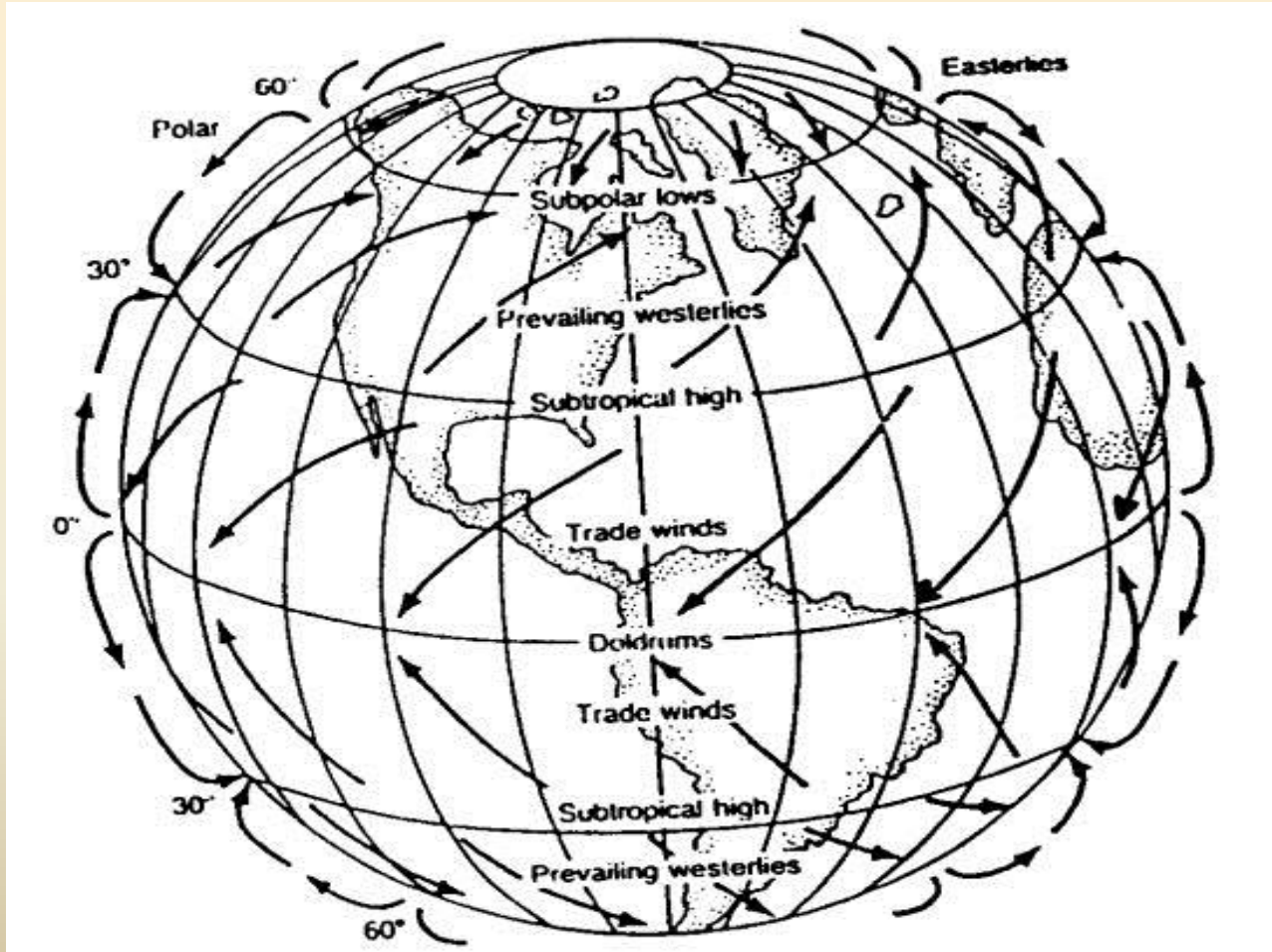


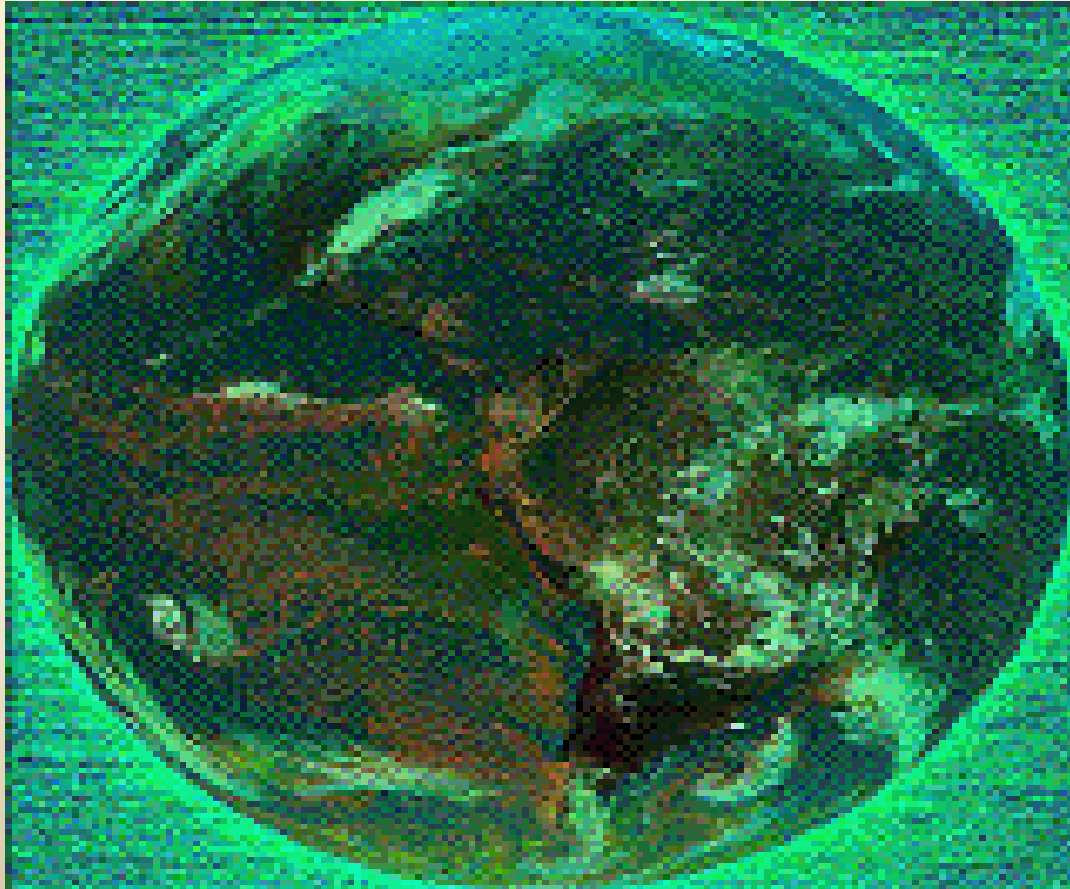
ΠΡΟΕΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η εμφάνιση του ανέμου πάνω στην επιφάνεια της γης οφείλεται σε δύο παράγοντες: την ηλιακή ακτινοβολία και την περιστροφική κίνηση της γης.



ΠΡΟΕΛΥΣΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η εμφάνιση του ανέμου πάνω στην επιφάνεια της γης οφείλεται σε δύο παράγοντες: την ηλιακή ακτινοβολία και την περιστροφική κίνηση της γης.



ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

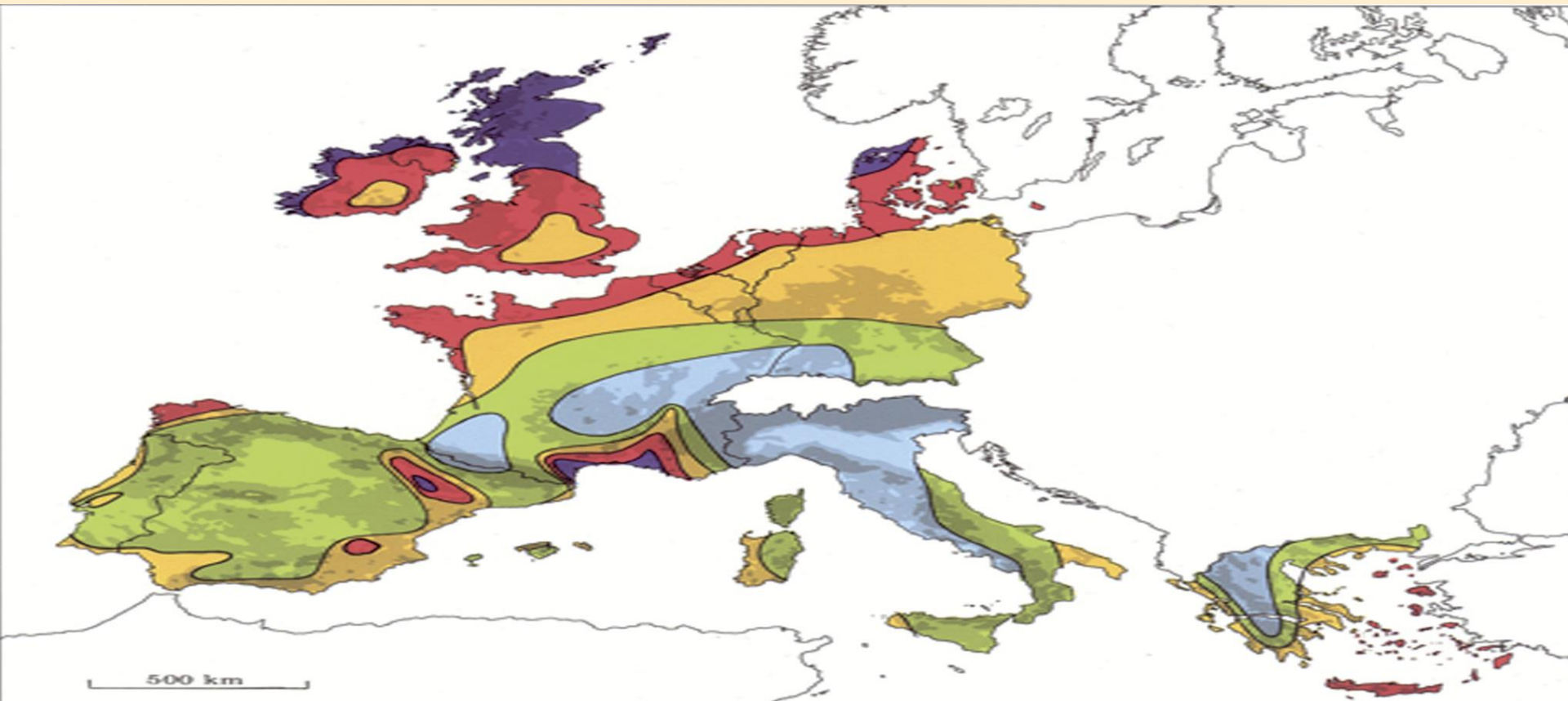


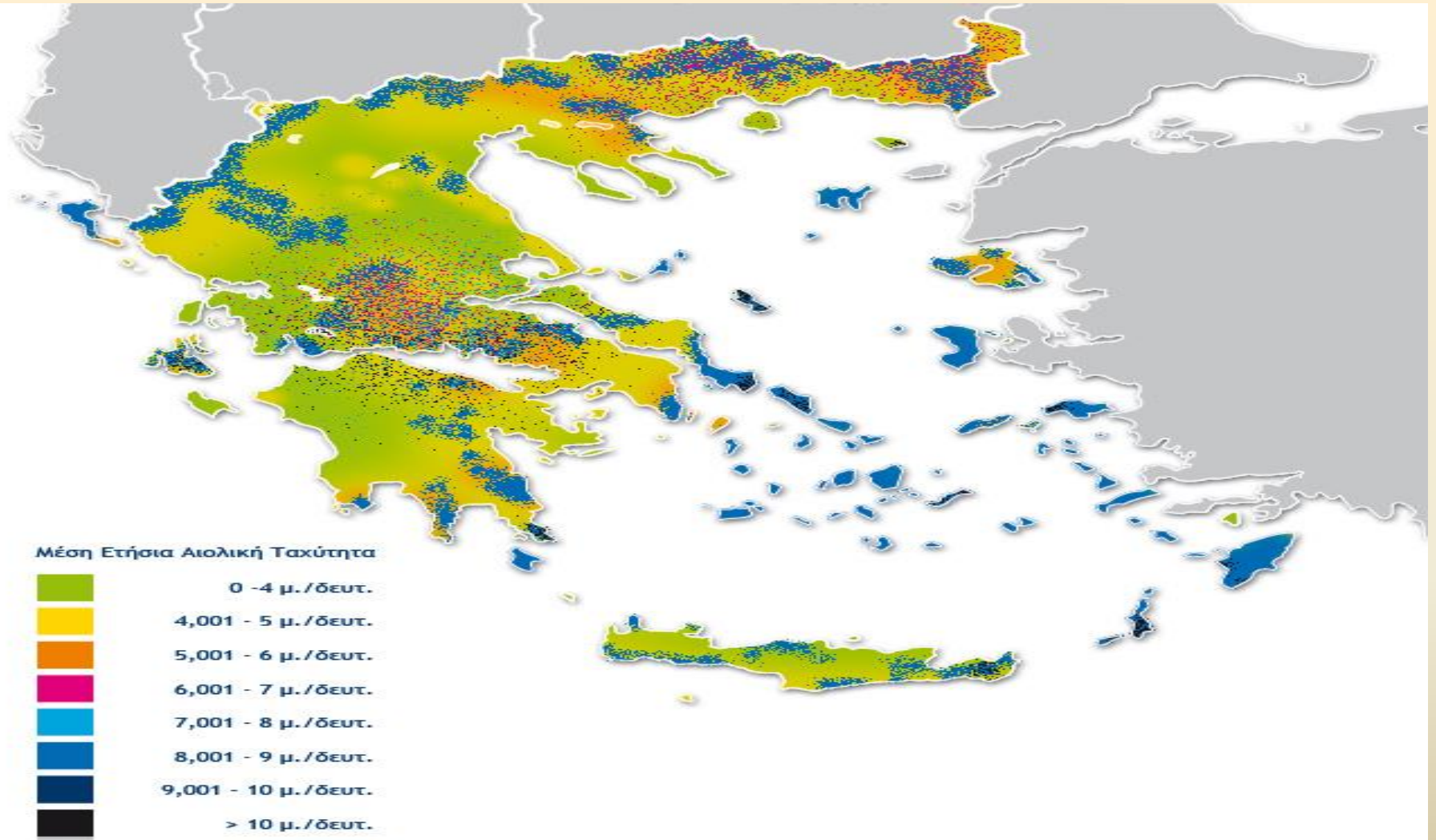
Table 1 Wind Resources at 50 Metres Above Ground Level for Five Different Topographic Conditions

Sheltered terrain		Open plain		At a sea coast		Open sea		Hills and ridges	
ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻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

Source: European Wind Atlas, Onshore, Source, Rise National Laboratory, Denmark.

