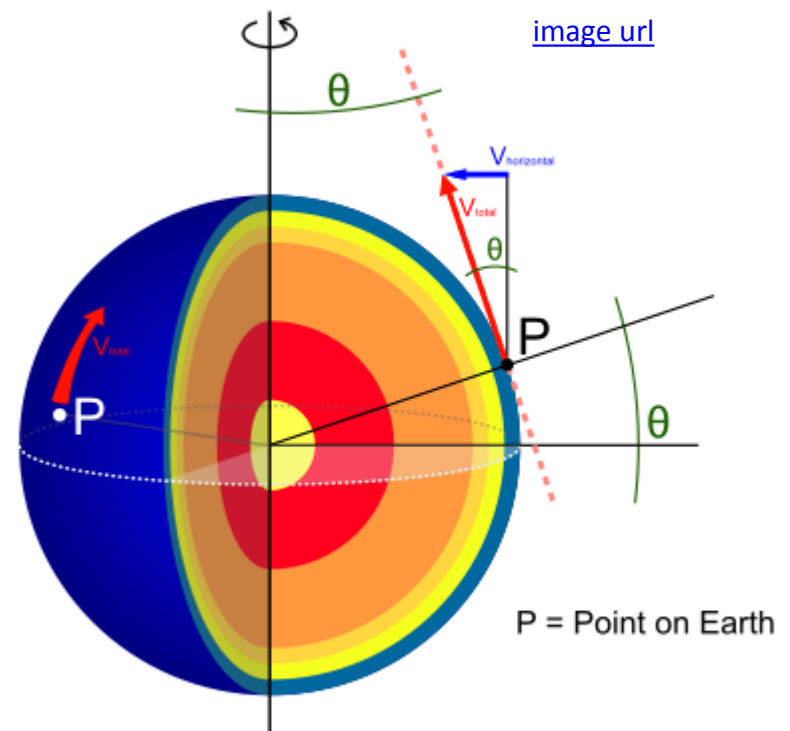
- Διαφορετική θερμοκρασία μεταξύ ισημερινού και πόλων (διαφορετική ακτινοβολία) → Συνεχή κίνηση αερίων μαζών από τους πόλους προς τον ισημερινό (ψυχρές επιφανειακές μάζες) και αντίστροφα (θερμές μάζες)
- Η περιστροφή της Γης → κίνηση ψυχρών επιφανειακών μαζών προς Δυτικά και θερμών μαζών σε μεγαλύτερο ύψος προς Ανατολικά
- Ανομοιομορφία θερμικής συμπεριφοράς ξηράς και θάλασσας – ανομοιόμορφη ψύξη → ζώνες διαφορετικής θερμοκρασίας → πεδία στατικής πίεσης



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

Ο συνδυασμός της προσλαμβανόμενης από την ατμόσφαιρα και την γη ηλιακής ακτινοβολίας με την ανομοιομορφία του γήινου ανάγλυφου και την περιστροφή της γης γύρω από το άξονά της έχει ως συνέπεια την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα. Οι δυνάμεις που ρυθμίζουν την κίνηση του αέρα:

- **Δύναμη βαροβαθμίδας** (Μεταβολή ατμοσφαιρικής πίεσης σε γεωγραφική απόσταση 1 μοίρας)
- **Δύναμη Coriolis** ($F=2*\omega*\sin\phi$, ω =γωνιακή ταχύτητα, ϕ =γεωγραφικό πλάτος)
- **Δύναμη τριβής**



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

[image url](#)

