



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού

Ενότητα 3: Ο άνεμος και οι ιδιότητές του

Γεώργιος Λευθεριώτης, Επίκουρος Καθηγητής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Σκοποί ενότητας

- Παρουσίαση της κίνησης του ανέμου ως ρευστό
- Παρουσίαση των μεθόδων μέτρησης των ιδιοτήτων του ανέμου (εξοπλισμός) και των χαρτών αποτύπωσης του αιολικού δυναμικού (τεχνικά και οικονομικά εκμεταλλεύσιμου)

Περιεχόμενα ενότητας

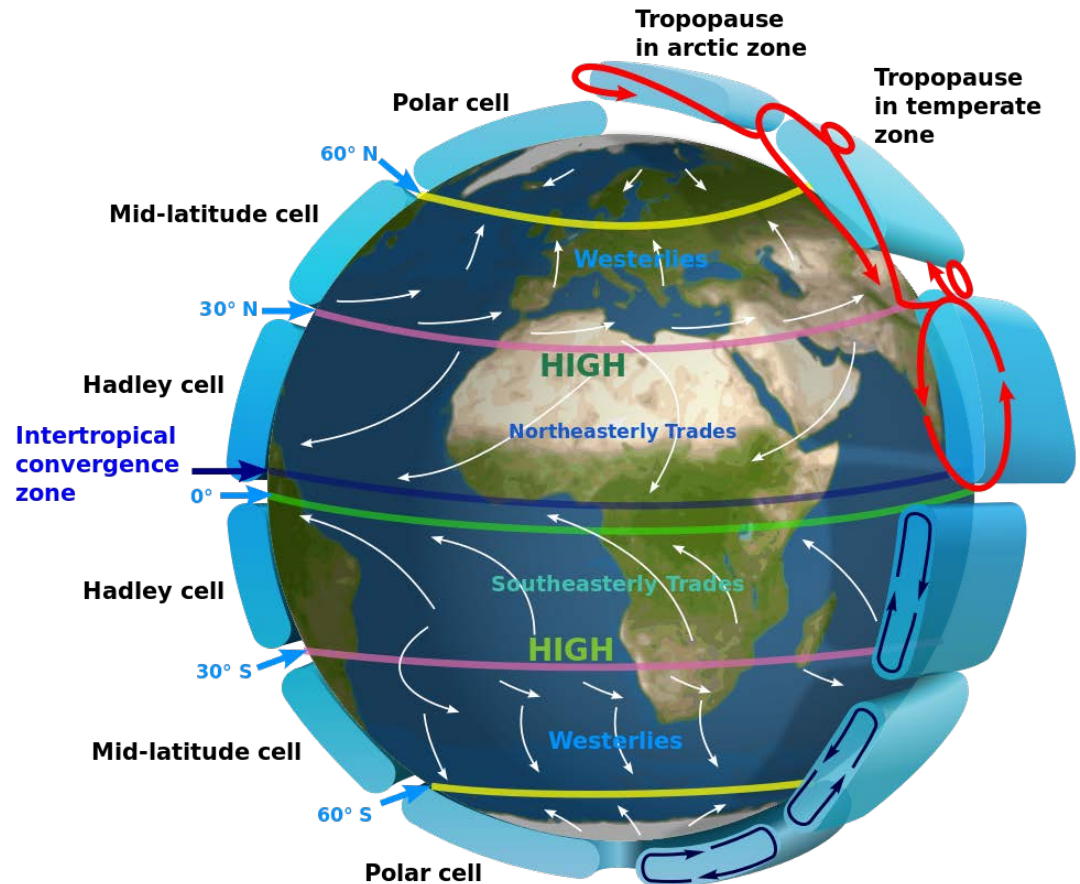
- Κίνηση ανέμου
- Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα
- Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου
 - Σωλήνας Pitot
 - Ανεμόμετρο θερμού σύρματος
- Στατιστική περιγραφή του ανέμου
- Περιγραφή της κατεύθυνσης του ανέμου – Ροδόγραμμα
- Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου
- Αιολικό δυναμικό
 - Ευρωπαϊκός αιολικός άτλας
 - Αιολικό δυναμικό Κυκλάδων

Η φύση του ανέμου

Η εμφάνιση του ανέμου οφείλεται σε δύο κυρίως λόγους:

- Στη θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο (η οποία διαφέρει στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη) και
- στην περιστροφή της.