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ



ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Specifications and equivalent speeds

Beaufort wind scale	Mean Wind Speed		Limits of wind speed		Wind descriptive terms	Probable wave height in metres*	Probable maximum wave height in metres*	Seastate	Sea descriptive terms
	Knots	m/s	Knots	m/s					
0	0	0	<1	0-0.2	Calm	-	-	0	Calm (glassy)
1	2	0.8	1-3	0.3-1.5	Light air	0.1	0.1	1	Calm (rippled)
2	5	2.4	4-6	1.6-3.3	Light breeze	0.2	0.3	2	Smooth (wavelets)
3	9	4.3	7-10	3.4-5.4	Gentle breeze	0.6	1.0	3	Slight
4	13	6.7	11-16	5.5-7.9	Moderate breeze	1.0	1.5	3-4	Slight-Moderate
5	19	9.3	17-21	8.0-10.7	Fresh breeze	2.0	2.5	4	Moderate
6	24	12.3	22-27	10.8-13.8	Strong breeze	3.0	4.0	5	Rough
7	30	15.5	28-33	13.9-17.1	Near gale	4.0	5.5	5-6	Rough-Very rough
8	37	18.9	34-40	17.2-20.7	Gale	5.5	7.5	6-7	Very rough-High
9	44	22.6	41-47	20.8-24.4	Severe gale	7.0	10.0	7	High
10	52	26.4	48-55	24.5-28.4	Storm	9.0	12.5	8	Very High
11	60	30.5	56-63	28.5-32.6	Violent storm	11.5	16.0	8	Very High
12	-	-	64+	32.7+	Hurricane	14+	-	9	Phenomenal

*

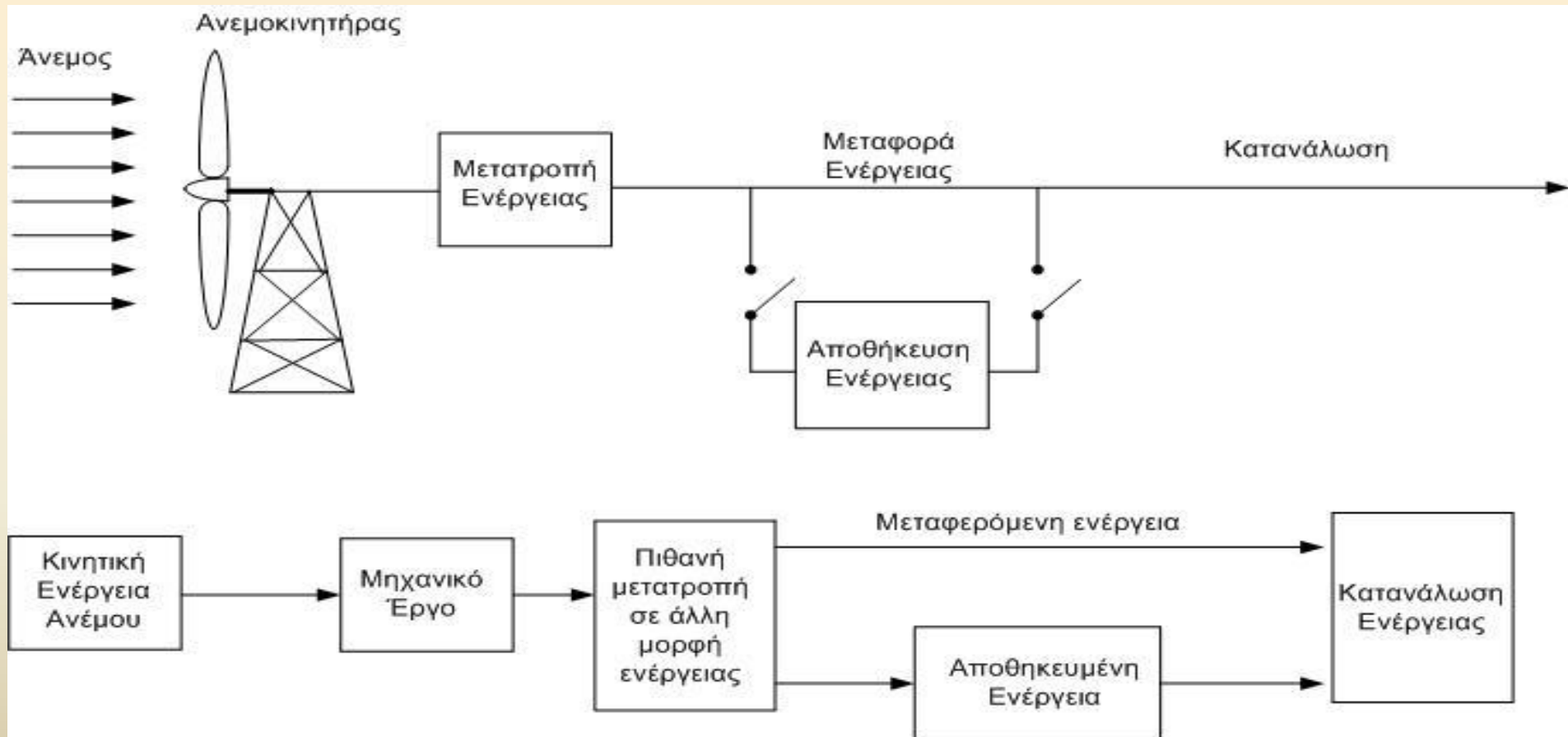
1.These values refer to well-developed wind waves of the open sea.

2.The lag effect between the wind getting up and the sea increasing should be borne in mind.

Πίνακας 1. Μετρήσεις Αιολικού Δυναμικού ΔΕΗ/ΔΕΜΕ

Τοποθεσία	Μέση Ταχύτητα (m/s)	Περίοδος Μετρήσεων
Ανδρος	9.7	81-90
Τήνος	9.5	87-90
Σύρος	8.1	88-90
Κρήτη	8.1	81-83
Λέσβος	8.7	87-90
Σάμος	10.4	86-90
Εύβοια	9.2	89-90
Σαμοθράκη	6.6	86-89

ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ

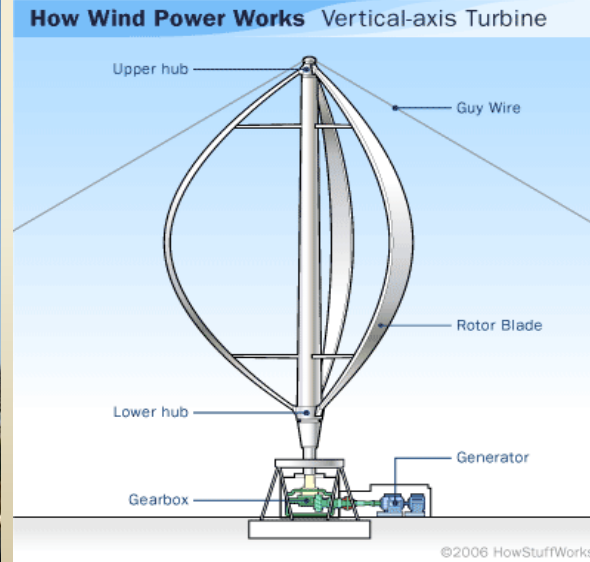
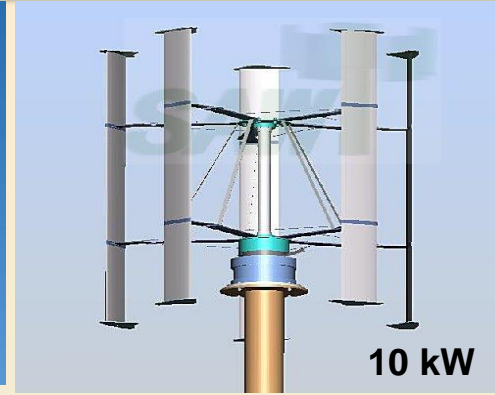
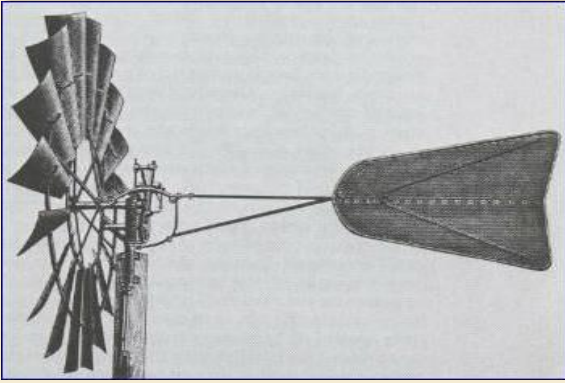


Μικροί, όταν η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται μεταξύ των τιμών: $50 \text{ W} \leq N_o \leq 20 \text{ kW}$

χρησιμοποιούνται σε απομονωμένες περιοχές για κάλυψη αγροτικών ή κτηνοτροφικών αναγκών, ιδιαίτερα για άντληση και θέρμανση νερού, θέρμανση κατοικίας, φωτισμό και άλλες μικροεφαρμογές. Τις περισσότερες φορές η λύση αυτή είναι η οικονομικότερη. Οι ανεμοκινητήρες του τύπου αυτού είναι ανεξάρτητοι, μη συνδεδεμένοι με δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος που φορτίζει συσσωρευτές.

ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μικροί, όταν η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται μεταξύ των τιμών: $50 \text{ W} \leq N_o \leq 20 \text{ kW}$



ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μικροί, όταν η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται μεταξύ των τιμών: $50 \text{ W} \leq N_o \leq 20 \text{ kW}$



ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μεσαίοι, όταν η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται μεταξύ των τιμών: $20 \text{ kW} \leq N_o \leq 250 \text{ kW}$



50 kW



50 kW



100 kW



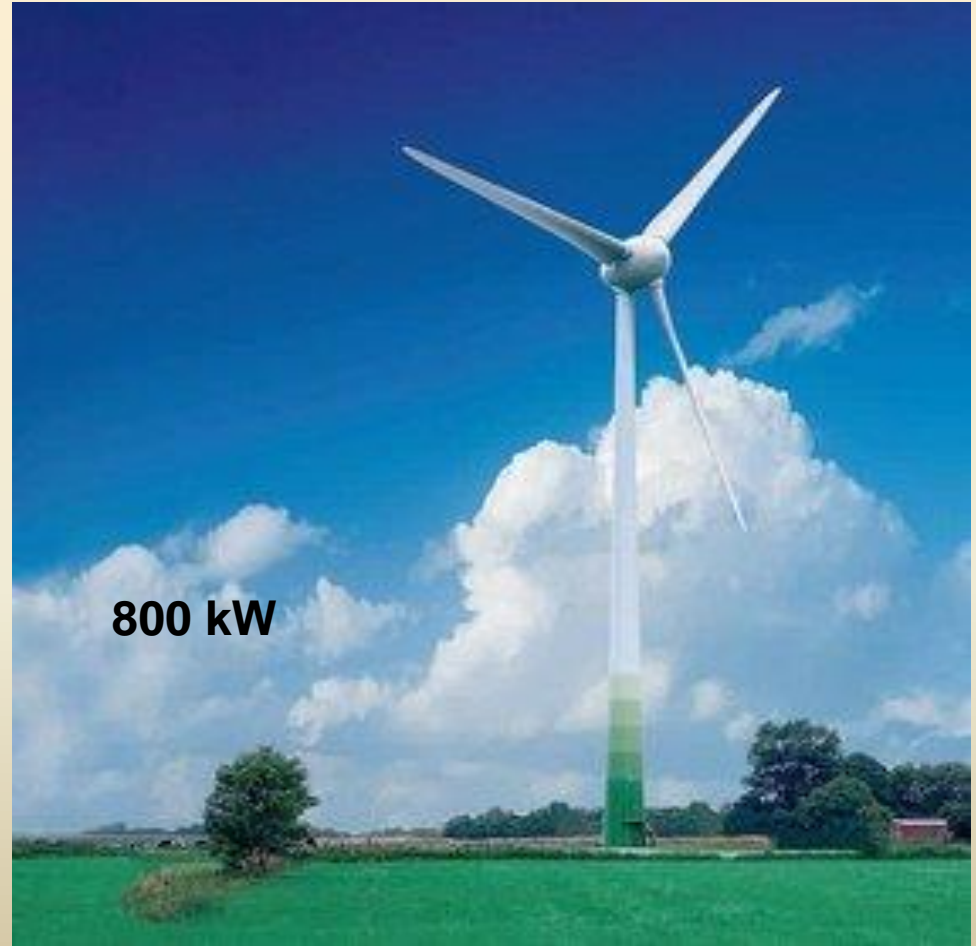
150 kW



150 kW

ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μεγάλοι, όταν η ονομαστική τους ισχύς υπερβαίνει τα $250 \text{ kW} \leq N_o$



ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μεγάλοι, όταν η ονομαστική τους ισχύς υπερβαίνει τα $250 \text{ kW} \leq N_0$



ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Μεγάλοι, όταν η ονομαστική τους ισχύς υπερβαίνει τα $250 \text{ kW} \leq N_o$



Primary Components of a Turbine Common on Canadian Wind Farms

- 1 Blade
- 2 Rotor Hub
- 3 Pitch Cylinder
- 4 Main Shaft
- 5 Gear Box*
- 6 Generator
- 7 Transformer



ΜΕΓΕΘΗ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ

Οι ανεμοκινητήρες των κατηγοριών μέσης και μεγάλης ισχύος χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας σε συνεργασία με δίκτυο παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Διακρίνουμε τις παρακάτω περιπτώσεις :

- ❖ Λειτουργία ανεμοκινητήρα για εξοικονόμηση καυσίμου. Ο τρόπος αυτός λειτουργίας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τη νησιώτικη Ελλάδα όπου επικρατούν ισχυροί άνεμοι, και το κόστος της παραγόμενης kWh είναι υψηλό λόγω του αυξημένου κόστους του kg καυσίμου, λόγω της θαλάσσιας μεταφοράς και του μικρού μεγέθους του σταθμού.
- ❖ Λειτουργία ανεμοκινητήρα ως σταθμού βάσης θεωρώντας ότι η εγκατεστημένη ισχύς της Diesel μειώνεται κατά ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του ανεμοκινητήρα. Λειτουργία ως αντλητικού σταθμού για αποθήκευση νερού, και χρησιμοποίησή του με υδροηλεκτρική εκμετάλλευση.

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ



ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΘΑΛΑΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ



ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Εύβοια όρος Όχη



ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ



Εικονική αναπαράσταση της πρότασης εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου στη νήσο Σέριφο, συνολικού αριθμού ανεμογεννητριών 87 3 MW εκάστη. Στη φωτογραφία απεικονίζεται η θέα από το πλοίο όπως πλησιάζει τη Σέριφο από την Κύθνο μπροστά από το βυζαντινό μοναστήρι των Ταξιαρχών. Απεικονίζονται σε πλήρη αναλογία ύψους οι ανεμογεννήτριες A14 έως A16, θέση προφήτης Ηλίας (Τράχηλας), A1 έως A3 θέση Τράχηλας, και B11 έως B16 θέση Πετριάς.

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ



ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Δεν υπάρχει καμία ένδειξη ότι τα αιολικά πάρκα επιβαρύνουν τη γεωργία ή την κτηνοτροφία. Δεδομένου ότι περίπου το 99% της γης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις, μπορούμε να κατανοήσουμε ότι οι αγροτικές δραστηριότητες μπορούν να συνεχίζονται και μετά την εγκατάστασή του.