Πολικοί Ανατολικοί Άνεμοι

Βόρειο Πολικό Μέτωπο

Ζώνη Χαμηλών

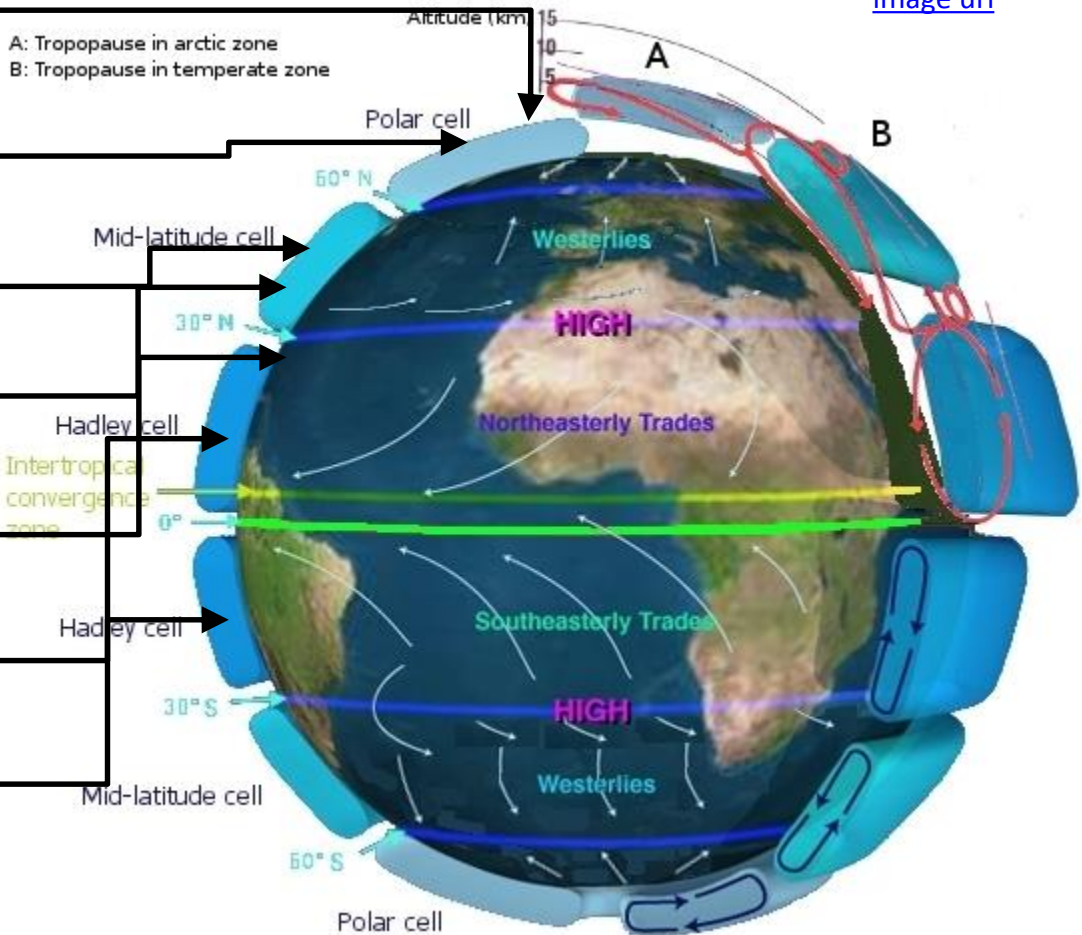
Ζώνη Δυτικών Ανέμων

Ζώνη Υψηλών

Βόρειο-Ανατολικό Πέρασμα

Νότιο-Ανατολικό Πέρασμα

.....



Χαρακτηριστικές Παράμετροι του Ανέμου

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
- 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)



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:

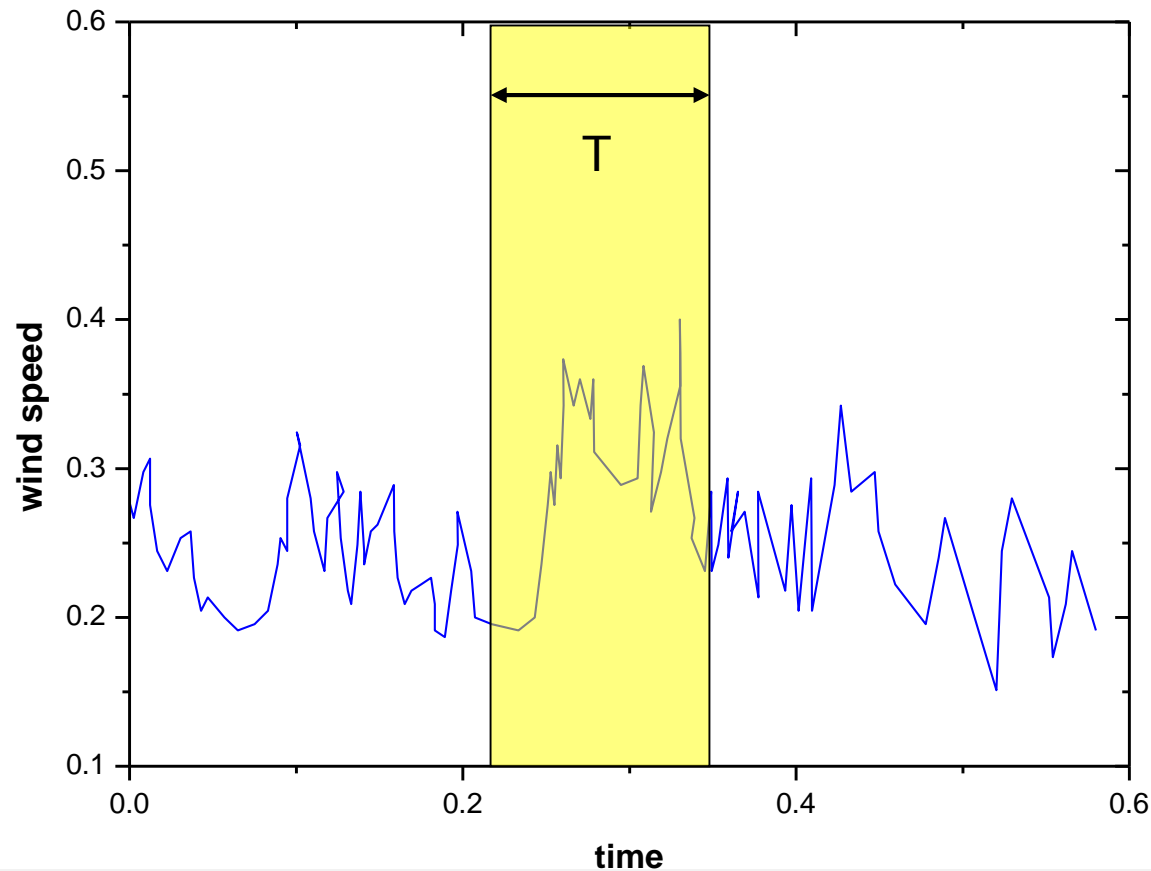
$$V(t) = \bar{V} + V'(t)$$



Μέση Ταχύτητα του Ανέμου

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

Για $T=10\text{min}$



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

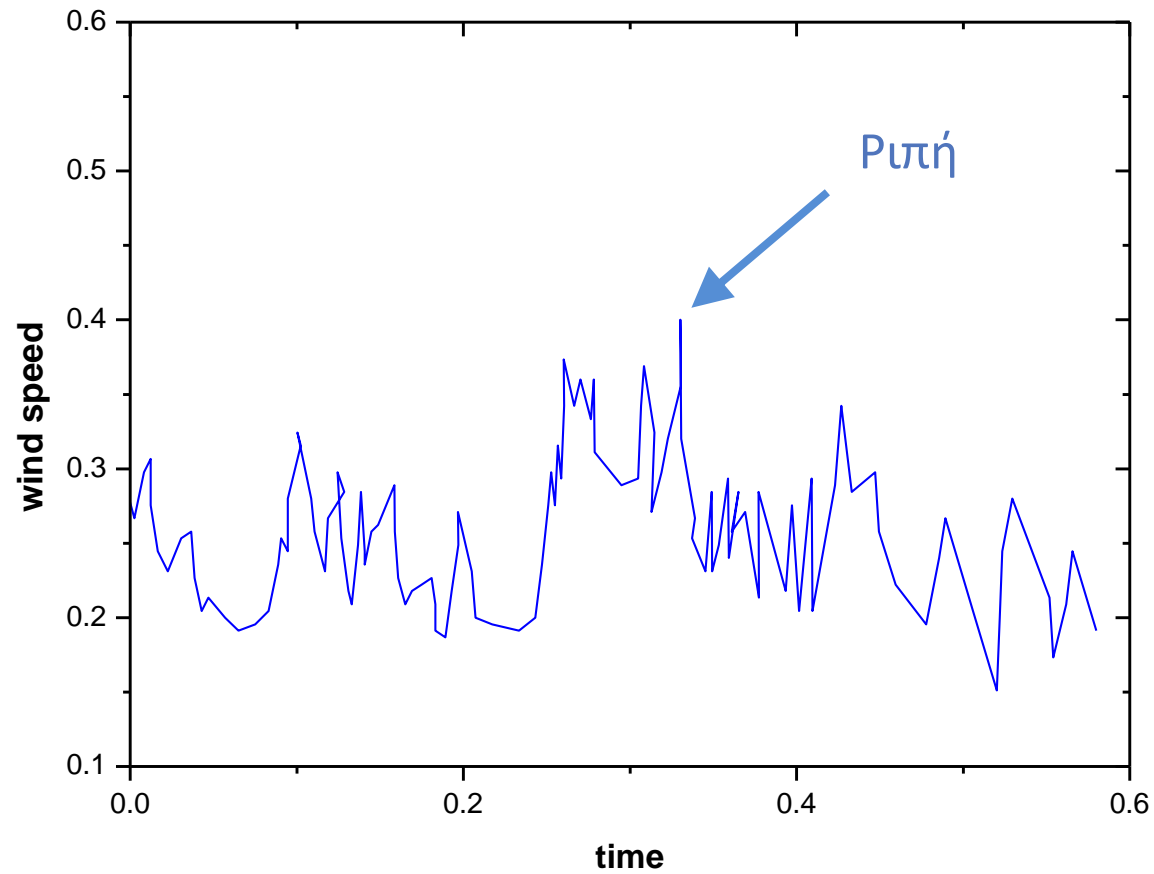


Ριπές του Ανέμου

- Ορίζεται ως η ξαφνική και μικρής διάρκειας ($\sim 20\text{sec}$) 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 $4-5\text{m/sec}$
- Καθορίζει την κόπωση της πτερωτής της ανεμογεννήτριας
- Αν οι ριπές διαρκέσουν περισσότερο από 30sec 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,...)