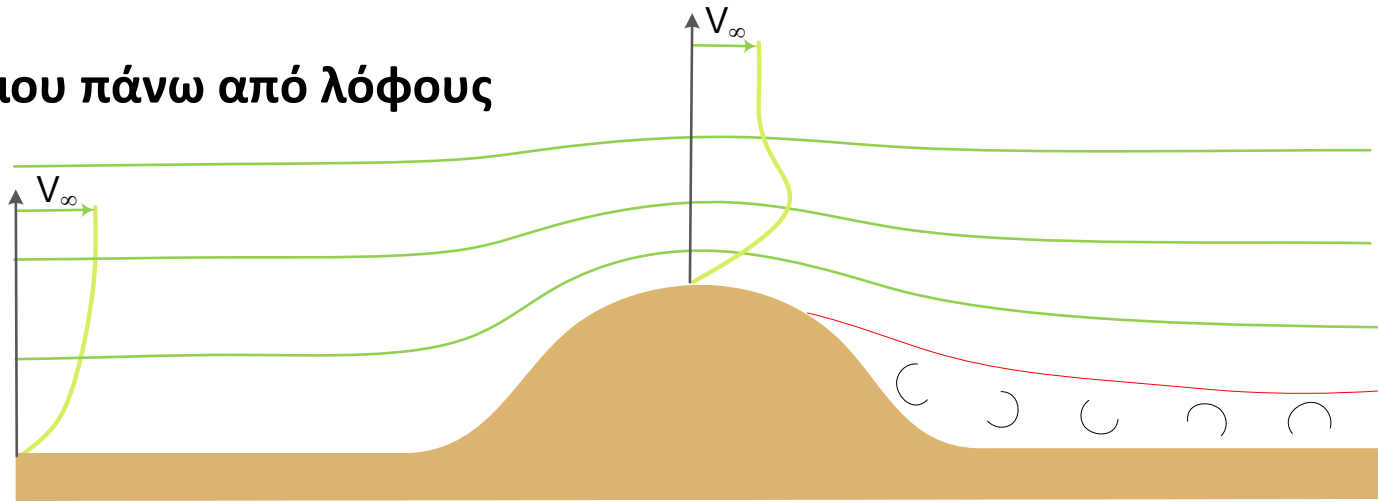
Εκτός από την παγκόσμια κυκλοφορία, σε κάθε περιοχή επικρατούν και τοπικά φαινόμενα που έχουν να κάνουν με τη μορφολογία, το κλίμα της κλπ.



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9c/Earth_Global_Circulation_-_en.svg/1000px-Earth_Global_Circulation_-_en.svg.png

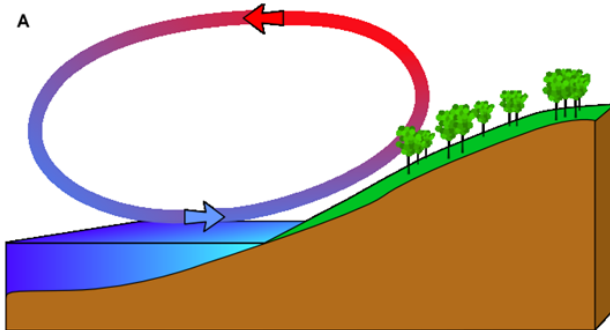
Χαρακτηριστικές κινήσεις ανέμου

Ροή ανέμου πάνω από λόφους

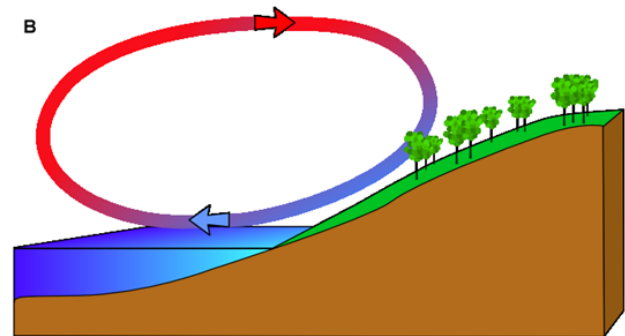


Θαλάσσια Αύρα

Πρωινές ώρες



Βραδυνές ώρες



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagrama_de_formacion_de_la_brisa-breeze.png

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (1)

Η ροή οποιοδήποτε ρευστού πάνω από στερεή επιφάνεια προκαλεί τη δημιουργία οριακού στρώματος. Έτσι και η ροή του ανέμου προκαλεί το «ατμοσφαιρικό» οριακό στρώμα. Αυτό έχει πάχος από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι μερικά χιλιόμετρα και είναι κατά κανόνα τυρβώδες.

Η ταχύτητα του ανέμου, αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος. Για εφαρμογές αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ο Νόμος της δύναμης του 1/7 (one seventh power law):

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^{\frac{1}{7}}$$

όπου V , V_0 οι ταχύτητες σε ύψη y και y_0 αντίστοιχα.

Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (2)

Γενικότερη σχέση:

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{y}{y_0} \right)^n \quad 0,1 < n < 0,4$$

όπου ο συντελεστής n εξαρτάται από την «**τραχύτητα**» του εδάφους, δηλαδή το μέσο ύψος z_0 των εμποδίων που συναντά ο άνεμος. Μία **εμπειρική σχέση** που συνδέει τα n και z_0 είναι:

$$n = 0,04 \ln(z_0) + 0,003 \left(\ln(z_0) \right)^2 + 0,24$$

ΕΙΔΟΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	z_0 (m)	n
ΘΑΛΑΣΣΑ-ΑΜΜΟΥΔΙΑ-ΧΙΟΝΙ	0,001-0,02	0,10-0,13
ΓΡΑΣΙΔΙ-ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΣΙΤΗΡΩΝ	0,02-0,3	0,13-0,20
ΔΑΣΗ-ΠΕΡΙΒΟΛΙΑ	0,3-2,0	0,20-0,27
ΑΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ	2,0-10,0	0,27-0,40

Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (1)

Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο. Έχει συνήθως τρία κύπελλα ημισφαιρικού ή κωνικού σχήματος. Η κυρτή πλευρά του κυπέλλου έχει μεγαλύτερο συντελεστή οπισθέλκουσας από την κοίλη ($C_{D,κυρτης}=1,33$ και $C_{D,κοιλης}=0,33$, για ημισφαιρικό σχήμα). Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των κυπέλλων είναι ανάλογη της ταχύτητας ανέμου γεγονός που διευκολύνει τις μετρήσεις. Για το λόγο αυτό το ανεμόμετρο συνδέεται με ταχύμετρο ή παλμική γεννήτρια.