Γιατί όμως υπάρχουν οι αντιδράσεις;

Κάποιοι λένε ότι αυτό συμβαίνει από άγνοια ή από συντηρητισμό και άρνηση στις νέες τεχνολογίες, ενώ κάποιοι είναι γνωστό ότι αντιδρούν από καθαρά και μόνο ιδεολογική σκοπιά, δηλαδή καχυποψία έναντι των ιδιωτών επενδυτών και δυσπιστία για μία επιδοτούμενη δραστηριότητα, ενώ δεν είναι απίθανο κάποιοι να αντιδρούν για ίδιον όφελος, δηλαδή να έχουν κάποια άλλα «επενδυτικά σχέδια στο μυαλό τους». Οι πολέμιοι των αιολικών πάρκων θεωρούν πως προσβάλλεται το περιβάλλον και μάχονται στο όνομα της προστασίας του. Οι επιστήμονες πάντως δίνουν απαντήσεις στα κύρια θέματα που θέτουν οι σκεπτικείς των

ΟΧΙ ΣΤΗ ΠΡΑΣΙΝΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

φτάνει πια η ανελέητη καταστροφή της φύσης που στο βωμό του κέρδους το κράτος & το κεφάλαιο καταπατούν και καταστρέφουν τα πάντα βαπτίζοντας τα όλα "πράσινα" !



Ο αγώνας ενάντια στους μεγαλονταβατζήδες της φύσης, είναι αγώνας για την γη και την ελευθερία...

ΑΜΕΣΗ ΣΥΛΛΟΓΙΚΗ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΤΡΟΠΗ

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

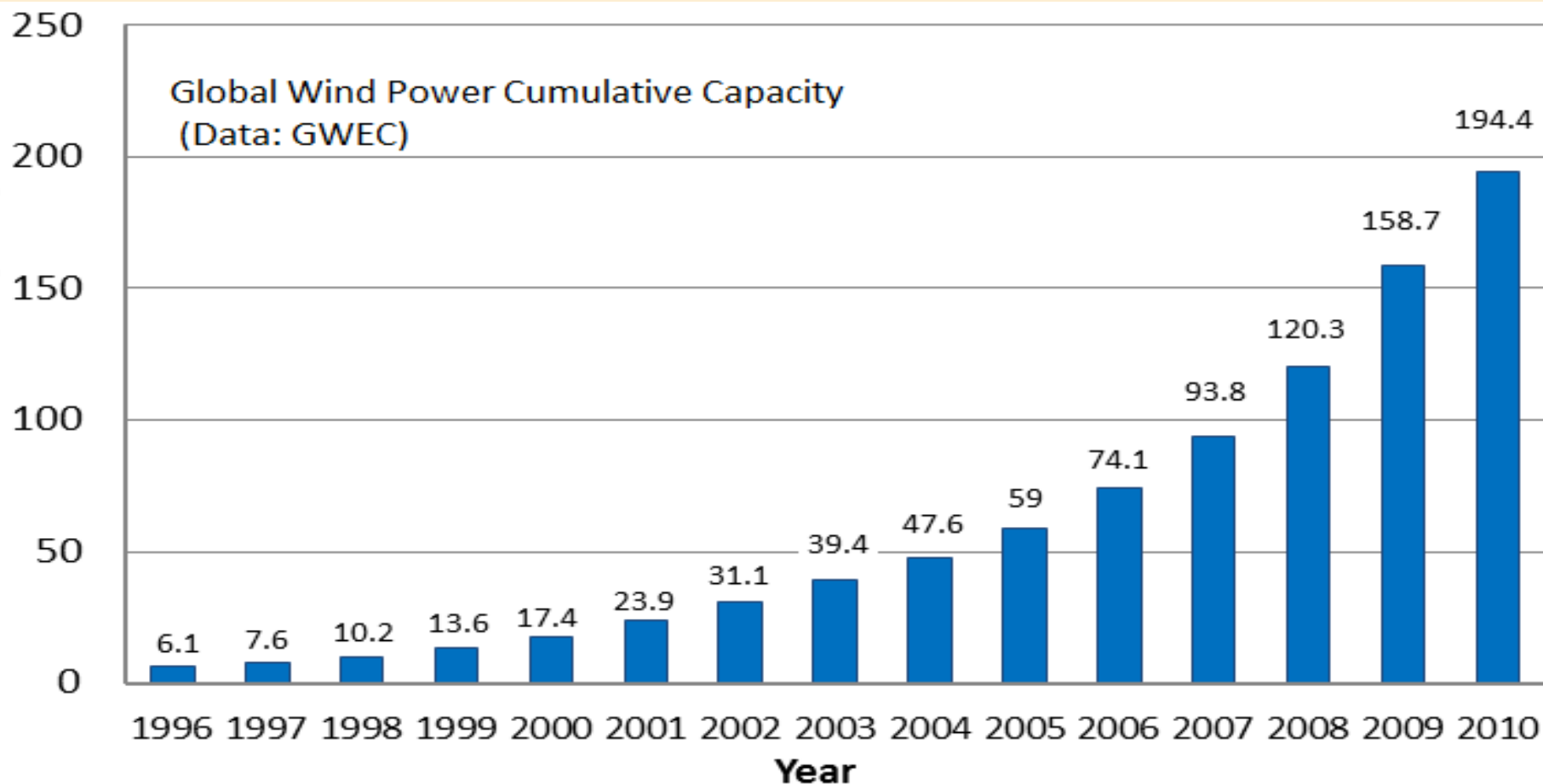
Top 10 countries by nameplate windpower capacity (2010) MW

China	44.733
United States	40.180
Germany	27.215
Spain	20.676
India	13.066
Italy	5.797
France	5.660
United Kingdom	5.204
Canada	4.008
Denmark	3.734

Top 10 EU countries by windpower electricity production (December 2010) GWh

United Kingdom	11.440
Sweden	3.500
Spain	42.976
Portugal	8.852
Netherlands	3.972
Ireland	3.473
Greece	2.200
Germany	35.500
France	9.600
Denmark	7.808

Global Cumulative Capacity (GW)



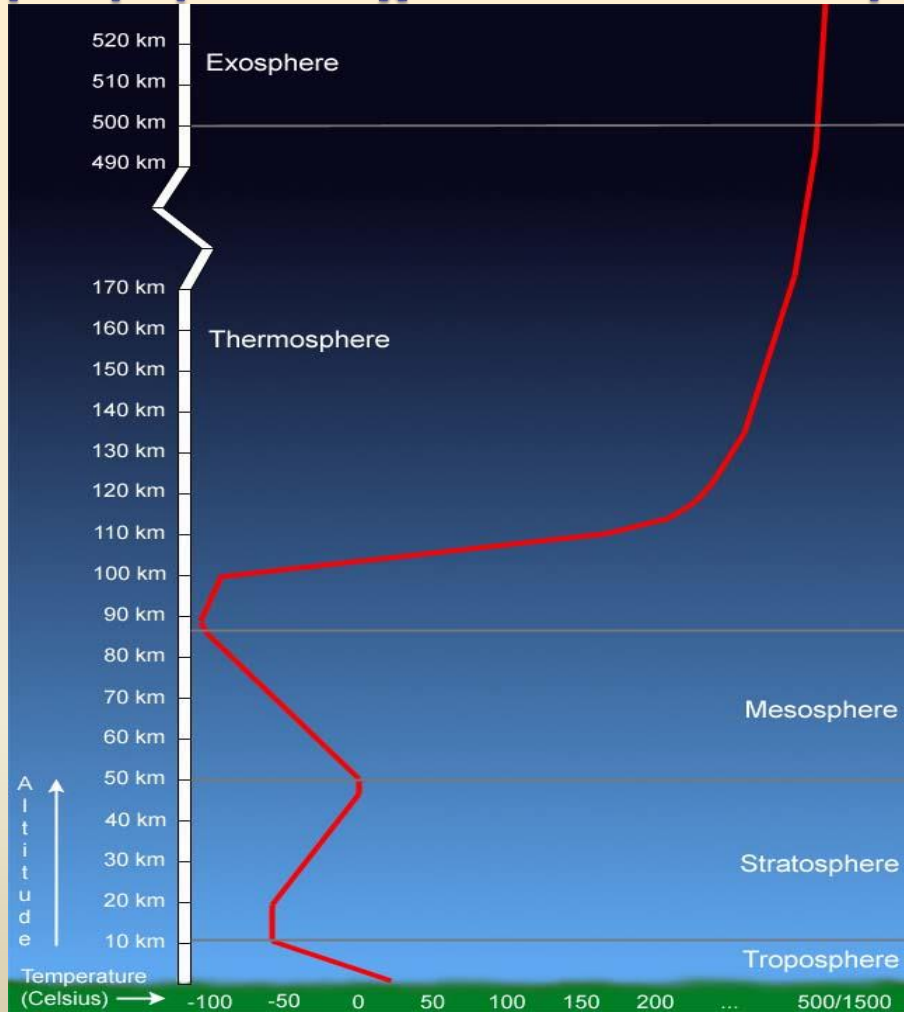
Πλεονεκτήματα χρήσης της αιολικής ενέργειας

- Η αιολική ενέργεια σαν Α.Π.Ε. δεν εξαντλείται ποτέ, ενώ αντίθετα οι συμβατικές μορφές ενέργειας έχουν πεπερασμένο χρόνο ζωής.
- Είναι φιλική με το περιβάλλον μια και έχει μηδενική εκπομπή επιβλαβών ρύπων.
- Η χώρα μας και ειδικότερα οι ανατολικές της περιοχές διαθέτει από τους υψηλότερους δείκτες αιολικού δυναμικού, σε παγκόσμια κλίμακα.
- Με την ευρύτερη εφαρμογή αιολικών εγκαταστάσεων σε όλη σχεδόν την επικράτεια θα καταφέρουμε σε αρκετά μεγάλο ποσοστό να αποκτήσουμε ενεργειακή αυτονομία η οποία συνεπάγεται άμεση οικονομική ανάπτυξη.
- Ειδικότερα στη νησιωτική Ελλάδα με την πολλαπλή εγκατάσταση Α/Κ θα μειωθεί αισθητά το κόστος της παραγόμενης kWh η οποία σήμερα είναι κατά πολύ ακριβότερη από εκείνη της ηπειρωτικής Ελλάδας, λόγω του αυξημένου κόστους μεταφοράς των συμβατικών καυσίμων στους τοπικούς και ανεξάρτητους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.
- Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί το αξιόλογο επιστημονικό και ερευνητικό προσωπικό που διαθέτει η χώρα μας, το οποίο μπορεί να απασχοληθεί στον τομέα της αιολικής ενέργειας με σκοπό την πλήρη εγκαθίδρυση κατασκευαστικής δραστηριότητας και παραγωγής διαφόρων τύπων και μεγεθών Α/Κ. Παράλληλα, με αυτή την δραστηριότητα θα ενισχυθεί σημαντικά και η εθνική οικονομία αλλά και θα μειωθεί καταλυτικά η ανεργία.
- Με την ενεργή δραστηριοποίηση στο τομέα των αιολικών εγκαταστάσεων, σε ολόκληρη τη χώρα, θα δοθεί παράλληλα η δυνατότητα αποκεντρωμένης ανάπτυξης και οικονομικής ενίσχυσης των περιφερειακών-τοπικών κοινωνιών.

Μειονεκτήματα χρήσης της αιολικής ενέργειας

- Η αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ενέργειας χαμηλής πυκνότητας (αραιή μορφή ενέργειας). Από αυτό συνεπάγεται ότι μόνο ένα χαμηλό ποσοστό της κινητικής ενέργειας του ανέμου είναι αξιοποιήσιμο. Έτσι για να λάβουμε τα επιθυμητά ποσά ηλεκτρικής ισχύος, είναι αναγκαία είτε η ταυτόχρονη χρήση πολλών μικρών Α/Κ ή η κατασκευή μεγάλης ισχύος Α/Κ.
 - Η αιολική ενέργεια δεν είναι ακριβώς προβλέψιμη, όπως είναι οι συμβατικές μορφές παραγωγής ενέργειας. Η παντελής ανικανότητα ακριβούς πρόβλεψης της ταχύτητας αλλά και της διεύθυνσης των ανέμων αποτελούν ίσως τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της αιολικής ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι αυτό μας αποτρέπει από το να δεχτούμε τους Α/Κ ως βασική πηγή ενέργειας, αλλά ως εφεδρική σε κάποιο υβριδικό σταθμό παραγωγής ενέργειας.
 - Στην περίπτωση διασύνδεσης των Α/Κ με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής, τίθεται σίγουρα θέμα συμβατότητας των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με το υπόλοιπο ηλεκτρικό δίκτυο, πρόβλημα το οποίο σίγουρα ξεπερνιέται με χρήση κατάλληλων αυτοματισμών, τους οποίους σε τελική ανάλυση θα επιβαρυνθεί ο καταναλωτής της παραγόμενης ενέργειας.
 - Όμως σε περίπτωση αυτόνομων μονάδων αιολικής εγκατάστασης, όπως στην περίπτωση εξοχικών κατοικιών και αγροκτημάτων, είναι αναγκαία η εγκατάσταση συστημάτων αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας με στόχο την συνεχή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη οποιωνδήποτε αναγκών. Αυτό το επιπλέον κόστος επιβαρύνει οικονομικά τον ιδιοκτήτη της αιολικής εγκατάστασης.
 - Δεν πρέπει επίσης να ξεχνάμε ότι μια αιολική εγκατάσταση δεν είναι τίποτε άλλο παρά μια ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή, και σαν μια τέτοια εγκατάσταση δεν θα πρέπει να αμελούμε από τους υπολογισμούς μας το μέγεθος των αεροδυναμικών, μηχανικών και ηλεκτρικών απωλειών και περιορισμών.
 - Οι εμπορικοί Α/Κ με υψηλούς αριθμούς ταχυστροφίας έχουν το μειονέκτημα των υψηλών εκπομπών θορύβου από το δρομέα. Σε γενικές γραμμές, το επίπεδο έντασης θορύβου του δρομέα αυξάνεται με την έκτη δύναμη της ταχύτητας του ακροπτερυγίου, και αυτός είναι από τους βασικότερους λόγους για τον οποίο οι σχεδιαστές εμπορικών Α/Κ δεν υπερβαίνουν τα 70 m/s ως μέγιστη ταχύτητα περιστροφής του ακροπτερυγίου.
- Τελικά, αξίζει να σημειωθεί το υψηλό κόστος της αρχικής εγκατάστασης ενός Α/Κ μια και αποτελεί διάταξη υψηλής τεχνολογίας.