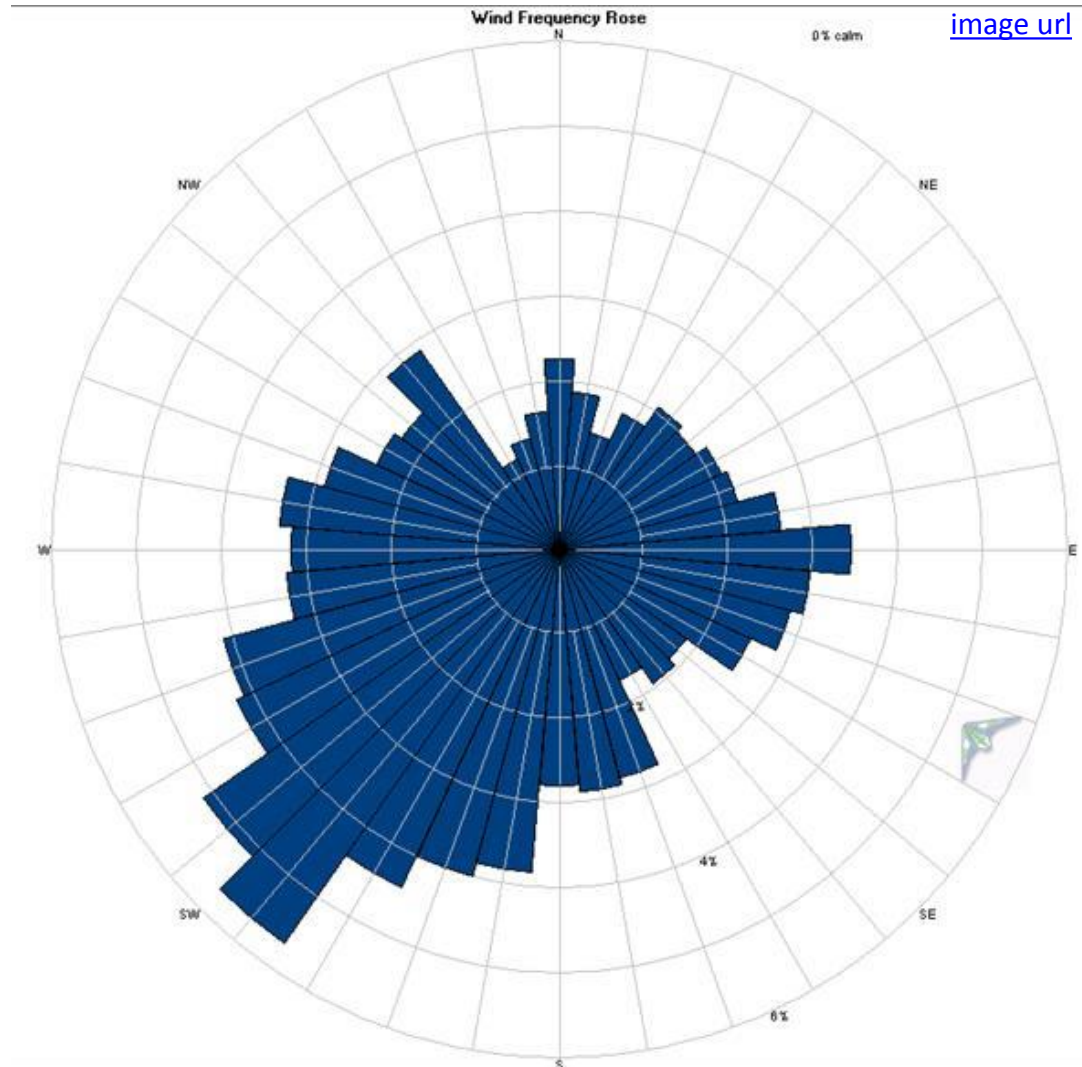


Διεύθυνση του Ανέμου

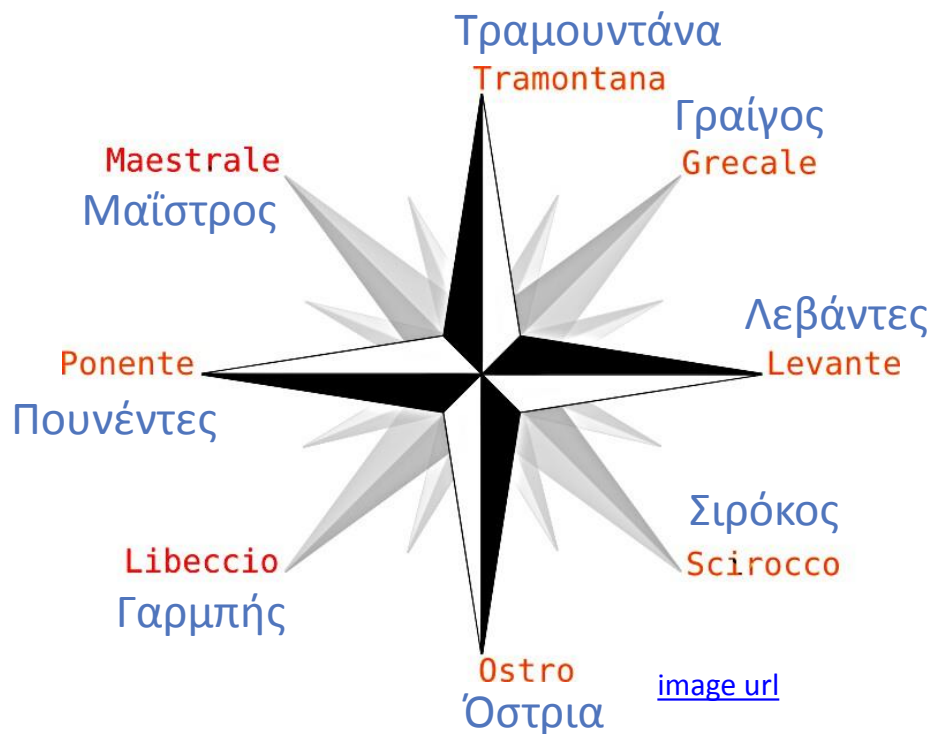
- **Επικρατούσες διευθύνσεις του ανέμου**
 - Οι διευθύνσεις που εμφανίζονται στην περιοχή που μελετάμε την μεγαλύτερη συχνότητα
 - Η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συχνά με την εποχή
- **Προσήνεμη – Υπήνεμη Περιοχή**
 - **Προσήνεμη:** Ο χώρος μεταξύ του σημείου που θέλουμε να εγκαταστήσουμε 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



Διεύθυνση του Ανέμου – Ελλάδα



Μποφόρ	m/s	km/h
0	0.0 - <0.3	0
1	0.3 - <1.6	1 – 5
2	1.6 - <3.4	6 – 11
3	3.4 - <5.5	12 - 19
4	5.5 - <8.0	20 – 28
5	8.0 - <10.8	29 – 38
6	10.8 - <13.9	39 – 49
7	13.9 - <17.2	50 – 61
8	17.2 - <20.8	62 – 74
9	20.8 - <24.5	75 – 88
10	24.5 - <28.5	89 – 102
11	28.5 - <32.7	103 – 117
12	> 32.7	>118