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Anemometer_2745.JPG



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cup-Anemometer.jpg>

Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (2)

Το **ανεμούριο (wind vane)** ή «**ουρά του κόκκορα**», (**weathercock**) αποτελείται από μια περιστρεφόμενη ουρά που συνδέεται στο δρομέα μιας μεταβλητής αντίστασης με κυκλικό σχήμα. Έτσι, για κάθε θέση της ουράς, αντιστοιχεί μία τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία συσχετίζεται με την αντίστοιχη κατεύθυνση (Β, ΒΔ, κλπ). Τα ανεμούρια χρησιμοποιούνται μαζί με τα κυπελοφόρα ανεμόμετρα για συνδυασμένες μετρήσεις ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου.



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Girouette_-_Wind_vane.png

Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (3)

Ανεμόμετρο υπερήχων. Περιέχει δύο (τουλάχιστον) ζευγάρια πομπού-δέκτη υπερήχων. Ο ήχος στον αέρα έχει ταχύτητα c ($\approx 320\text{m/s}$ στους 20°C). Ο πομπός στέλνει παλμούς υπερήχων στο δέκτη.



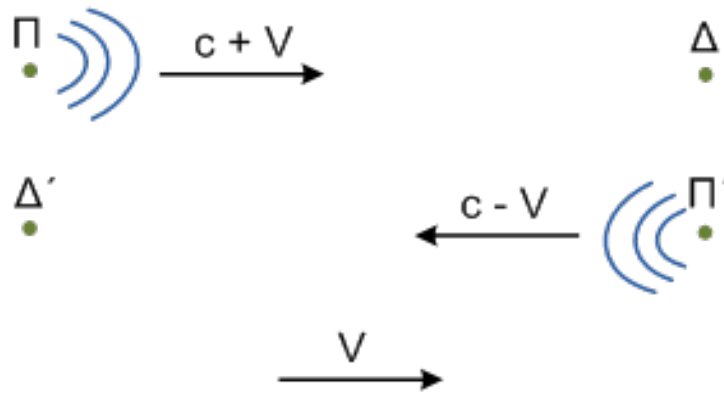
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Acoustic_Resonance_Wind_Sensor.jpg



http://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_covariance

Μέτρηση ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου (4)

Κατά τη διάδοση των υπερήχων, η ταχύτητα του **ανέμου V** προστίθεται διανυσματικά στην c και η σχετική ταχύτητα γίνεται $c+V$ στη μία διαδρομή και $c-V$ στην άλλη



Η απόσταση πομπού-δέκτη είναι l και διανύεται από τον ήχο σε χρόνους t_1 και t_2 για κάθε διαδρομή. Έτσι:

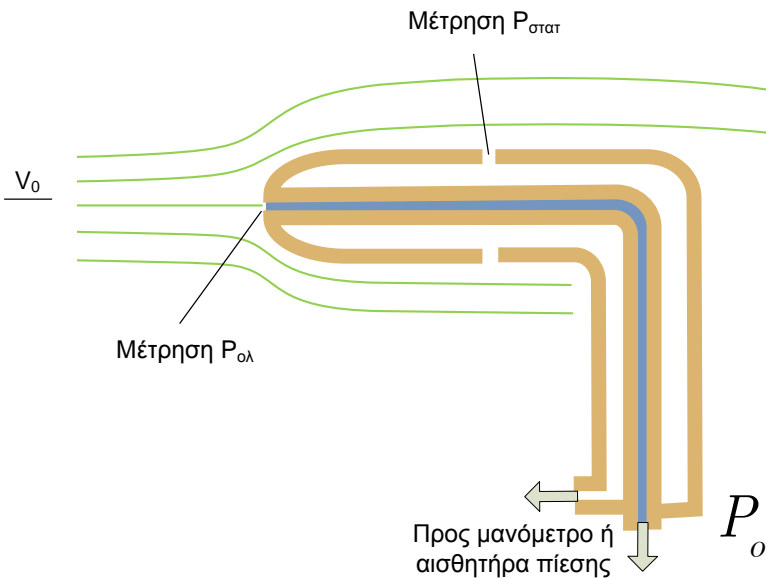
$$t_1 = \frac{l}{c+V}, \quad t_2 = \frac{l}{c-V}$$

οπότε:

$$V = \frac{l}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

Σωλήνας Pitot

Είναι ένας κούφιος, διπλός σωλήνας με μία κεντρική οπή και 5-6 περιφερειακές. Εισάγεται παράλληλα στη ροή ώστε στην κεντρική οπή να καταλήγει ρευματική γραμμή (σημείο τερματισμού) και να μετράται η ολική πίεση $P_{ολ}$, ενώ οι περιφερειακές είναι παράλληλες στη ροή και με αυτές μετράται η στατική πίεση $P_{στατ}$. Το όργανο συνδέεται σε μανόμετρο που περιέχει υγρό με πυκνότητα ρ_v και εμφανίζει διαφορά ύψους H ανάμεσα στα δύο σκέλη, προκύπτει από το νόμο Bernoulli