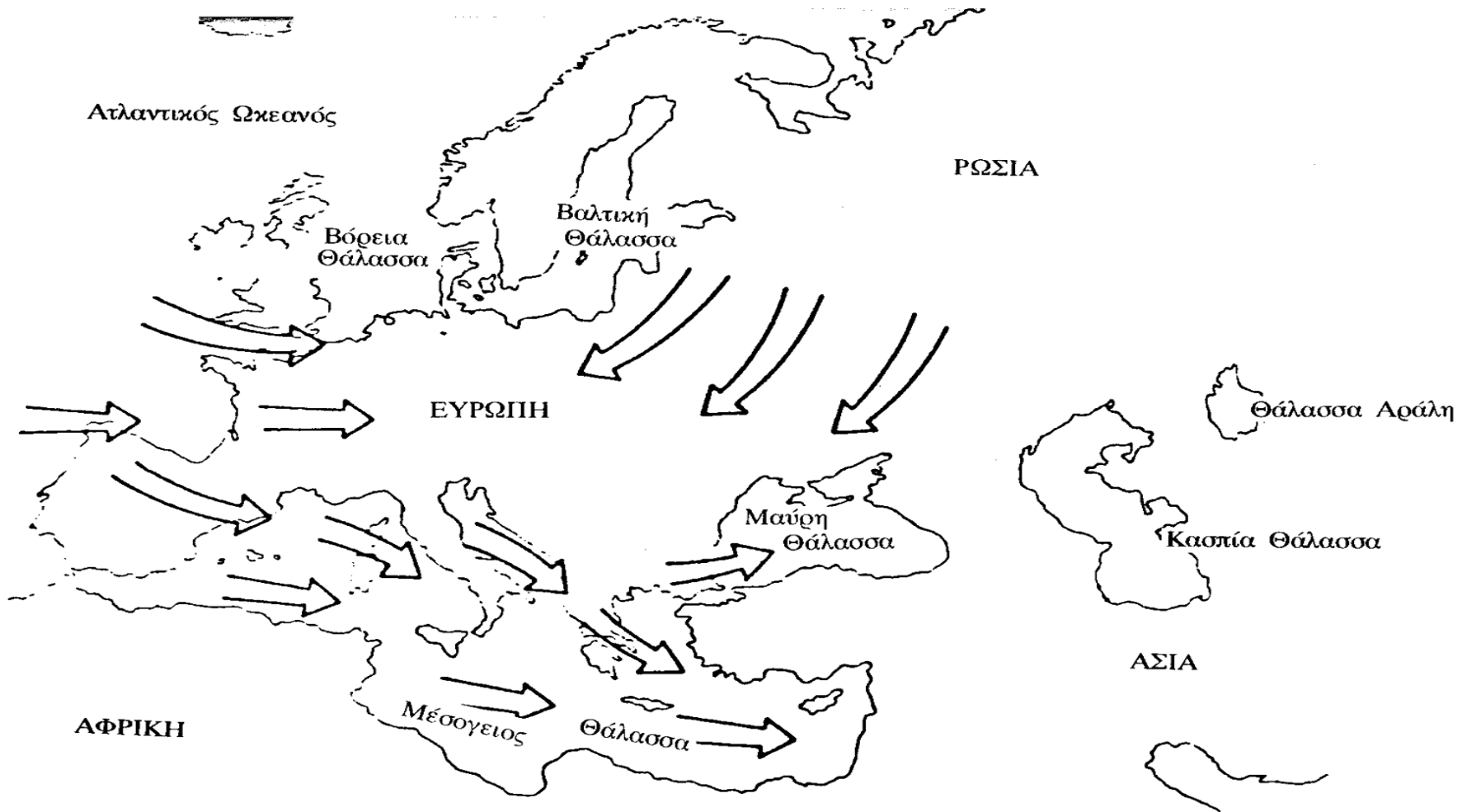
Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



Κατανομή θερμοκρασίας- ύψους στην ατμόσφαιρα

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

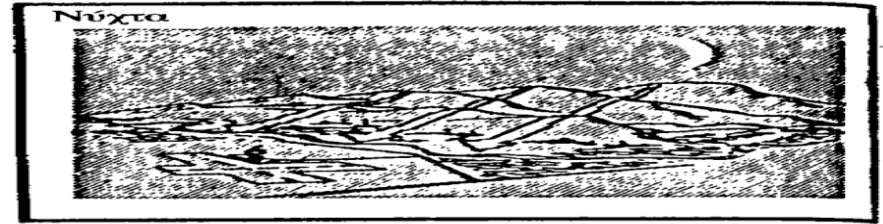
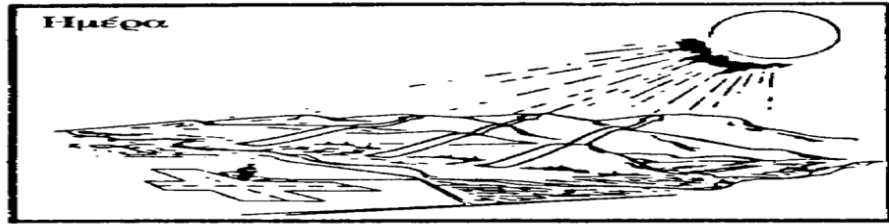
Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



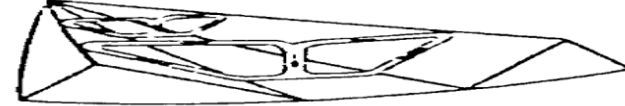
Συνοπτικός χάρτης των ανέμων που κατά κύριο λόγο πνέουν στην Ευρώπη

ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



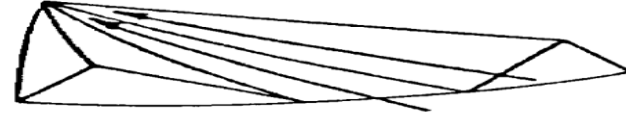
Πρωί



Πριν το μεσημέρι



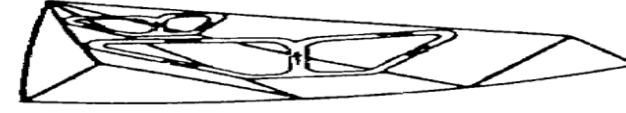
Μεσημέρι και νωρίς το απόγευμα



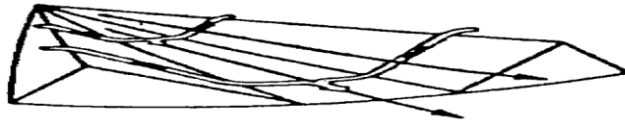
Λογά το απόγευμα



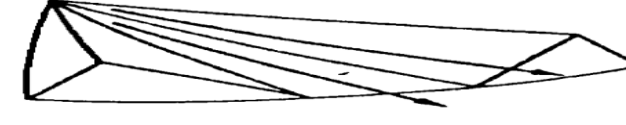
Βράδυ



Νωρίς τη νύχτα



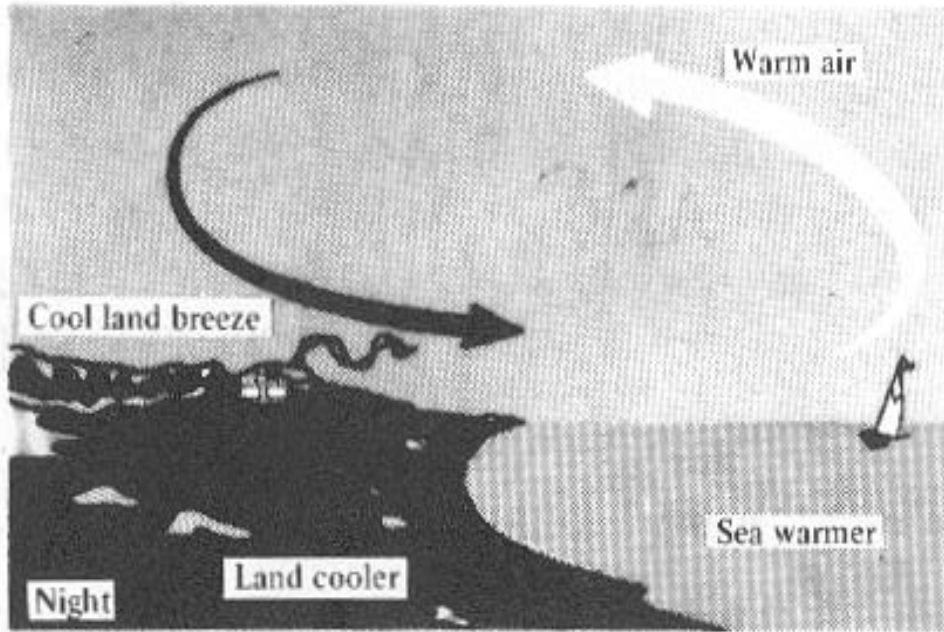
Μεσάνυχτα



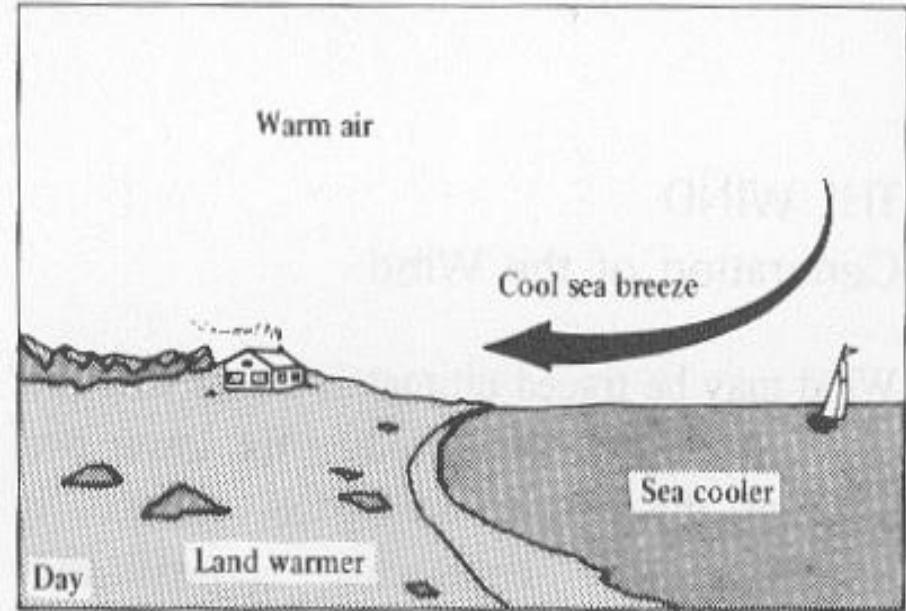
Πριν το πρωί

Γραφική αναπαράσταση ημερήσιας μεταβολής ανέμων βουνών και κοιλάδων

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



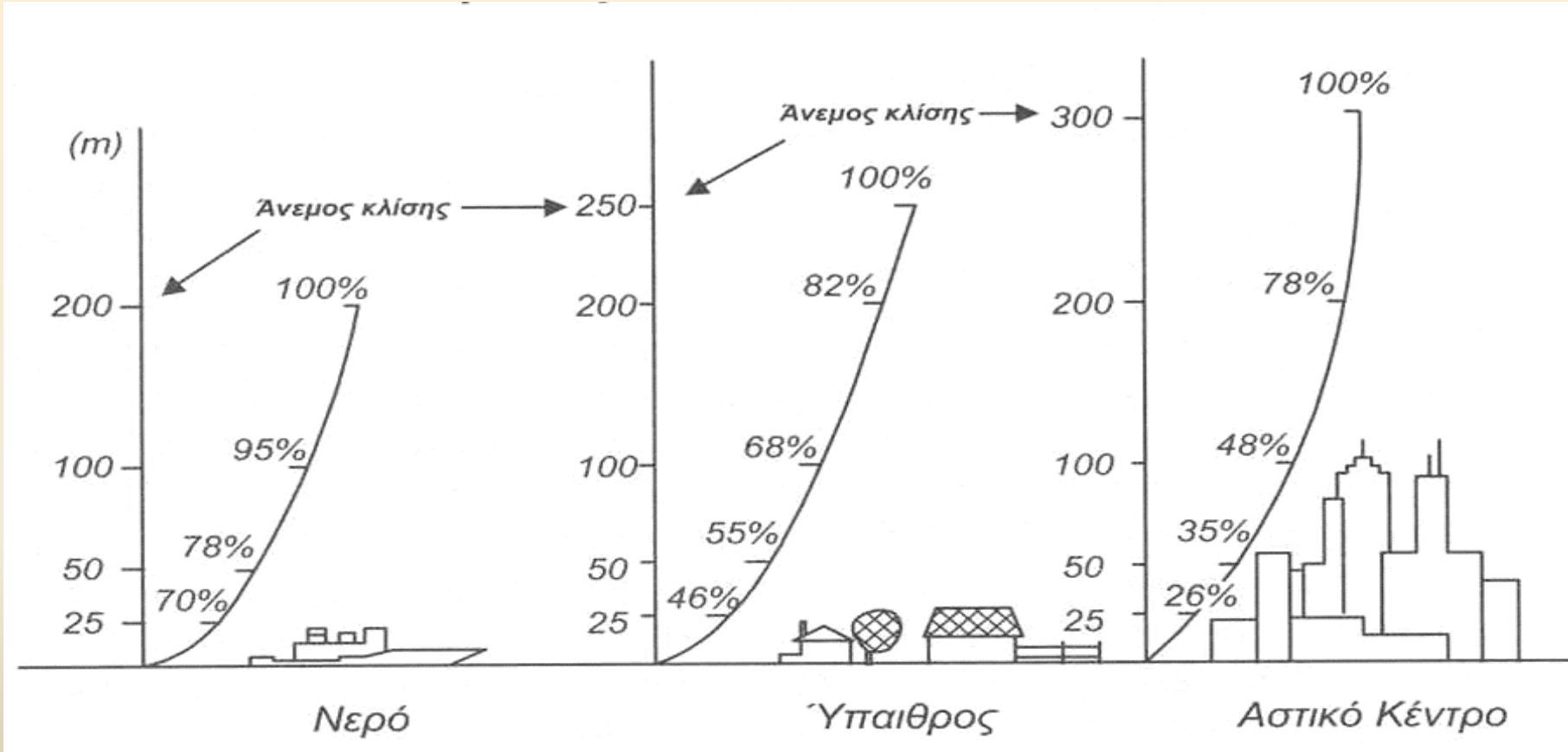
α. Ροή αύρας στεριάς (νύχτα)



β. Ροή θαλάσσιας αύρας (ημέρα)

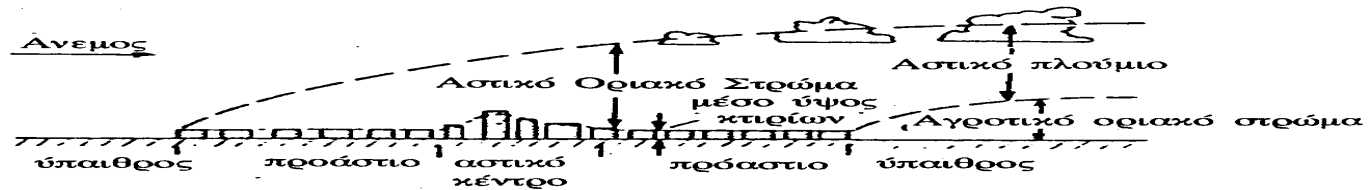
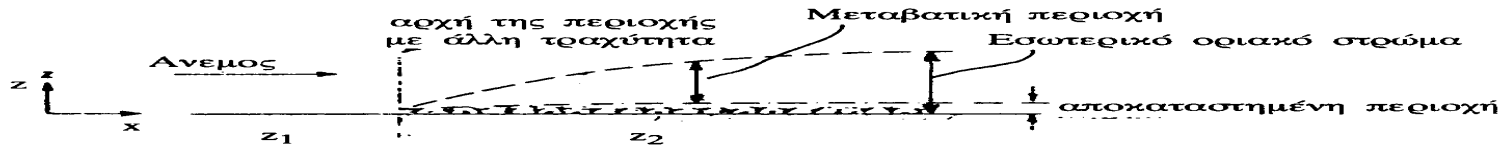
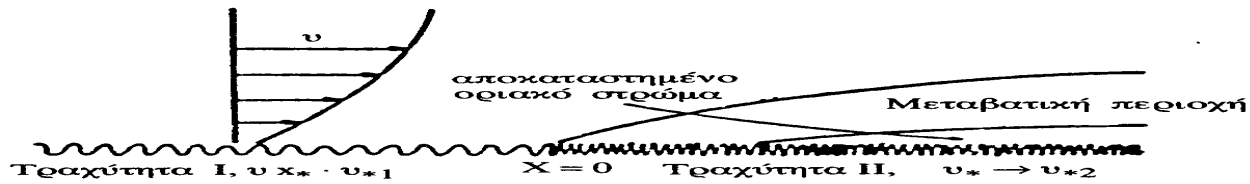
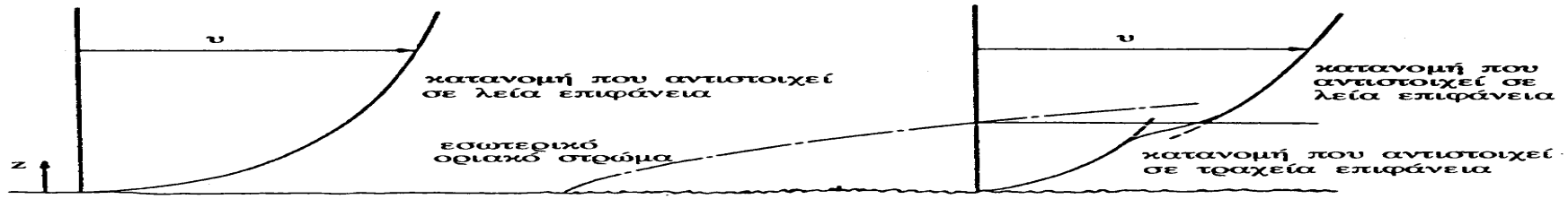
Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα



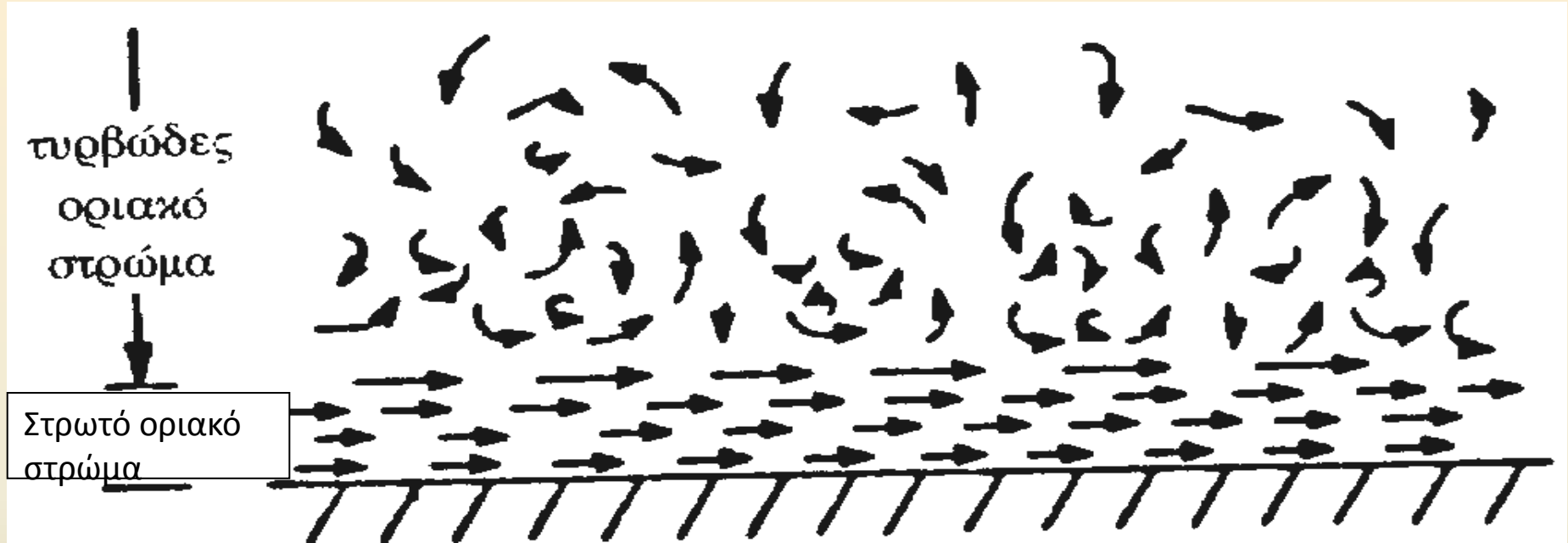
Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στο ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



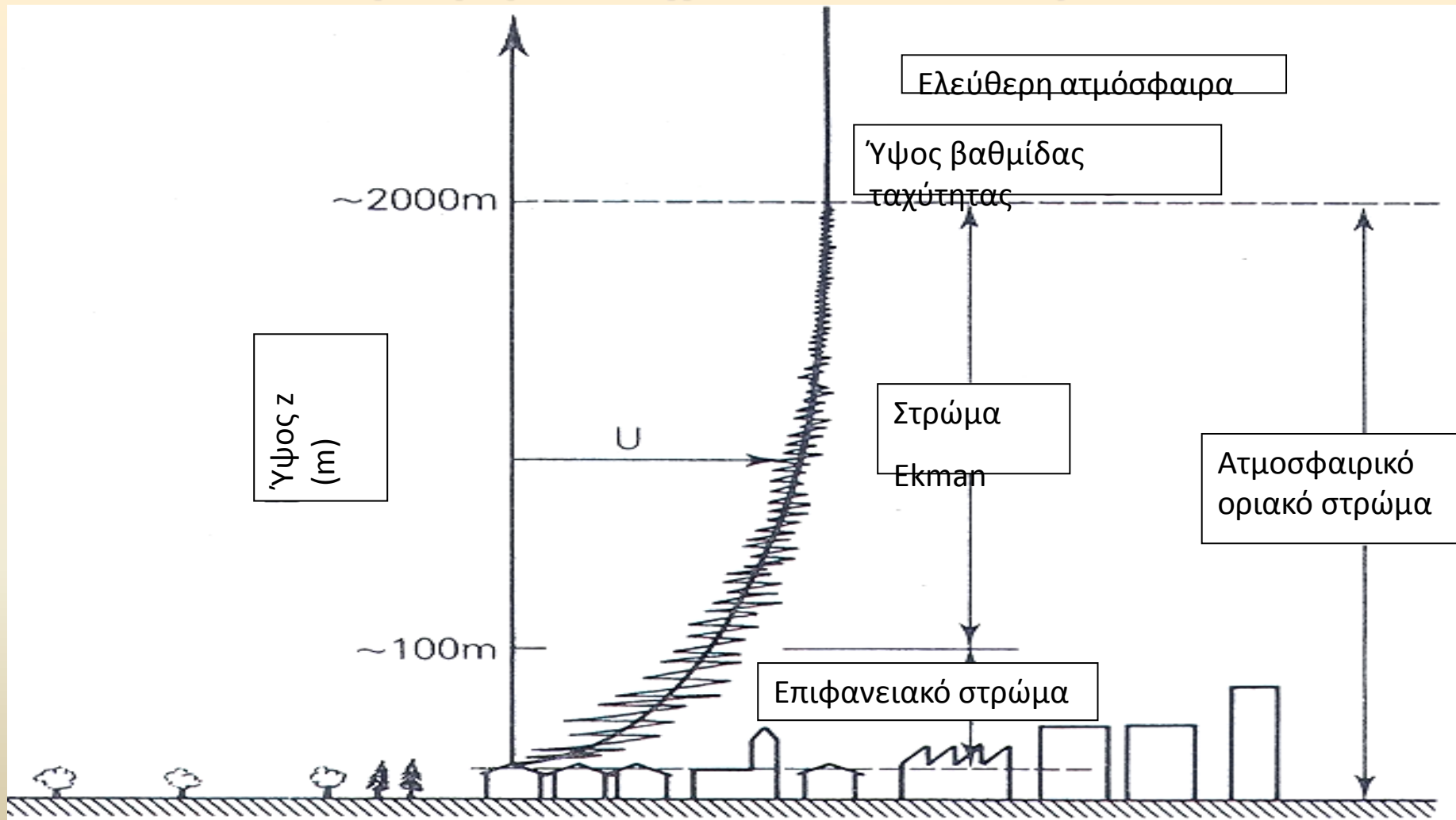
Ανάπτυξη και διαταραχές ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και ανάπτυξη εσωτερικού οριακού στρώματος λόγω μεταβολών τραχύτητας του στερεού ορίου

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



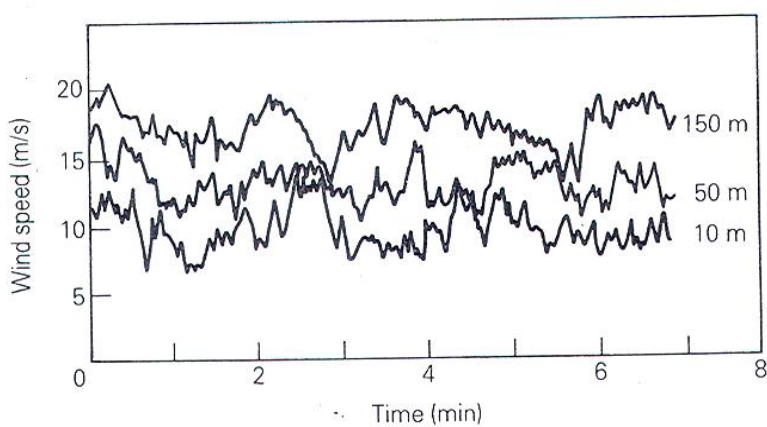
Στρωτή και τυρβώδης κίνηση του αέρα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



Διάκριση των στρωμάτων του ατμοσφαιρικού αέρα κοντά στο έδαφος

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό



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

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) dt$$

Κατά την ανάλυση του ροϊκού πεδίου μιας περιοχής, είναι σημαντικό να καταγραφούν και οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας του ανέμου, διότι αυτές επηρεάζουν σημαντικά την κατασκευαστική αντοχή του πύργου στήριξης του ανεμοκινητήρα καθώς και τη μέγιστη φόρτιση των πτερυγίων της μηχανής. Όπως είναι λογικό οι μέγιστες ταχύτητες του ανέμου εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση της περιοχής καθώς και από το τοπογραφικό της ανάγλυφο. Στην ομαλή λειτουργία μιας αιολικής εγκατάστασης δημιουργούνται επιπλέον προβλήματα και από ξαφνικούς ανέμους ιδιαίτερα μεγάλης έντασης και μικρής διάρκειας, οι οποίοι καλούνται *ριπές ανέμου*. Συγκεκριμένα *ριπή ανέμου* ορίζεται μια ξαφνική μικρής διάρκειας (≤ 20 s) αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ($\geq 9,3$ m/s), η οποία διαφέρει από τη μέση τιμή της ταχύτητας στο διάστημα που προηγήθηκε και ακολουθεί κατά τουλάχιστον **4,6 m/s**, ενώ η ταχύτητα του ανέμου επανέρχεται στη συνέχεια στα προηγούμενα επίπεδα τιμών. Είναι σημαντικό να τονιστεί το γεγονός ότι στην περίπτωση που παρουσιαστούν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες ανέμου με διάρκεια μεγαλύτερη των **30s**, οι ανεμοκινητήρες τίθενται συχνά (για λόγους αυτοπροστασίας) εκτός λειτουργίας. Ο άνεμος παρουσιάζει λιγότερες ριπές πάνω από εκτεταμένες υδάτινες επιφάνειες και περισσότερες ριπές πάνω από επιφάνειες με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο ή με υψηλά εμπόδια (π.χ. υψηλά κτίρια).

μέση μέγιστη ριπή του ανέμου

\bar{u}_{\max} σε ύψος z από το έδαφος σαν συνάρτηση της μέσης ωριαίας τιμής της ταχύτητας στο ίδιο ύψος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\bar{u}_{\max}(z) = \bar{u}(z) \left[1 + k(t) I_t(z) \right]$$

όπου $k(t)$ ο συντελεστής ριπής και I_t η αδιάστατη τιμή της τύρβης κατά τη διεύθυνση ανέμου. Ο συντελεστής ριπής δίνεται από τη σχέση:

$$k(t) = 0,42 \ln \left(\frac{3600}{t} \right)$$

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Η ριπή ανέμου $u_t(z)$ χρονικής διάρκειας t δευτερολέπτων συναρτήσει της μέσης ωριαίας ταχύτητας στο ύψος μελέτης z , του συντελεστή τραχύτητας z_o της περιοχής και ενός χρονικού συντελεστή $C(t)$, μπορεί να υπολογιστεί, με παρόμοια αποτελέσματα, και από τη σχέση:

$$u_t(z) = \bar{u}(z) \left(1 + 0,98 \frac{C(t)}{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)} \right)$$

t (s)	C(t)	t (s)	C(t)
1	3,00	100	1,02
3	2,66	200	0,70
10	2,32	300	0,54
20	2,00	600	0,36
30	1,75	1000	0,16
50	1,35		

για διευκόλυνση εφαρμογής δίνονται οι εξής τιμές του συντελεστή τραχύτητας z_o :

$z_o = 0,0005\text{m}$ για θάλασσες και λίμνες

$z_o = 0,001\text{m}$ για επίπεδες επιφάνειες

$z_o = 0,5\text{m}$ για πυκνόφυτες περιοχές και προάστια πόλεων.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

μέση ταχύτητα: $\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$

τύρβη: $u'(t) = u(t) - \bar{u}$

ένταση τύρβης: $\overline{u'^2}$ Μέτρο της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου αποτελεί η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου σ_u^2 , η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$\sigma_u^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (u'(t) - \bar{u})^2 dt$$

αδιάστατη τιμή τύρβης ή ένταση της διαταραχής I_t ως το λόγο της διασποράς προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου.

$$I_t = \sigma_u / \bar{u}$$

με τυπική χρονική περίοδο μέτρησης $T = 10\text{min}$.

$$I_t = 1 / \ln(z / z_0)$$

για $(z \leq 0,20\text{m})$

$$I_t = (0,78 - 0,14 \ln z_0) / \ln(z / z_0)$$

για $(z > 0,20\text{m})$

Η ένταση της διαταραχής δεν είναι σταθερό μέγεθος αλλά εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του εδάφους της υπό μελέτη περιοχής (ανάγλυφο της περιοχής) καθώς και από το γενικό επίπεδο τύρβης της ατμόσφαιρας και επηρεάζει σημαντικά τόσο την αεροδυναμική συμπεριφορά ενός ανεμοκινητήρα όσο και τα χαρακτηριστικά ολόκληρης της εγκατάστασης.

Εν γένει η ένταση της διαταραχής είναι ανάλογη της τραχύτητας του εδάφους και αντιστρόφως ανάλογη του ύψους μελέτης από το έδαφος. Εάν χρησιμοποιήσουμε το αντιπροσωπευτικό μήκος z_0 της μέσης τοπικής τραχύτητας, η ένταση της διαταραχής προσεγγίζεται ικανοποιητικά από τις εξισώσεις:

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

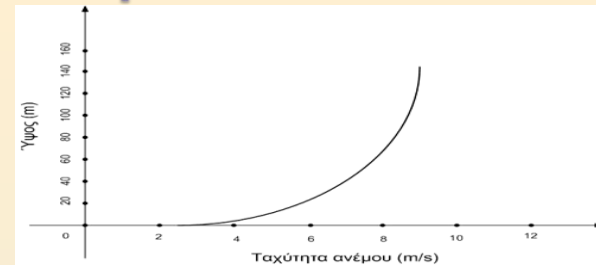
Για την περιγραφή της κατακόρυφης κατανομής της ταχύτητας του ανέμου έχουν προταθεί διάφορες αναλυτικές σχέσεις, οι οποίες στηρίζονται στη θεωρία των οριακών στρωμάτων. Σαν γενική παρατήρηση πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει σημαντικά με το ύψος από το έδαφος στο οποίο αναφέρονται οι μετρήσεις. Συνήθως η μεταβολή αυτή είναι αξιοσημείωτη μέχρι τα πρώτα 100m από το έδαφος, δηλαδή μέχρι το συνηθισμένο πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος.

Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιβλιογραφία για κατανομή της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα είναι οι ακόλουθες:

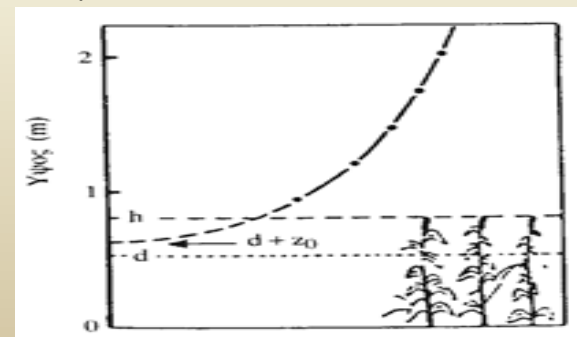
$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^{1/a} \dots\dots\dots (\text{Εκθετικός νόμος})$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \dots\dots\dots (\text{Λογαριθμικός νόμος})$$

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$$



όπου u , u_1 και u_2 η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας στα ύψη z , z_1 και z_2 αντίστοιχα, u_* η ταχύτητα τριβής, $1/a$ ο εκθέτης του εκθετικού νόμου, k η σταθερά von Karman ($=0,35$), z_0 η παράμετρος τραχύτητας ή μήκος τραχύτητας και d η μετατόπιση μηδενικού επιπέδου.



Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Συνήθως στα μετεωρολογικά προβλήματα χρησιμοποιείται ο εκθετικός νόμος λόγω του πιο εύκολου μαθηματικού χειρισμού του. Η τιμή του εκθέτη $1/a$ αποτελεί μια ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους, αφού η τιμή αυτή είναι συνάρτηση μόνο της τραχύτητας ή του μήκους της τραχύτητας που συνήθως χρησιμοποιείται.

Η εμπειρική σχέση μεταξύ ύψους τραχύτητας z_0 και του εκθέτη a για την κατανομή ταχύτητας μεταξύ 10 έως 30 m είναι:

$$z_0 = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{1/a}\right)$$

και δίνει με ικανοποιητική ακρίβεια τη συσχέτιση (z_0, a) για ύψη τραχύτητας μεταξύ 10^{-4} μέχρι 1 m. Προτείνεται επίσης στη βιβλιογραφία και ο λογαριθμικός νόμος για ύψη μέχρι τα 200 m που είναι:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 5,75 \frac{z}{h} \right]$$

όπου $h = u_* / 6f$, f η παράμετρος Coriolis = $2\Omega \sin\varphi = 10^{-4} \text{ S}^{-1}$, Ω η γωνιακή περιστροφή της γης και φ το γεωγραφικό πλάτος.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Η **εκθετική** κατανομή (power law) η οποία εκφράζεται σαν:

$$\frac{u(z)}{u(z_1)} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^a$$

και δίνει την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z από το έδαφος συναρτήσει της παραμέτρου a , της οποίας η ακριβής τιμή εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους αλλά και τη διεύθυνση του ανέμου. Οι τιμές της παραμέτρου a κυμαίνονται μεταξύ του 0,08 για παγωμένες επιφάνειες και του 0,45 για αστικές περιοχές. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες εκτιμήσεις για την τιμή της παραμέτρου a , όπως η αναλυτική σχέση που προτάθηκε από τους Justus και Mikhail (1976), η οποία δίνει:

$$a = \frac{0,37 - 0,088 \ln[u_{z=z_1}]}{1 - 0,088 \ln(z_1 / 10)}$$

Οι ίδιοι ερευνητές προτείνουν για γρήγορους υπολογισμούς μια μέση τιμή ίση με $a = 0,23 \pm 0,03$, ενώ ο Vadot προτείνει μια μέση τιμή ίση με $a = 0,20$. Τέλος άλλοι συγγραφείς προτείνουν για τον εκθέτη της σχ.(2.6.16) τις εξής τιμές:

$a = 1/7$ για εκτεταμένη επίπεδη πεδιάδα χωρίς δένδρα ή θάλασσα

$a = 1/5$ για πεδινή περιοχή με δένδρα ή και χαμηλά σπίτια

$a = 1/4$ για πυκνοκατοικημένες πόλεις με μεγάλα κτίσματα.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Όμοια όπως ανωτέρω ισχύει για τη συσχέτιση μεταξύ του ύψους τραχύτητας z_o και του εκθέτη a η σχέση:

$$z_o = 15,25 \exp\left(-\frac{1}{a}\right)$$

Όλες οι ανωτέρω εξισώσεις ισχύουν για επίπεδη επιφάνεια, η οποία ορίζεται βάσει των κάτωθι περιορισμών, δεχόμενοι πάντοτε ότι η θέση που γίνονται οι ανεμολογικές μετρήσεις συμπίπτει με τη θέση πιθανής εγκατάστασης ενός ανεμοκινητήρα:

- Η διαφορά ύψους μεταξύ της θέσεως του ανεμοκινητήρα και του περιβάλλοντος χώρου σε ακτίνα 12 km να μην είναι μεγαλύτερη των 60 m.
- Όλοι οι λόφοι με λόγο ύψους προς το πλάτος μικρότερο από 0,016 σε ακτίνα 4 km πρέπει να έχουν διαφορά ύψους μεταξύ του υψηλότερου και χαμηλότερου σημείου το πολύ το 1/3 της διαφοράς ύψους μεταξύ του κάτω μέρους του στροφείου του ανεμοκινητήρα και του χαμηλότερου σημείου του εδάφους.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου παρουσιάζονται συνήθως ανηγμένες σε ύψος 10 μέτρων, είναι σχεδόν πάντοτε απαραίτητη η αναγωγή των μετρήσεων των χαρακτηριστικών του ανέμου στο υπό μελέτη ύψος λειτουργίας του ανεμοκινητήρα. Όμως πρέπει να τονισθεί ότι η εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, δεδομένης της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται στην εκτίμηση των παραμέτρων z_o και a . Επιπλέον, για τη χρησιμοποίηση των παραπάνω ημιεμπειρικών κατανομών ταχύτητας για αποστάσεις μεγαλύτερες των 50 m από το έδαφος είναι σκόπιμο να συμπεριληφθούν και διορθώσεις λόγω περιστροφής της γης.

για τον περιορισμό του σφάλματος κατά τη μέτρηση της καμπύλης ισχύος των ανεμοκινητήρων, οι κανονισμοί IEA (International Energy Association) συνιστούν την τοποθέτηση των ανεμόμετρων στο ύψος της πλήμνης της μηχανής και όχι τη χρήση των παραπάνω εμπειρικών αναγωγικών σχέσεων.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

<i>ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ</i>	<i>Περιγραφή</i>	z₀ (m)
Πάγος, Βούρκος	Λεία επιφάνεια	$\approx 10^{-5}$
Ήρεμη θάλασσα, Χιονισμένη περιοχή	Επίπεδη ή Λοφώδης περιοχή	$\approx 10^{-4}$
Άμμος, Έρημος, Υπήνεμη παραλία	Εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων και την παρουσία αμμόλοφων ή κυματώσεων	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Χιονισμένη αγροτική περιοχή	Ομαλή επιφάνεια	$\approx 10^{-3}$
Γυμνό έδαφος	Μεγαλύτερες τιμές για οργωμένο	$10^{-3} \div 10^{-2}$
Γρασίδι – Χόρτα	Ύψος από 0,02 ÷ 0,1m Ύψος από 0,25 ÷ 1,0m	0,003 ÷ 0,01 0,04 ÷ 0,1
Αεροδρόμια – Διάδρομος	Περιοχή διαδρόμου	$\approx 0,02$
Αγροτικές καλλιέργειες	Εξαρτάται και από την ένταση του ανέμου	0,04 ÷ 0,20
Τυπικές αγροτικές περιοχές	Χωράφια με μεμονωμένα δένδρα και κτίρια	0,01 ÷ 0,1
Περιβόλι οπωροφόρων	Εξαρτάται από τις εποχές	0,5 ÷ 1,0
Πολλά δένδρα, Δενδρόφυτοι Φράκτες, Λίγα κτίσματα	Εξαρτάται από το είδος των δένδρων	0,01 ÷ 0,03
Δάση	–	1,0 ÷ 6,0
Μικρές πόλεις ή Προάστια	Χαμηλά σπίτια, δένδρα κ.λπ. (Ανομοιόμορφη έκταση)	0,1 ÷ 2,0
Κέντρα πόλεων ή πολύ ανάγλυφο ορεινής περιοχής	Κτίρια ύψους 10 ÷ 50m Ιδιαίτερα ανομοιόμορφη έκταση	1,0 ÷ 10,0

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Εφαρμογή

- 1) Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί δίνονται πειραματικές μετρήσεις, ανά 15 s, της έντασης του ανέμου σε κάποια τοποθεσία. Να υπολογιστεί και αποδοθεί γραφικά η μέση τιμή και η διακύμανση της έντασης του ανέμου, για χρονική περίοδο 10 min.
- 2) Να εξεταστεί αν στην εν λόγω χρονική περίοδο υπάρχουν ριπές ανέμου.
- 3) Να υπολογιστεί η αδιάστατη ένταση της τύρβης.
- 4) Με δεδομένο ότι οι μετρήσεις έχουν παρθεί σε ύψος $z=10$ m, να εκτιμηθεί η ακρίβεια των θεωρητικών σχέσεων που προσδιορίζουν την ένταση της τύρβης, όταν η τραχύτητα της περιοχής είναι: I) $z_0=0,15$ (δένδρα, φράκτες, αγροτικές καλλιέργειες), II) $z_0=0,60$ (δασικές εκτάσεις).

Πίνακας 1

Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s
0	3,4	165	3,9	330	4,5	495	3,8
15	4,5	180	4,7	345	4,6	510	4,3
30	3,8	195	4,2	360	5,1	525	4,9
45	5,1	210	4,6	375	3,6	540	2,7
60	4,3	225	5,1	390	3,5	555	1,9
75	4,2	240	2,8	405	3,8	570	1,6
90	4,1	255	9,9	420	3,9	585	3,7
105	4	270	3,8	435	4,9	600	4,8
120	3,8	285	3,9	450	6,1	615	3,4
135	3,6	300	4,2	465	6,9	630	4,1
150	2,1	315	3,6	480	2,9	645	4

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Υπολογισμός μέσης ταχύτητας : $\bar{v} = \int_0^T v(t)dt$ με $T=10 \text{ min (600 s)}$. Λόγω διακριτών τιμών $\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v(i)$, οπότε

$$\bar{v} \approx 4,17 \text{ m/s}$$

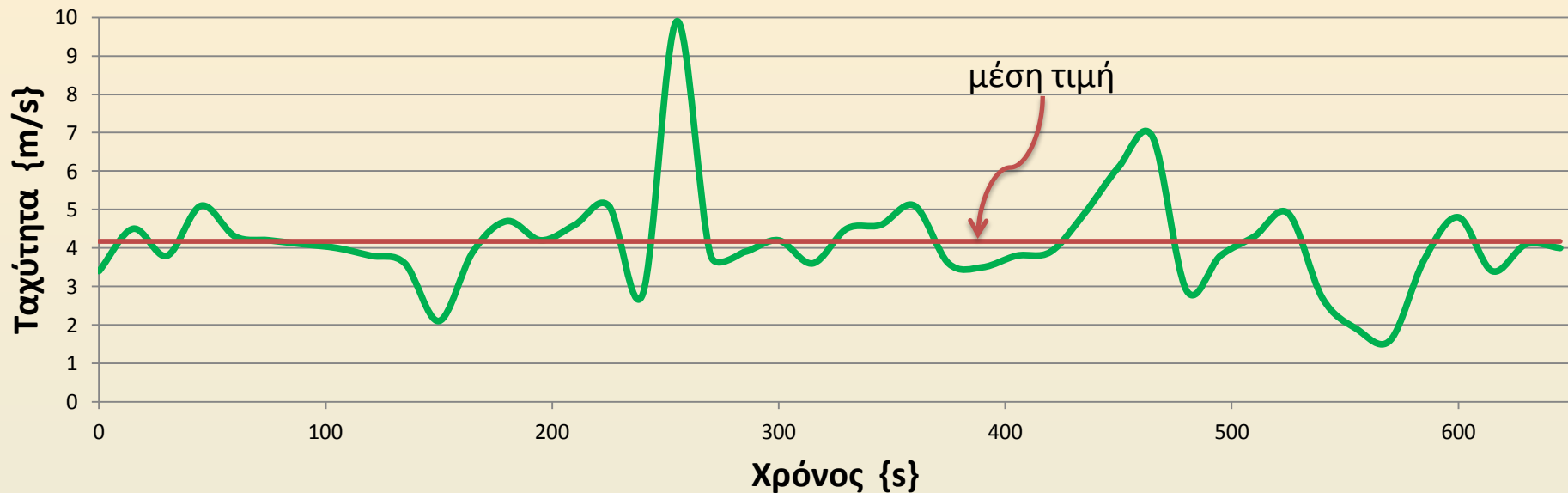
Υπολογισμός διακύμανσης $v'(t)$ της έντασης του ανέμου : $v'(t) = v(t) - \bar{v}$ οπότε προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 2.

Πίνακας 2

Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s	Χρόνος s	Ταχ. m/s
0	-0,7732	165	-0,2732	330	0,32683	495	-0,3732
15	0,32683	180	0,52683	345	0,42683	510	0,12683
30	-0,3732	195	0,02683	360	0,92683	525	0,72683
45	0,92683	210	0,42683	375	-0,5732	540	-1,4732
60	0,12683	225	0,92683	390	-0,6732	555	-2,2732
75	0,02683	240	-1,3732	405	-0,3732	570	-2,5732
90	-0,0732	255	5,72683	420	-0,2732	585	-0,4732
105	-0,1732	270	-0,3732	435	0,72683	600	0,62683
120	-0,3732	285	-0,2732	450	1,92683		
135	-0,5732	300	0,02683	465	2,72683		
150	-2,0732	315	-0,5732	480	-1,2732		

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Από τις τιμές του Πίνακα 1 προκύπτει η παρακάτω γραφική παράσταση της ταχύτητας του ανέμου, όπου απεικονίζεται και η μέση τιμή της.