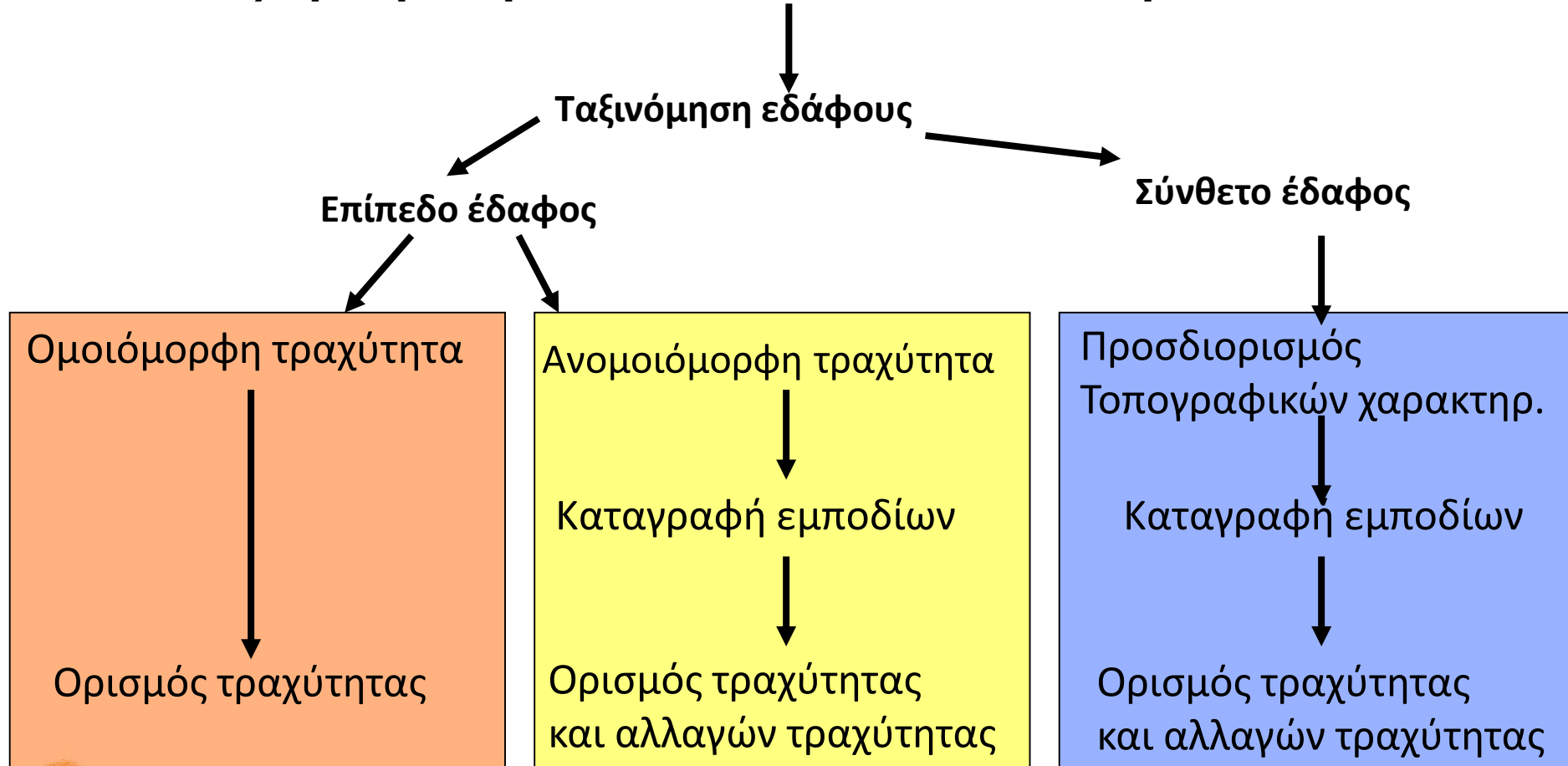
Διεύθυνση του Ανέμου – Τραχύτητα Εδάφους

- 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



Διεύθυνση του Ανέμου – 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**



Τραχύτητα Εδάφους

- Για επίπεδη περιοχή με τα στοιχεία τραχύτητας να καταλαμβάνουν 10-20% το z_0 συνδέεται με το μέσο ύψος (h) των στοιχείων τραχύτητας με την σχέση:
 - $z_0 = 0.15h$
- Αν $z_0 \leq 0.03 \rightarrow$ Κλάση $= 1.699823015 + \ln(z_0) / \ln(150)$
- Αν $z_0 > 0.03 \rightarrow$ Κλάση $= 3.912489289 + \ln(z_0) / \ln(3.33333333)$



Τραχύτητα Εδάφους

Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος Εδάφους	Zo (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	Σιτοβολώνες	0.045
2	Καλλιέργειες	0.064
2	Θαμνώδες έδαφος	0.1 - 0.3
2	Δάση με χαμηλά δέντρα	0.05 - 0.1
3	Δάση με υψηλά δέντρα	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:** Καλλιεργημένη 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 καλλιεργημένης περιοχής με πολλά εμπόδια στα περίχωρα 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:

$$[V'(t)]^2 = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [V(t) - \bar{V}]^2 dt$$

- Η ένταση I της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως (σ_v η τυπική απόκλιση):

$$I = \frac{\sigma_v}{\bar{V}}$$



Ανατάραξη του Αέρα

Η ένταση της ανατάραξης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος τραχύτητας z_o :