<http://en.wikipedia.org/wiki/Airspeed>

$$P_{ολ} = P_{στατ} + \frac{1}{2} \rho V_0^2 \Rightarrow P_{ολ} - P_{στατ} = \frac{1}{2} \rho V_0^2 = \rho_v gH$$

$$V_0 = \sqrt{2 \frac{\rho_v}{\rho} gH}$$

Ανεμόμετρο θερμού σύρματος

Αποτελείται από πολύ λεπτό σύρμα **βολφραμίου ή λευκόχρυσου** μικρού μήκους (2-3 mm) το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Όταν εκτίθεται στον άνεμο ψύχεται λόγω εξαναγκασμένης μεταφοράς θερμότητας και αλλάζει η ωμική του αντίσταση. Το ηλεκτρικό κύκλωμα παρέχει περισσότερη ισχύ ώστε να διατηρήσει σταθερή τη θερμοκρασία του σύρματος, μέσω μιας διάταξης του τύπου γέφυρας Whitstone ή με χρήση άλλων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τότε ισχύει για την τάση U που εφαρμόζεται στο σύρμα:

$$U^2 [Volt] = A + B V^{\frac{1}{2}} [m / s]$$

όπου V η ταχύτητα του ανέμου. Έχει εξαιρετικά μεγάλη ευαισθησία ($U^2 \sim V^{1/2}$) και προσφέρεται για τη μέτρηση πολύ μικρών μεταβολών της ταχύτητας. Χρησιμοποιείται για τη μέτρηση των επιπέδων τύρβης του ανέμου.

Στατιστική περιγραφή του ανέμου (1)

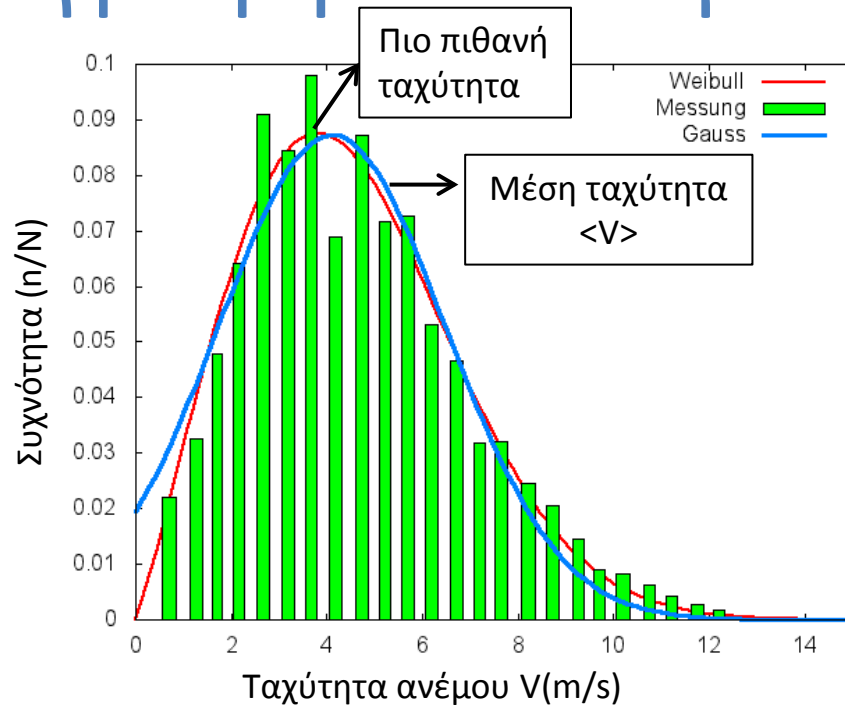
Για να αποδοθεί στατιστικά το αιολικό δυναμικό σε μια περιοχή, είναι απαραίτητο να γίνει η ακόλουθη επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων:

- Πρώτα υπολογίζονται **οι μέσοι όροι** ταχυτήτων για ένα μικρό χρονικό διάστημα (πχ λεπτό ή δεκάλεπτο).
- Στη συνέχεια, ανάλογα με τον αριθμό των μετρήσεων και την επιθυμητή ακρίβεια, **επιλέγεται κατάλληλο διάστημα ΔV** το οποίο χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση των μετρήσεων.
- Η κλίμακα ταχυτήτων **χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα $(V_i, V_i+\Delta V)$** και **αθροίζεται ο αριθμός των φορών n** (λέγεται και συχνότητα εμφάνισης) που η ταχύτητα του ανέμου εμφάνισε τιμές μέσα στο κάθε τμήμα.
- Έτσι κατασκευάζεται διάγραμμα $n/N=f(V)$, όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων.

Στατιστική περιγραφή του ανέμου (2)

Τυπική κατανομή συχνότητας εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου με $\langle V \rangle = 10 \text{ m/s}$, $\Delta V = 1 \text{ m/s}$ και η αντίστοιχη κατανομή Weibull ($k=1,8$, $c=11,2 \text{ m/s}$). Η κατανομή **Weibull** ορίζεται ως εξής:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right]$$



<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Windvertln.png>

$f(V)$ η πιθανότητα εμφάνισης της ταχύτητας με τιμή V , **k** αδιάστατος συντελεστής, «συντελεστής σχήματος, shape coefficient» **c** «συντελεστής κλίμακας, scale coefficient» με διαστάσεις ταχύτητας.