Από τα δεδομένα του Πίνακα 1, αλλά κι από τη γραφική παράσταση της ταχύτητας του ανέμου, προκύπτει ότι εμφανίζεται ριπή ανέμου τη χρονική στιγμή $t=255$ s, δεδομένου ότι η τιμή της ταχύτητας του ανέμου για χρονικό διάστημα μικρότερο των 20 s (οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά 15 s) υπερβαίνει την τιμή 9,3 m/s και διαφέρει κατά τουλάχιστον 4,6 m/s από τη μέση τιμή της ταχύτητας στο προηγούμενο (2,8 m/s) και επόμενο (3,8 m/s) διάστημα.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Υπολογισμός αδιάστατης έντασης της τύρβης : $I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$ με $\bar{v} \approx 4,17$ m/s.

$$\overline{v^2} = \sigma_v^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) - \bar{v})^2 dt$$

και λόγω διακριτών τιμών

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} (v(t) - \bar{v})^2$$

$$\sigma_v^2 = 1,90958 \longrightarrow \sigma_v = 1,3819 \longrightarrow \boxed{I = \frac{\sigma_v}{\bar{v}} = \frac{1,3819}{4,17} = 0,3314}$$

Συσχέτιση τύρβης και τραχύτητας. Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\alpha v \quad z_0 \leq 0,2 m \longrightarrow I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{διαφορετικά} \quad I = \frac{(0,78 - 0,14 \ln(z_0))}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

$$\text{Για } z_0 = 0,15 \text{ m} < 0,2 \text{ m} \quad I = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{10}{0,15}\right)} = 0,238112$$

$$\boxed{\text{Για } z_0 = 0,915 \rightarrow I = 0,331366968}$$

$$\text{Για } z_0 = 0,60 \text{ m} > 0,2 \text{ m} \quad I = \frac{(0,78 - 0,14 \ln(z_0))}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{(0,78 - 0,14 \ln(0,6))}{\ln\left(\frac{10}{0,6}\right)} = 0,302663$$

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Επεξεργασία των ανεμολογικών μετρήσεων και δεδομένων

Μονάδες	kn	m/s	mile/h	km/h	ft/s
kn	1	0,515	1,152	1,853	1,689
m/s	1,943	1	2,237	3,600	3,281
mile/h	0,868	0,447	1	1,609	1,467
km/h	0,540	0,278	0,621	1	0,911
ft/s	0,592	0,305	0,682	1,097	1

Από την επεξεργασία των καταγραφών της ταχύτητας του ανέμου προσδιορίζεται η ένταση του ανέμου. Εάν οι καταγραφές αυτές είναι στιγμιαίες, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε τόσο τις διακυμάνσεις όσο και τις τυχόν ριπές του ανέμου. Εάν ο ανεμογράφος είναι αθροιστικός τότε δεν καταγράφονται οι διακυμάνσεις της ταχύτητας αλλά προσδιορίζεται αθροιστικά η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας προκαθορισμένης χρονικής περιόδου (π.χ. μιας ώρας)

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Ετήσια καμπύλη διάρκειας ανέμου

Η δημιουργία της ετήσιας καμπύλης διάρκειας του ανέμου, η οποία μας δείχνει τον αριθμό των περιόδων του χρόνου, που ο άνεμος έχει ένταση μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή, είναι δυνατή από την καταγραφή των μέσων ταχυτήτων του ανέμου ανά ορισμένη χρονική περίοδο (π.χ. μέσες ημερήσιες, μέσες ωριαίες) σε μια συγκεκριμένη θέση και σε ένα συγκεκριμένο ύψος στη διάρκεια ενός έτους.

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %
0-1	9,5%	8-9	6,5%	16-17	3,3%
1-2	1,7%	9-10	7,4%	17-18	1,7%
2-3	3,1%	10-11	5,7%	18-19	2,0%
3-4	4,8%	11-12	7,7%	19-20	1,1%
4-5	6,0%	12-13	7,0%	20-21	0,4%
5-6	3,7%	13-14	7,2%	21-22	0,4%
6-7	6,0%	14-15	6,4%	22-23	0,2%
7-8	4,7%	15-16	4,2%	>23	0,3%

Βάσει των στοιχείων αυτού του Πίνακα κατασκευάζεται ο παρακάτω Πίνακας, που αναφέρεται σε πειραματικά στοιχεία *αθροιστικής πιθανότητας έντασης του ανέμου* $F(u \leq u_0)$, δηλαδή τη συνολική πιθανότητα να εμφανίζονται στην περιοχή άνεμοι εντάσεως μικρότερης της u_0

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %
≤1	9,5%	≤9	46,0%	≤17	93,9%
≤2	11,2%	≤10	53,4%	≤18	95,6%
≤3	14,3%	≤11	59,1%	≤19	97,6%
≤4	19,1%	≤12	66,8%	≤20	98,7%
≤5	25,1%	≤13	73,8%	≤21	99,1%
≤6	28,8%	≤14	81,0%	≤22	99,5%
≤7	34,8%	≤15	86,4%	≤23	99,7%
≤8	39,5%	≤16	90,6%	≤24	99,9%

$$F(u \leq 4) = f(0 \leq u \leq 1) + f(1 \leq u \leq 2) + f(2 \leq u \leq 3) + f(3 \leq u \leq 4) \rightarrow F(u \leq 4) = 9,5\% + 1,7\% + 3,1\% + 4,8\% = 19,1\%$$

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας
≥1	90,5%	≥9	54,0%	≥17	6,1%
≥2	88,8%	≥10	46,6%	≥18	4,4%
≥3	85,7%	≥11	40,9%	≥19	2,4%
≥4	80,9%	≥12	33,2%	≥20	1,3%
≥5	74,9%	≥13	26,2%	≥21	0,9%
≥6	71,2%	≥14	19,0%	≥22	0,5%
≥7	65,2%	≥15	13,6%	≥23	0,3%
≥8	60,5%	≥16	9,4%	≥24	0,1%

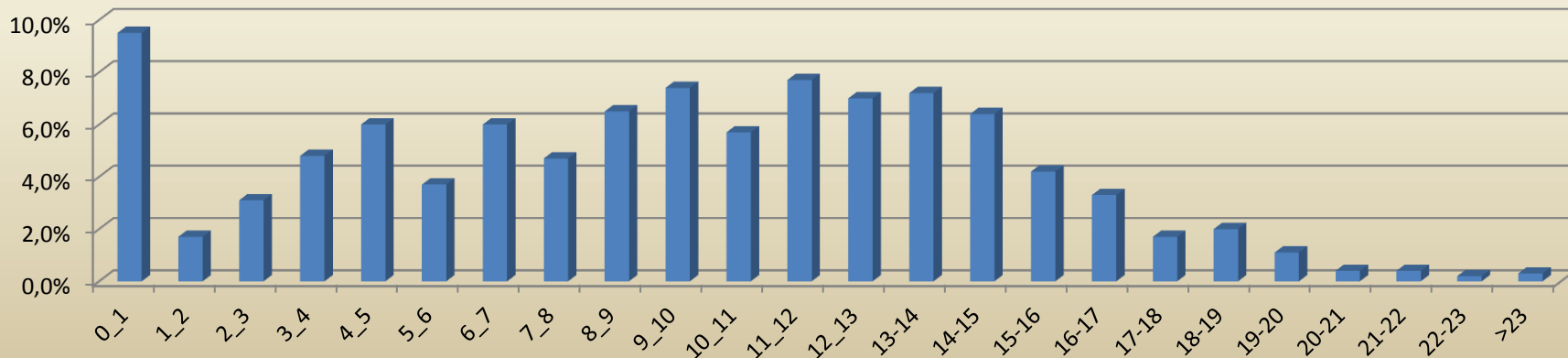
Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται οι ετήσιες πειραματικές μετρήσεις του ανέμου στη Κάρπαθο.

Ζητούνται:

- 1) Να υπολογιστεί και σχεδιαστεί το ιστόγραμμα της ετήσιας καμπύλης συχνότητας.
- 2) Να υπολογιστεί και σχεδιαστεί η καμπύλη αθροιστικής πιθανότητας της ετήσιας έντασης του ανέμου.
- 3) Να υπολογιστεί και σχεδιαστεί η ετήσια καμπύλη διάρκειας του ανέμου.

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %
0-1	9,5%	8-9	6,5%	16-17	3,3%
1-2	1,7%	9-10	7,4%	17-18	1,7%
2-3	3,1%	10-11	5,7%	18-19	2,0%
3-4	4,8%	11-12	7,7%	19-20	1,1%
4-5	6,0%	12-13	7,0%	20-21	0,4%
5-6	3,7%	13-14	7,2%	21-22	0,4%
6-7	6,0%	14-15	6,4%	22-23	0,2%
7-8	4,7%	15-16	4,2%	>23	0,3%

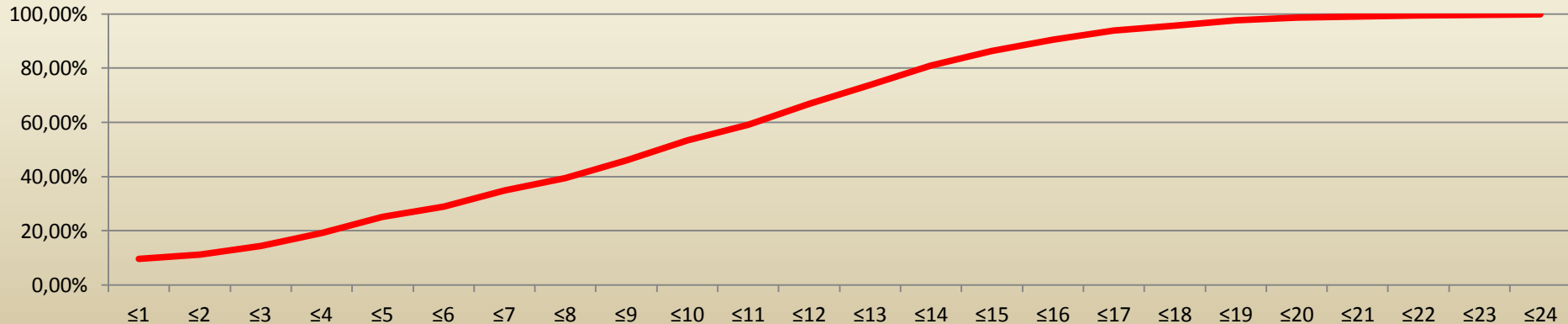


Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Η αθροιστική πιθανότητα της ετήσιας έντασης ανέμου $F(v \leq v_0)$ δηλ. η συνολική πιθανότητα να επικρατούν άνεμοι ταχύτητας $v \leq v_0$

Π.χ. $F(v \leq 4) = F(0 \leq v \leq 1) + F(1 \leq v \leq 2) + F(2 \leq v \leq 3) + F(3 \leq v \leq 4) = 9,5\% + 1,7\% + 3,1\% + 4,8\% = 19,1\%$

Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %	Ταχύτητα Ανέμου (m/s)	Πειραματική Συχνότητα %
≤1	9,5%	≤9	46,0%	≤17	93,9%
≤2	11,2%	≤10	53,4%	≤18	95,6%
≤3	14,3%	≤11	59,1%	≤19	97,6%
≤4	19,1%	≤12	66,8%	≤20	98,7%
≤5	25,1%	≤13	73,8%	≤21	99,1%
≤6	28,8%	≤14	81,0%	≤22	99,5%
≤7	34,8%	≤15	86,4%	≤23	99,7%
≤8	39,5%	≤16	90,6%	≤24	99,9%

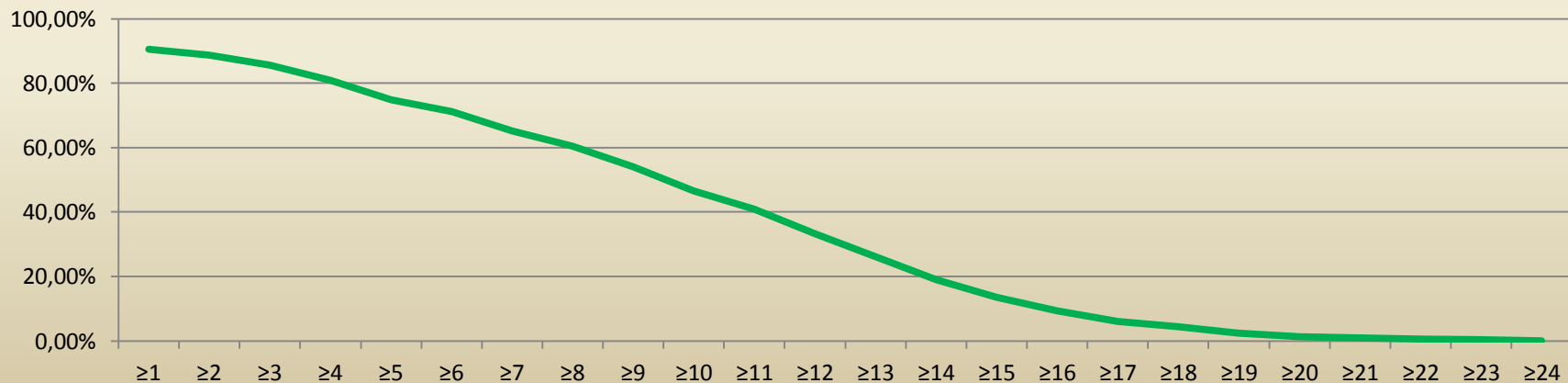


Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Για την καμπύλη διάρκειας ανέμου (ως ποσοστό % που ο άνεμος έχει ένταση v μεγαλύτερη από μια τιμή v_0) ισχύει $G(v \geq v_0) = 1 - F(v \leq v_0)$

Π.χ. $G(v \geq 4) = 1 - F(v \leq 4) = 100\% - 19,1\% = 80,9\%$

Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Καμπύλη διάρκειας
≥ 1	90,5%	≥ 9	54,0%	≥ 17	6,1%
≥ 2	88,8%	≥ 10	46,6%	≥ 18	4,4%
≥ 3	85,7%	≥ 11	40,9%	≥ 19	2,4%
≥ 4	80,9%	≥ 12	33,2%	≥ 20	1,3%
≥ 5	74,9%	≥ 13	26,2%	≥ 21	0,9%
≥ 6	71,2%	≥ 14	19,0%	≥ 22	0,5%
≥ 7	65,2%	≥ 15	13,6%	≥ 23	0,3%
≥ 8	60,5%	≥ 16	9,4%	≥ 24	0,1%



Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής μπορεί να γίνει θεωρητικά λαμβάνοντας όμως υπόψη διάφορες ανεμολογικές μετρήσεις της περιοχής. Για τις ανάγκες υπολογισμού του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής δεν επαρκεί η γνώση της μέσης ταχύτητας του ανέμου της περιοχής, αλλά μας χρειάζονται αναλυτικές πληροφορίες και για την κατανομή της πιθανότητας εμφάνισης των διαφόρων τιμών ταχύτητας του ανέμου μέσα στο χρόνο, με έμφαση στην καταγραφή των διαστημάτων νηνεμίας καθώς και των διαστημάτων εμφάνισης πολύ ισχυρών ανέμων.

Επομένως είναι αναγκαίο, πριν να πάρουμε την τελική απόφαση για την εγκατάσταση ενός ανεμοκινητήρα σε μια περιοχή, να συγκεντρώσουμε τα διαθέσιμα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής, να τα επεξεργαστούμε στατιστικά και να δημιουργήσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα πυκνότητας πιθανότητας και διάρκειας των ανέμων. Επιπλέον είναι απαραίτητος ο εντοπισμός της συχνότητας και της διάρκειας των περιόδων χαμηλών ταχυτήτων και άπνοιας (δηλ. " $u \leq V_c$ "), οπότε και ο ανεμοκινητήρας βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

Από τα ανωτέρω γίνεται αμέσως κατανοητό ότι για να μπορέσουμε να καταλήξουμε σε ασφαλή συμπεράσματα, απαιτούνται μακροχρόνιες και αναλυτικές μετρήσεις. Όμως το σημαντικό κόστος μετρήσεως αλλά και η αναπόφευκτη καθυστέρηση σε συνδυασμό με την έλλειψη, κατά κανόνα, μακροχρόνιων μετρήσεων στις συγκεκριμένες "ενδιαφέρουσες" περιοχές, μας υποχρεώνει να καταφύγουμε σε ημιεμπειρικά αναλυτικά μοντέλα, που περιγράφουν το τοπικό αιολικό δυναμικό μιας περιοχής βάσει μικρού αριθμού παραμέτρων. Οι χρησιμοποιούμενες αυτές σχέσεις, πέρα από τα προβλήματα ακριβείας που παρουσιάζουν, εμφανίζουν και επιπλέον προβλήματα αξιοπιστίας σε τοπικό επίπεδο για μια συγκεκριμένη περιοχή.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Από τις διάφορες προτάσεις φαίνεται ότι η αναλυτική σχέση Weibull για την πυκνότητα πιθανότητας έχει ευρύτατη προσαρμογή και γι αυτό έχει γενικά καθιερωθεί, όπως επίσης και η κατανομή Rayleigh, που αποτελεί ειδική περίπτωση της κατανομής Weibull. Η κατανομή που προτάθηκε από τον Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100 m από το έδαφος. Η εν λόγω κατανομή προσδιορίζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται σε μια περιοχή βάσει δύο μόνο παραμέτρων. Η αναλυτική έκφραση της κατανομής Weibull είναι η εξής:

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{u}{C}\right)^k\right] \quad (2.10.1)$$

Η παράμετρος C της σχ.(2.10.1) συνδέεται με τη μέση ταχύτητα \bar{u}

$$\bar{u} = C \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$
$$\Gamma(t) = \int_0^{\infty} x^{t-1} e^{-x} dx.$$

όπου με Γ συμβολίζεται η αριθμητική συνάρτηση *Γάμμα*. Τυπικές τιμές της συνάρτησης *Γάμμα* δίνονται στον διπλανό Πίνακα, ενώ για γρήγορους υπολογισμούς και για την περιοχή του Αιγαίου (οπότε η παράμετρος k παίρνει τιμές μεταξύ του 1,3 και του 2,0) μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$C \approx 1,1\bar{u}$$

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

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Λαμβάνοντας υπόψη ότι για τη συνάρτηση Γάμμα ισχύει:

$$\Gamma(n+1) = n \Gamma(n) \quad n > 0 \quad (2.10.4)$$

προκύπτει το συμπέρασμα ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός της $\Gamma(n)$ για κάθε τιμή του $n > 0$, με τη βοήθεια του προηγούμενου Πίνακα.