$$I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_o}}$$

Για $z_o \leq 0.20\text{m}$

$$I = \frac{-0.14 \ln z_o + 0.78}{\ln \frac{z}{z_o}}$$

Για $z_o > 0.20\text{m}$

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

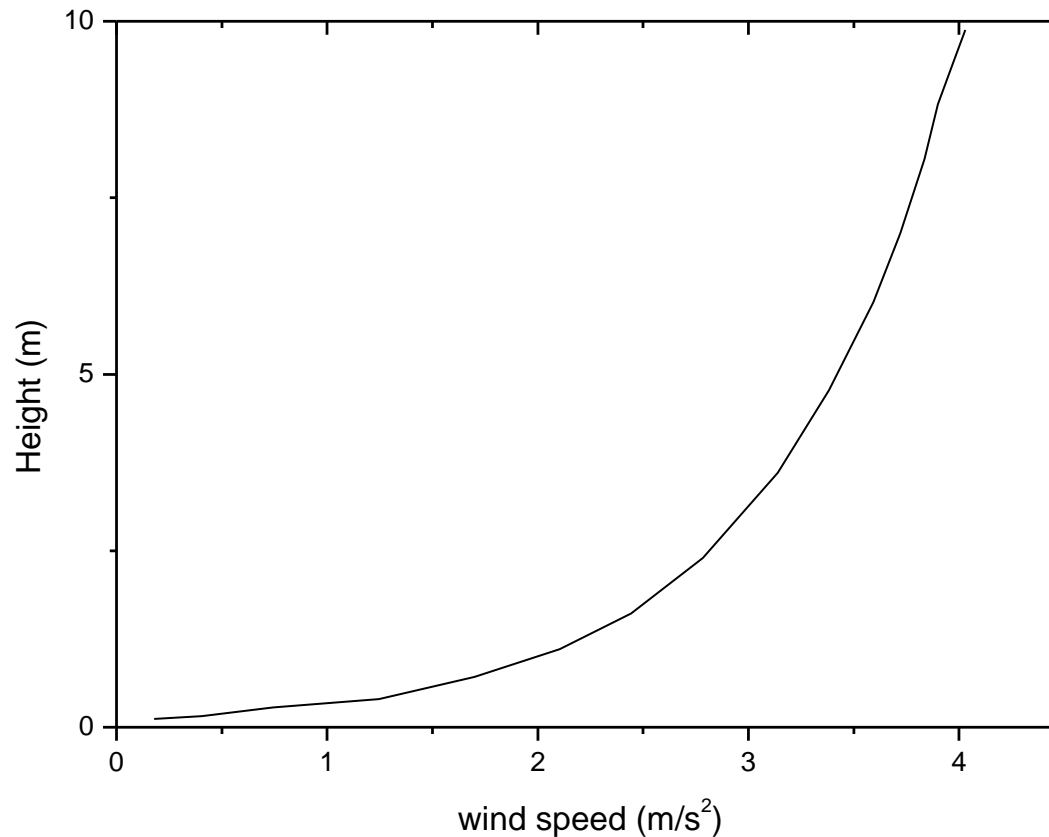


Στροβιλισμός του Αέρα



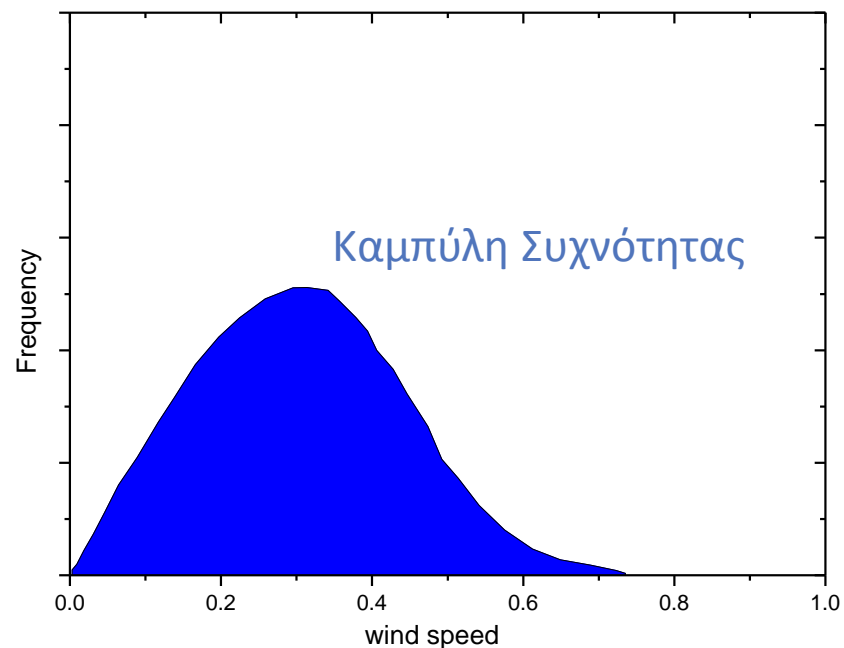
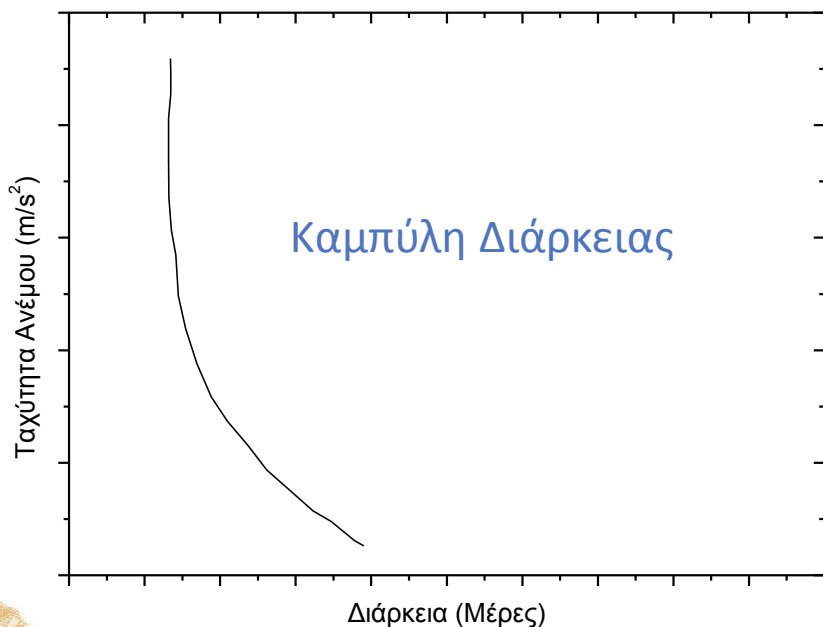
Κατανομή του Ανέμου – Εισαγωγή

Η κατανομή του ανέμου εκφράζει τις μεταβολές του ανέμου καθ' ύψος



Στατιστική Μελέτη Ανέμου

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



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 έλλειψη 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



Κατανομή Weibull

- Η **κατανομή Weibull** περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος **μέχρι 100m από το έδαφος**

$$P(V)dV = \frac{k}{c} \cdot \left[\frac{V}{c} \right]^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} dV$$

- Εκφράζει την **πιθανότητα** η ταχύτητα V να βρίσκεται στην περιοχή $V-dV/2$ και $V+dV/2$
- c παράμετρος κλίμακας, k παράμετρος μορφής



Κατανομή Weibull

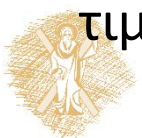
- Η παράμετρος c ονομάζεται **παράμετρος κλίμακας** και συνδέεται με την μέση ταχύτητα με την σχέση:

$$\bar{V} = c \cdot \Gamma \cdot \left[1 + \frac{1}{k} \right]$$

- Η παράμετρος k ονομάζεται **παράμετρος μορφής** είναι αντιστρόφως ανάλογη της διακύμανσης σ^2 των ταχυτήτων του ανέμου ως προς την μέση ταχύτητα:

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right\}^2 \right]$$

- Μεγαλύτερες τιμές του k εκφράζουν μικρότερη διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου και συνεπώς μεγαλύτερη συγκέντρωση γύρω από την μέση τιμή



Κατανομή Weibull – Υπολογισμός k και c

- Για την εύρεση της καμπύλης διάρκειας των ταχυτήτων του ανέμου πρέπει να προσδιοριστεί το χρονικό διάστημα για το οποίο η μετρημένη ταχύτητα είναι μικρότερη από κάποια προσδιορισμένη τιμή. Ολοκληρώνοντας την κατανομή Weibull έχουμε:

$$P(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} P(V) dV = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k}$$

- Λογαριθμούμε: $\ln[-\ln\{1 - P(V \leq V_x)\}] = -k \ln c + k \ln V_x$

- Θέτουμε:
$$\left. \begin{array}{l} y = \ln[-\ln\{1 - P(V \leq V_x)\}] \\ x = \ln V_x \end{array} \right\} y = -k \cdot \ln c + k \cdot x$$



Κατανομή Weibull – Υπολογισμός k και c

- Με την μέθοδο των **ελαχίστων τετραγώνων** υπολογίζουμε τα k και c :

$$Y = A + B \cdot X$$

$$A = \frac{(\sum y) \cdot (\sum x^2) - (\sum x) \cdot (\sum x \cdot y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

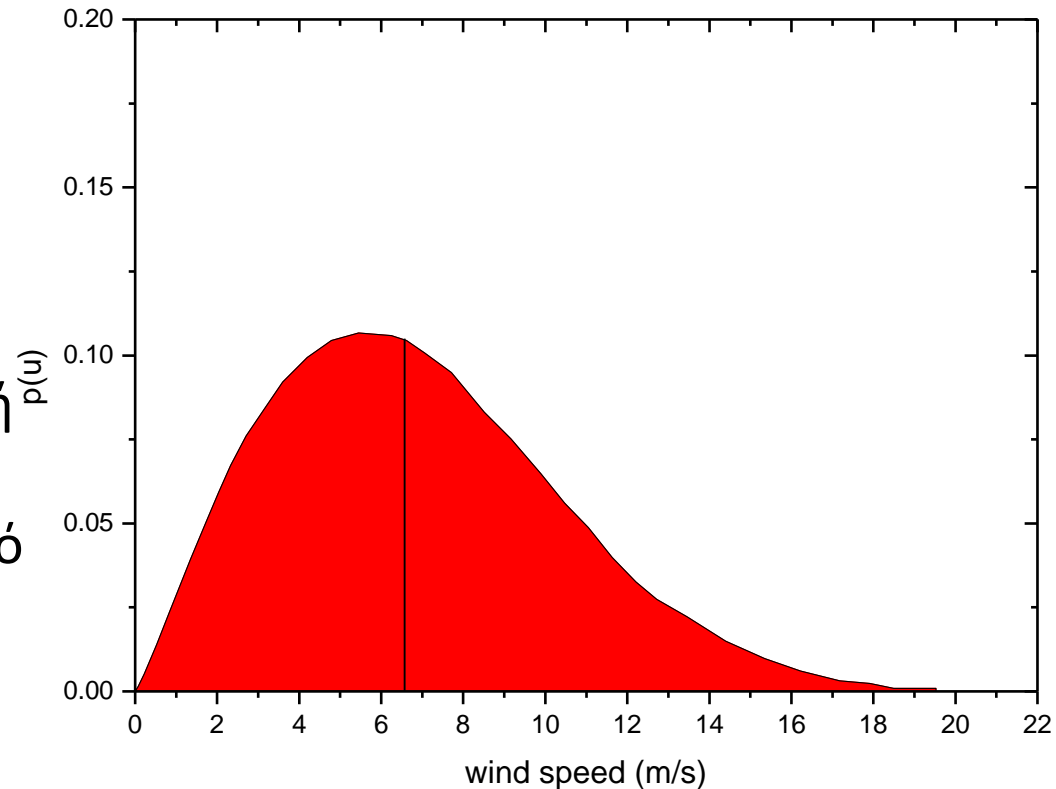
$$B = \frac{n \cdot (\sum x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$c = e^{-\frac{A}{B}} \quad \text{και} \quad k = B$$



Κατανομή Weibull

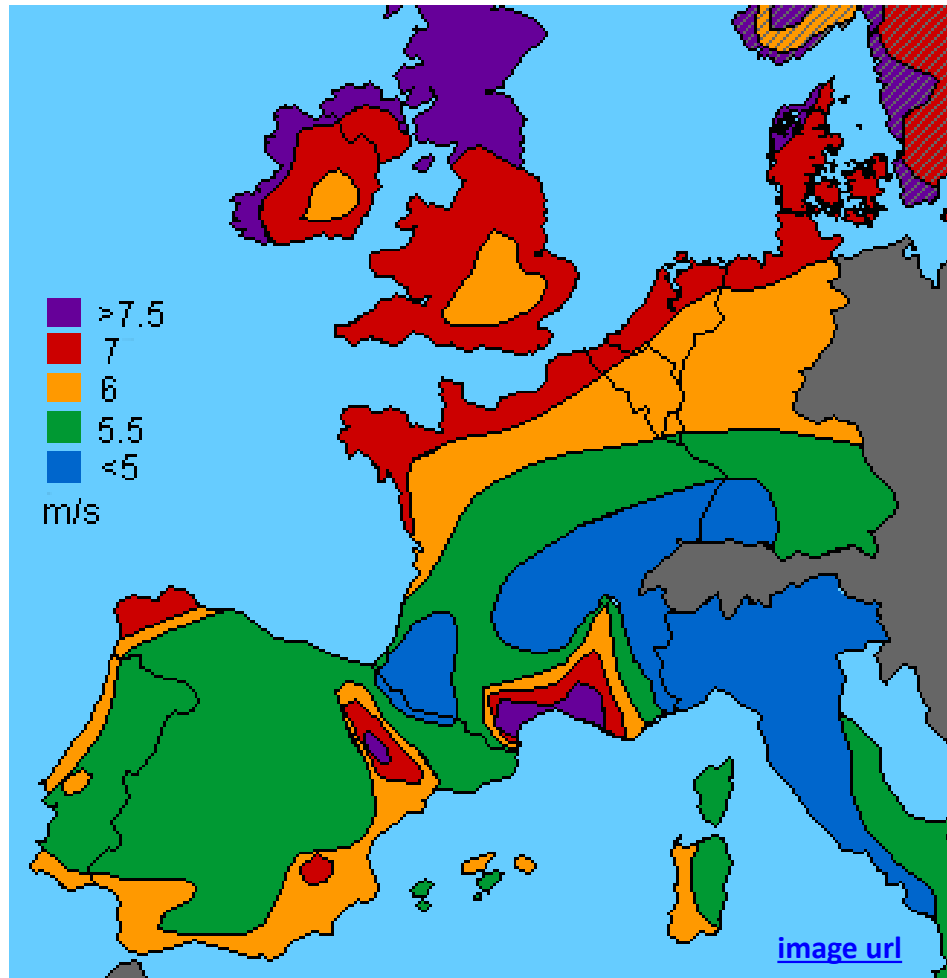
- Κατανομή της πυκνότητας πιθανότητας
- **Συνολική επιφάνεια=1**
- Ο μέσος της κατανομής=6.6m/sec (ίσα εμβαδά) → Τον μισό χρόνο η ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή μικρότερη από 6.6m/sec και τον άλλο μισό μεγαλύτερη από 6.6m/sec
- **Μέση τιμή ανέμου: 7m/sec**
- Η συχνότερη τιμή: 5.5m/sec



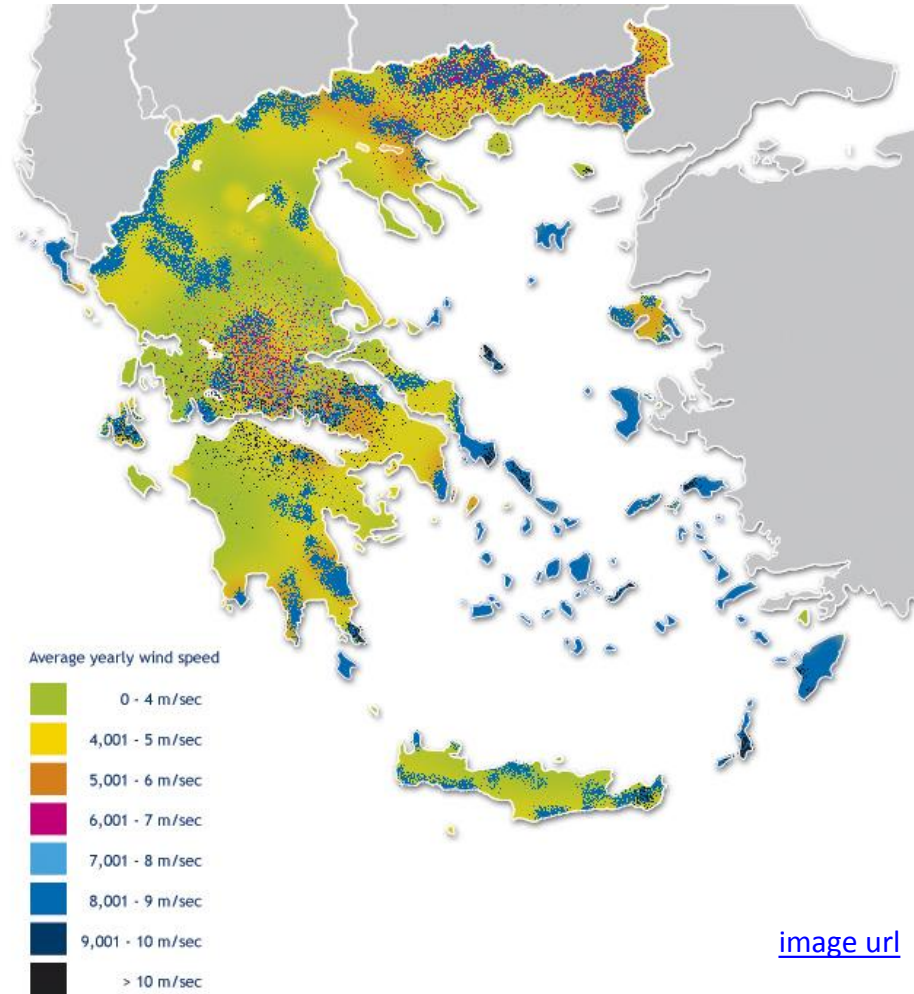
Η μορφή της κατανομής διαφέρει από τόπο σε τόπο και εξαρτάται από τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το ανάγλυφο του εδάφους, ...



Ταχύτητες Ανέμου στην Ευρώπη



Ταχύτητες Ανέμου στον Ελλαδικό χώρο



Τέλος Ενότητας

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Όνομα μέλους ή μελών ΔΕΠ 2014:
Ελευθέριος Αμανατίδης. «Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας». Έκδοση: 1.0.
Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2123/>.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.