Στατιστική περιγραφή του ανέμου (3)

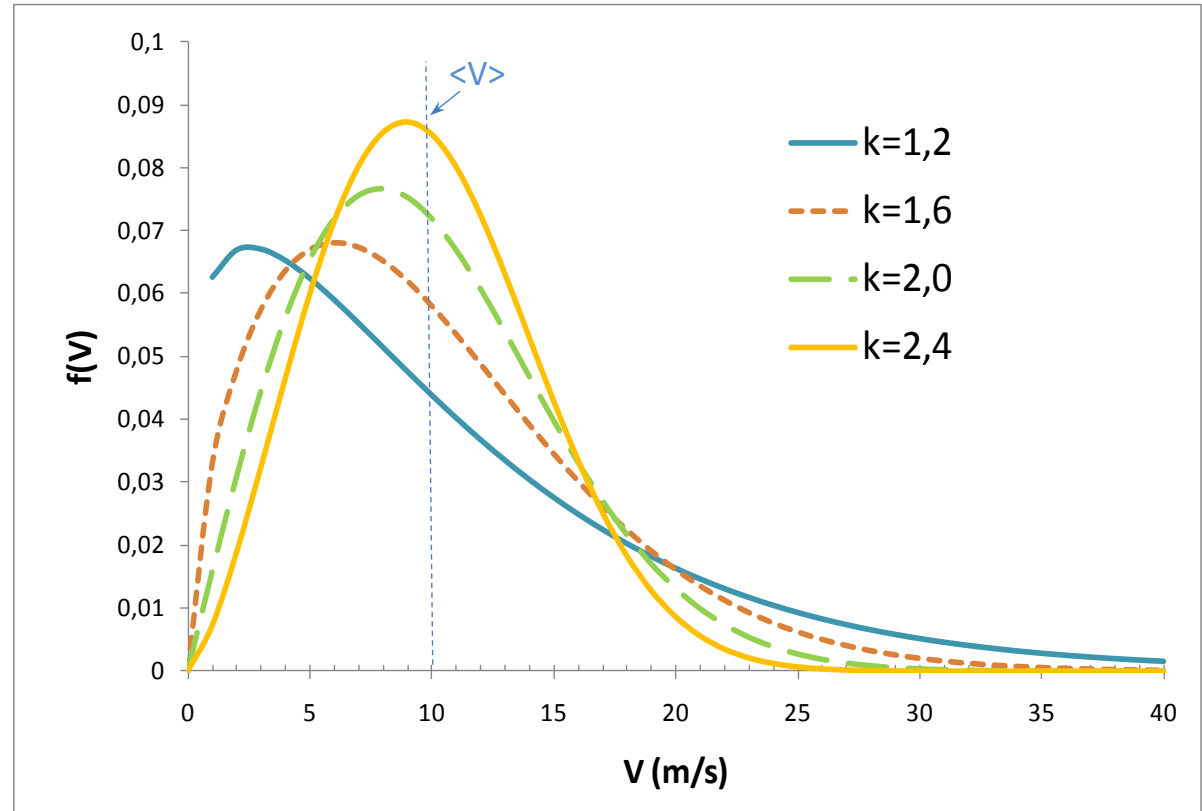
Η κατανομή είναι κανονικοποιημένη, ισχύει δηλαδή:

$$\int_0^{\infty} f(V) dV = 1$$

Η επίδραση του k στο σχήμα της κατανομής Weibull ($\langle V \rangle = 10 \text{ m/s}$, $c = 11,2 \text{ m/s}$).

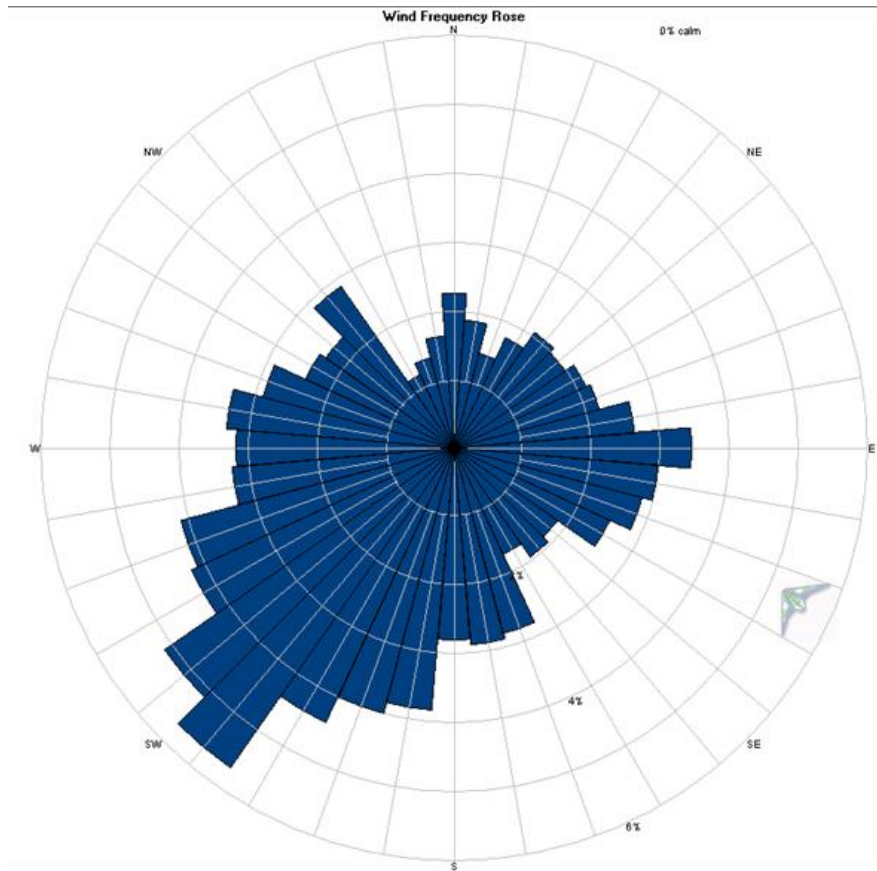
Ο συντελεστής κλίμακας μεταθέτει ολόκληρη την καμπύλη στον άξονα των x .