Η δεύτερη παράμετρος της κατανομής Weibull, δηλαδή η παράμετρος k , προσδιορίζεται από τη σχέση:

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

από την οποία προκύπτει ότι η παράμετρος αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη της διασποράς σ^2 των ταχυτήτων του ανέμου ως προς τη μέση ταχύτητα. Πιο συγκεκριμένα μεγαλύτερες τιμές του k εκφράζουν μικρότερη διασπορά των ταχυτήτων του ανέμου και συνεπώς μεγαλύτερη συγκέντρωσή τους γύρω από τη μέση τιμή της ταχύτητας.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Για να προσδιορίσουμε την *καμπύλη διάρκειας* των ταχυτήτων του ανέμου πρέπει να προσδιορίσουμε το χρονικό διάστημα για το οποίο η μετρημένη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από κάποια προκαθορισμένη τιμή. Στην περίπτωση της κατανομής Weibull η καμπύλη διάρκειας μπορεί να βρεθεί βάσει της συνάρτησης ολικής πιθανότητας, δηλαδή:

$$F(v \leq v_0) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v_0}{C}\right)^k\right] \quad (2.10.6)$$

η οποία είναι συμπληρωματική (έχουν άθροισμα μονάδα) της καμπύλης διάρκειας και δίνει την πιθανότητα F , η ταχύτητα u να είναι μικρότερη μιας τιμής u_0 .

Μια ειδική μορφή της κατανομής Weibull είναι η κατανομή Rayleigh, η οποία και προκύπτει από αυτήν όταν στην παράμετρο k δώσουμε τιμή ίση με 2.0. Η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται εναλλακτικά στη θέση της κατανομής Weibull επειδή παρουσιάζει συγκρίσιμα αποτελέσματα με λιγότερες μαθηματικές πράξεις. Η προτεινόμενη τιμή της παραμέτρου k αποτελεί μια αρκετά ρεαλιστική τιμή για την περιοχή του Αιγαίου. Με τον τρόπο αυτό απλοποιούνται οι αναλυτικές σχέσεις και για τον προσδιορισμό της κατανομής χρειάζεται μόνο η μέση ταχύτητα του ανέμου στην υπό μελέτη περιοχή, δηλαδή:

$$f(u) = \frac{\pi u}{2\bar{u}^2} \exp\left[-\frac{\pi u^2}{4\bar{u}^2}\right]$$

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

Σαν ένα γενικό σχόλιο μπορεί να αναφερθεί ότι η ανάλυση των μετεωρολογικών στοιχείων της χώρας μας οδήγησε τους ερευνητές στη δημιουργία γεωγραφικών χαρτών, που περιγράφουν τη γεωγραφική κατανομή των παραμέτρων Weibull (C, k). Έτσι για τη γεωγραφική περιοχή του Αιγαίου οι τιμές της παραμέτρου C βρίσκονται μεταξύ του πέντε και του επτά ($5,0 \leq C \leq 7,0$) και οι τιμές της παραμέτρου k στην περιοχή ($1,3 \div 2,0$). Τέλος, για αρκετές μεμονωμένες περιοχές οι τιμές της παραμέτρου C πλησιάζουν τα 10 m/s , ενώ η παράμετρος k υπερβαίνει την τιμή $2,0$, πράγμα που πιστοποιεί την ύπαρξη υψηλού αιολικού δυναμικού πολύ καλής ποιότητας (μεγάλη διάρκεια ισχυρών ανέμων).

Για την εφαρμογή των αναλυτικών κατανομών ταχύτητας ακολουθείται η εξής διαδικασία. Η σχ. “Weibull” (2.10.1) μπορεί να γραφτεί :

$$F(u \leq u_o) = 1 - \exp[-(u_o/C)^k] \rightarrow F(u \leq u_o) - 1 = -\exp[-(u_o/C)^k] \rightarrow 1 - F(u \leq u_o) = \exp[-(u_o/C)^k] \rightarrow$$

$$\ln[1 - F(u \leq u_o)] = \ln\{\exp[-(u_o/C)^k]\} \rightarrow \ln[1 - F(u \leq u_o)] = -(u_o/C)^k \rightarrow -\ln[1 - F(u \leq u_o)] = (u_o/C)^k \rightarrow$$

$$\ln\{-\ln[1 - F(u \leq u_o)]\} = \ln(u_o/C)^k \rightarrow \ln(-\ln(1 - F(u \leq u_o))) = k \ln u_o - k \ln C \quad (2.10.8)$$

οπότε ο υπολογισμός των παραμέτρων k και C , που αντιστοιχούν στις μετρήσεις μιας περιοχής, μπορεί να γίνει με χρήση ευθείας ελαχίστων τετραγώνων προσαρμοσμένης στις μετρήσεις, δηλαδή:

$$Y = A + BX \quad (2.10.9)$$

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

όπου:

$$Y = \ln(-\ln(1 - F(u \leq u_o))) \quad (2.10.10)$$

και:

$$X = \ln u_o \quad (2.10.11)$$

Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι είναι δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων k και C αρκεί να έχει γίνει ο υπολογισμός των συντελεστών A και B της εν λόγω ευθείας. Έτσι, για τις παραμέτρους k και C ισχύει:

$$C = \exp(-A / B) \quad (2.10.12)$$

και

$$k = B \quad (2.10.13)$$

Ο υπολογισμός των συντελεστών A και B της εξίσωσης των ελάχιστων τετραγώνων, βάσει των μετρημένων τιμών των μεταβλητών Y και X , επιτυγχάνεται με τις σχέσεις:

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

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

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

όπου n είναι το πλήθος των διακεκριμένων τιμών ταχύτητας του ανέμου που έχουμε λάβει υπόψη μας κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Σε αντίθεση με την κατανομή Weibull, η οποία χρειάζεται τον προσδιορισμό δύο παραμέτρων, η κατανομή Rayleigh χρειάζεται μόνο τη μέση τιμή της ταχύτητας \bar{u}

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^{i=n} f_i(u) u_i$$

όπου n είναι το πλήθος των διακριτών τιμών ταχύτητας, που έχει ληφθεί υπόψη κατά τη διάρκεια της καταγραφής των μετρήσεων.

Ατμοσφαιρικά Στοιχεία και Αιολικό Δυναμικό

ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Να υπολογιστεί η καμπύλη Weibull που αντιστοιχεί στα πειραματικά δεδομένα του παρακάτω Πίνακα 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1	
m/s	F (%) πειρ.
0-1	11,3
1-2	3,6
2-3	9,1
3-4	13,2
4-5	10,3
5-6	5,4
6-7	8,4
7-8	5,2
8-9	6,1
9-10	6,4
10-11	3,2
11-12	5,1
12-13	3,9
13-14	3,6
14-15	2
15-16	1,4
16-17	0,9
17-18	0,4
18-19	0,4
19-20	0,2
20-21	0
21-22	0
22-23	0
23-24	0
24-25	0

Για την αθροιστική πιθανότητα της κατανομής Weibull ισχύει:

$$F(v \leq v_0) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v_0}{C} \right)^k \right] \quad (1)$$

άρα είναι δυνατός ο υπολογισμός των συντελεστών **k** και **C**. Θα πρέπει πρώτα να υπολογιστούν οι αθροιστικές πιθανότητες $F(v \leq v_0) = \sum F(v \leq v_i)$. π.χ. $F(v \leq 3) = f(0-1) + f(1-2) + f(2-3) = 11,3\% + 3,6\% + 9,1\% = 24\%$. Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 2.

Οι συντελεστές **k** και **C** θα προσδιοριστούν με γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων. Έτσι η σχέση (1) πρέπει να εκφραστεί σε γραμμική μορφή ως προς **X** και **Y**, ώστε $Y = A + BX$:

Από τη σχέση (2.10.8) →

$$Y = \ln [-\ln(1-F(v \leq v_0))], \quad X = \ln(v_0)$$

Έτσι προκύπτει ο Πίνακας 3. Με γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων προκύπτουν οι συντελεστές **A** και **B**

$$A = -2,9303813, \quad B = 1,60027926$$

Οπότε $C = \exp(-A / B) = \exp(2,9303813 / 1,60027926) = 6,241168705$ και $k = B = 1,60027926$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2		ΠΙΝΑΚΑΣ 3	
m/s	F	X	Y
0-1	0,113	0	-2,1210113
0-2	0,149	0,693147	-1,8242218
0-3	0,24	1,098612	-1,2930341
0-4	0,372	1,386294	-0,7652554
0-5	0,475	1,609438	-0,4395023
0-6	0,529	1,791759	-0,2838266
0-7	0,613	1,94591	-0,0519982
0-8	0,665	2,079442	0,0894976
0-9	0,726	2,197225	0,2582228
0-10	0,79	2,302585	0,445101
0-11	0,822	2,397895	0,5457902
0-12	0,873	2,484907	0,7244366
0-13	0,912	2,564949	0,8880635
0-14	0,948	2,639057	1,08401
0-15	0,968	2,70805	1,2360583
0-16	0,982	2,772589	1,3906308
0-17	0,991	2,833213	1,5498006
0-18	0,995	2,890372	1,6673893
0-19	0,999	2,944439	1,9326447
0-20	1	2,995732	2,913474
0-21	1	3,044522	3,1366175

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

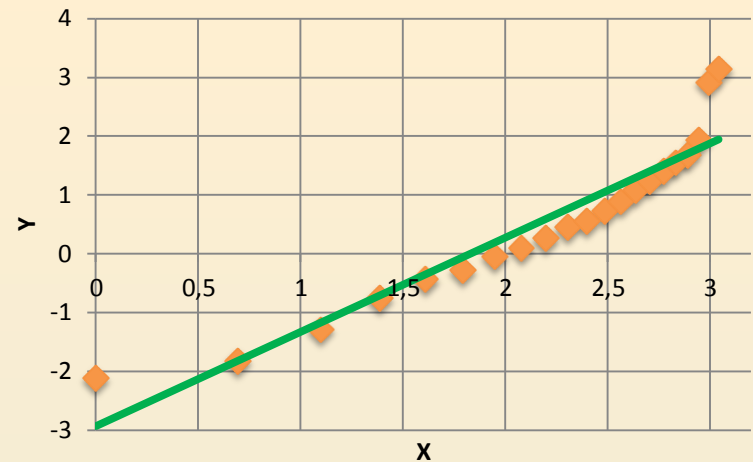
m/s	f (%)	f (%)
	πειρ.	Weibull
0-1	11,3	5,536
1-2	3,6	9,838
2-3	9,1	11,748
3-4	13,2	12,191
4-5	10,3	11,651
5-6	5,4	10,501
6-7	8,4	9,038
7-8	5,2	7,483
8-9	6,1	5,991
9-10	6,4	4,653
10-11	3,2	3,516
11-12	5,1	2,590
12-13	3,9	1,863
13-14	3,6	1,310
14-15	2	0,902
15-16	1,4	0,608
16-17	0,9	0,402
17-18	0,4	0,261
18-19	0,4	0,166
19-20	0,2	0,104
20-21	0	0,064
21-22	0	0,039
22-23	0	0,023
23-24	0	0,013
24-25	0	0,008

Στην Εικόνα 1 φαίνεται η προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων.

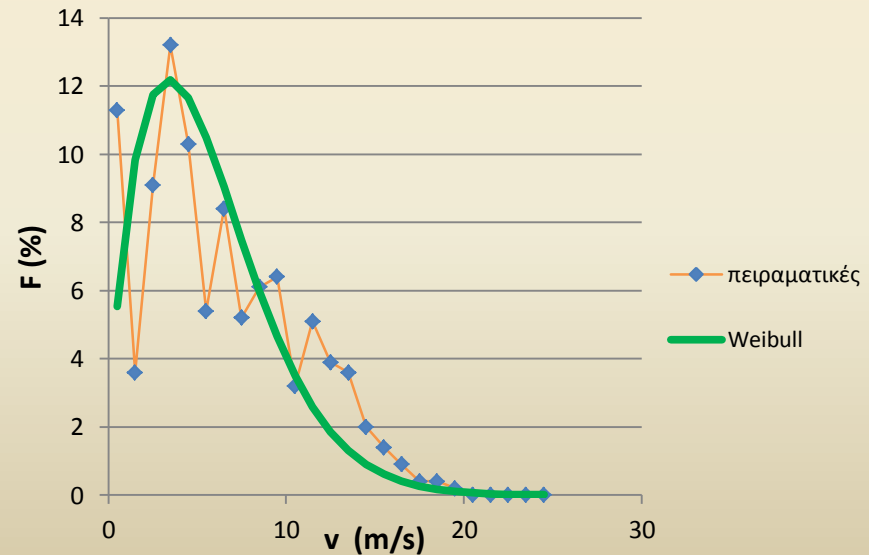
Με τον προσδιορισμό των συντελεστών k και C υπολογίζεται η πιθανότητα $f(u)$ με την κατανομή Weibull και έτσι σχηματίζεται η 3^η στήλη του Πίνακα 4. Ως τιμή ταχύτητας u , για κάθε διάστημα, στη κατανομή Weibull, θεωρήθηκε η μέση τιμή του διαστήματος. Π.χ. για το διάστημα 2-3 m/s ($2 \leq u \leq 3$) m/s τίθεται $u = 2,5$ m/s

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{u}{C} \right)^k \right]$$

Στην Εικόνα 2 συγκρίνονται γραφικά οι πειραματικές τιμές και οι θεωρητικές, όπως αυτές προκύπτουν από την προσαρμοσμένη στις μετρήσεις κατανομή Weibull. Όπως φαίνεται υπάρχει αρκετή απόκλιση μεταξύ τους. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε σφάλματα ή πολύ μικρό δείγμα μετρήσεων.



Εικόνα 1. Γραμμική παλινδρόμηση ελαχίστων τετραγώνων



Εικόνα 2. Σύγκριση πειραματικών τιμών και θεωρητικών (Weibull)



ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ»