

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ & ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Μάθημα 4ο

Διδάσκων: Αν. Καθηγητής Ε. Αμανατίδης

13/11/2019

Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Πατρών

Περίληψη

- Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία
 - Παράμετροι Ανέμου
 - Ταχύτητα (Μέση, Μέγιστη, Ριπή)
 - Διεύθυνση
 - Ανατάραξη
 - 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** ($F=2 \cdot \omega \cdot \sin\phi$, ω =γωνιακή ταχύτητα, ϕ =γεωγραφικό πλάτος)
- **Δύναμη τριβής**

Coriolis



Άνεμος και Ατμοσφαιρική Κυκλοφορία

Πολικοί Ανατολικοί Άνεμοι

Βόρειο Πολικό Μέτωπο

Ζώνη Χαμηλών

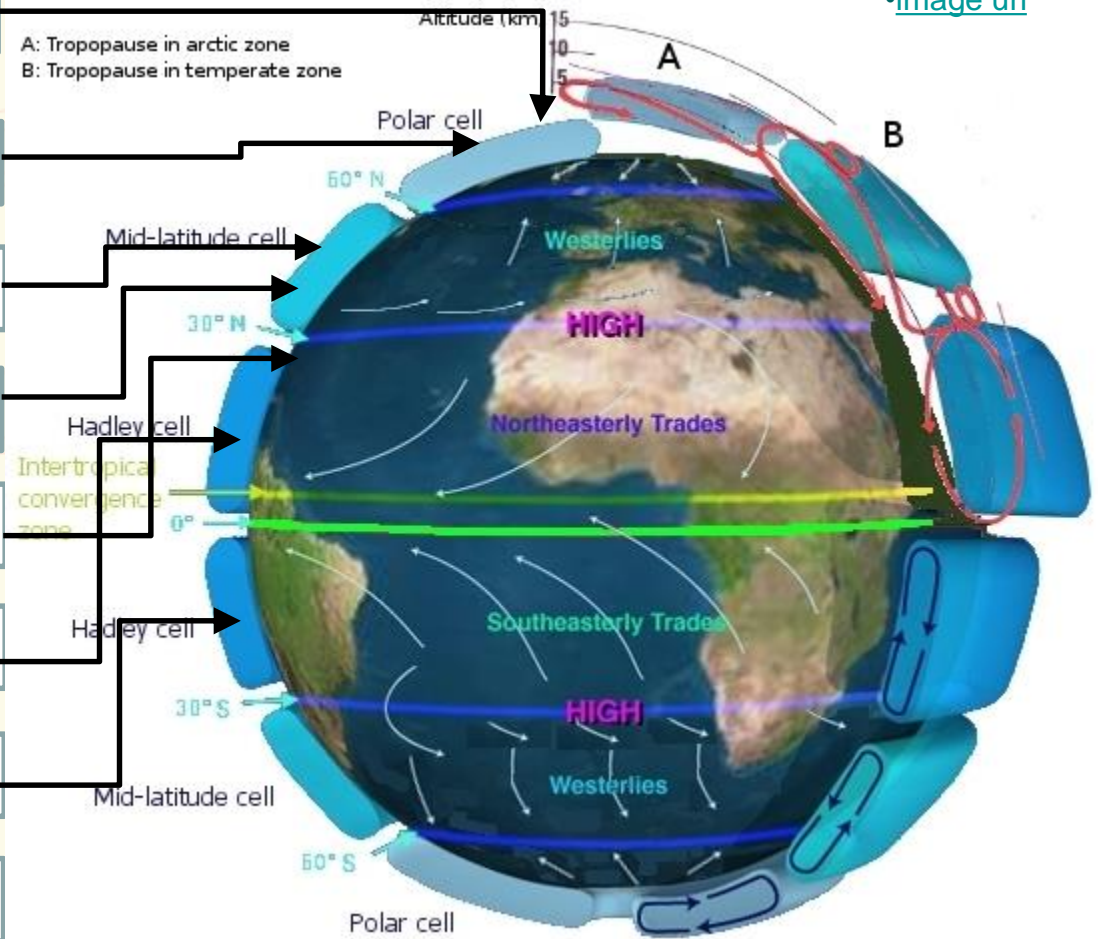
Ζώνη Δυτικών Ανέμων

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 (Στιγμιαία, Μέση, Μέγιστη, Ριπή)
 - Την διεύθυνση του ανέμου
 - Την επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη
 - Τον στροβιλισμό του ανέμου
 - Την εξάρτηση της ταχύτητας από το ύψος
-