$$c = 1,12 \langle V \rangle \quad (1,5 \leq k \leq 3,0)$$



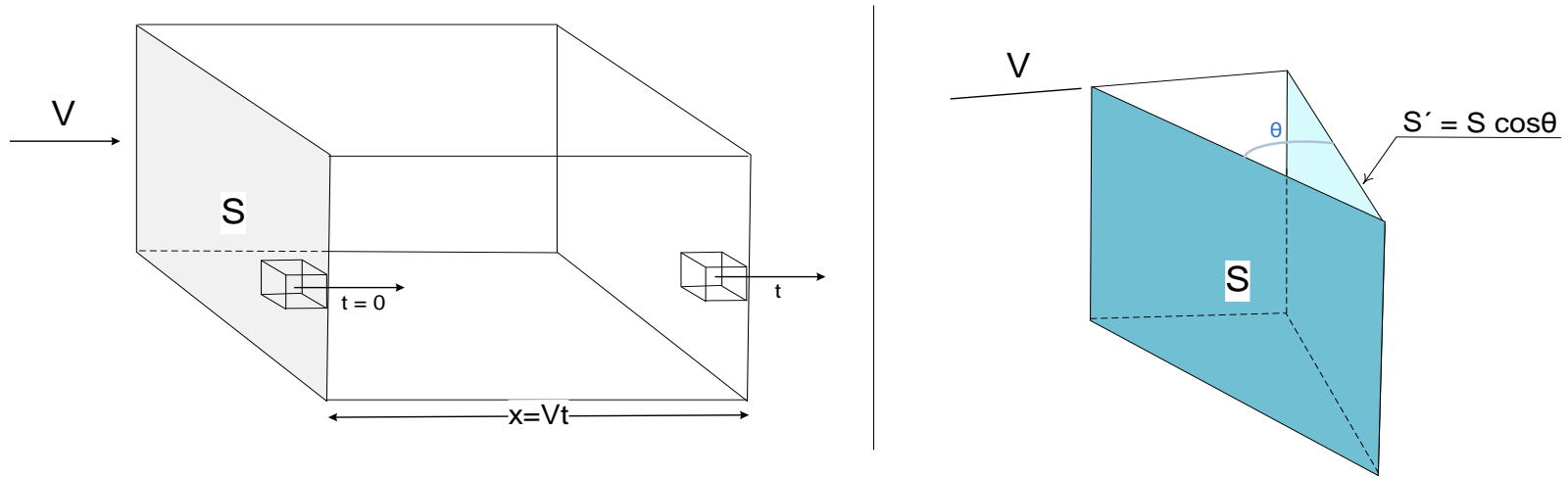
Όσο πιο μεγάλες τιμές παίρνουν οι συντελεστές k και c , τόσο καλύτερο είναι το μετρούμενο πεδίο από άποψη αιολικού δυναμικού.

Περιγραφή της κατεύθυνσης του ανέμου - Ροδόγραμμα



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore_wind_rose_sample.JPG

Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου (1)



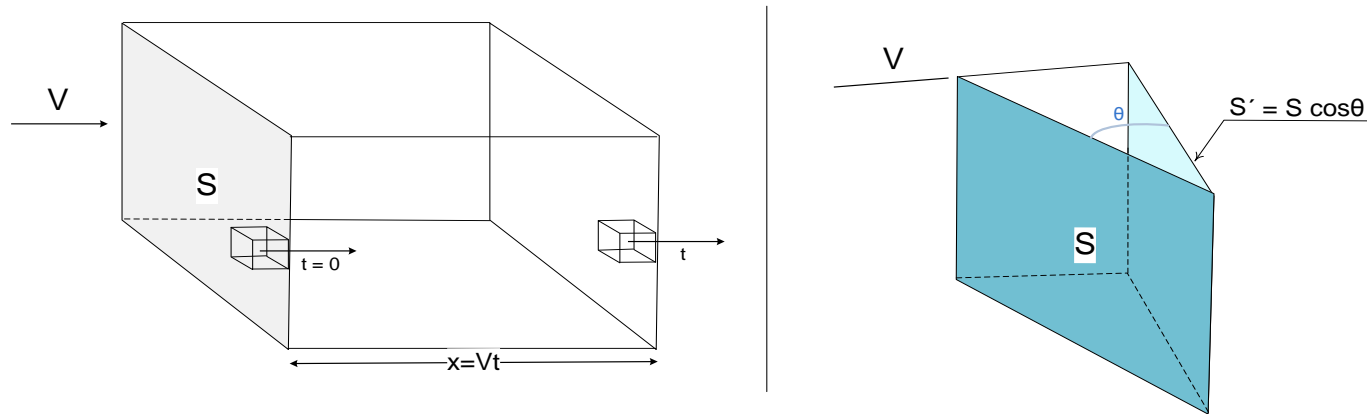
Έστω επιφάνεια S στην οποία προσπίπτει κάθετα ο άνεμος με ταχύτητα V .
Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου που προσπίπτει στην επιφάνεια S είναι:

$$P = \frac{E_{\text{κινητική}}}{t} = \frac{\frac{1}{2} m V^2}{t} \qquad \frac{m}{t} = \frac{\rho S x}{t} = \rho S V$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα και έτσι προκύπτει:

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Διαθέσιμη ισχύς του ανέμου (2)



Για πλάγια πρόσπτωση του ανέμου υπό γωνία θ , η «ενεργός» επιφάνεια μειώνεται σε $S' = S \cos\theta$ και η διαθέσιμη ισχύς γίνεται:

$$P' = \frac{1}{2} \rho S V^3 \cos\theta$$

$P \sim V^3$: Η διαθέσιμη ισχύς του ανέμου εξαρτάται ισχυρά από την ταχύτητα.