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=10min



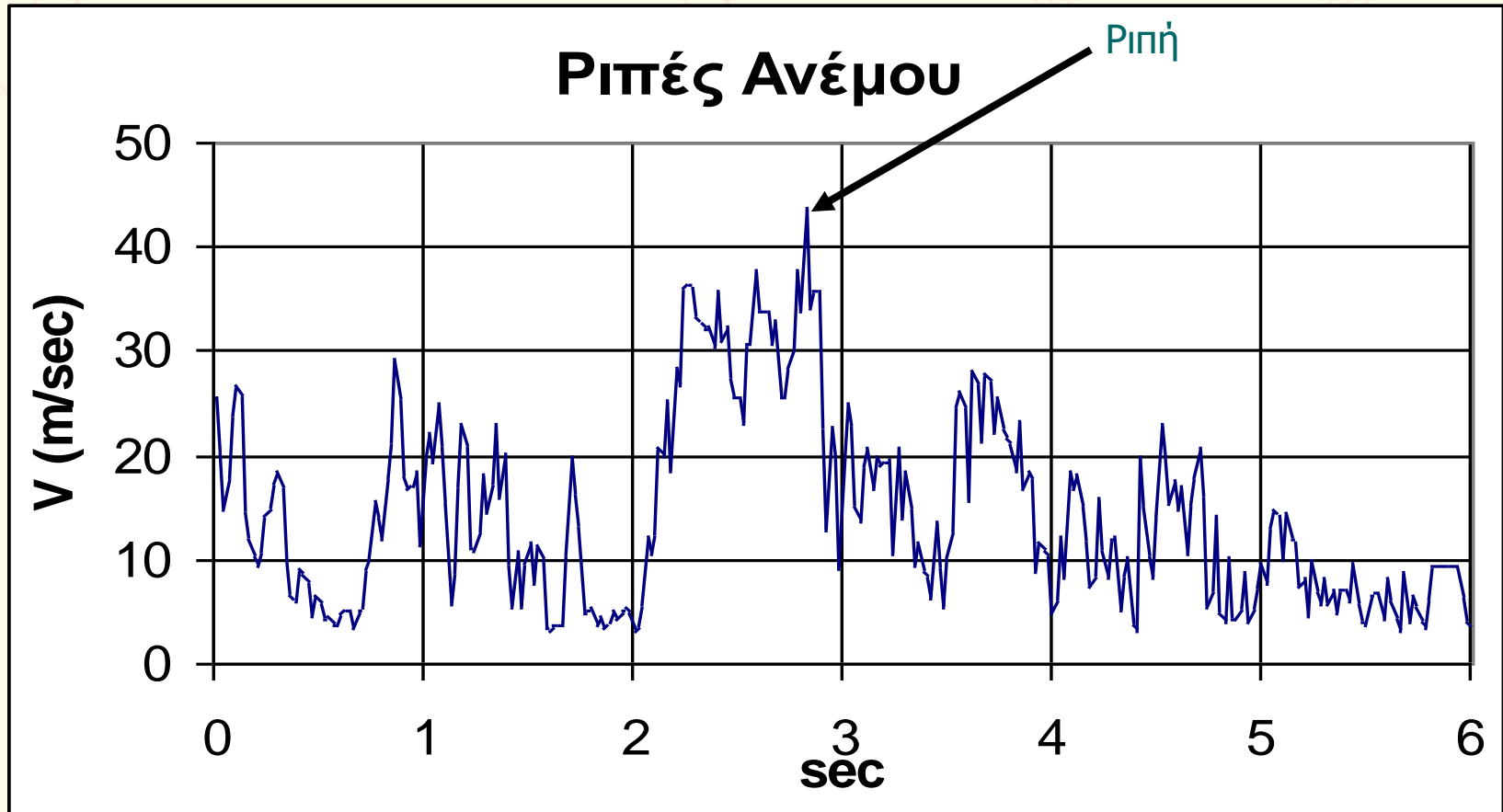
Μέγιστη Ταχύτητα του Ανέμου

- 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 (~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,...)
-

Ανατάραξη του αέρα

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

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

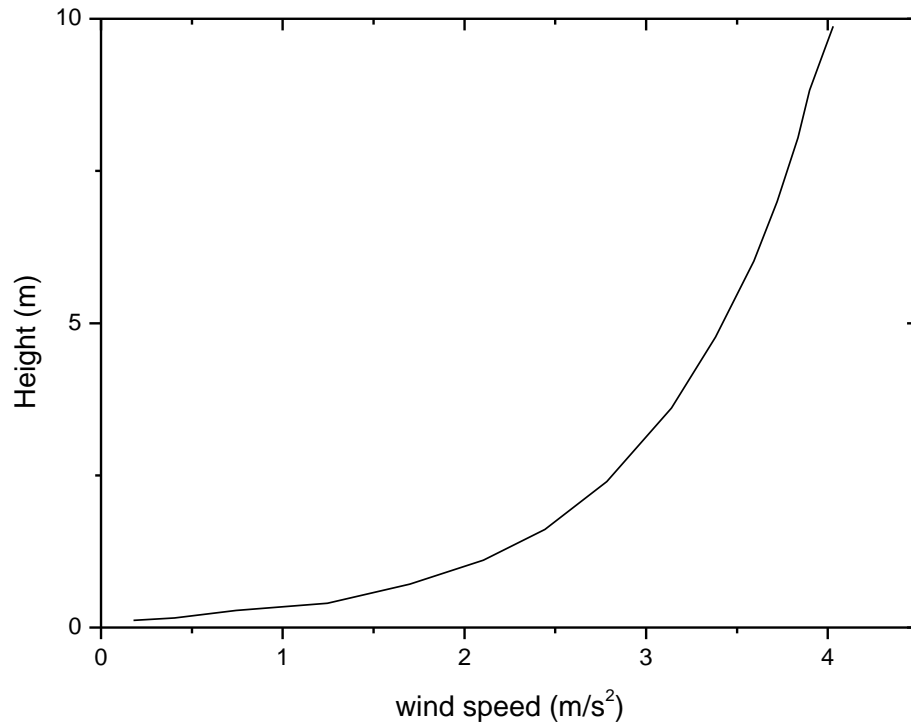
- Η ένταση I της ανατάραξης του αέρα ορίζεται ως (σ_v η τυπική απόκλιση):

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

Υψηλές τιμές αυξάνουν την κόπωση αιολικής μηχανής

Κατανομή του ανέμου

Μεταβολές του ανέμου καθ' ύψος



$$\left(\frac{V_x}{V_z}\right) = \left(\frac{h_x}{h_z}\right)^a$$

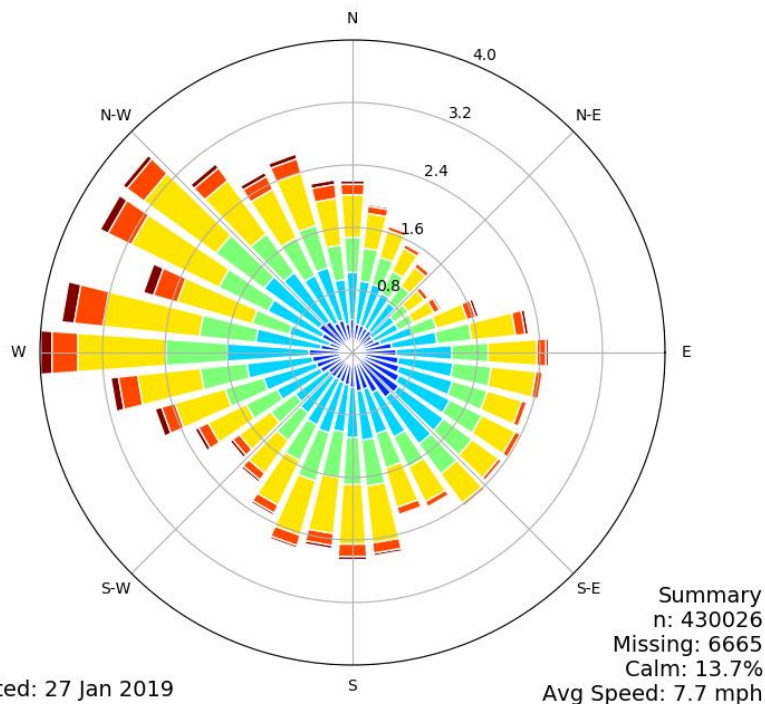
Υπολογισμός του a από σχέση Justus

$$a = \frac{0,37 - 0,088 \cdot \ln V_z}{1 - 0,088 \cdot \ln \frac{h_z}{10}}$$

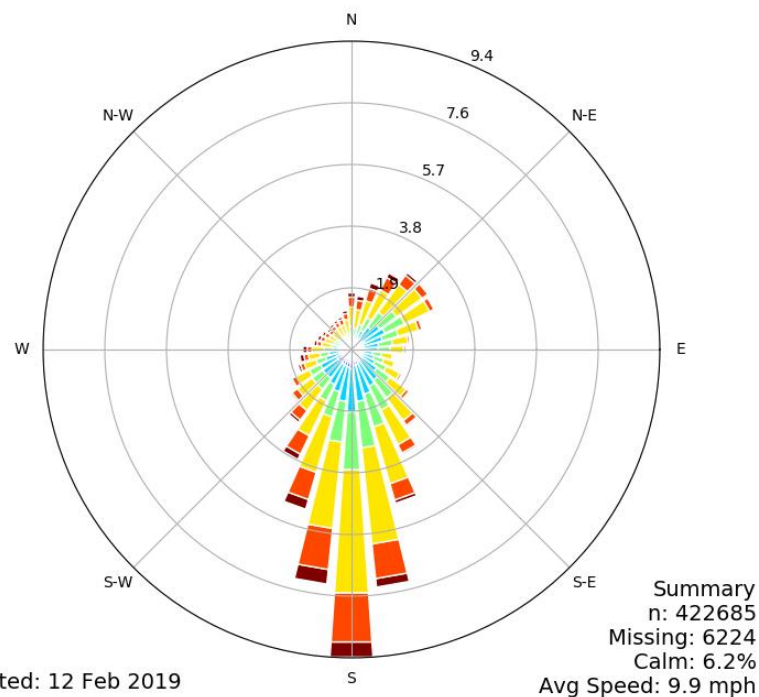
Διεύθυνση του Ανέμου - Ροδόγραμμα



[CWA] MOSINEE/CENTRAL
Windrose Plot [All Year]
Period of Record: 31 Dec 1972 - 27 Jan 2019



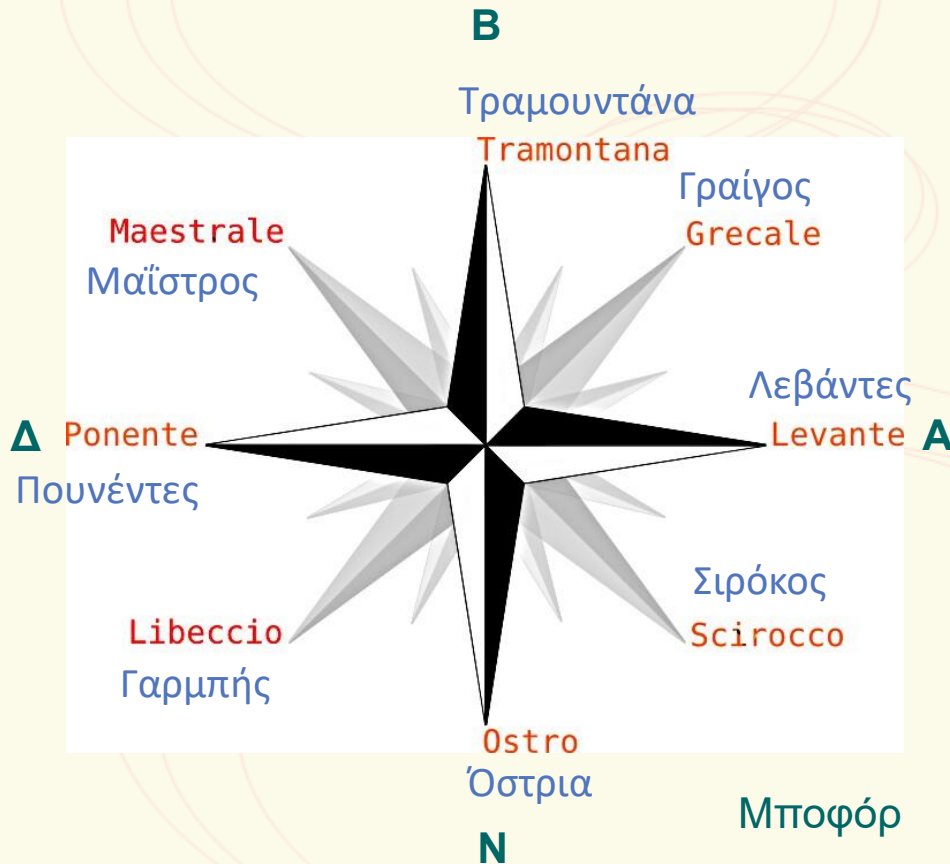
[SJT] SAN ANGELO/MATHIS
Windrose Plot [All Year]
Period of Record: 01 Jan 1970 - 12 Feb 2019



Τυχαίος προσανατολισμός

Συγκεκριμένος προσανατολισμός

Διεύθυνση του Ανέμου – Ελλάδα



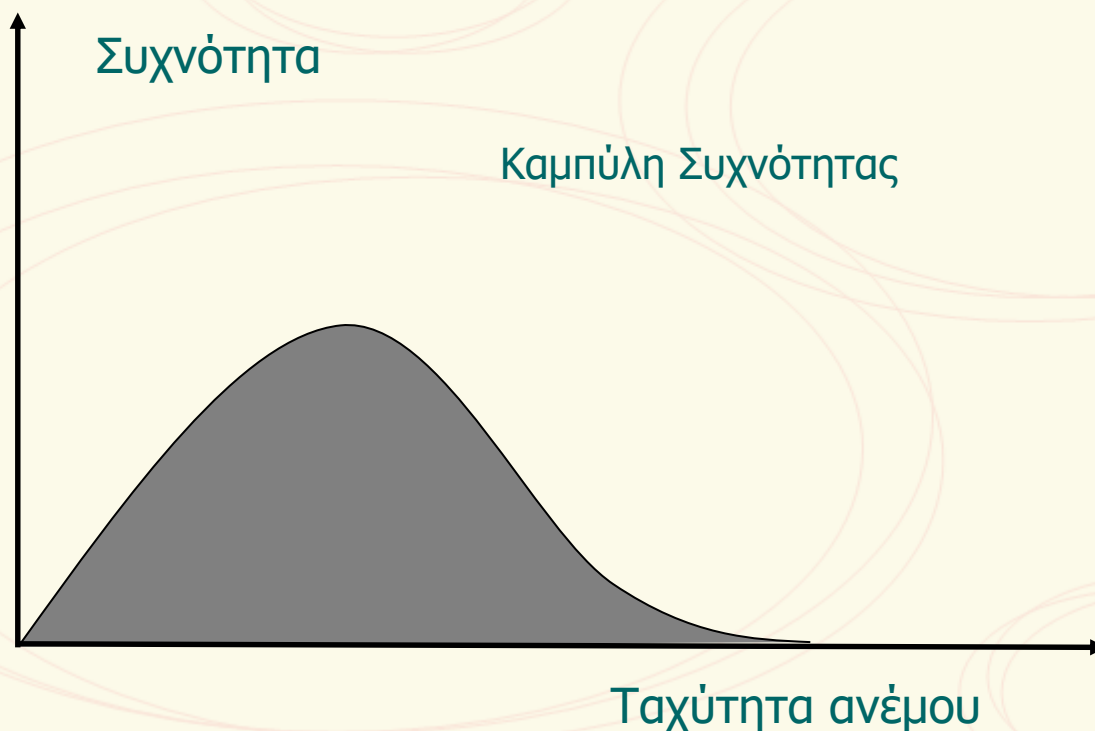
$$v_{[m/s]} = 0,836 \cdot B^{3/2}$$

$$v_{[km/h]} = 3,01 \cdot B^{3/2} \text{ (για km/h)}$$

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

Στατιστική μελέτη του 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:

$$\bar{V} = c \cdot \left(0,568 + \frac{0,433}{K} \right)^{\frac{1}{K}}$$

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

Για διάφορες τιμές V_x προσδιορίζονται ζεύγη τιμών x, y
Και στη συνέχεια από κλίση και τετμημένη ευθείας τα k, c και άρα και την
κατανομή Weibull

Κατανομή Weibull – Υπολογισμός k και c – Εύρεση κατανομής

Αξιοποιώ ανεμολογικά δεδομένα μιας περιοχής

Ταχύτητα m/sec	f(%) Πειραματ.	Ταχύτητα m/sec	f(%) Πειραματ.
0-1	11.3	13-14	3.6
1-2	3.6	14-15	2.0
2-3	9.1	15-16	1.4
3-4	13.2	16-17	0.9
4-5	10.3	17-18	0.4
5-6	5.4	18-19	0.4
6-7	8.4	19-20	0.2
7-8	5.2	20-21	0.0
8-9	6.1	21-22	0.0
9-10	6.4	22-23	0.0
10-11	3.2	23-24	0.0
11-12	5.1	24-25	0.0
12-13	3.9		