$P \sim S$ δηλαδή $P \sim D^2$: Από εδώ προκύπτει ότι ο διπλασιασμός της διαμέτρου D μίας ανεμογεννήτριας, τετραπλασιάζει τη διαθέσιμη ισχύ.

$P \sim \rho$: Η πυκνότητα του ανέμου μειώνεται σε μεγάλα υψόμετρα.

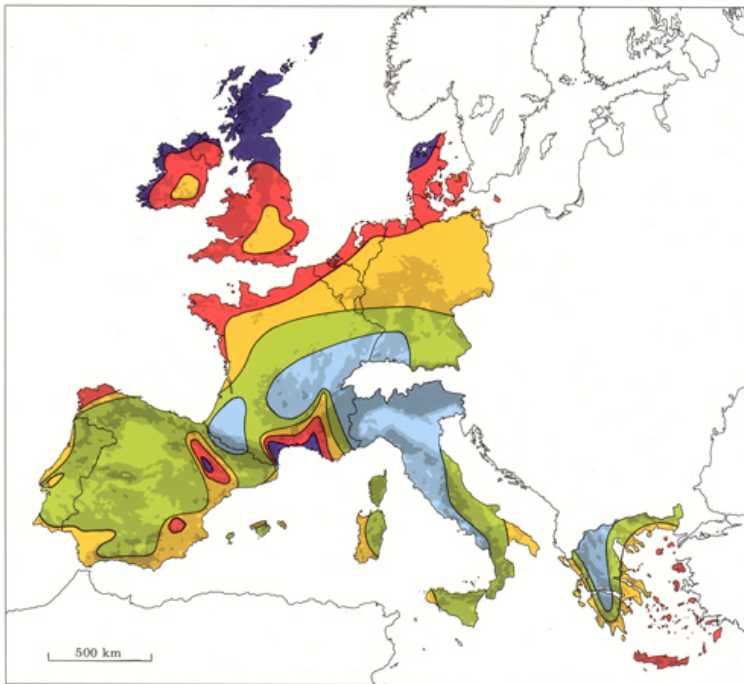
$P \sim \cos\theta$: Είναι απαραίτητος ο προσανατολισμός –ή «προσανεμισμός»- των ανεμογεννητριών.

Αιολικό δυναμικό

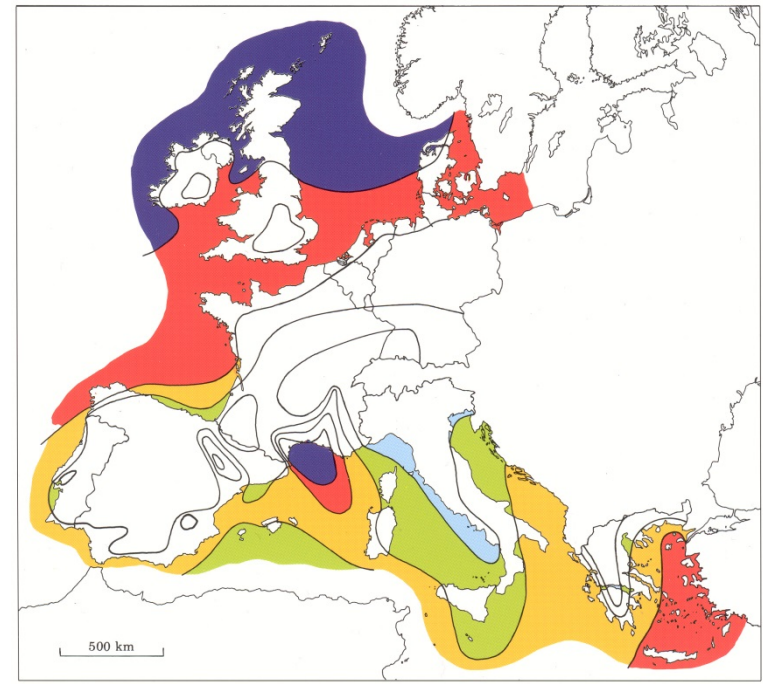
- **Διαθέσιμο αιολικό δυναμικό.** Για την εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή, χρησιμοποιούνται επιτόπιες μετρήσεις, μετεωρολογικά στοιχεία και προγράμματα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (computational fluid dynamics, CFD), που προβλέπουν τις μεταβολές της μέσης ταχύτητας του ανέμου, ανάλογα με τη διαμόρφωση του εδάφους της περιοχής ενδιαφέροντος. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται χάρτες όπως αυτοί που παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.
- **Τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό.** Είναι προφανές, ότι δεν είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούμε ολόκληρο το διαθέσιμο δυναμικό για παραγωγή ενέργειας. Και αυτό γιατί υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί στη χρήση του, όπως απαγορευτικές χρήσεις γης (κατοικημένες περιοχές, δάση ή εθνικοί δρυμοί, αρχαιολογικοί χώροι, κλπ), ασθενή ή ανύπαρκτα ηλεκτρικά δίκτυα, δύσκολη ή αδύνατη πρόσβαση,
- **Οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό.** Σε περιοχές με τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό αλλά με χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν είναι οικονομικά συμφέρουσα η παραγωγή αιολικής ενέργειας. Το οικονομικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό εξαρτάται από παράγοντες όπως η τιμή της kWh, οι επιδοτήσεις που προσφέρονται για την εγκατάσταση των αιολικών, κλπ.