Υπολογίζω το $P(V \leq V_x)$

Ταχύτητα m/sec	f(%) Πειραματ.	Διάστημα Ταχύτητας	$P(V \leq V_x)$
0-1	11.3	0-1	0.113
1-2	3.6	0-2	0.149
2-3	9.1	0-3	0.240
3-4	13.2	0-4	0.372
4-5	10.3	0-5	0.475
5-6	5.4	0-6	0.529
6-7	8.4	0-7	0.613
7-8	5.2	0-8	0.665
8-9	6.1	0-9	0.726
9-10	6.4	0-10	0.790
10-11	3.2	0-11	0.822
11-12	5.1	0-12	0.873
12-13	3.9	0-13	0.912
13-14	3.6	0-14	0.948
14-15	2.0	0-15	0.968
15-16	1.4	0-16	0.982
16-17	0.9	0-17	0.991
17-18	0.4	0-18	0.995
18-19	0.4	0-19	0.999
19-20	0.2	0-20	1.000
20-21	0.0	0-21	1.000
21-22	0.0	0-22	
22-23	0.0	0-23	
23-24	0.0	0-24	
24-25	0.0	0-25	

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

Κατανομή Weibull – Υπολογισμός k και c – Εύρεση κατανομής

Πράξεις για υπολογισμό x, y και στη συνέχεια υπολογισμός k και c

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

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

$$y = \ln[-\ln\{1 - P(V \leq V_x)\}]$$

$$x = \ln V_x$$

$$y = -k \cdot \ln c + k \cdot x \quad Y = A + B \cdot X$$

$$A = -k \cdot \ln c$$

$$B = k$$

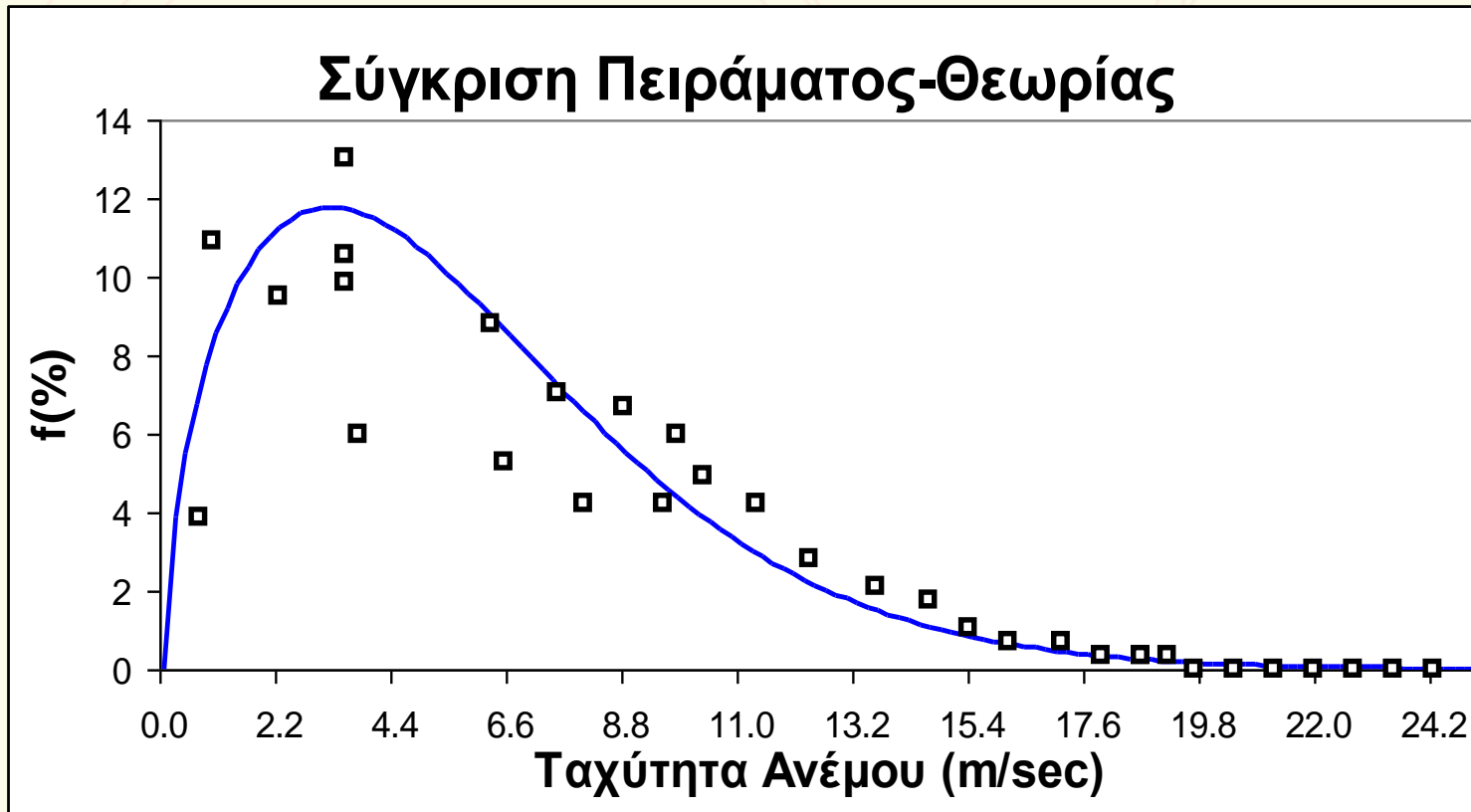
Εύρεση κατανομής με k, c γνωστά

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

Υπολογισμός ζευγών X, Y – Υπολογισμός A και B

Διάστημα Ταχύτητας	$P(V \leq V_x)$	X	Y
0-1	0.113	0.0000	-2.1210
0-2	0.149	0.6931	-1.8242
0-3	0.240	1.0986	-1.2930
0-4	0.372	1.3863	-0.7653
0-5	0.475	1.6094	-0.4395
0-6	0.529	1.7918	-0.2838
0-7	0.613	1.9459	-0.0520
0-8	0.665	2.0794	0.0895
0-9	0.726	2.1972	0.2582
0-10	0.790	2.3026	0.4451
0-11	0.822	2.3979	0.5458
0-12	0.873	2.4849	0.7244
0-13	0.912	2.5649	0.8881
0-14	0.948	2.6391	1.0840
0-15	0.968	2.7081	1.2361
0-16	0.982	2.7726	1.3906
0-17	0.991	2.8332	1.5498
0-18	0.995	2.8904	1.6674
0-19	0.999	2.9444	1.9326
0-20	1.000	2.9957	2.4435
0-21	1.000	3.0445	2.4435
0-22			

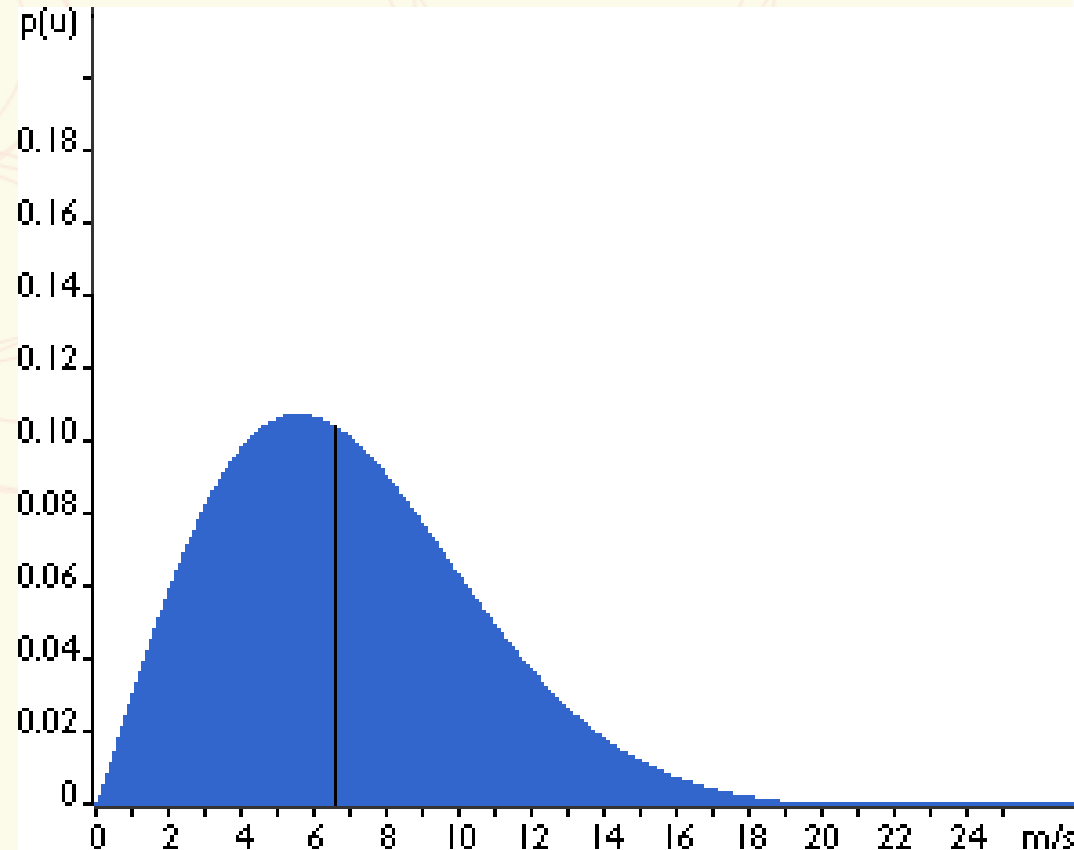
Κατανομή Weibull – Παράδειγμα



- Τα αποτελέσματα μπορούν να θεωρηθούν αρκετά ικανοποιητικά αν και εμφανίζονται αρκετές αποκλίσεις σε μικρές και μεσαίες ταχύτητες

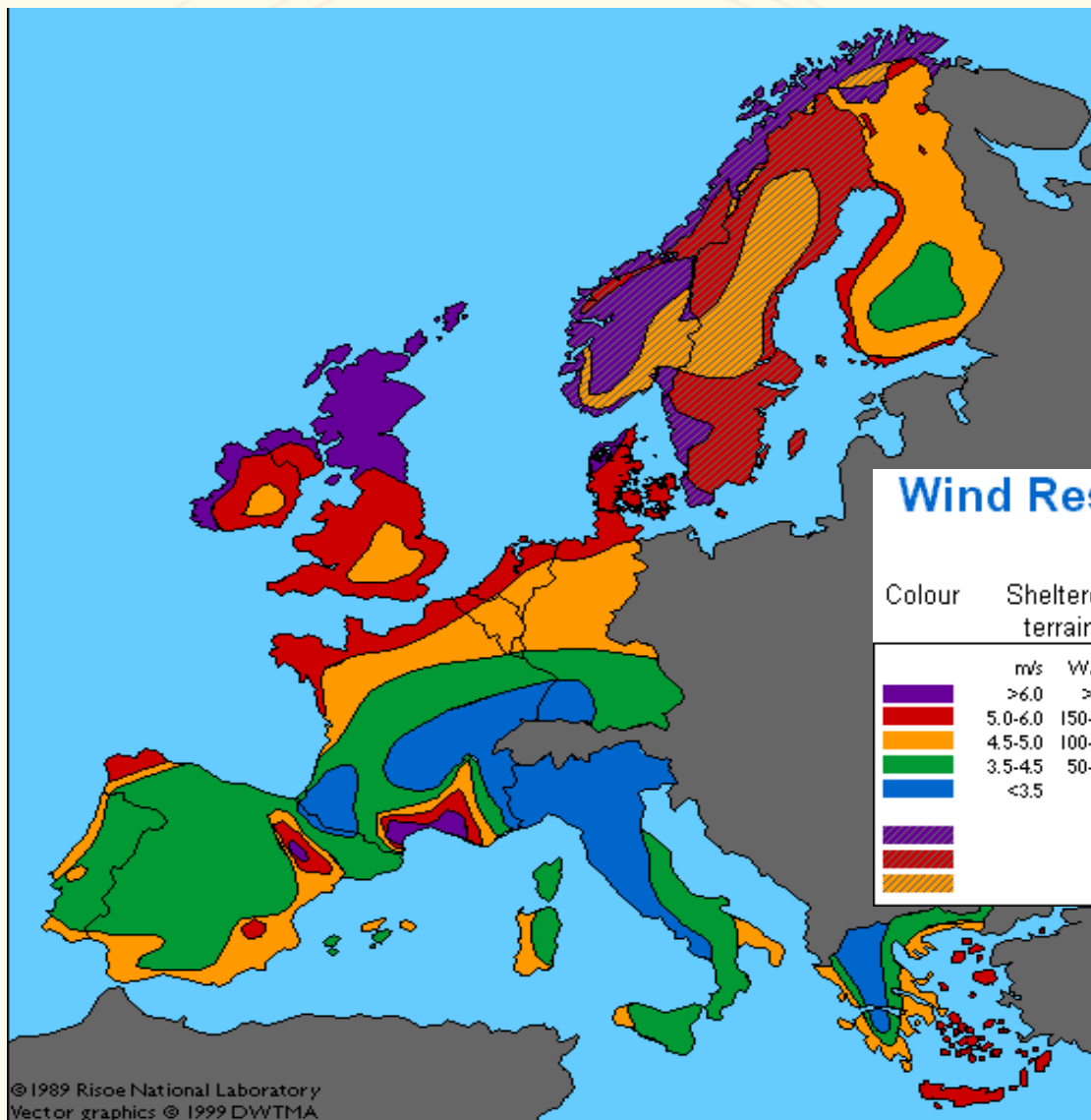
Κατανομή Weibull

- 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



Wind Resources at 50 (45) m Above Ground Level

Colour	Sheltered terrain		Open plain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
				>7.5						
				5.5-7.5						
				<5.5						

Ταχύτητες ανέμου στον Ελλαδικό χώρο