Ευρωπαϊκός αιολικός άτλας

Μετά την αποτύπωση των τεχνικών και οικονομικών περιορισμών στους χάρτες του διαθέσιμου δυναμικού, προκύπτουν νέοι χάρτες με το τεχνικά (και οικονομικά) εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό.



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-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



Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights									
10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

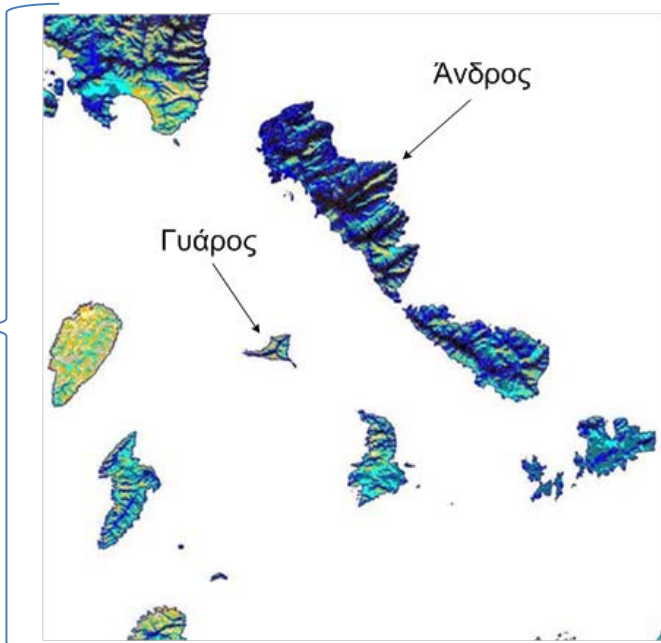
<http://www.wind-energy-the-facts.org/wind-atlases.html>

Troen, I. and E.L. Petersen (1989)

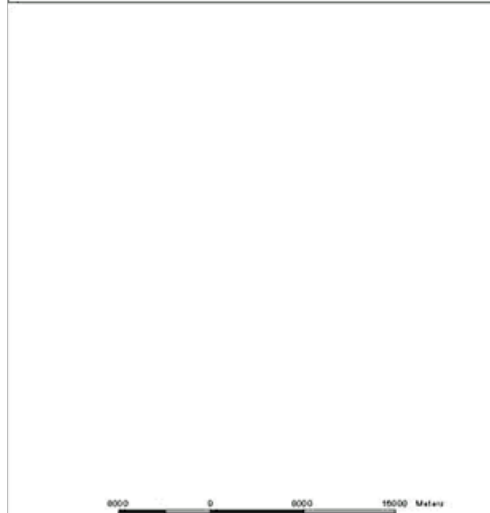
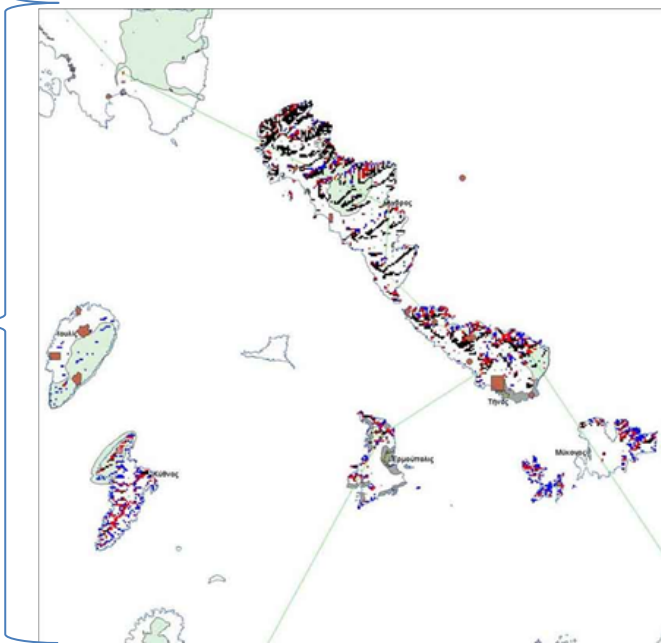
<http://www.risoe.dk/vea/projects/nimo/ewa.htm>

Αιολικό δυναμικό Κυκλάδων

Διαθέσιμο
δυναμικό



Τεχνικά
εκμεταλλεύσιμο
δυναμικό



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» 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 Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.0**.



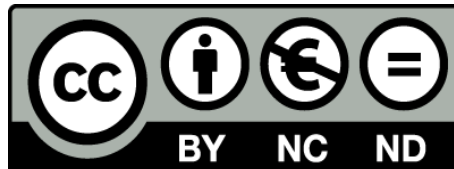
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Λευθεριώτης Γεώργιος, 2015**. «**Αιολική Ενέργεια & Ενέργεια του Νερού, Ενότητα: Ο άνεμος και οι ιδιότητές του**»
Έκδοση: **1.0**. Πάτρα **2015**. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1954&id=4289>



Σημείωμα Αδειοδότησης

- 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.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Οι πηγές των εικόνων είναι:

- <http://www.wind-energy-the-facts.org/wind-atlases.html>
- <http://www.risoe.dk/vea/projects/nimo/ewa.htm>
- <http://www.cres.gr> (ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ & ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΚΑΠΕ)

