



Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Αιολική Ενέργεια



Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης

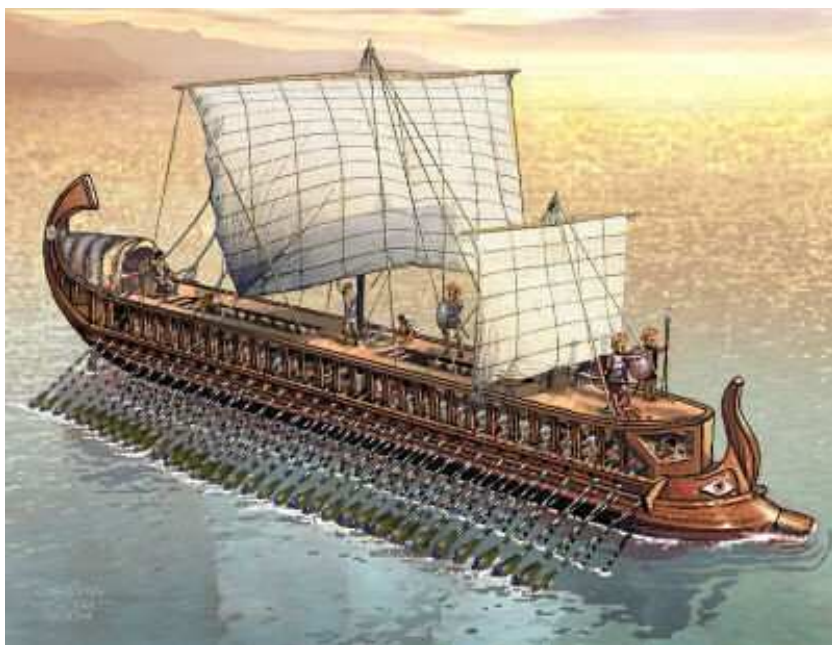


Αιολική ενέργεια



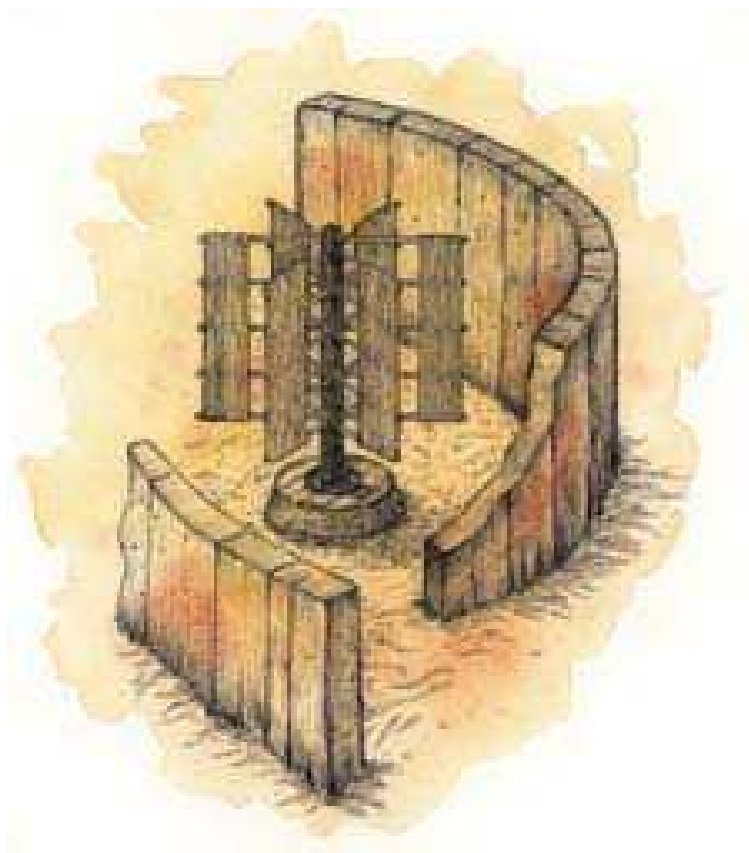
● ● ● | Ιστορικά

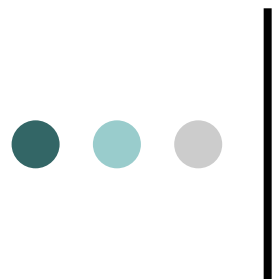
Ίσως η αρχαιότερη μορφή Α.Π.Ε. που αξιοποιήθηκε.



● ● ● | Ιστορικά

Ίσως η αρχαιότερη μορφή Α.Π.Ε. που αξιοποιήθηκε.

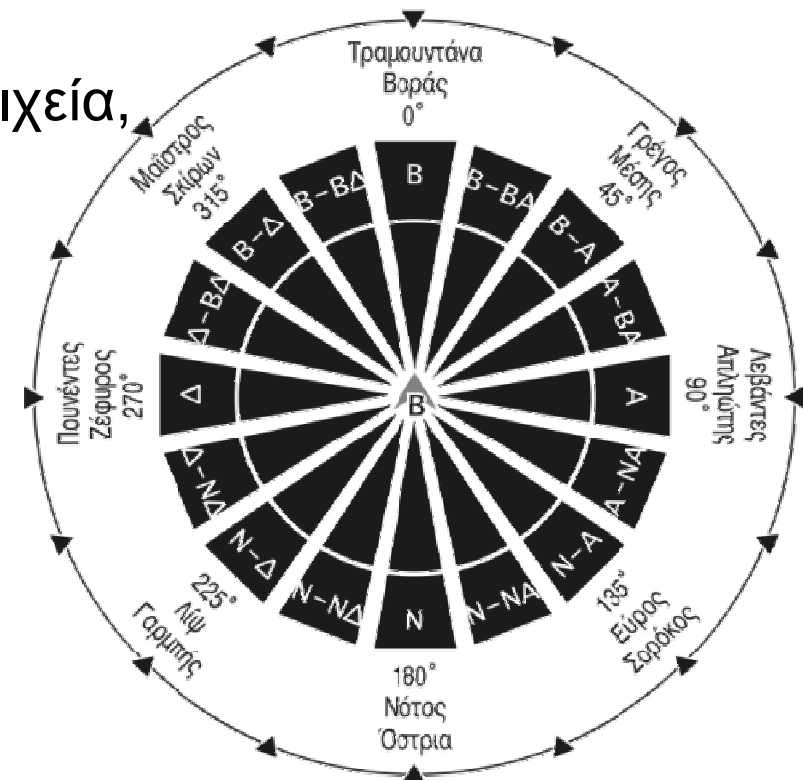




Περί ανέμου γενικά

Άνεμος

- Άνεμος ονομάζεται κάθε οριζόντια μετακίνηση μάζας ατμοσφαιρικού αέρα.
- Ο άνεμος είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών πιέσεων που επικρατούν από τόπο σε τόπο.
- Ο άνεμος προσδιορίζεται από δύο στοιχεία, τη διεύθυνση (direction) και την ένταση (speed), δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα. Ως διεύθυνση ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος.



Δυνάμεις ανέμου

Δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέρια μάζας

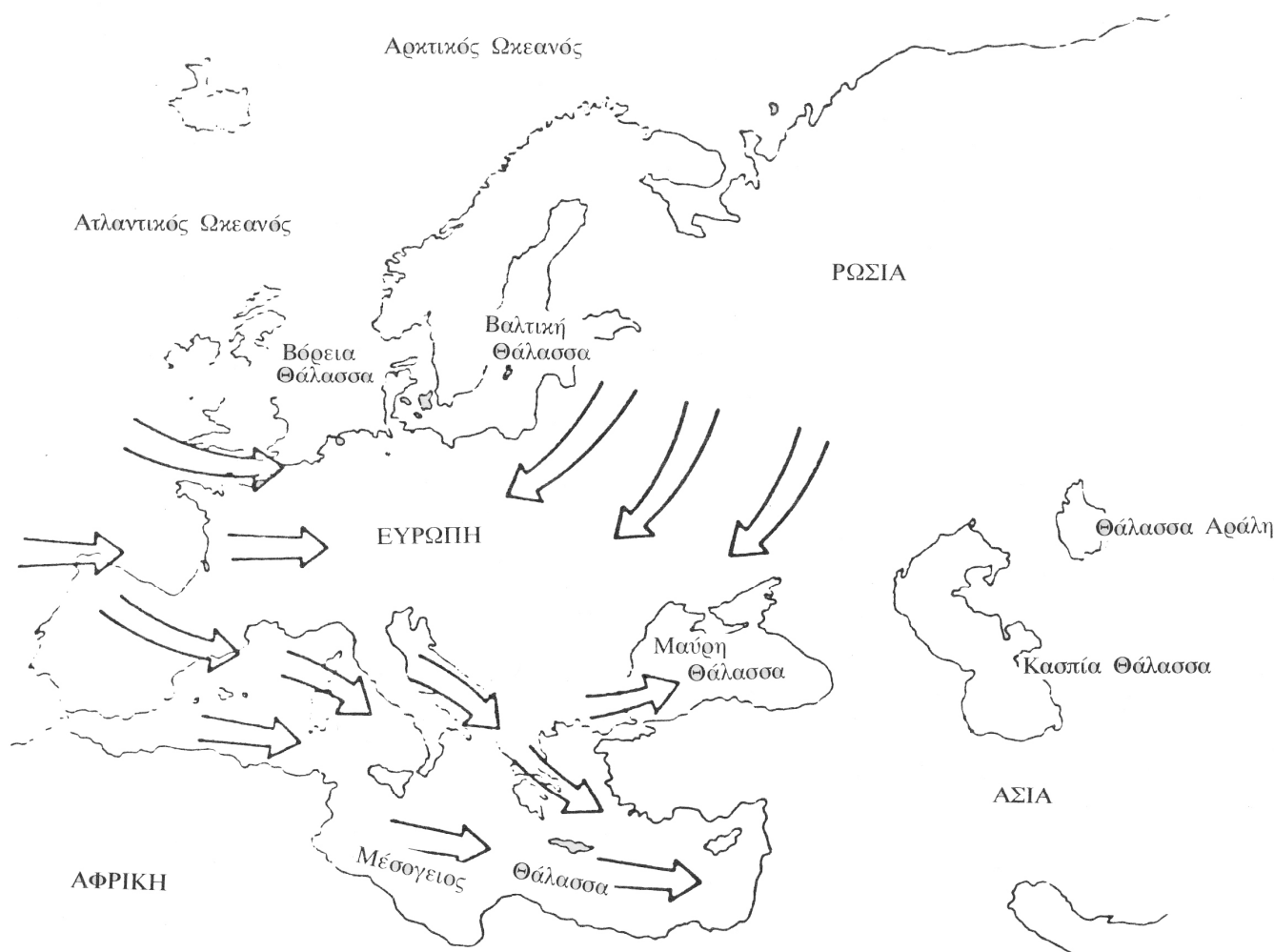
- **Δύναμη βαροβαθμίδας:** ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε μια αέρια μάζα εξαιτίας των διαφορετικών πιέσεων που υπάρχουν σ' αυτήν και η οποία ωθεί την αέρια μάζα από τις ψηλές πιέσεις προς τις χαμηλές.
- **Η δύναμη Coriolis** ασκείται σε κάθε σώμα που κινείται πάνω στη γη: $F = m \cdot u \cdot \omega \cdot \sin(\varphi)$.
- **Η δύναμη τριβής** αναπτύσσεται εξαιτίας της τραχύτητας που παρουσιάζει η επιφάνεια του εδάφους και της θάλασσας, πάνω στην οποία υποχρεώνεται να κινηθεί η αέρια μάζα.
- **Η φυγόκεντρη δύναμη** είναι η δύναμη με την οποία αντιδρά κάθε σώμα, το οποίο κινείται σε κυκλική τροχιά.



Τύποι ανέμου

- **Γεωστροφικός άνεμος (geostrophic wind):** Ο άνεμος που δημιουργείται από την ισορροπία των δυνάμεων βαροβαθμίδας και Coriolis, ονομάζεται γεωστροφικός άνεμος. Όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε ένα χάρτη επιφανείας, τόσο πιο μεγάλη είναι η δύναμη βαροβαθμίδας και άρα τόσο μεγαλύτερη και η ταχύτητα του ανέμου.

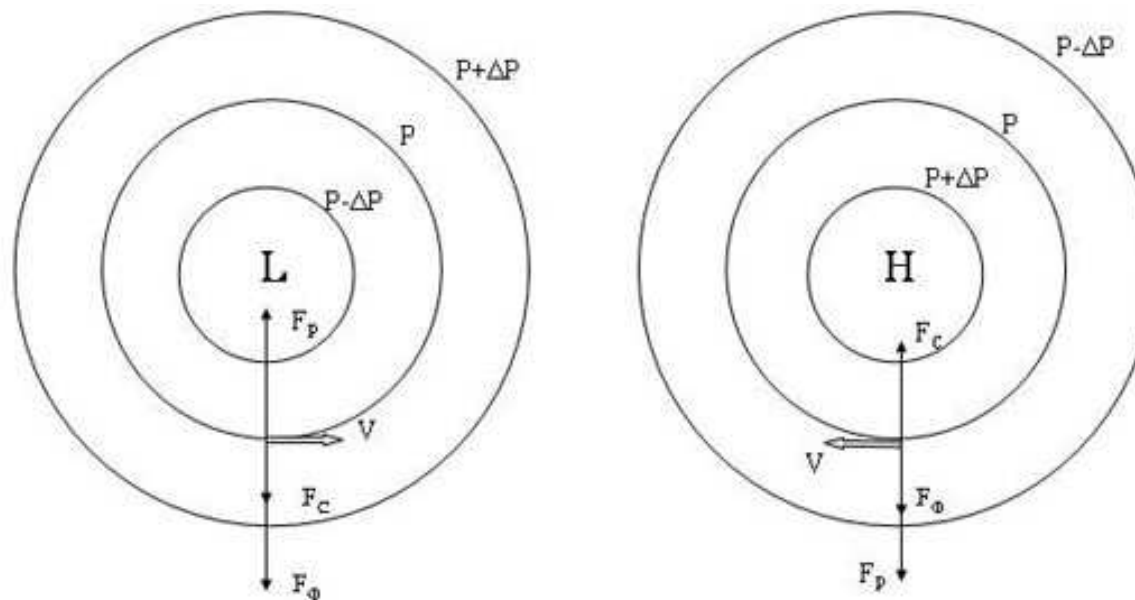
Κύριες κατευθύνσεις πνοής γεωστρωφικού ανέμου στην Ευρώπη



Πηγή: Γ. Μπεργελές. *Ανεμοκινητήρες*. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα 1995.

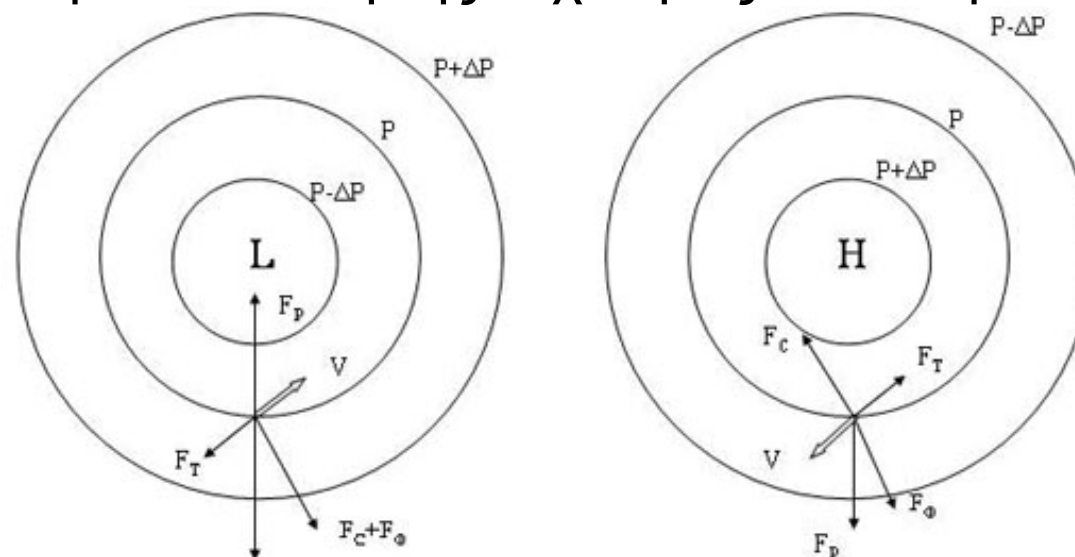
● ● ● | Τύποι ανέμου

- Άνεμος βαροβαθμίδας (gradient wind):** Όταν οι ισοβαρείς είναι καμπύλες και η κίνηση του ανέμου εκτελείται σε περιοχές της ατμόσφαιρας που η δράση της τριβής είναι αμελητέα, τότε αυτή είναι αποτέλεσμα της δράσης τριών δυνάμεων, της δύναμης βαροβαθμίδας (F_p), της δύναμης Coriolis (F_c) και της φυγόκεντρης δύναμης (F_ϕ).



● ● ● | Τύποι ανέμου

- Άνεμος βαροβαθμίδας (gradient wind):** Όταν οι ισοβαρείς είναι καμπύλες και η κίνηση γίνεται κοντά στο έδαφος, τότε έχουμε και πάλι τη δύναμη τριβής να παίζει ρόλο στη διαμόρφωση της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου. Τώρα πλέον η κίνηση του ανέμου είναι αποτέλεσμα της ισορροπίας των δυνάμεων βαροβαθμίδας, τριβής, φυγόκεντρης και Coriolis. Η δύναμη της τριβής έχει πάντα φορά αντίθετη από εκείνη της ταχύτητας του ανέμου.

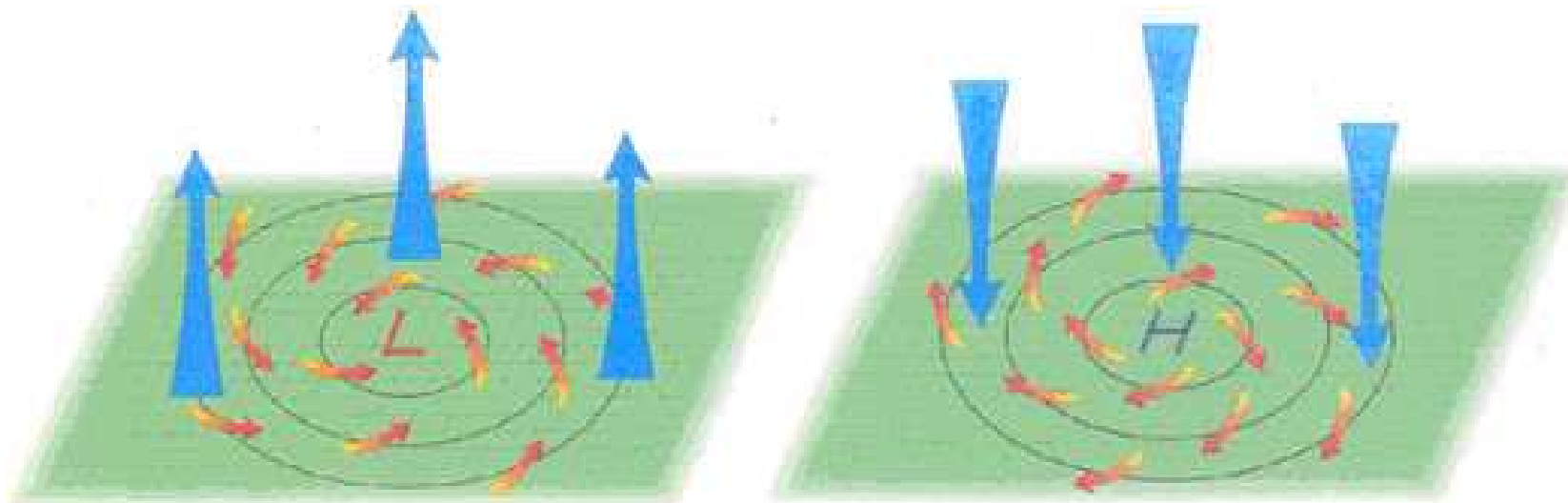


● ● ● | Τύποι ανέμου

- **Άνεμος βαροβαθμίδας (gradient wind):** Στο κυκλωνικό σύστημα των ισοβαρών (χαμηλό βαρομετρικό), εξαιτίας της συγκεκριμένης ισορροπίας των δυνάμεων, παρατηρείται σύγκλιση (convergence) του ανέμου προς το κέντρο του συστήματος, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανοδικές κινήσεις στο κέντρο. Αντίθετα στο αντικυκλωνικό σύστημα (υψηλό βαρομετρικό), η ισορροπία των δυνάμεων δημιουργεί απόκλιση (divergence) του ανέμου από το κέντρο του συστήματος, με συνέπεια τη δημιουργία καθοδικών κινήσεων στο κέντρο.

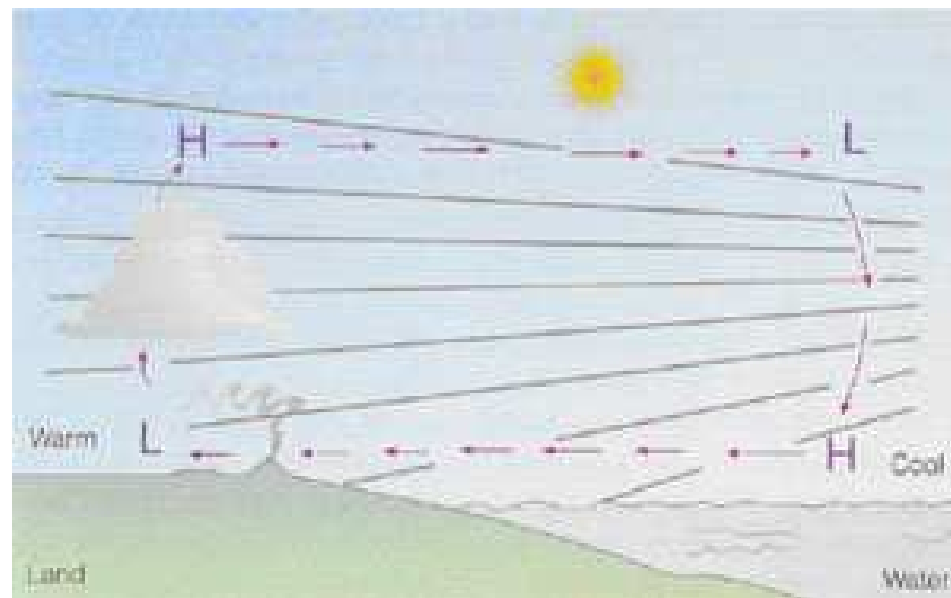
● ● ● | Τύποι ανέμου

- **Άνεμος βαροβαθμίδας (gradient wind):**
Συνέπεια των ανοδικών κινήσεων στο κέντρο ενός κυκλωνικού συστήματος είναι η δημιουργία νεφών με μεγάλη κατακόρυφη ανάπτυξη, όταν φυσικά υπάρχει αρκετή υγρασία στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, οι καθοδικές κινήσεις σε ένα βαρομετρικό υψηλό τείνουν να κάνουν την ατμόσφαιρα πιο ευσταθή.



● ● ● | Τύποι ανέμου

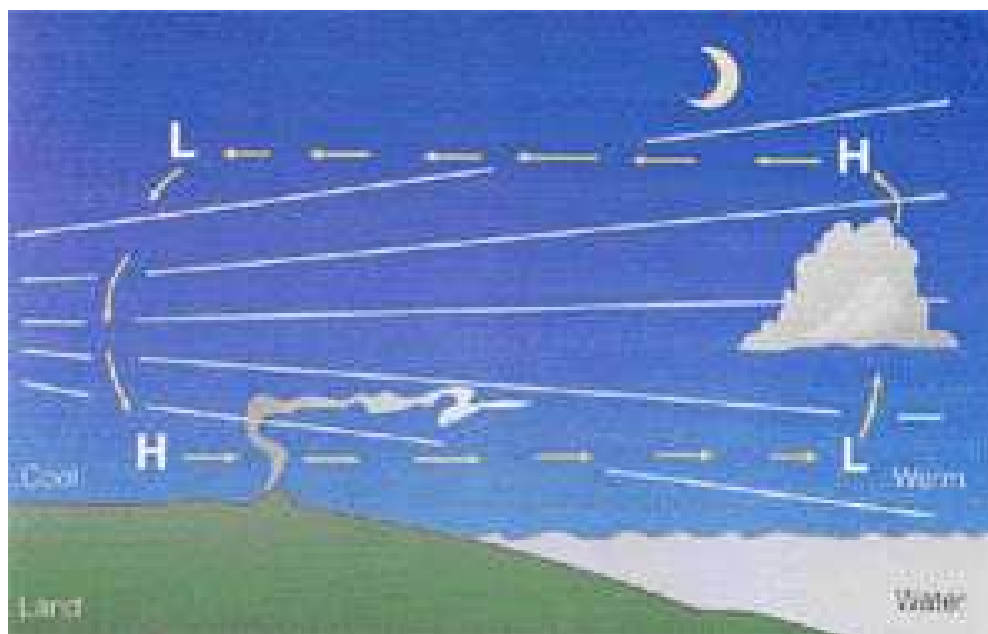
- **Ημερήσιοι άνεμοι:** Στην κατηγορία αυτή των ανέμων, ανήκουν οι άνεμοι εκείνοι που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται τόσο κατά την ημέρα όσο και κατά τη νύχτα, ανάμεσα στην ξηρά και στη θάλασσα ή ανάμεσα σε πεδινές και ορεινές περιοχές.
- **α. Θαλάσσια αύρα (sea breeze):**
Εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω της ταχύτερης θέρμανσης του αέρα πάνω από τη στεριά, από ότι πάνω από τη θάλασσα. Έχει διεύθυνση από τη θάλασσα προς τη στεριά.



● ● ● | Τύποι ανέμου

- **β. Απόγεια αύρα (land breeze):**

Εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της νύχτας, λόγω της ταχύτερης ψύξης του αέρα πάνω από τη στεριά, από ότι πάνω από τη θάλασσα. Έχει διεύθυνση από τη στεριά προς τη θάλασσα.





Τύποι ανέμου

- **Τοπικοί άνεμοι:**

Η τοπογραφική διαμόρφωση διαφόρων περιοχών της γης, σε συνάρτηση και με ορισμένες καιρικές συνθήκες, δημιουργεί τοπικούς ανέμους με χαρακτηριστικές πολλές φορές ονομασίες. Οι άνεμοι αυτοί, που χαρακτηρίζονται τοπικοί, είναι μικρής κλίμακας (Μελτέμια, Βαρδάρης κλπ).

- **Μελτέμια**

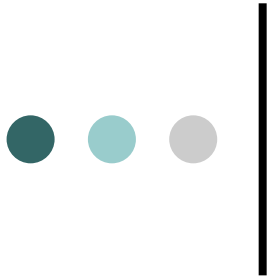
Δημιουργούνται από ένα μεγάλο σύστημα υψηλών πιέσεων στα Βαλκάνια, βόρεια της Ελλάδας, και ένα μεγάλο σύστημα χαμηλών πιέσεων στη Μικρά Ασία και ανατολικά στη Μεσόγειο. Το χαμηλό σύστημα πιέσεων οφείλεται κυρίως στα μεγάλα θερμικά ανοδικά ρεύματα πάνω από την Ινδία όπου καθιστούν ένα μεγάλο θερμικό ελάχιστο πίεσης που εκτείνεται στο μέσο του καλοκαιριού μέχρι και την ανατολική Μεσόγειο.

• • • Τύποι ανέμου

- Μελέμια:



Χάρτης στον οποίο φαίνεται πως δημιουργούνται οι "Ετησίοι" άνεμοι (Μελέμια), από το υψηλό βαρομετρικό (H) των Βαλκανίων και το χαμηλό (L) της Μικράς Ασίας. Εάν τα κέντρα αυτά ευρισκόντο πλησιέστερα, θα εδημιουργείτο καταστρεπτικός Κυκλώνας.

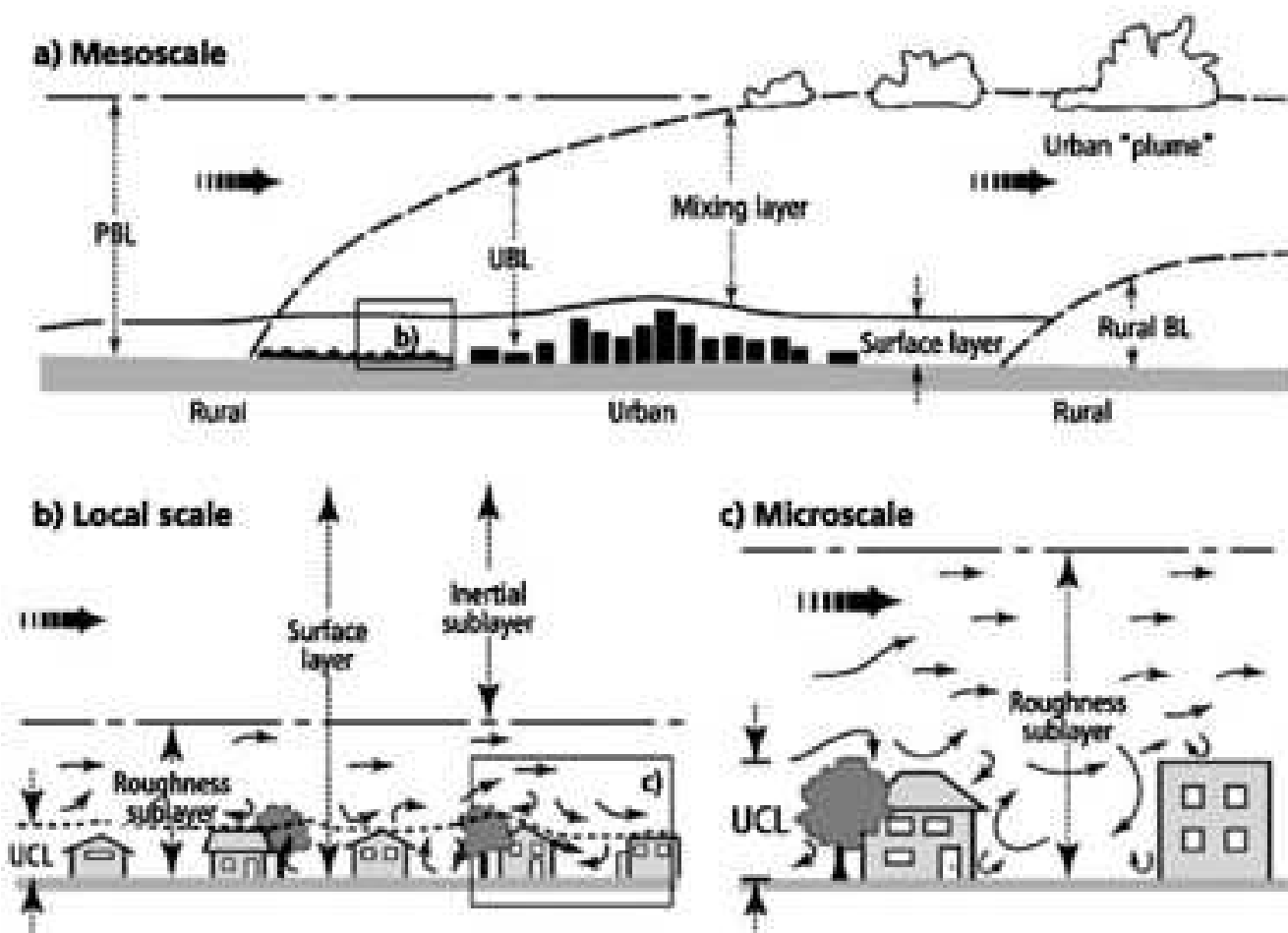


Τραχύτητα εδάφους

● ● ● | Τραχύτητα εδάφους

- Η τραχύτητα του εδάφους εκφράζει το είδος του εδάφους και ιδιαίτερα τη μορφολογία του (ορογραφία).
- 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 και τις καιρικές συνθήκες (συγκομιδή, κυματισμός).
- Το μήκος τραχύτητας ορίζεται για επιφάνειες με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων τραχύτητας και επηρεάζεται από την πυκνότητα των εδαφικών χαρακτηριστικών.

● ● ● Τραχύτητα εδάφους



● ● ● | Τραχύτητα εδάφους

Τραχύτητα εδάφους

- Για επίπεδη περιοχή το z_0 συνδέεται με το μέσο ύψος (h) των στοιχείων τραχύτητας με τη σχέση: $z_0=0,15h$
- Αν $z_0 \leq 0,03$
Κλάση= $1,699823015+\ln(z_0)/\ln(150)$
- Αν $z_0 > 0,03$
Κλάση= $3,912489289+\ln(z_0)/\ln(3,3333333)$



Τραχύτητα εδάφους

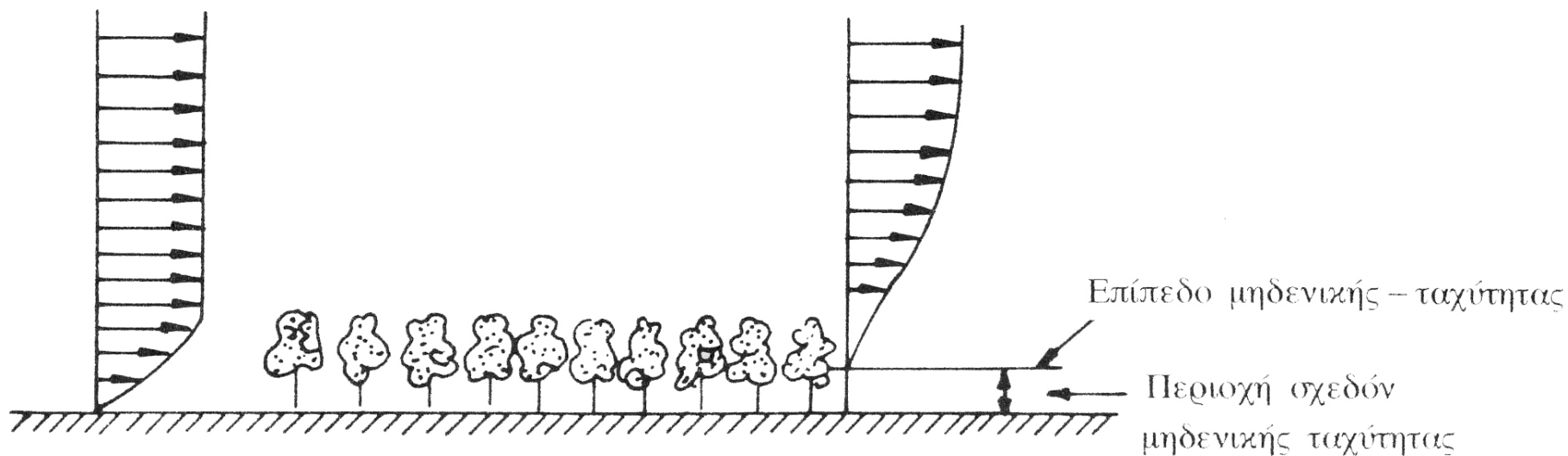
Κατηγορία Τραχύτητας	Τύπος εδάφους	Zo(m)
0	Πηλώδες έδαφος, Πάγος	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-5}$
0	Ήρεμη θάλασσα	$2 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
0	Αμμώδες έδαφος	$10^{-4} - 10^{-3}$
0	Χιονοκαλυμμένο επίπεδο έδαφος	$4.9 \cdot 10^{-3}$
1	Χέρσο έδαφος	$10^{-3} - 0.01$
1	Χλοερό έδαφος	0.017
1	Επίπεδο ακαλλιέργητο 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 δένδρα	0.05-0.1
3	Δάση με υψηλά δένδρα	0.2-0.9
3	Προαστιακές περιοχές	1-2
3	Πόλεις	1-4

● ● ● | Τραχύτητα εδάφους

- Κλάση τραχύτητας 1:
Ανοικτές περιοχές χωρίς εμπόδια.
Το έδαφος είναι επίπεδο ή με πολύ ελαφριές κλίσεις.
Μπορεί να υπάρχουν μεμονωμένες αγροικίες και χαμηλοί θάμνοι.
- Κλάση τραχύτητας 2:
Καλλιεργημένη περιοχή με ορισμένα εμπόδια σε απόσταση μεγαλύτερη των 1.000m μεταξύ τους και μερικά σπίτια. Το έδαφος είναι επίπεδο ή κυματώδες με δέντρα και σπίτια.
- Κλάση 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.

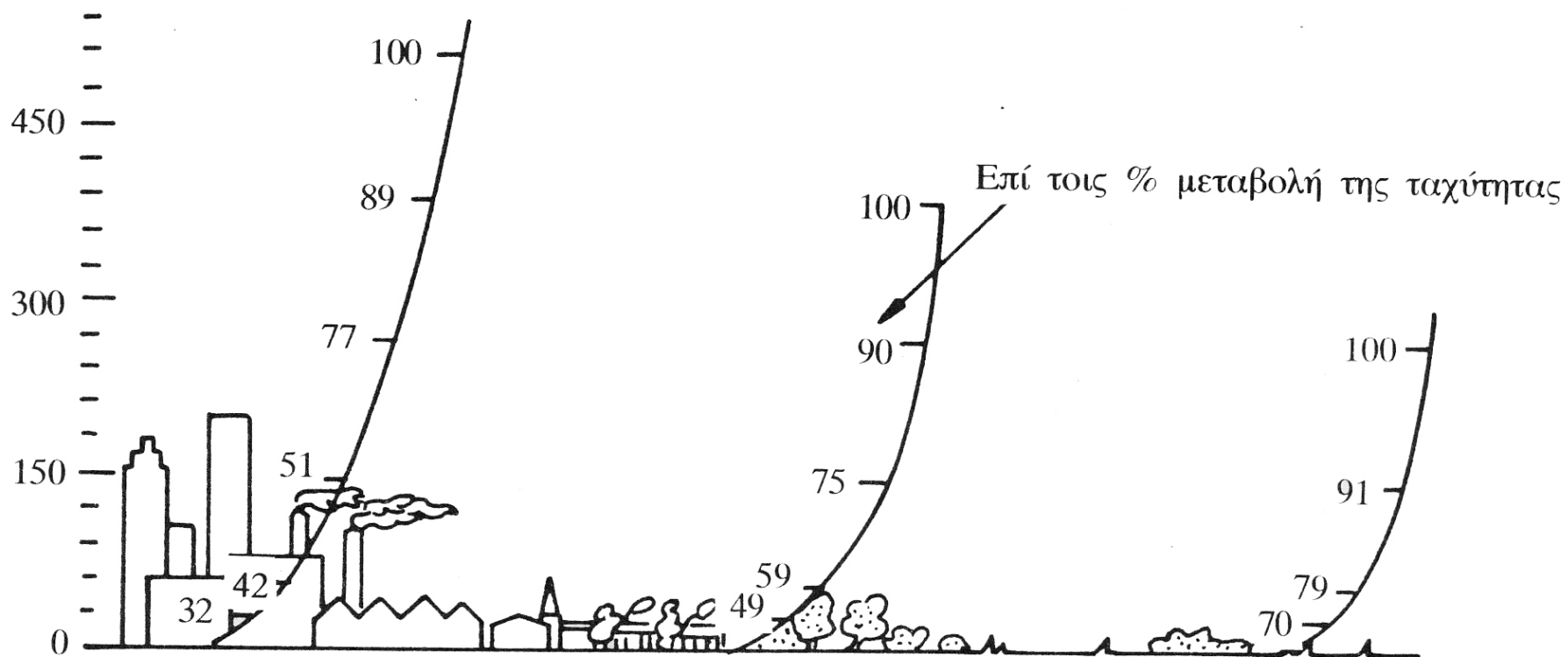


Οριακό στρώμα αέρα



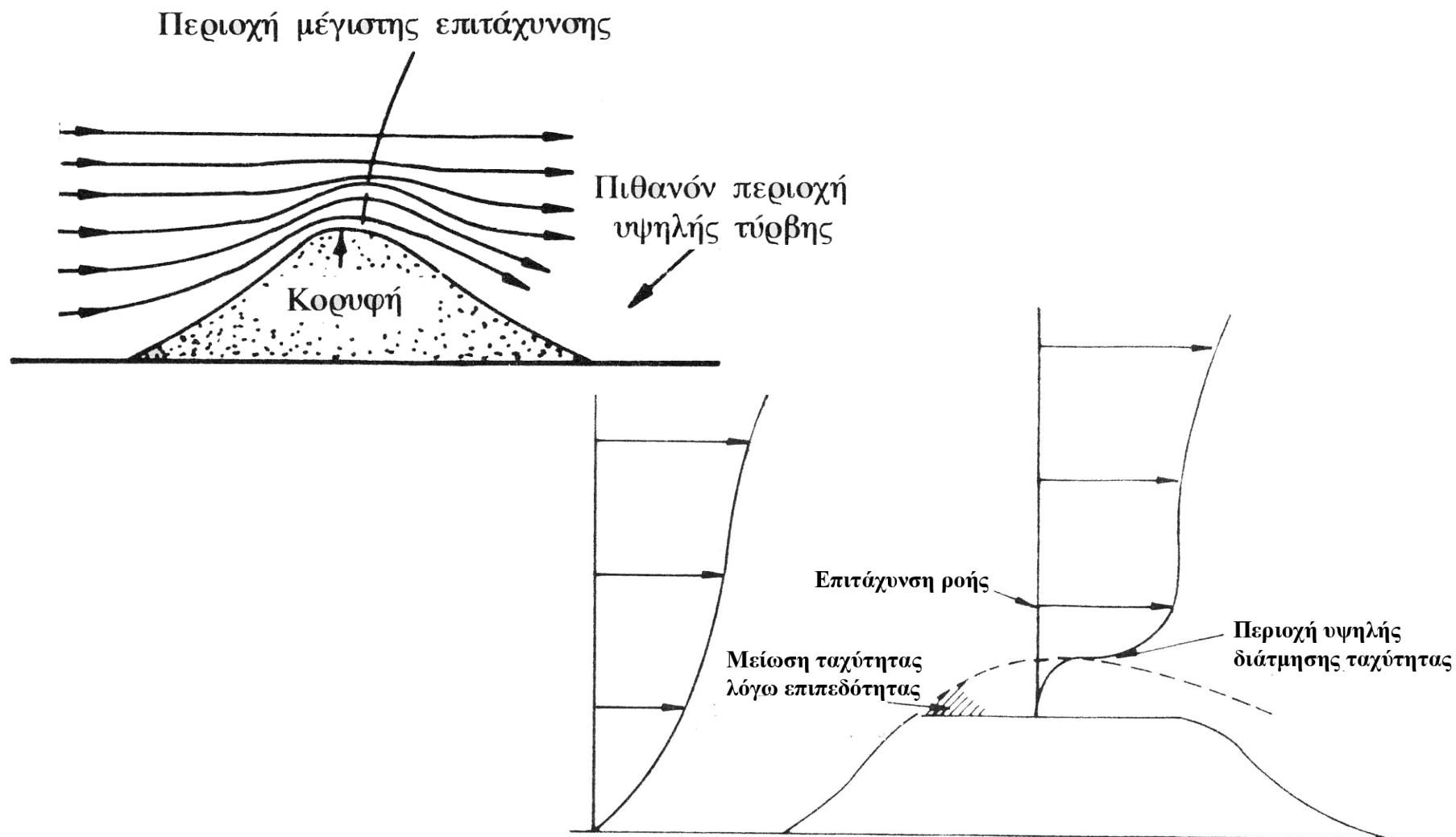


Οριακό στρώμα αέρα





Οριακό στρώμα αέρα



Μεταβολή ταχύτητας ανέμου καθ' ύψος

Ευστάθεια της Ατμόσφαιρας

- Ορίζεται από την κατακόρυφη με το ύψος μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα. Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας μετριέται από την τάση που έχει μία αέρια μάζα, που έχει μετακινηθεί κατακόρυφα, να επιστρέψει ή όχι στην αρχική της θέση.
- Για παράδειγμα, σε ευσταθείς συνθήκες το πάχος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μπορεί να φτάσει στα 10m ενώ συνήθως είναι μεταξύ 50m και 2km.
- Σε ουδέτερη ατμόσφαιρα η σχέση μεταβολής ανέμου καθ' ύψος γίνεται (ύψη μεταξύ $3z_0$ και $1.000z_0$, z_0 : μήκος τραχύτητας):

$$V(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z_0 + z}{z_0}$$

● ● ● | Εκθετικός νόμος κατανομής ανέμου καθ' ύψος

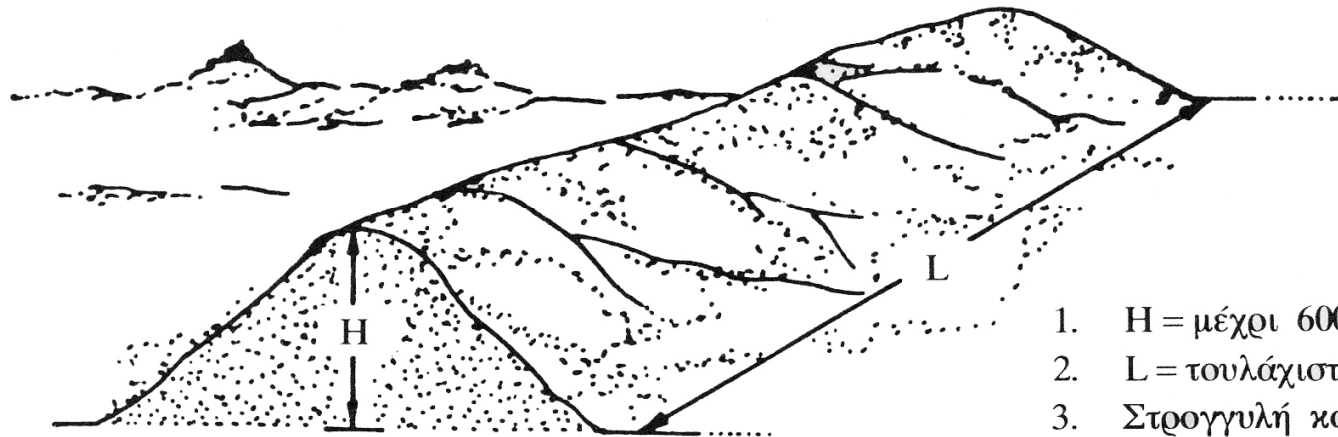
Ο εκθετικός νόμος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{u_{z_1}}{u_{z_2}} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^n$$

- Εφαρμόζεται σε μεγάλο πλήθος μετρήσεων και όχι σε ατομικές μετρήσεις.
- Εμφανίζει καλή ακρίβεια σε περιπτώσεις που η διαφορά ύψους είναι περισσότερο από 30-50m. Η ακρίβεια όμως ελαττώνεται πολύ για μεγάλες διαφορές υψών.
- Δεν χρειάζονται γνώσεις ευστάθειας της ατμόσφαιρας.
- Το n δίνεται από τη σχέση, όταν το ύψος αναφοράς (z_2) είναι διαφορετικό από τα 10m (z_0 : μήκος τραχύτητας):

$$n = 0.04 \ln z_0 + 0.003 (\ln z_0)^2 + 0.24$$

Κορυφογραμμές εγκατάστασης αιολικών πάρκων

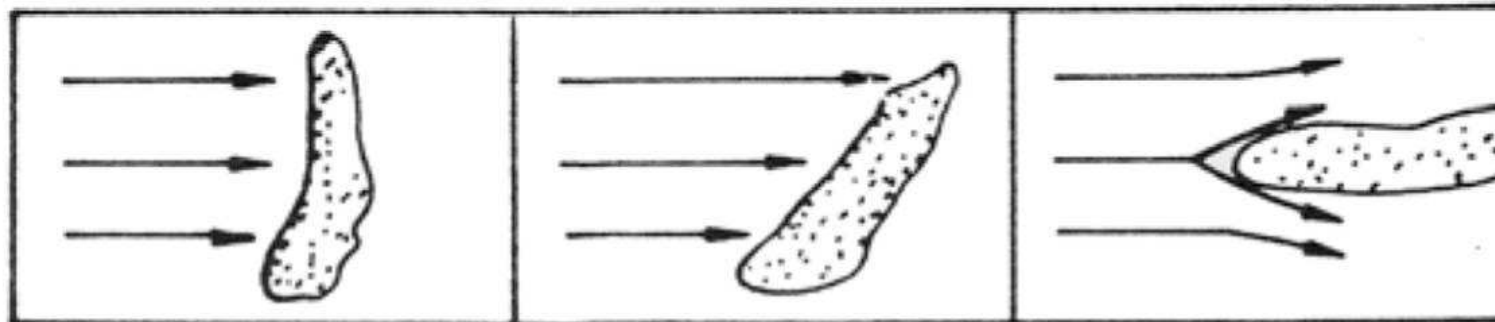


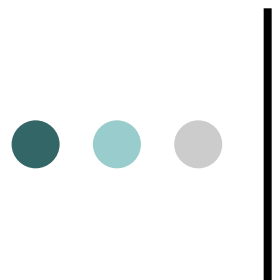
1. $H =$ μέχρι 600 m
2. $L =$ τουλάχιστον 10 H
3. Στρογγυλή κορυφή όχι επίπεδη

a. Vertical
(the optimum case)

b. Oblique
(acceptable case)

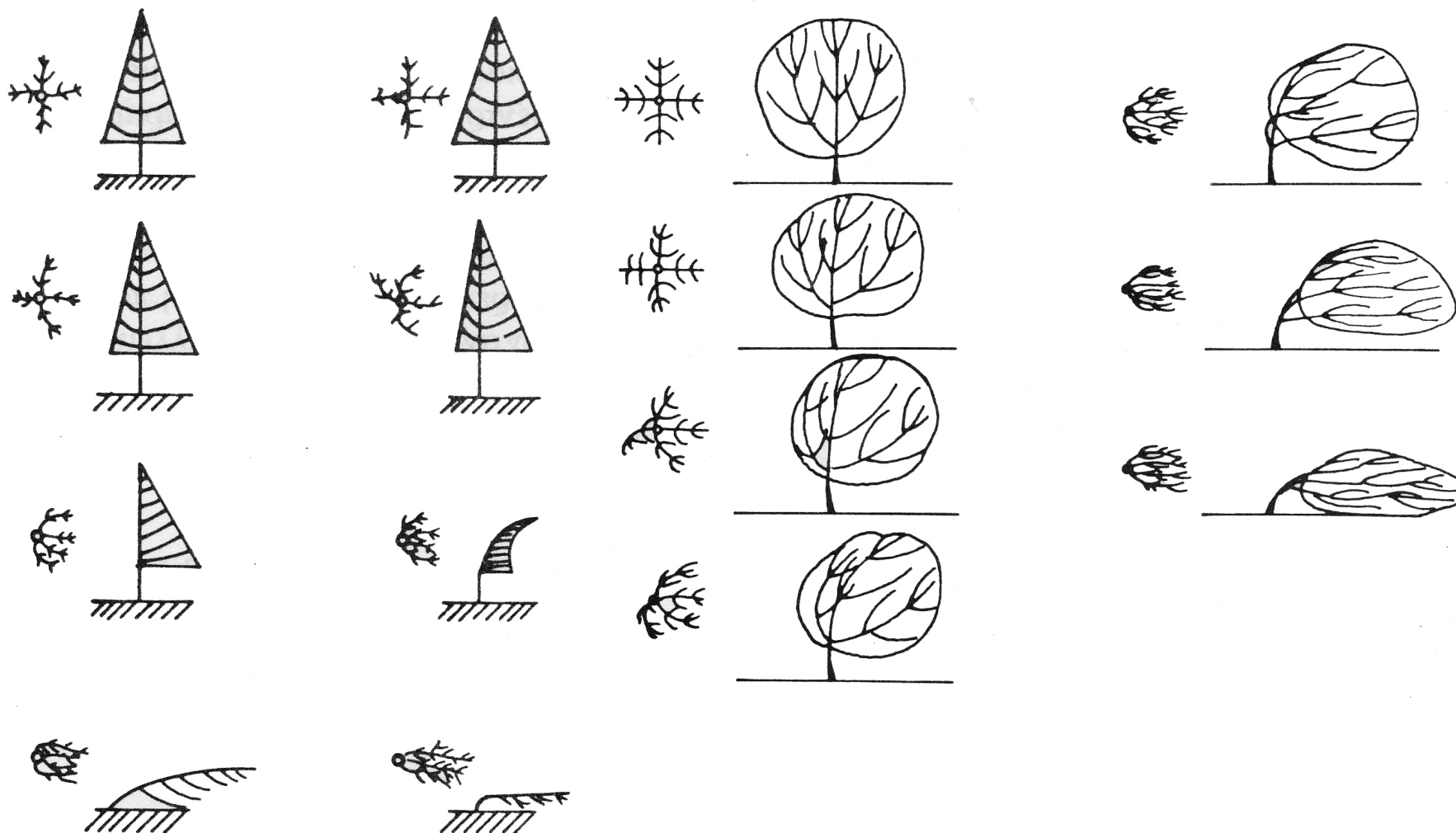
c. Parallel
(not good)





Αιολικό δυναμικό

Εκτίμηση αιολικού δυναμικού – Παραμόρφωση δέντρων



Εκτίμηση αιολικού δυναμικού – Παραμόρφωση δέντρων

Είδος δέντρου	Δείκτης	Μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου (m/sec) και 95% όριο αξιοπιστίας (\pm m/sec)							
		Τιμή Δείκτη							
		0	1	2	3	4	5	6	7
Έλατο	Griggs - Putnam	6,0 \pm 2,0	6,7 \pm 1,9	7,4 \pm 1,8	8,1 \pm 1,8	8,8 \pm 1,8	9,5 \pm 1,8	10,2 \pm 1,9	10,9 \pm 2,0
Άρκενθος (είδος πεύκου)	Griggs - Putnam	4,4 \pm 2,1	5,0 \pm 2,0	5,6 \pm 1,9	6,2 \pm 1,9	6,8 \pm 2,0	7,4 \pm 2,1	8,0 \pm 2,2	8,6 \pm 2,5
Έλατο	Griggs - Putnam	3,0 \pm 2,8	4,2 \pm 2,6	5,4 \pm 2,5	6,6 \pm 2,4	7,8 \pm 2,5	9,0 \pm 2,6	10,2 \pm 2,8	11,4 \pm 3,0
Πεύκο	Griggs - Putnam	3,3 \pm 1,9	4,0 \pm 1,8	4,7 \pm 1,7	5,4 \pm 1,8	6,1 \pm 1,8	6,8 \pm 2,0	7,5 \pm 2,1	8,2 \pm 2,3
<u>Pseudotsuga</u> (<u>Douglas Fir</u>)	Griggs - Putnam	3,3 \pm 1,7	4,1 \pm 1,6	4,9 \pm 1,5	5,7 \pm 1,5	6,5 \pm 1,5	7,3 \pm 1,6	8,1 \pm 1,8	8,9 \pm 1,9
Σφένδαμνος	<u>Barsch</u>	3,4 \pm 1,5	4,3 \pm 1,0	5,2 \pm 1,4	6,1 \pm 2,2	7,0 \pm 3,1	7,9 \pm 4,1	8,8 \pm 5,1	9,7 \pm 6,1
Βελανιδιά	<u>Barsch</u>	3,0 \pm 1,8	4,1 \pm 1,7	5,2 \pm 1,7	6,3 \pm 1,8	7,4 \pm 1,9	8,5 \pm 2,1	9,6 \pm 2,3	10,7 \pm 2,5
Ακακία	<u>Barsch</u>	3,7 \pm 1,2	4,4 \pm 1,0	5,1 \pm 1,0	5,8 \pm 1,3	6,5 \pm 1,7	7,2 \pm 2,1	7,9 \pm 2,5	8,6 \pm 3,0
Πτελέα	<u>Barsch</u>	3,3 \pm 1,5	4,4 \pm 1,4	5,5 \pm 1,4	6,6 \pm 1,6	7,7 \pm 2,0	8,8 \pm 2,4	9,9 \pm 2,9	11,0 \pm 3,4

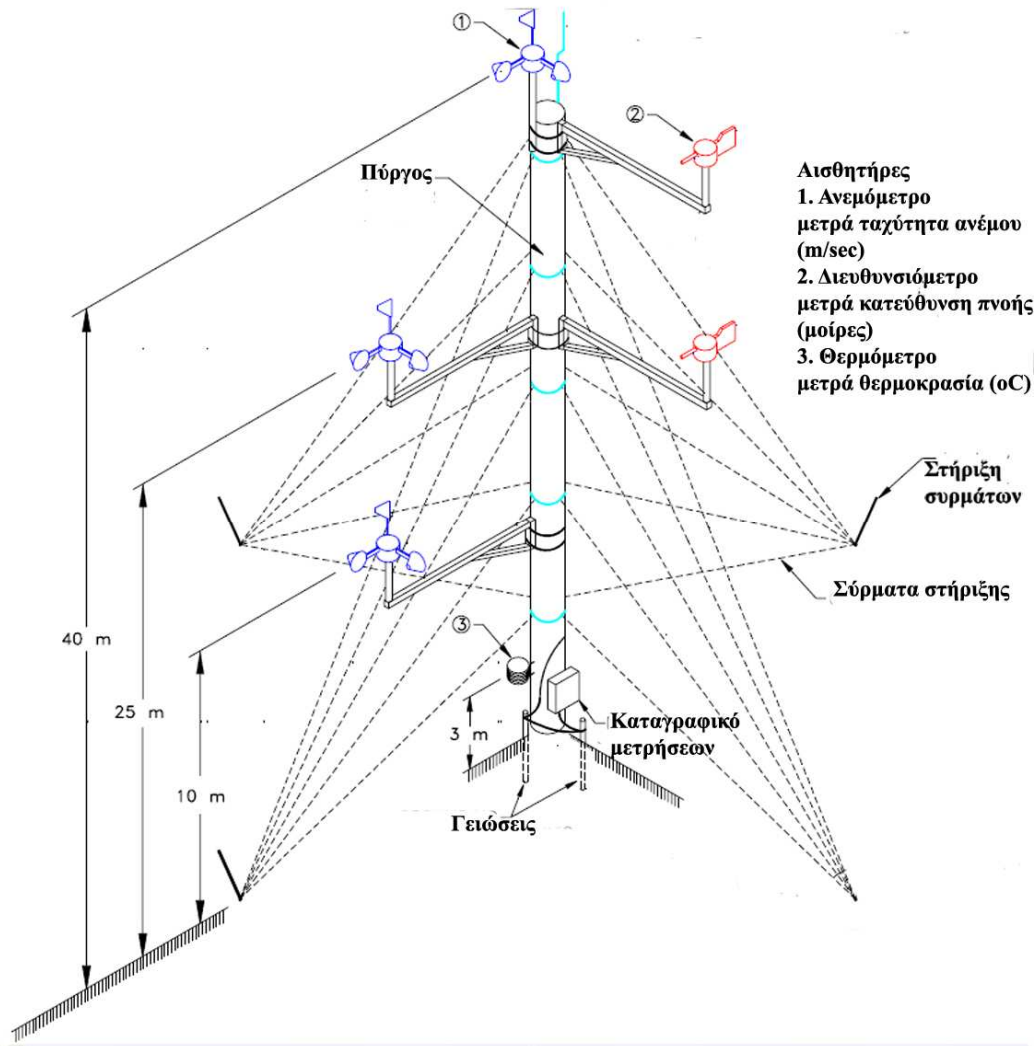
Χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου

Η γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου είναι απαραίτητη στις μελέτες εκτίμησης της ενέργειας του ανέμου. Για την επιλογή της κατάλληλης θέσης εγκατάστασης αιολικών συστημάτων θα πρέπει να γνωρίζουμε:

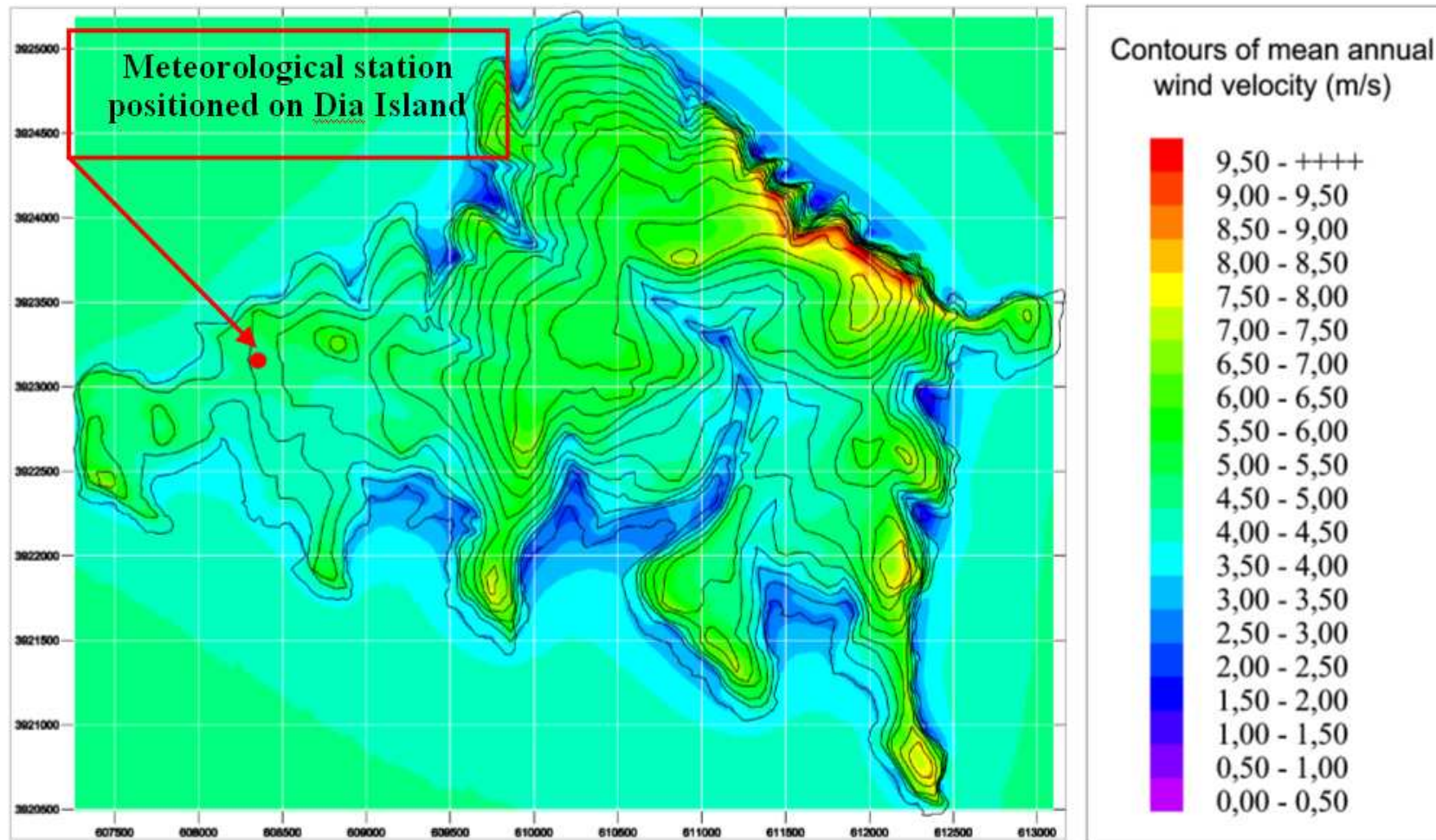
- την ταχύτητα του ανέμου
- τη διεύθυνση του ανέμου
- την επικρατούσα στην περιοχή τύρβη
- το στροβιλισμό του ανέμου
- τη μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου)
- τις ακραίες τιμές ταχύτητας ανέμου (ριπές).

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συνθέτουν το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής και μπορεί να γίνουν γνωστά μόνο με μετρήσεις.

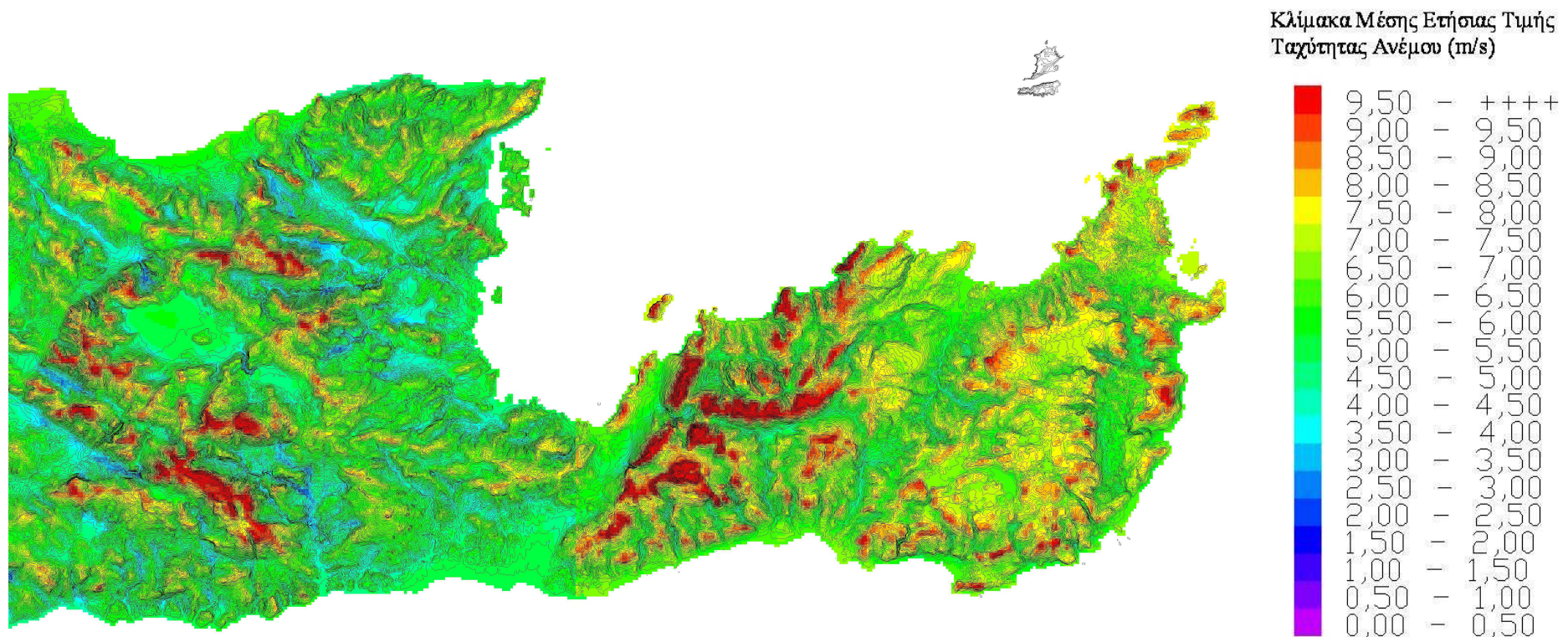
Εκτίμηση αιολικού δυναμικού – Μετεωρολογικός ιστός



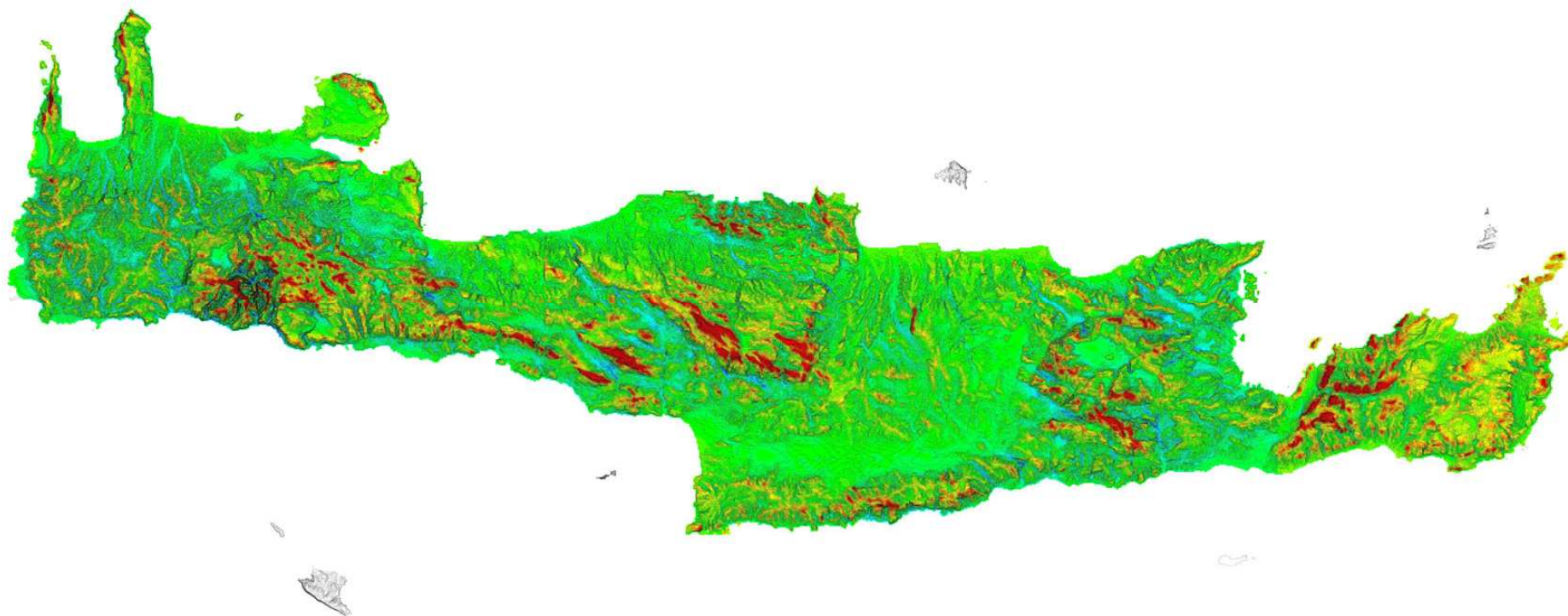
Αιολικός χάρτης νήσου Ντίας



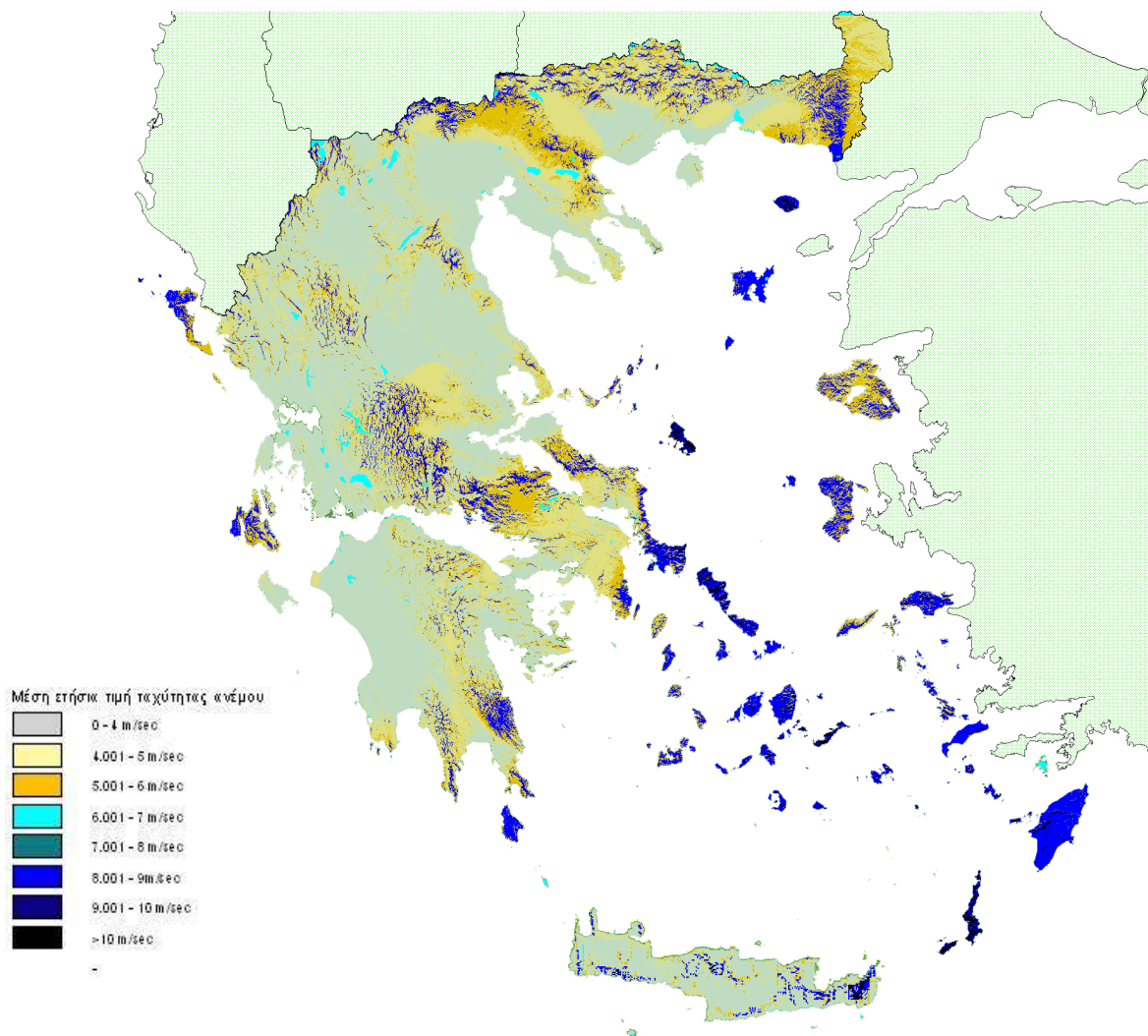
Αιολικός χάρτης Νομού Λασιθίου από Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας



• • • | Αιολικός χάρτης Κρήτης
από Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας

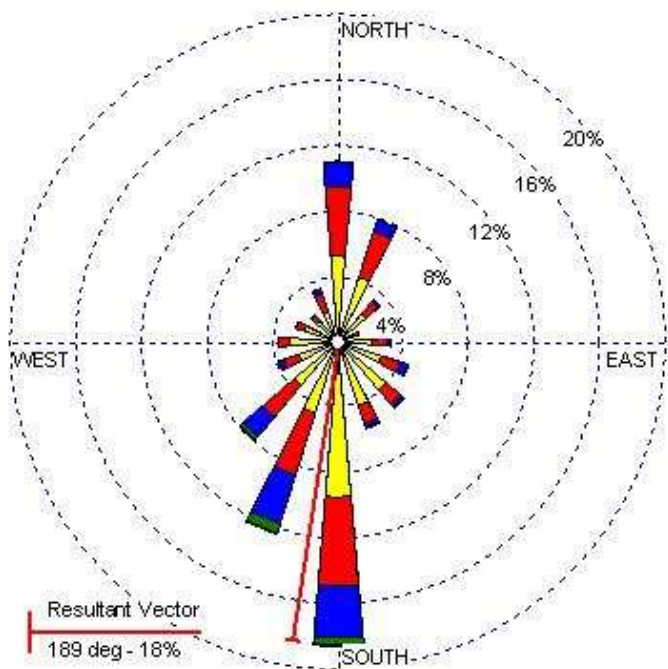


Αιολικός χάρτης Ελλάδας από Κ.Α.Π.Ε.





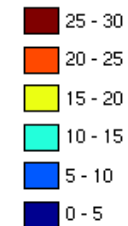
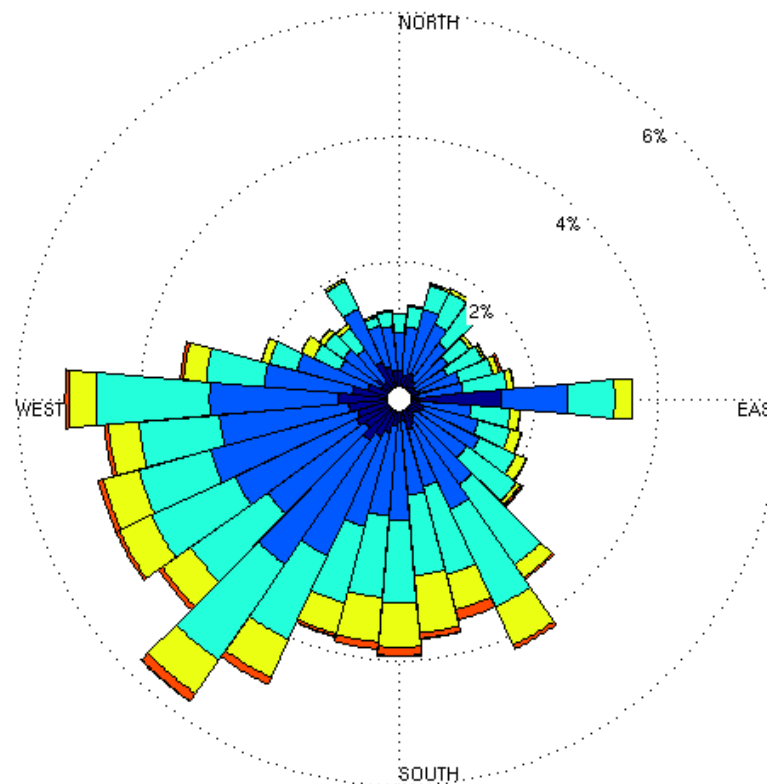
Ροδόγραμμα ταχύτητας ανέμου



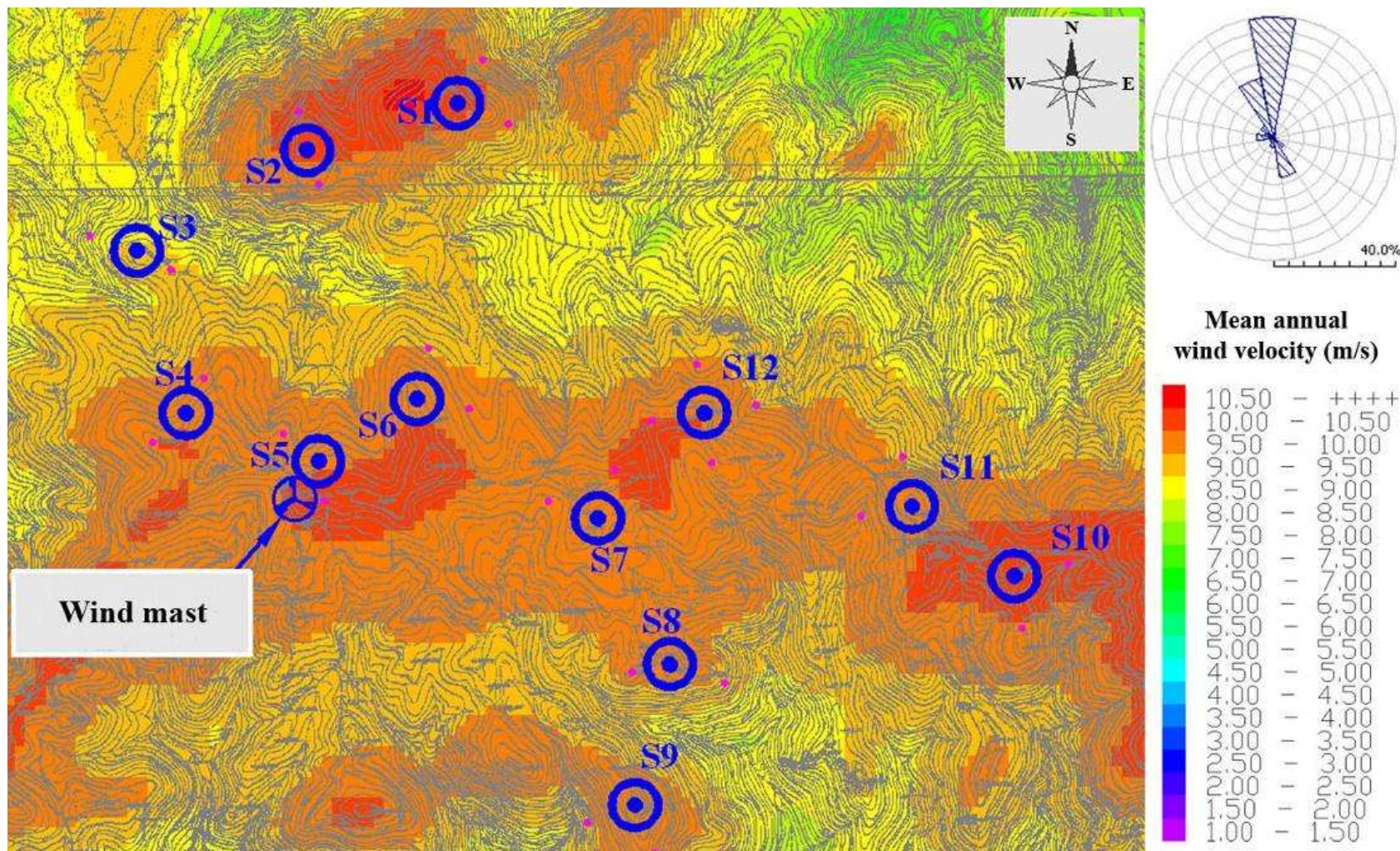
WIND SPEED
(Knots)



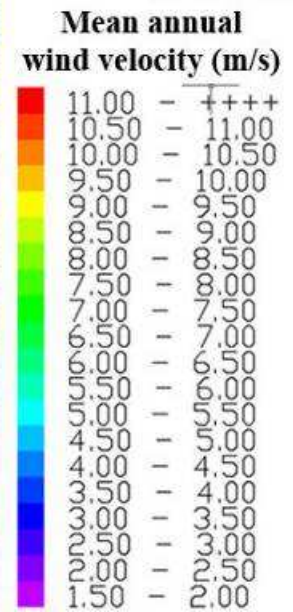
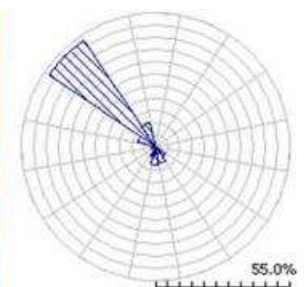
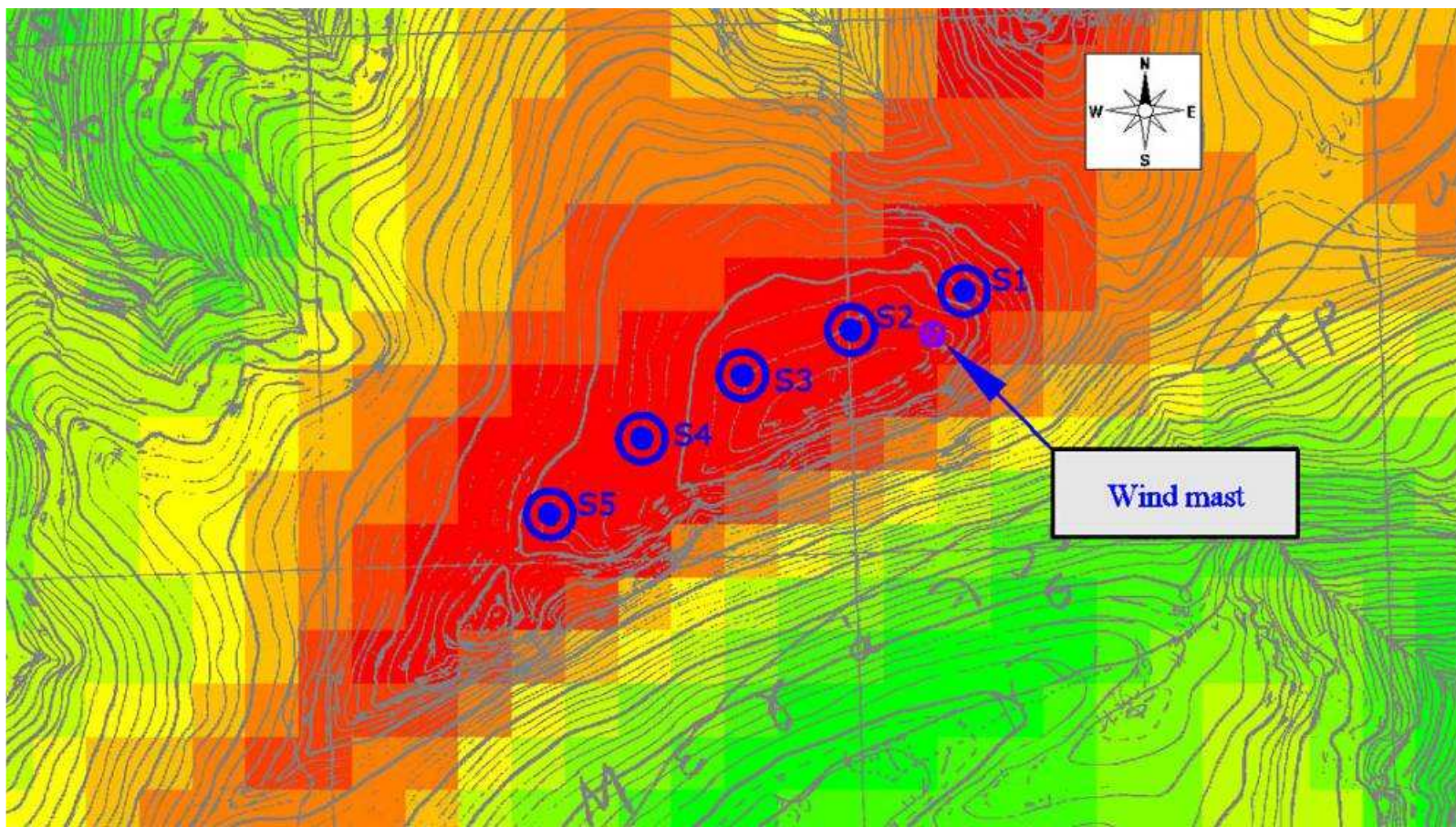
Calms: 2.59%



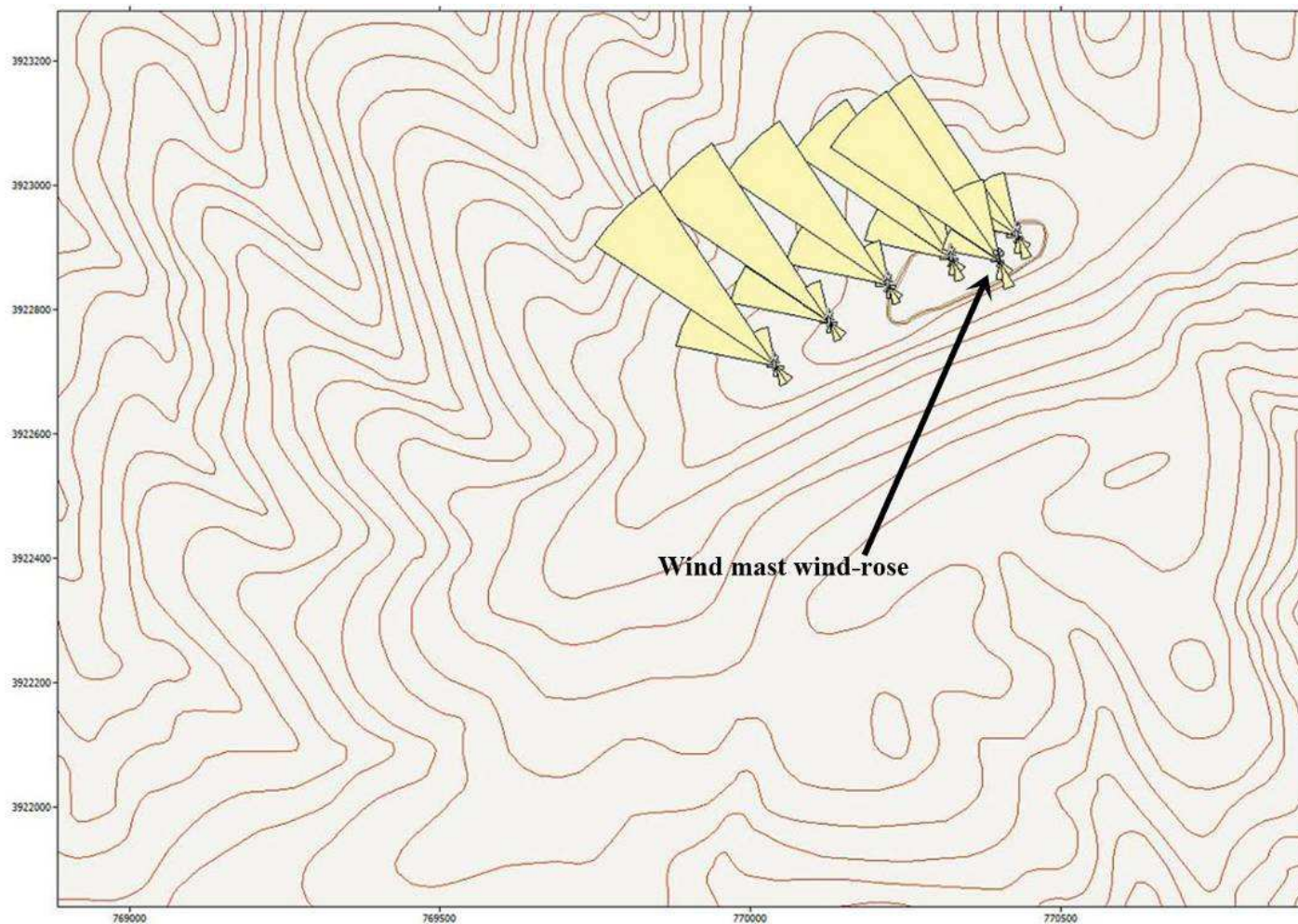
Αιολικός χάρτης περιοχής εγκατάστασης αιολικού πάρκου



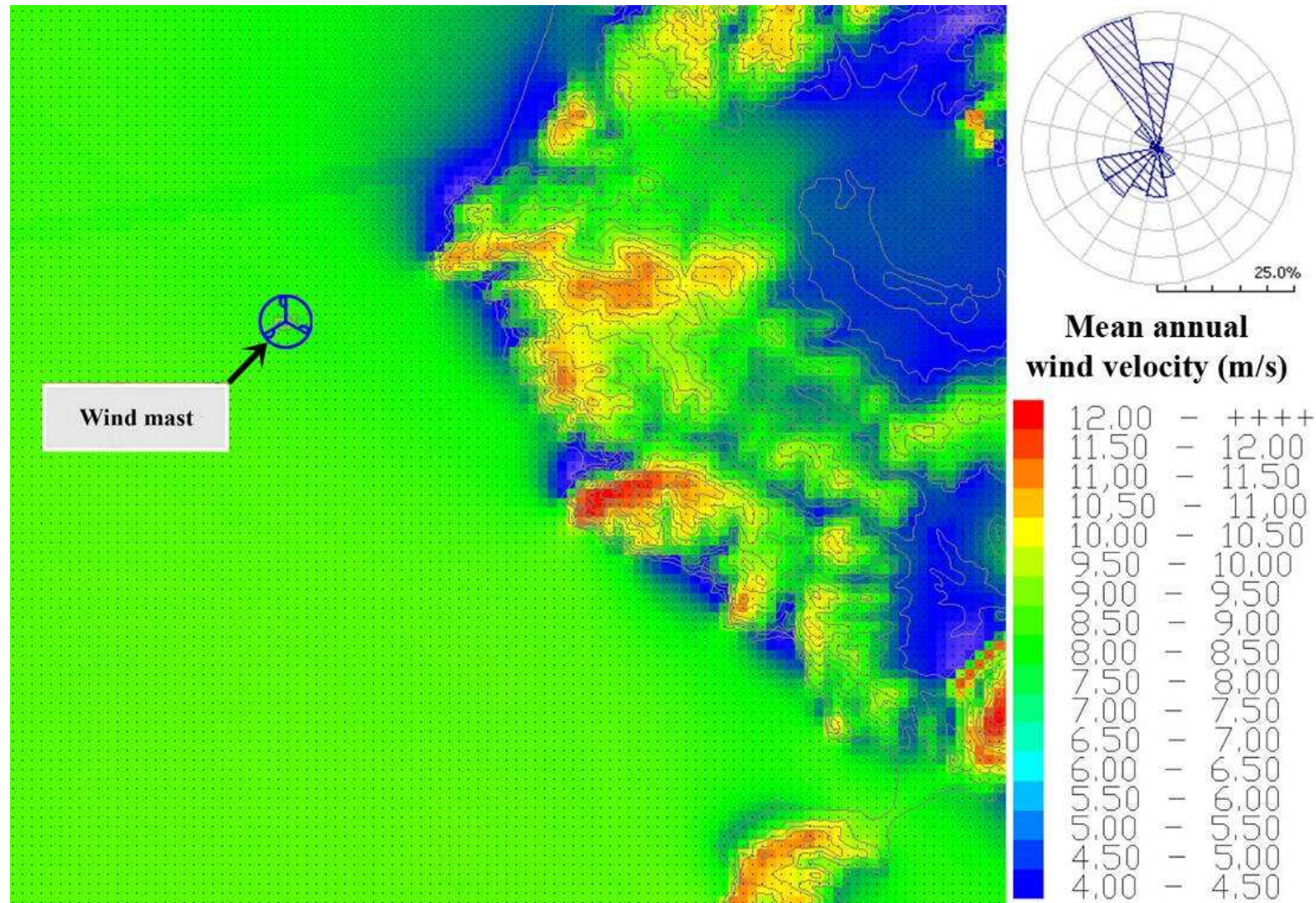
Αιολικός χάρτης περιοχής εγκατάστασης αιολικού πάρκου



Χάρτης ροδογραμμμάτων στις θέσεις εγκατάστασης Α/Γ



Αιολικός χάρτης περιοχής υπεράκτιου αιολικού πάρκου



Αποτελέσματα εκτίμησης αιολικού δυναμικού

- Μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου: προσδιορίζει ενεργειακό περιεχόμενο.
- Επίπεδο τύρβης: για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων που μπορούν να οδηγήσουν σε γήρανση το υλικό.
- Μέγιστη τιμή της εμφανιζόμενης ταχύτητας ανέμου: για εκτίμηση της μηχανολογικής αστοχίας.
- Καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας: για τον υπολογισμό του ενεργειακού οφέλους.
- Κατεύθυνση του ανέμου: ροδόγραμμα ανέμου.



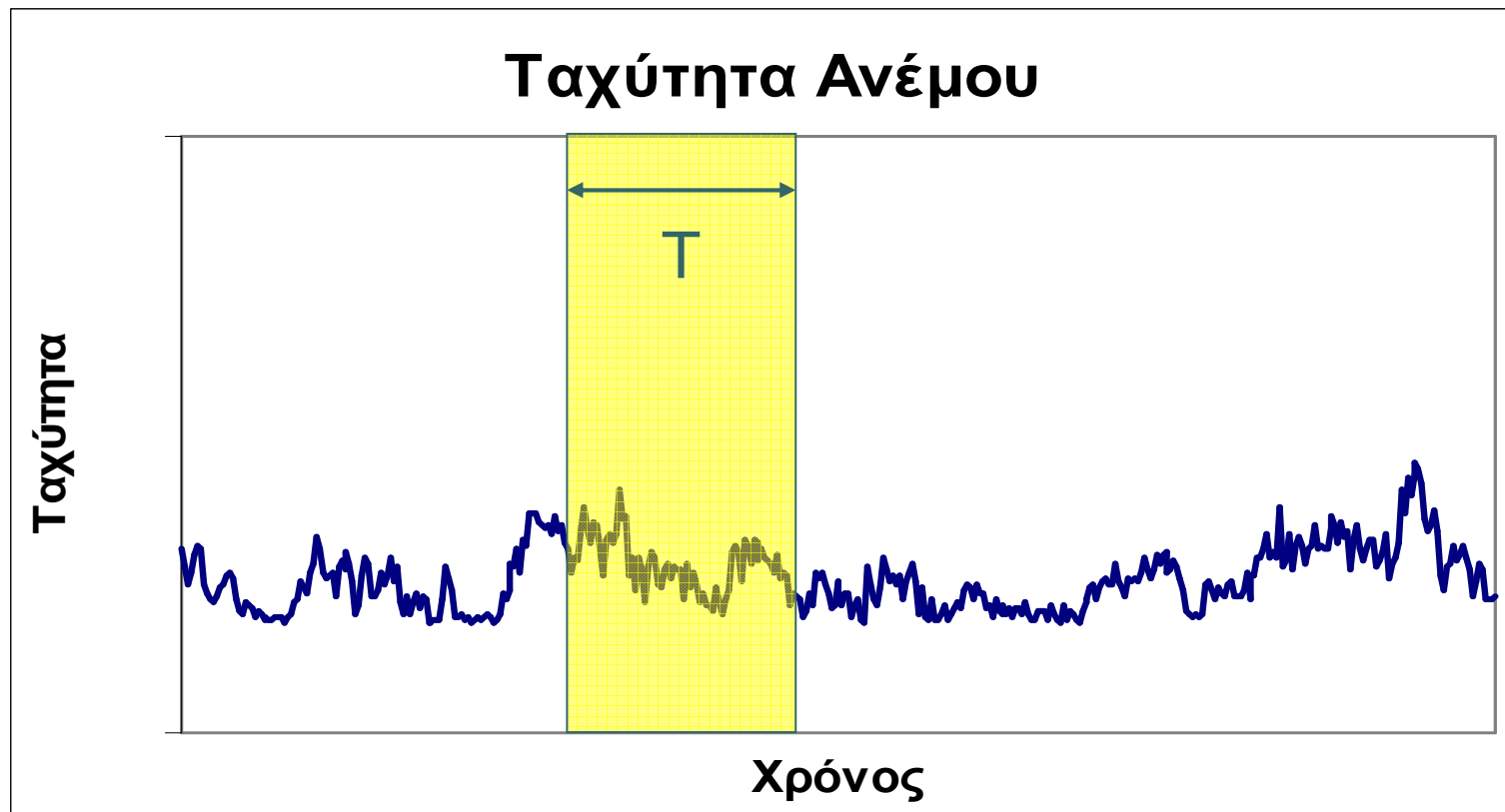
Ταχύτητα ανέμου

- Ιδιαίτερα μεταβλητό μέγεθος με σημαντικές μεταβολές μέσα στο χρονικό διάστημα
- 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 τη μέση τιμή:

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

Μέση ταχύτητα ανέμου

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

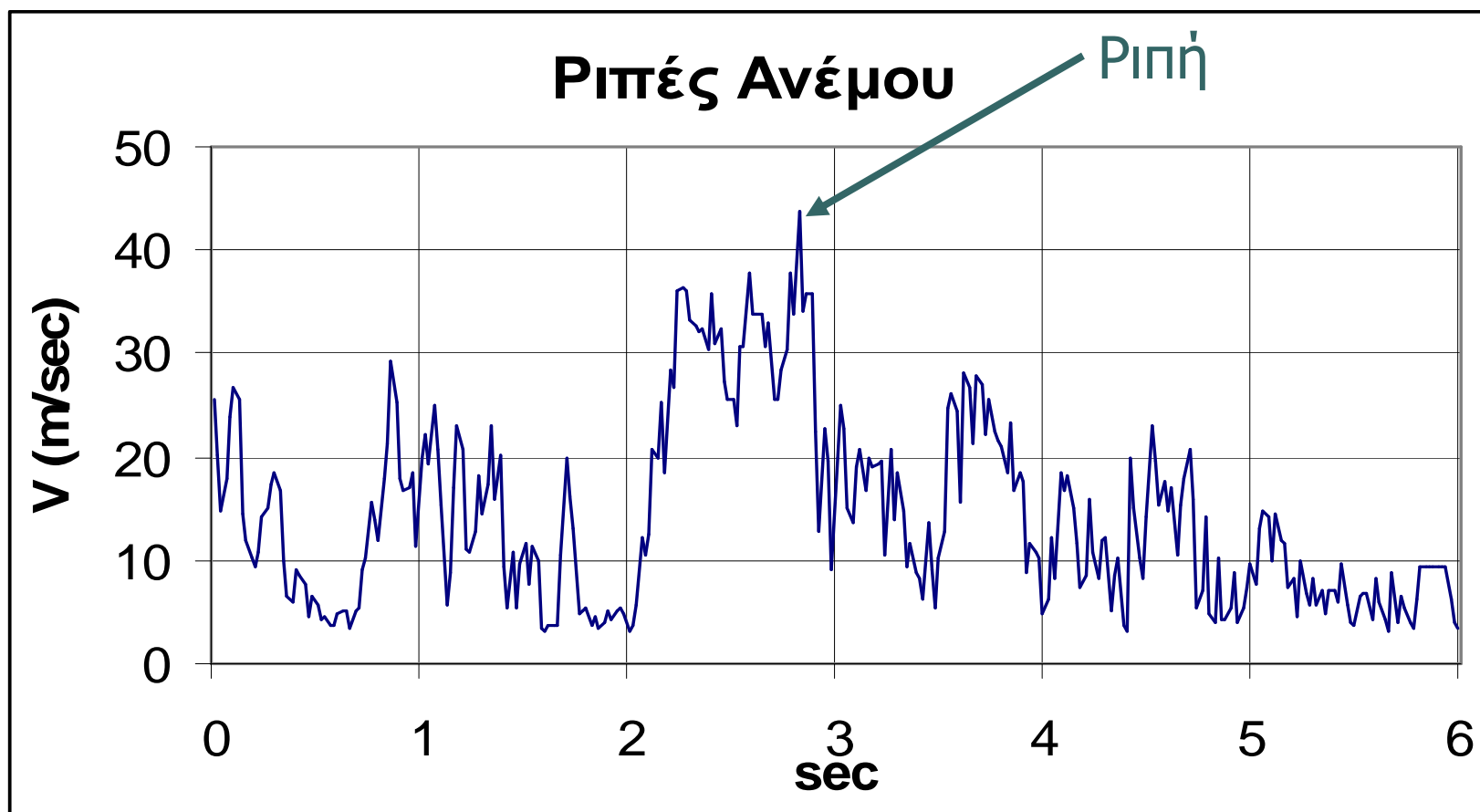




Ριπή ανέμου

- 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.

● ● ● | Ριπή ανέμου



• • • | Τύρβη

Τύρβη:

- Σημασία: ταραχή, θόρυβος, αταξία, αναστάτωση.
- Προέλευση: από το αρχαίο τυρβάζω = ανακατεύω, ανακινώ
- Παράγωγα: λατινικά turba = δίνη, στρόβιλος και turbo = τaráσσω, συγχέω.
- Η Τύρβη ήταν μία αρχαία ελληνική τοπική θρησκευτική εορτή, που γινόταν στο όρος Χάον της βόρειας Πελοποννήσου, δίπλα στον ποταμό Εράσινο, προς τιμή του Διονύσου. Κατά τη διάρκεια της Τύρβης λάβαινε χώρα ένας διθυραμβικός χορός, η «Τυρβασία», και μία μελωδική εκτέλεση μουσικής με πνευστά όργανα (αυλούς), η λεγόμενη «σικιννοτύρβη».

• • • | Τύρβη ανέμου

- Τυπική απόκλιση ταχύτητας του αέρα γύρω από τη 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 τύρβης του αέρα ορίζεται ως (σ_v η τυπική απόκλιση):

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

• • • | Τύρβη ανέμου

Η ένταση της τύρβης εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και μπορεί να υπολογιστεί με βάση το μήκος τραχύτητας z_0 :

$$I = \frac{1}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad \text{Για } z_0 \leq 0.20\text{m}$$

$$I = \frac{-0.14 \ln z_0 + 0.78}{\ln \frac{z}{z_0}} \quad \text{Για } z_0 > 0.20\text{m}$$

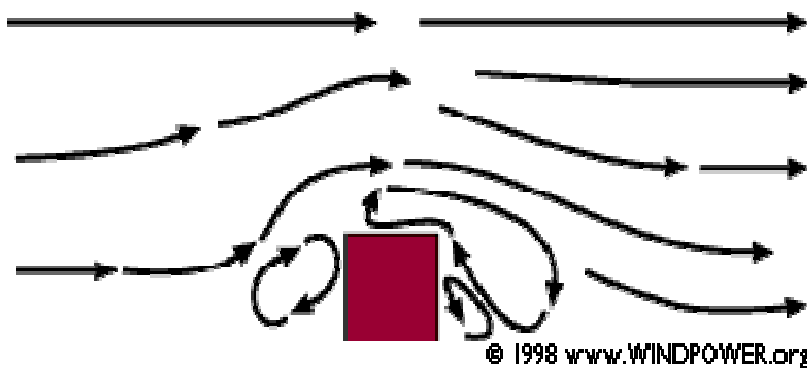


Τύρβη ανέμου

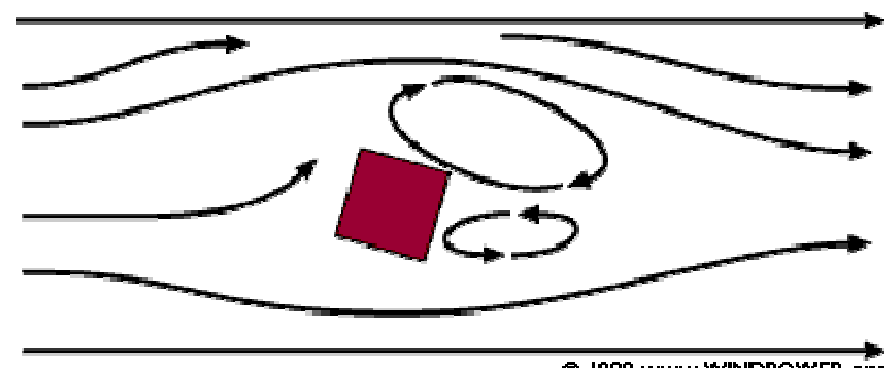
Η τύρβη προκαλείται από οποιοδήποτε στοιχείο μπορεί να εισάγει ανωμαλίες στη ροή, ιδιαίτερα δε λόγω της ύπαρξης των στοιχείων τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους.

Επί της ουσίας, η τύρβη του ανέμου δημιουργεί τυχαίους στροβιλισμούς του αέρα.

Οι στρόβιλοι επηρεάζουν τόσο την παρεχόμενη ισχύ από τον άνεμο όσο και την αντοχή της αιολικής εγκατάστασης.



© 1998 www.WINDPOWER.org



© 1998 www.WINDPOWER.org

Μεταβολή της πυκνότητας του αέρα

Μεταβολή της πυκνότητας ρ με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας:

Υψόμετρο (σε πόδια)*	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας	Υψόμετρο (σε πόδια)	Ποσοστό (%) Σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας
500	99	6000	83
1000	97	7000	80
2000	94	8000	77
3000	91	9000	74
4000	88	10000	70
5000	86		

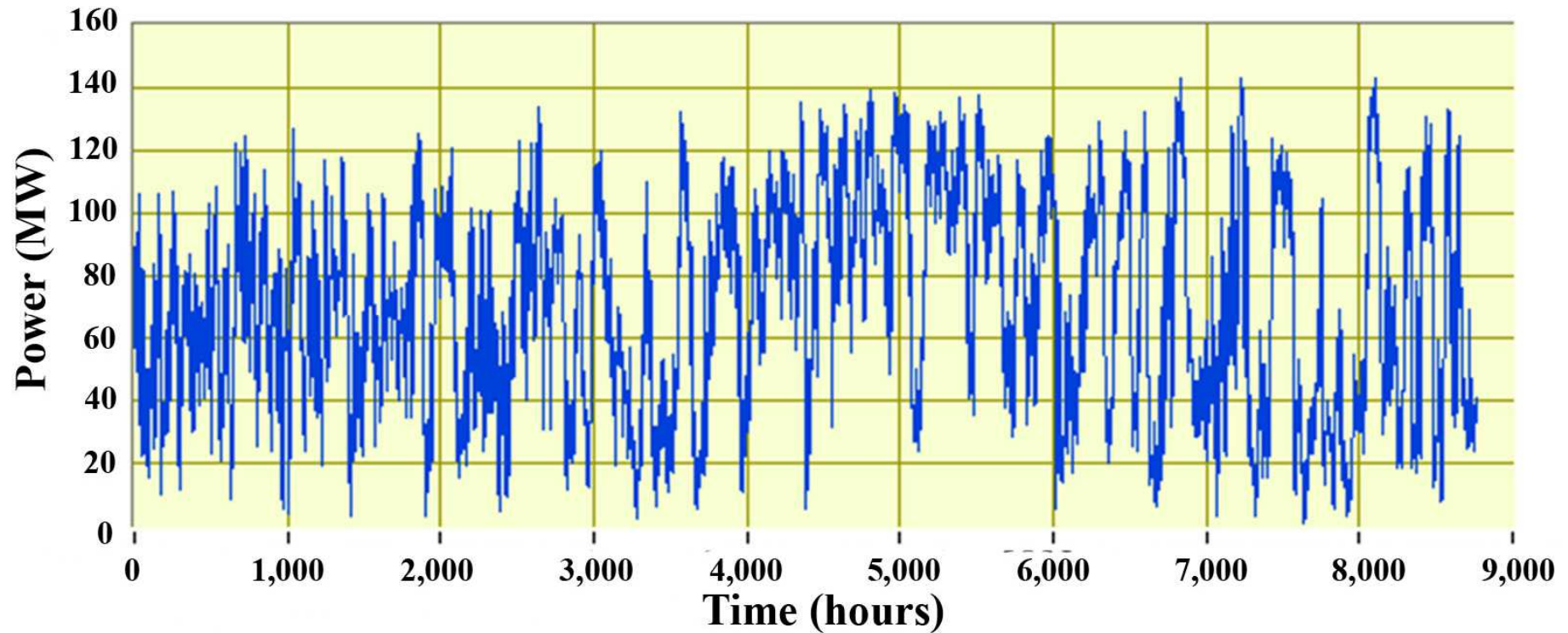
* 1 πόδι = 0.3048m

$$\rho = 1.225 \cdot \frac{288.15}{T} \cdot \frac{P}{1013.3}$$

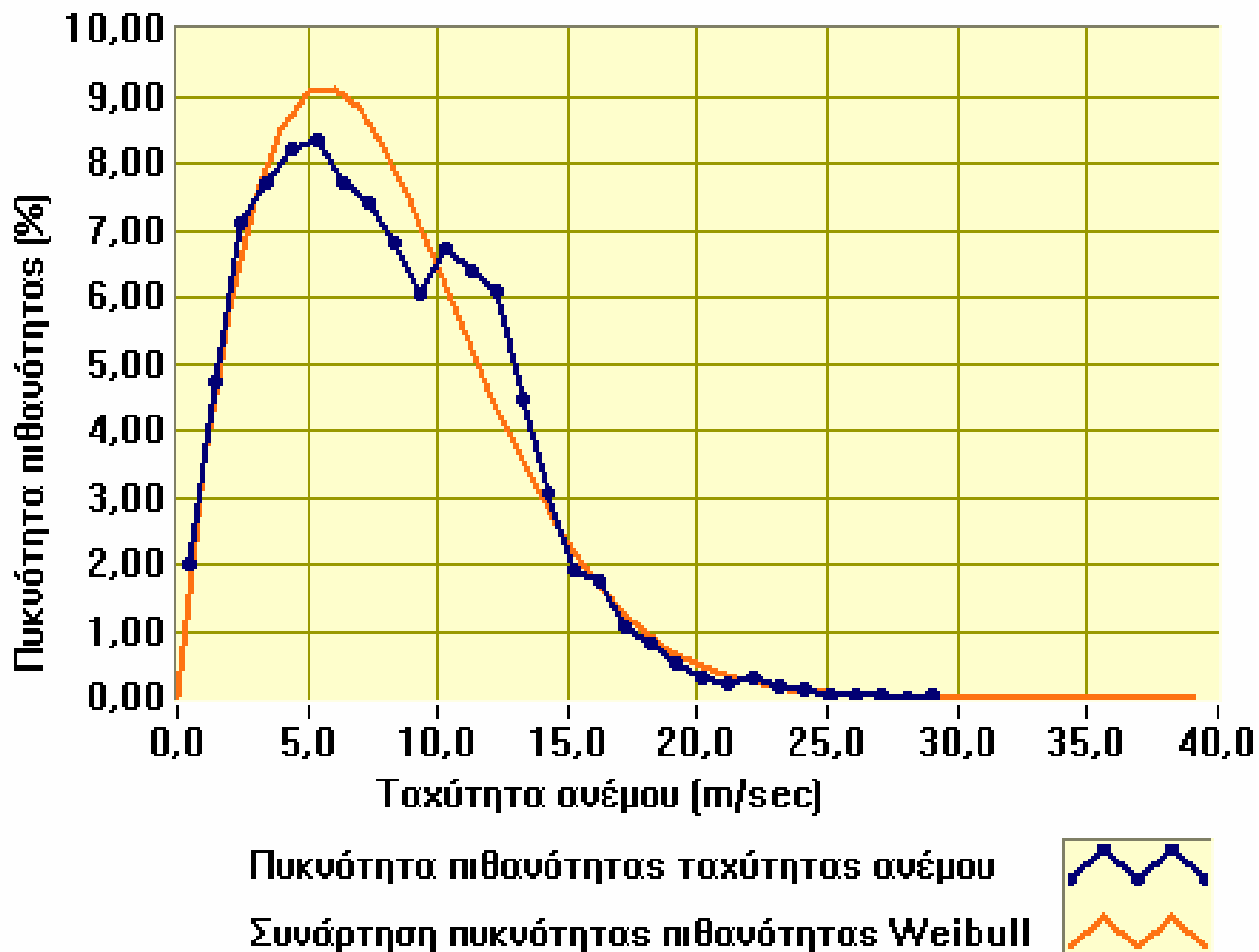
P: ατμοσφαιρική πίεση σε mb
T: Θερμοκρασία του αέρα σε °K

Η μεταβολή του πυκνότητας του αέρα μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού είναι της τάξης του 10% (~1,225 kgr/m³)

Ετήσια χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου



Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας ταχύτητας ανέμου



Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας Weibull

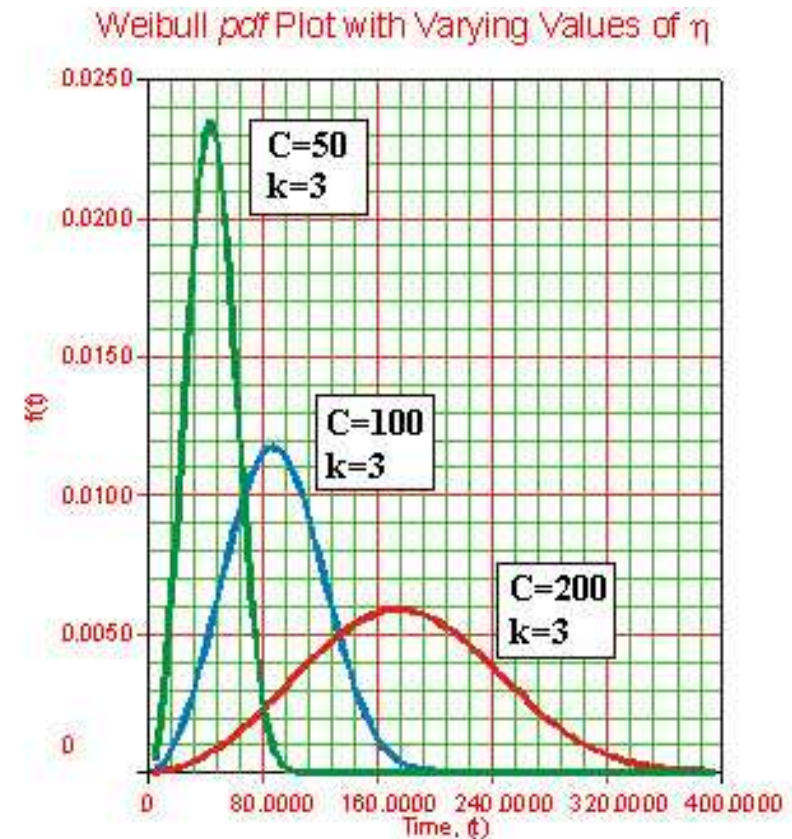
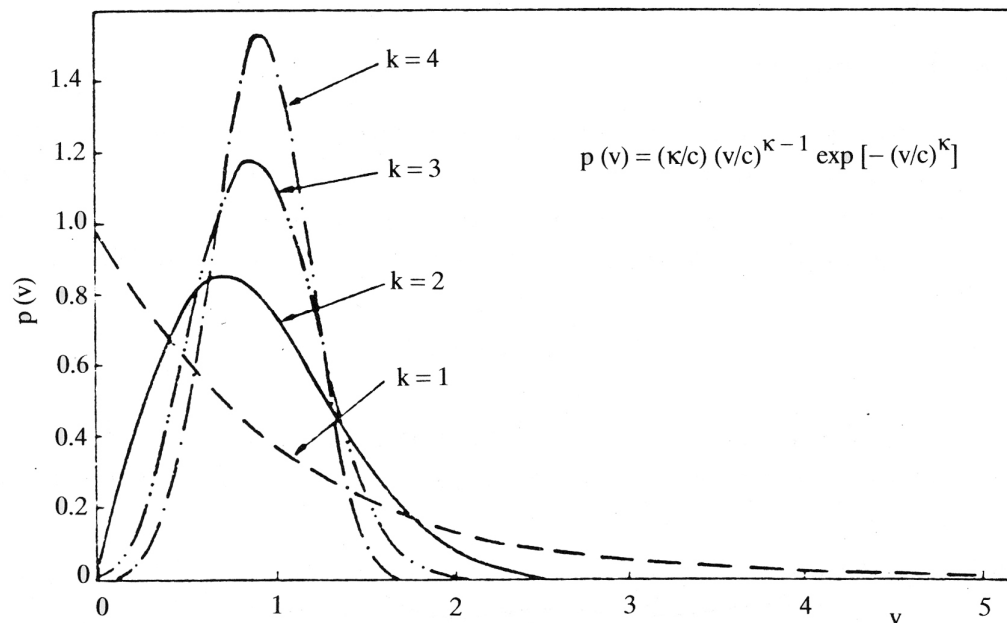
- Η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100m από το έδαφος.
- Εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου V να βρίσκεται στην περιοχή $V-dV/2$ και $V+dV/2$

$$P(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k}$$

- Οι παράμετροι C και k χαρακτηρίζουν την κατανομή πιθανότητας του ανέμου, συνεπώς χαρακτηρίζουν το αιολικό δυναμικό, άρα καθορίζονται από τις παραμέτρους που καθορίζουν και το αιολικό δυναμικό.

Παράμετροι C και k πυκνότητας πιθανότητας Weibull

- Η παράμετρος C ονομάζεται παράμετρος μεγέθους και καθορίζει τη θέση της καμπύλης σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα.
- Η παράμετρος k ονομάζεται παράμετρος μορφής ή κλίση και καθορίζει τη διασπορά των τιμών.



Υπολογισμός παραμέτρων Weibull

Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις ταχύτητας ανέμου, υπολογίζουμε τα k και C με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

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

$$x = \ln V_x \quad Y = A + B \cdot X$$

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

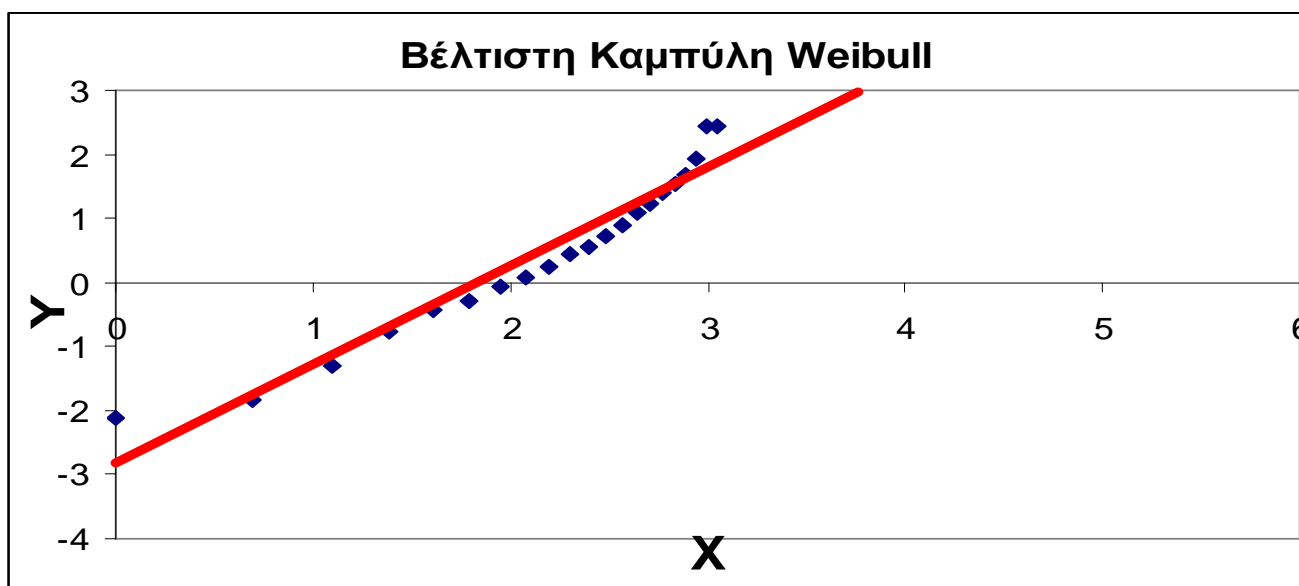
$$B = \frac{n \cdot (\sum x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$



Υπολογισμός παραμέτρων Weibull

Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμες οι μετρήσεις ταχύτητας ανέμου, υπολογίζουμε τα k και C με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων:

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



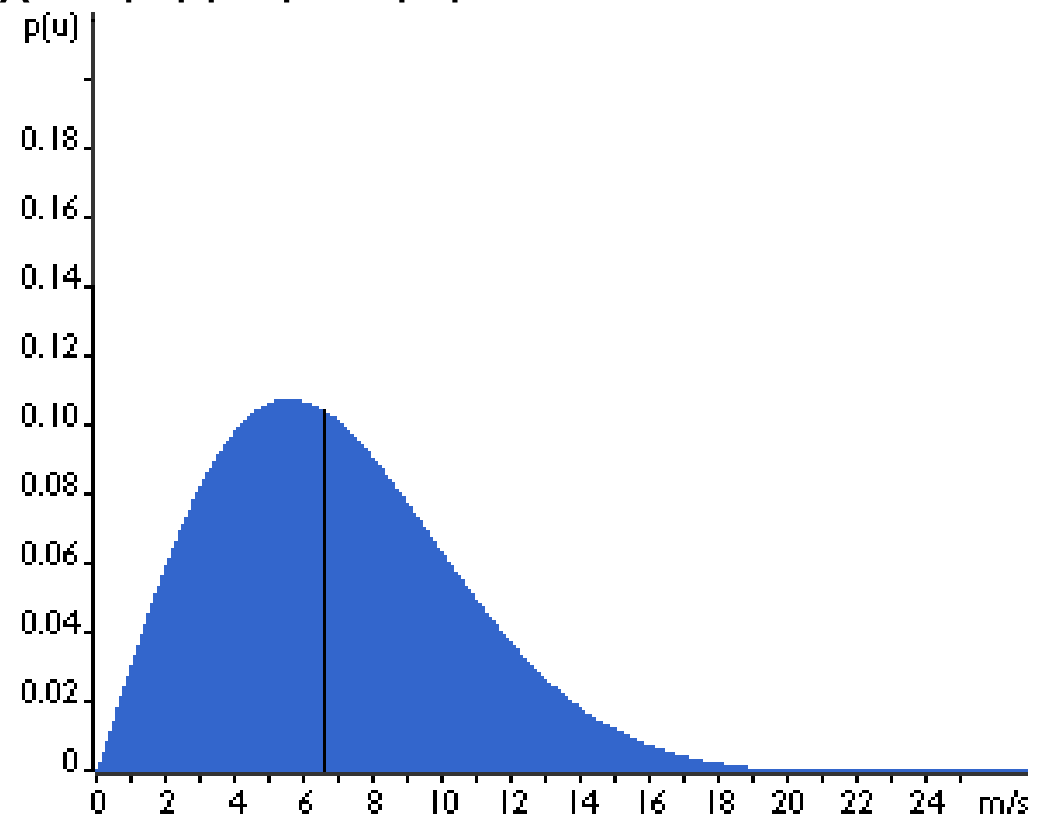
Υπολογισμός παραμέτρων Weibull

Στην περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμες μετρήσεις ταχύτητας ανέμου, υπολογίζονται τα k και C με αριθμητικές μεθόδους και με μοντέλα αναγωγής συναρτήσεων του αναγλύφου της περιοχής.

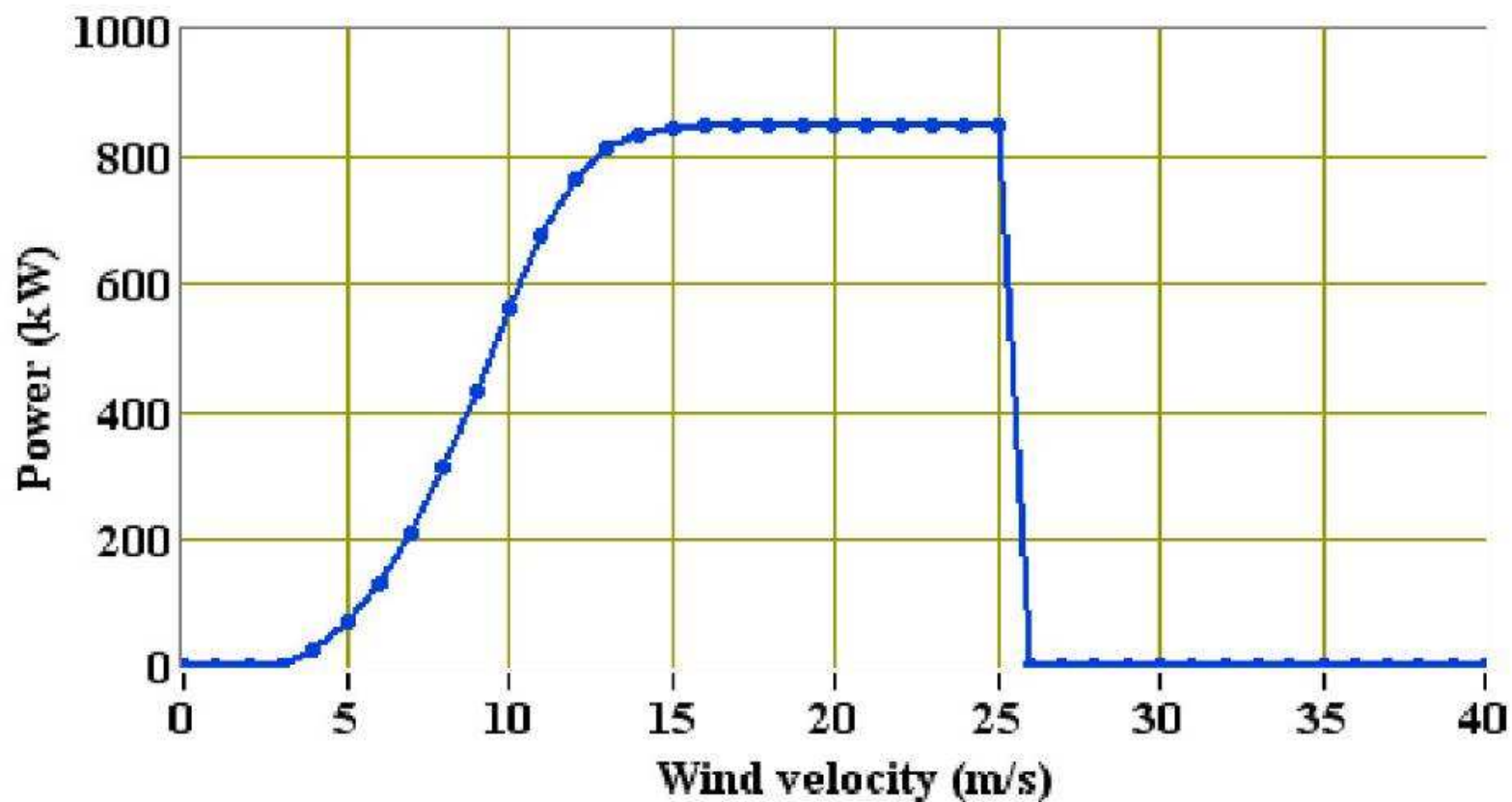
Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός βασίζεται σε τουλάχιστον ένα σημείο με διαθέσιμες μετρήσεις και στην ανάπτυξη χάρτη αιολικού δυναμικού με κατάλληλα λογισμικά.

Παράδειγμα κατανομής Weibull

- Συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη=1.
- Ο μέσος της κατανομής=6,6m/sec (ίσα εμβαδά), δηλαδή το μισό χρόνο η ταχύτητα του ανέμου έχει τιμή μικρότερη από 6,6m/sec και τον άλλο μισό μεγαλύτερη από 6,6m/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.



Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

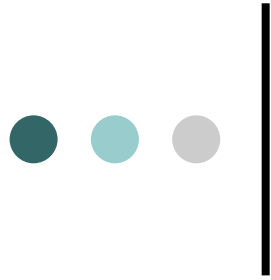


Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής ενέργειας

Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Πιθανότητα Weibull (%)	Αριθμός ωρών ετησίως	Καμπύλη ισχύος A/Γ (kW)	Παραγωγή ενέργειας (kWh)
0	0,00%	0	0,0	0
1	3,20%	280	0,0	0
2	5,30%	464	0,0	0
3	6,80%	596	0,0	0
4	7,70%	675	27,0	18.212
5	8,30%	727	70,4	51.186
6	8,40%	736	130,0	95.659
7	8,30%	727	211,0	153.414
8	7,80%	683	314,0	214.550
...
14	3,40%	298	837,0	249.292
15	2,80%	245	846,0	207.507
16	2,20%	193	849,0	163.619
17	1,70%	149	850,0	126.582
...
25	0,10%	9	850,0	7.446
Σύνολα	100,00%	8.760		3.183.184

● ● ● | Συντελεστής απασχόλησης Α/Π

- Ο λόγος της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το Α/Π σε ένα χρονικό διάστημα προς τη θεωρητική μέγιστη στο ίδιο χρονικό διάστημα.
- Αν $E_{πρ.}$ είναι η πραγματική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ένα Α/Π κατά το χρονικό διάστημα t και P_n είναι η ονομαστική ισχύς του Α/Π, τότε ο συντελεστής απασχόλησης C_f ισούται με:
$$C_f = E_{πρ.} / (P_n \cdot t)$$



Τύποι ανεμογεννητριών

Ταξινόμηση ανεμογεννητριών με το μέγεθος



Μικρές ($\leq 20\text{kW}$)

- Σπίτια
- Αγροκτήματα
- Μικρές απομονωμένες εφαρμογές



Μεσσαίες (20-250kW)

- Οικισμοί
- Υβριδικά συστήματα
- Αποκεντρωμένη παραγωγή



Μεγάλες (250kW - 5MW)

- Αιολικά πάρκα μεγάλη ισχύος
- Αποκεντρωμένη παραγωγή

● ● ● Διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών ανεμογεννητριών

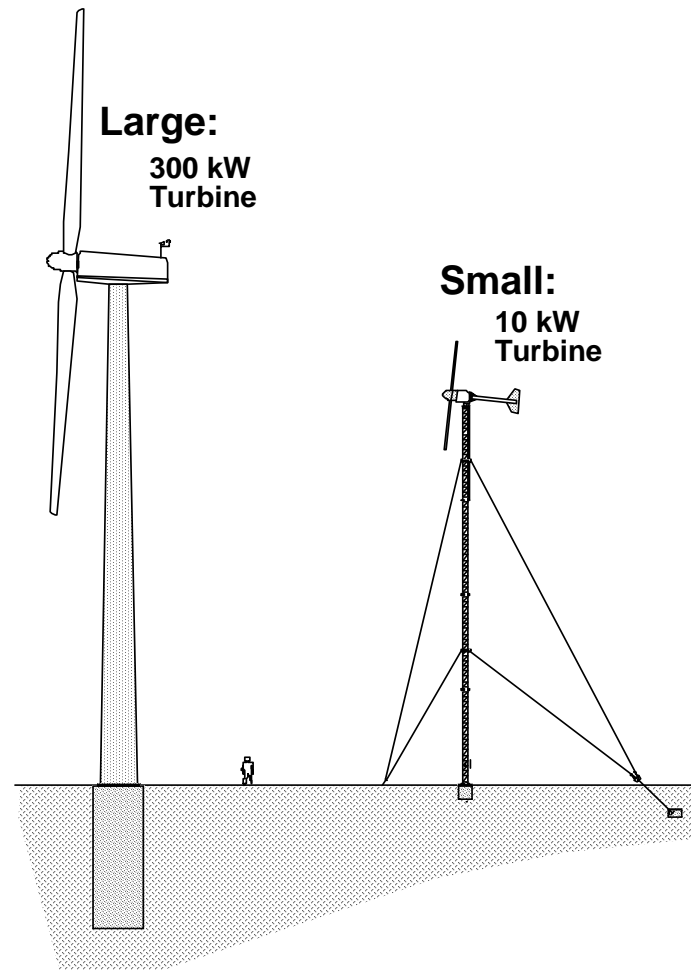
Μεγάλες ανεμογεννήτριες (250-5.000kW)

- Συνθέτουν πάρκα ισχύος εκατοντάδων MW
- Το συνολικό αρχικό ειδικό κόστος είναι της τάξης των 1.000€/kW
- Εγκαθίστανται σε περιοχές με μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου άνω των 6m/sec.

Μικρές ανεμογεννήτριες (0,3-20kW)

- Τροφοδοτούν μικρές αποκεντρωμένες καταναλώσεις
- Το συνολικό αρχικό ειδικό κόστος είναι της τάξης των 2.500-5.000€/kW
- Η αξιοπιστία και η χαμηλή συντήρηση είναι βασικές απαιτήσεις
- Εγκαθίστανται σε θέσεις με μέση ετήσια ταχύτητα τουλάχιστον 4m/sec.

Διαφορές μεταξύ μεγάλων και μικρών ανεμογεννητριών

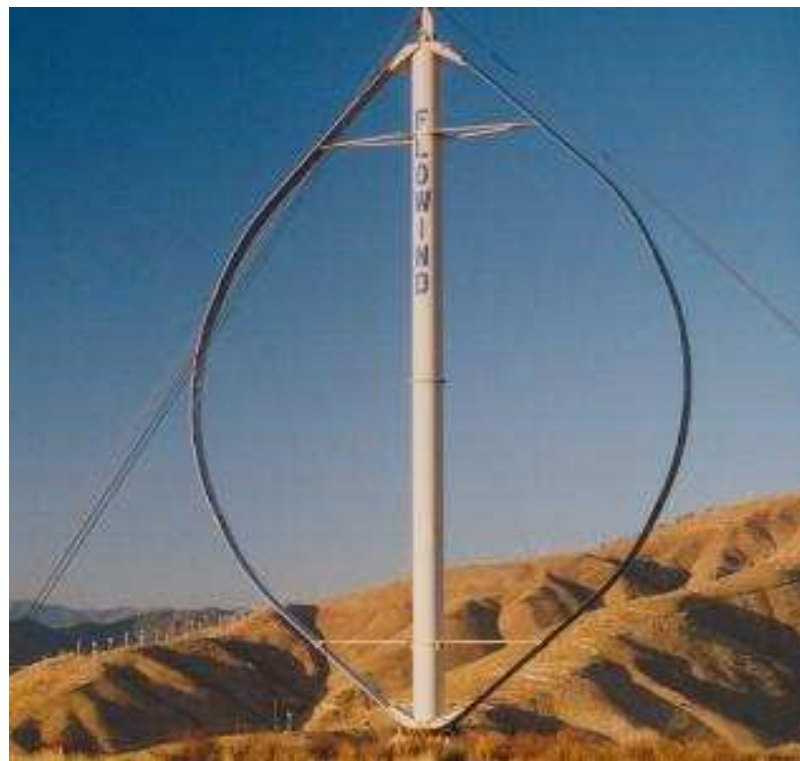
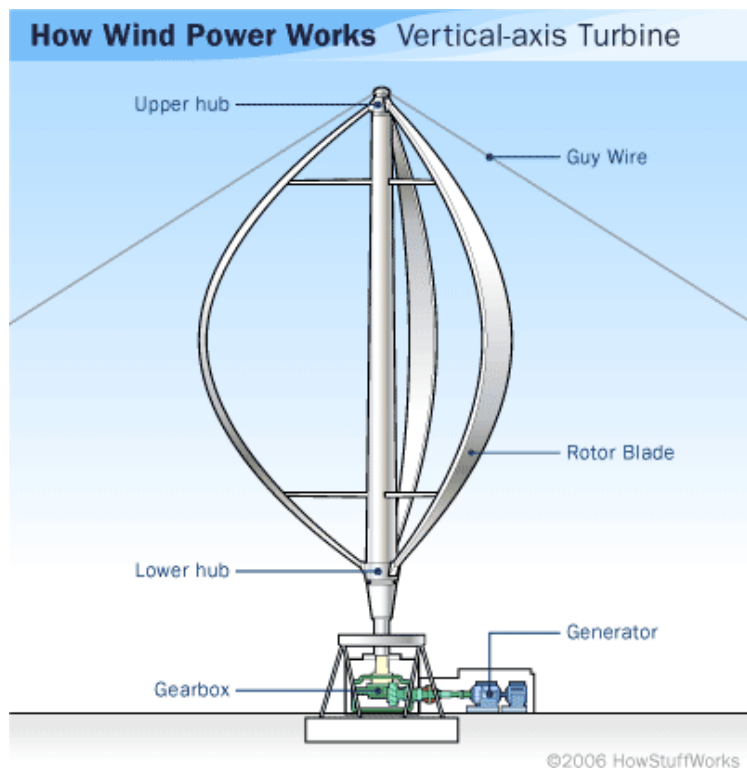




Α/Γ οριζοντίου άξονα



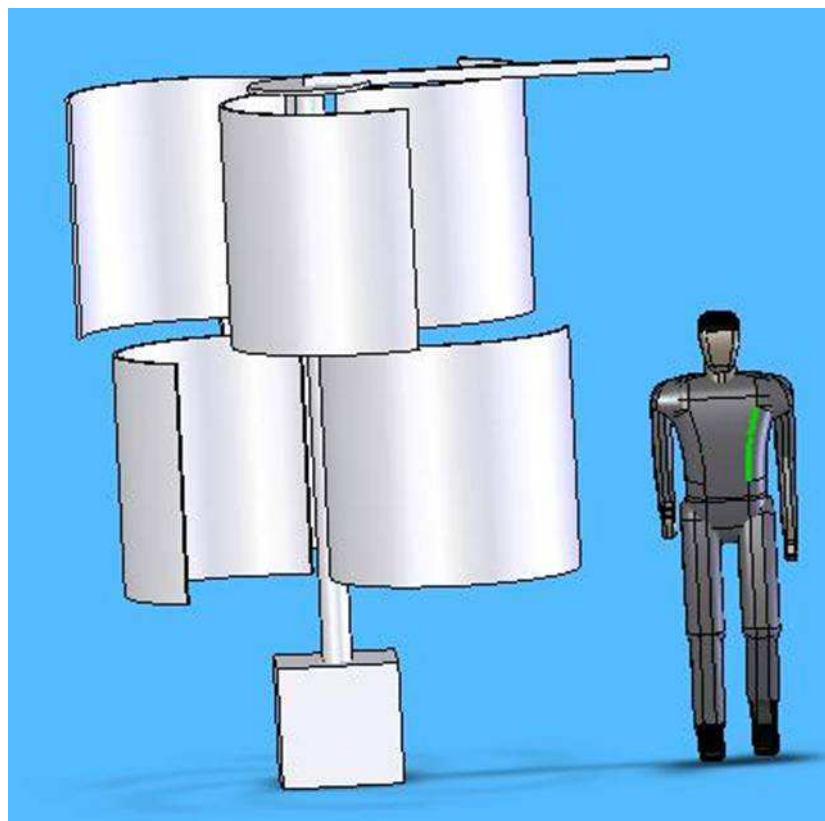
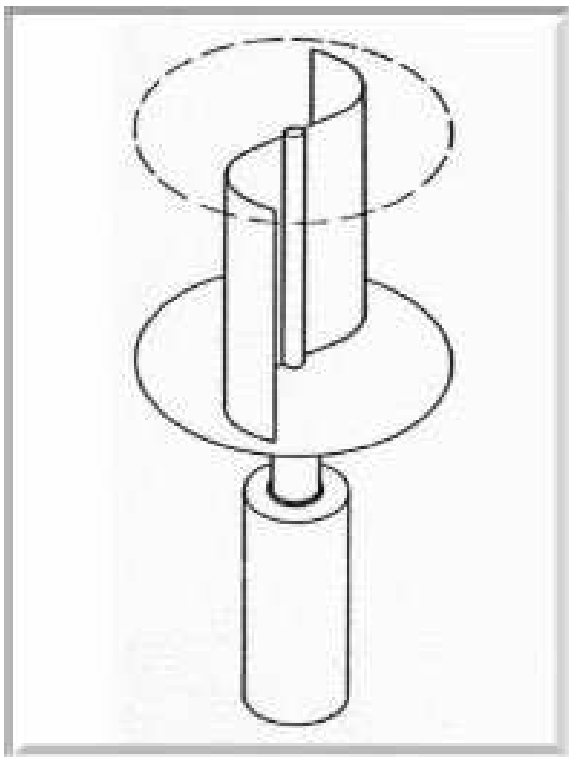
Α/Γ κατακόρυφου άξονα - Darrieus



● ● ● | Α/Γ κατακόρυφου άξονα - Darrieus



● ● ● | Α/Γ κατακόρυφου άξονα - Savonius





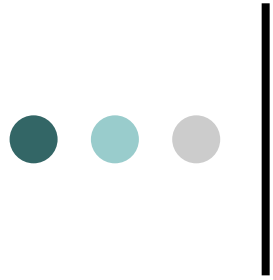
Α/Γ κατακόρυφου άξονα - Savonius





Α/Γ κατακόρυφου άξονα - Savonius

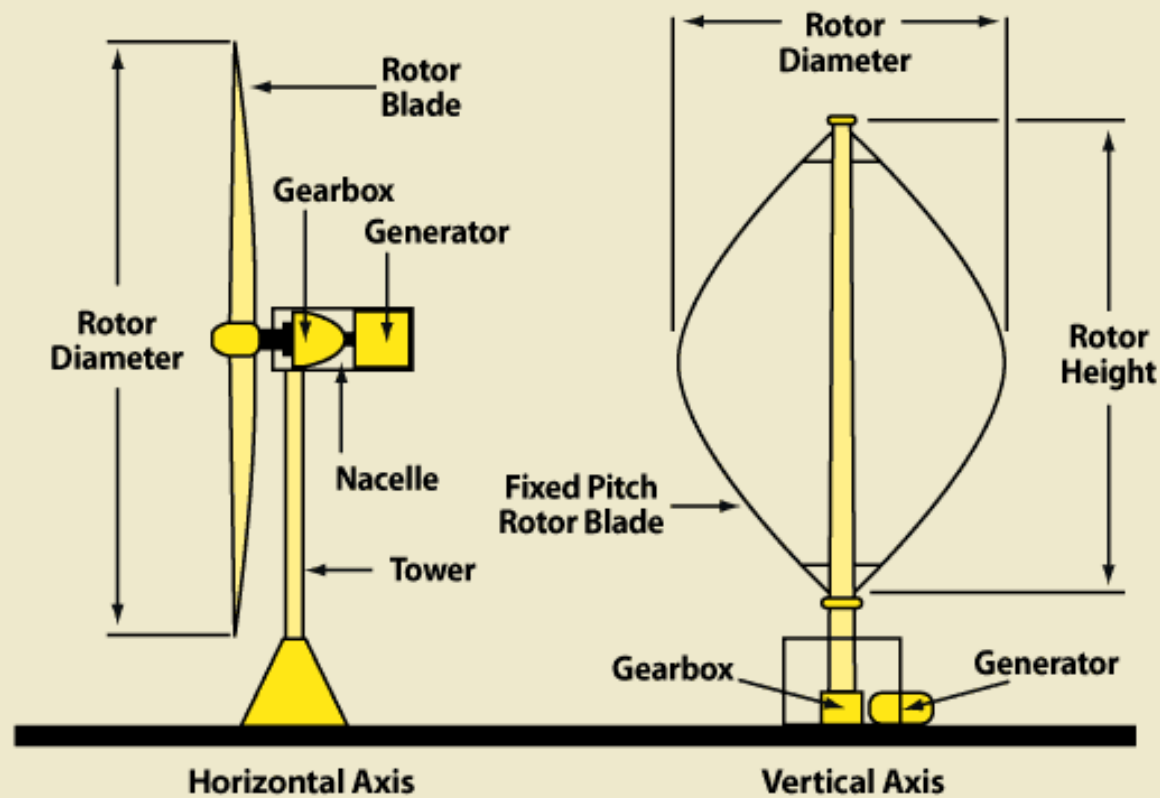




Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα

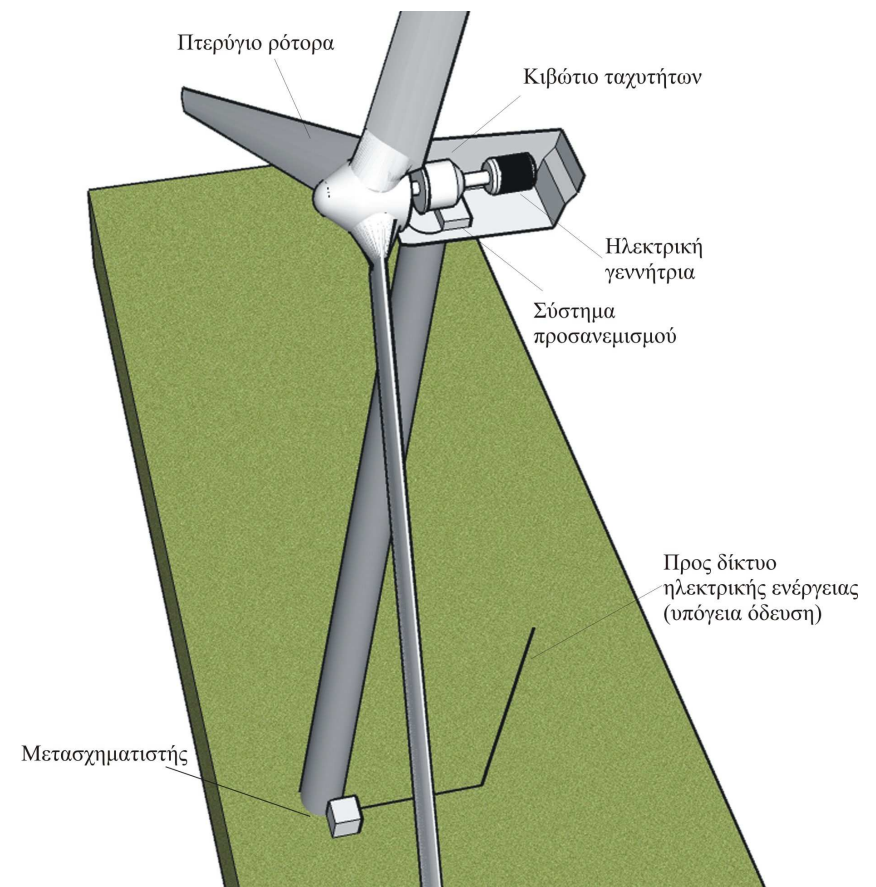
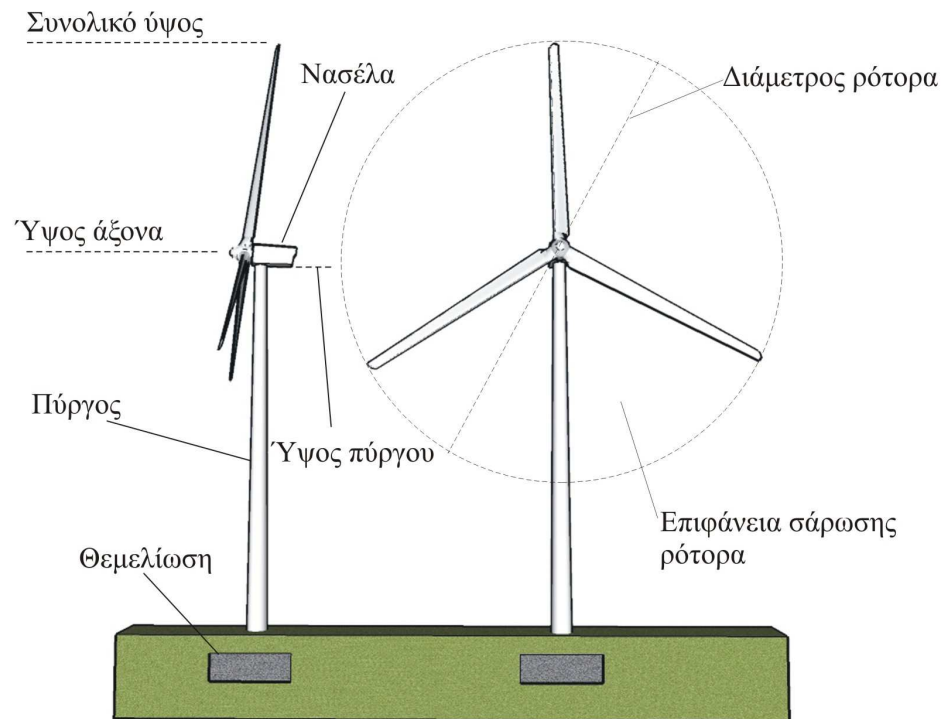
Βασικά μέρη ανεμογεννητριών

Horizontal-Axis and Vertical-Axis Wind Turbines

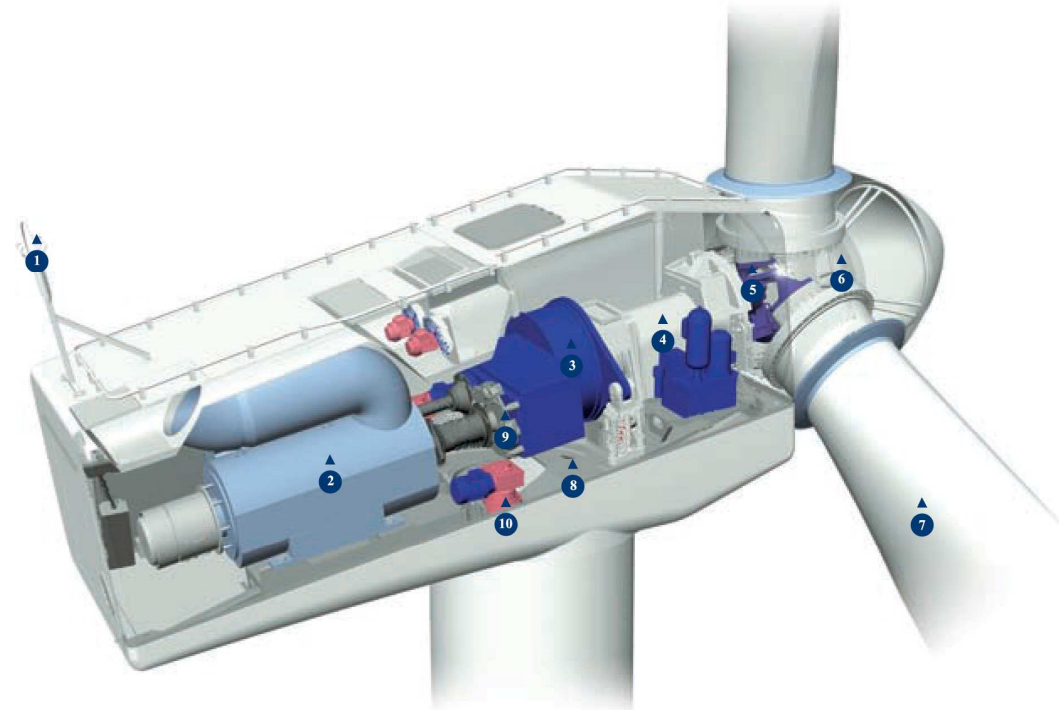


Source: American Wind Energy Association.

Βασικά μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

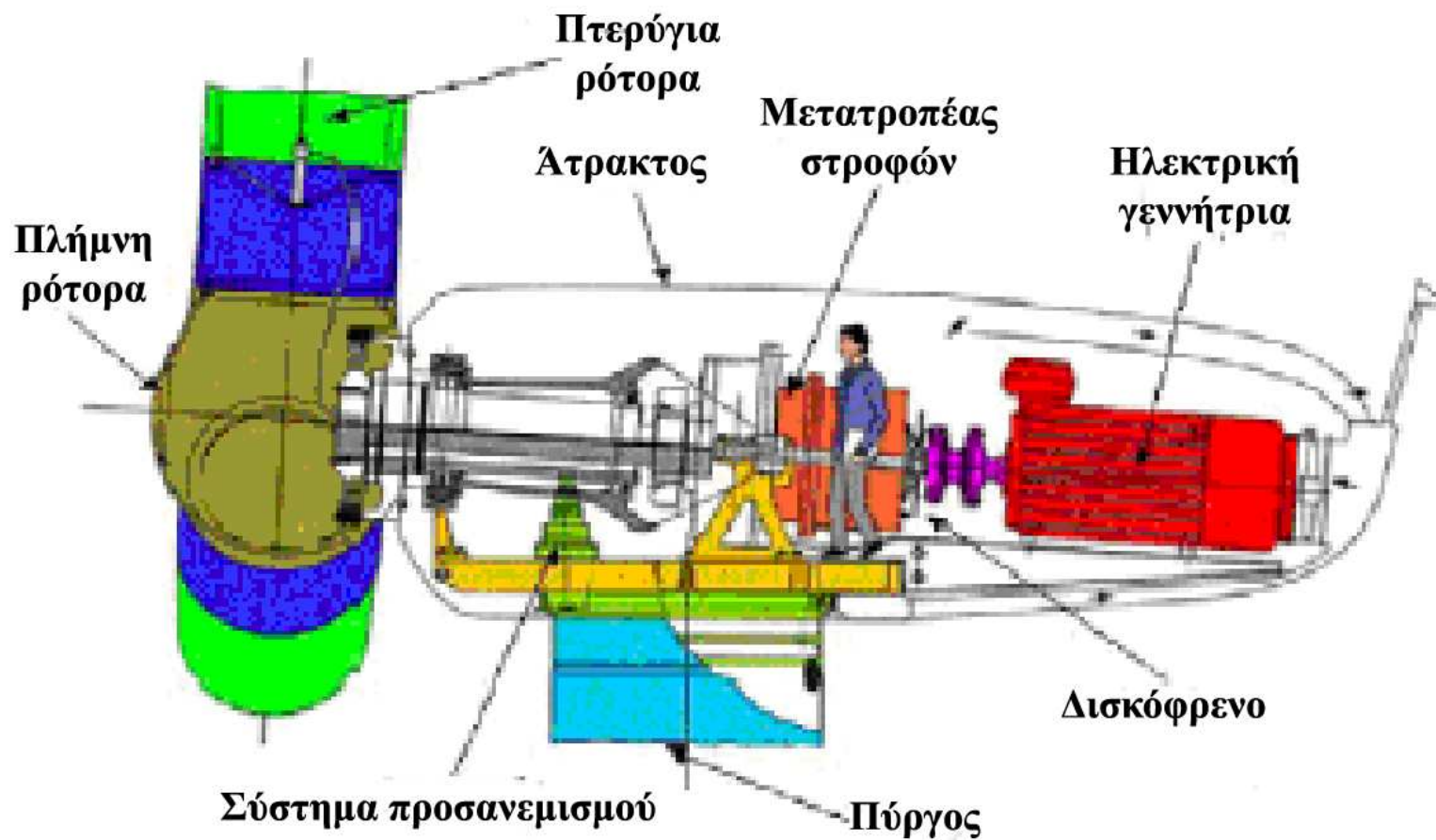


Βασικά μέρη νασέλας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα



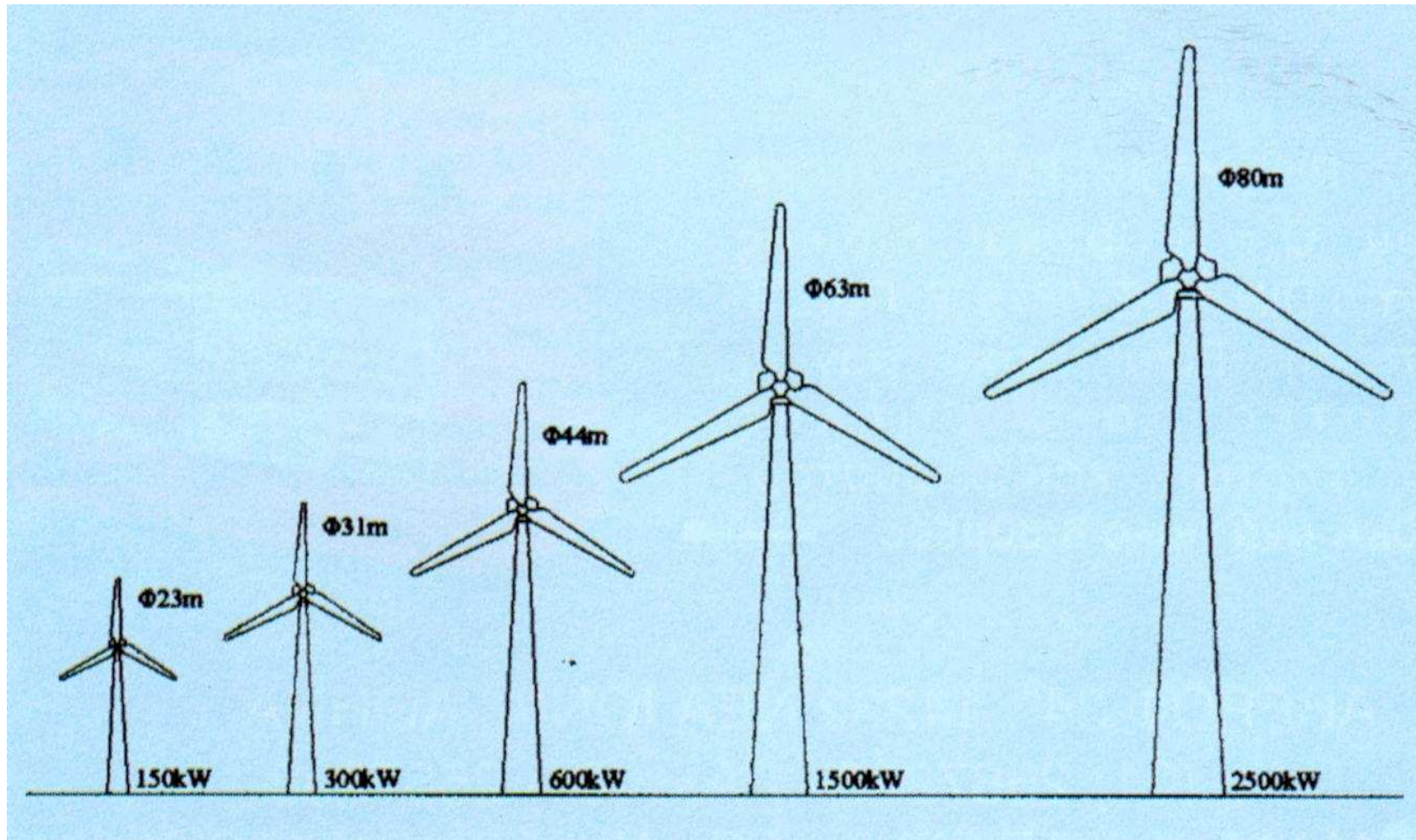
1. Ανεμόμετρο
2. Ηλεκτρική γεννήτρια
3. Κιβώτιο ταχυτήτων
4. Κύριος άξονας
5. Σύστημα ρύθμισης βήματος πτερυγίου (pitch system)
6. Πλήμνη
7. Πτερύγιο
8. Έδραση μηχανής
9. Μηχανικό φρένο άξονα
10. Σύστημα προσανεμισμού νασέλας (yaw system)

Πλήμνη Α/Γ οριζοντίου άξονα





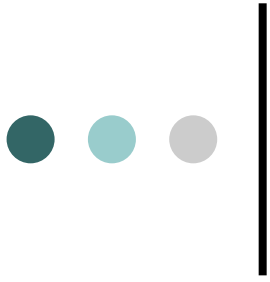
Εξέλιξη μεγέθους ανεμογεννητριών





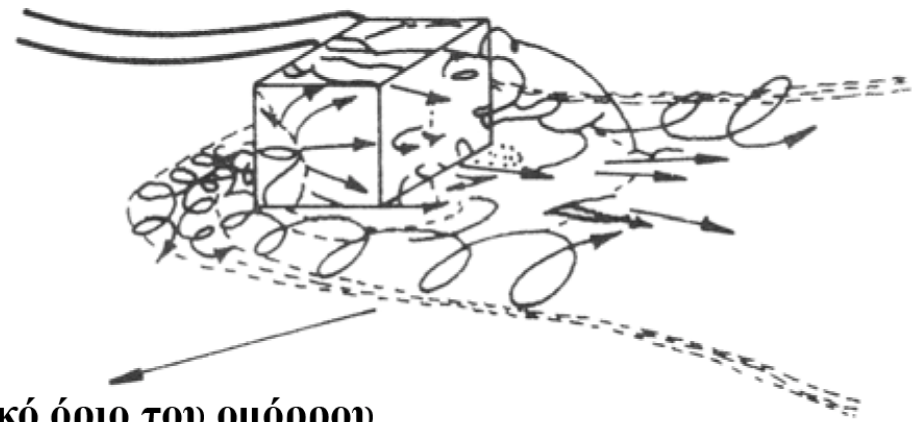
Μέγεθος ανεμογεννητριών

- Χαρακτηριστικές τιμές μιας μηχανής ισχύος 1.500kW
 - Συνολικό βάρος: 150tn
 - Βάρος πύργου: 100tn
 - Βάρος πτερωτής: 20tn
 - Βάρος κουβουκλίου μηχανισμών: 30tn
- Για την τοποθέτησή τους απαιτούνται γερανοί ανυψωτικής ικανότητας 1.200tn.



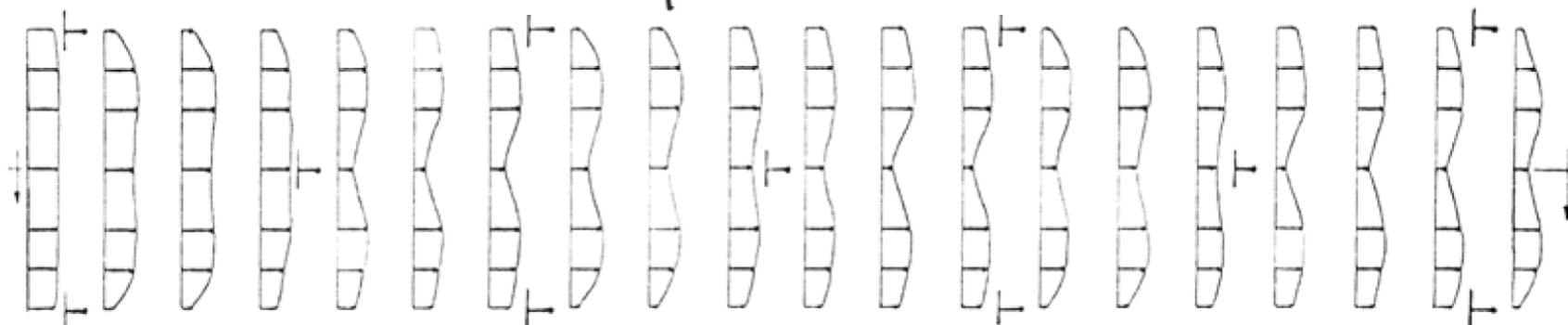
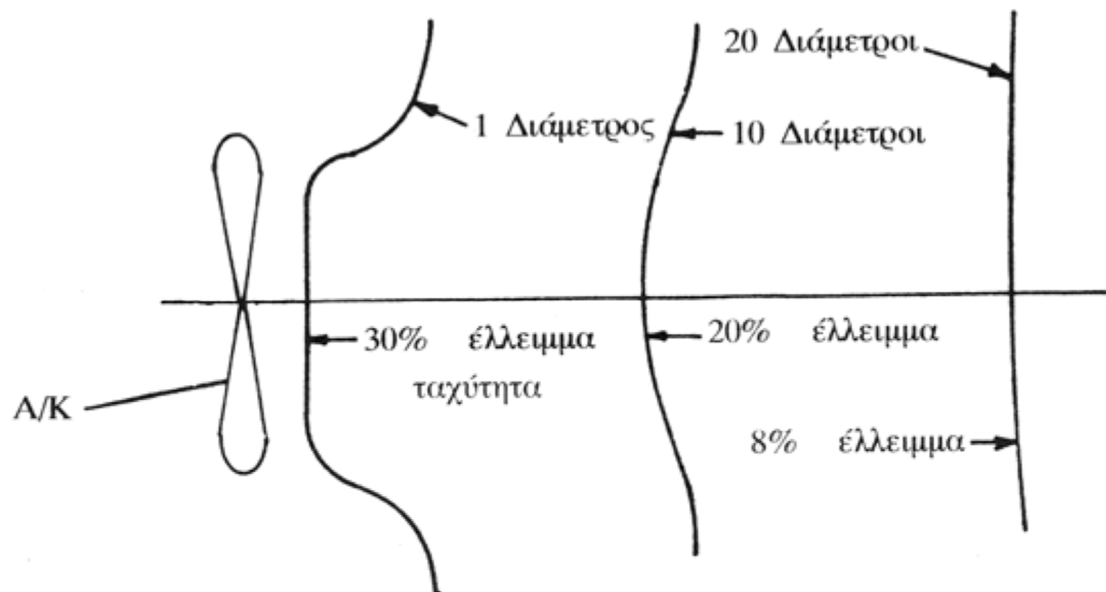
Χωροθέτηση ανεμογεννητριών

Χωροθέτηση ανεμογεννητριών





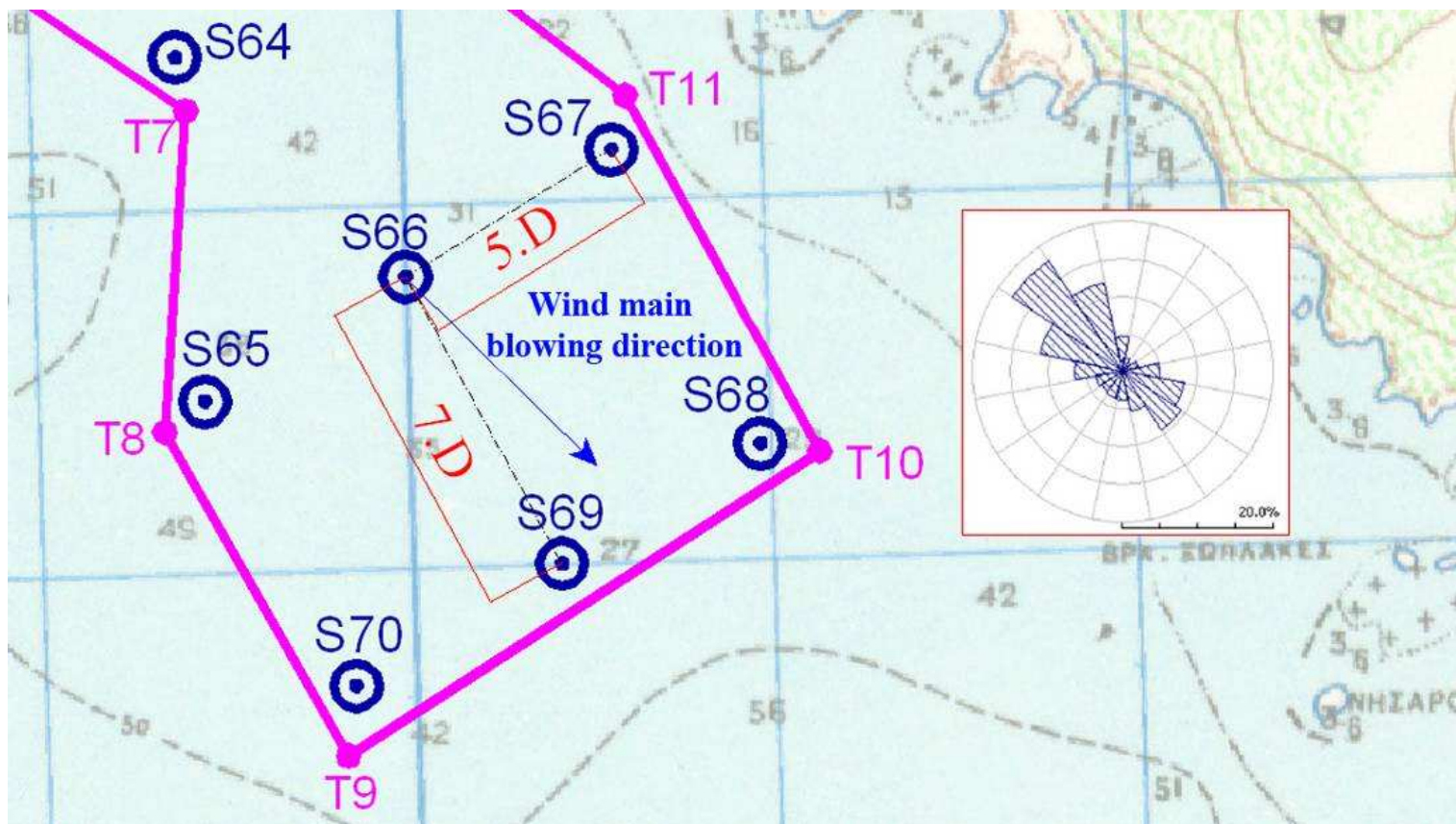
Χωροθέτηση ανεμογεννητριών



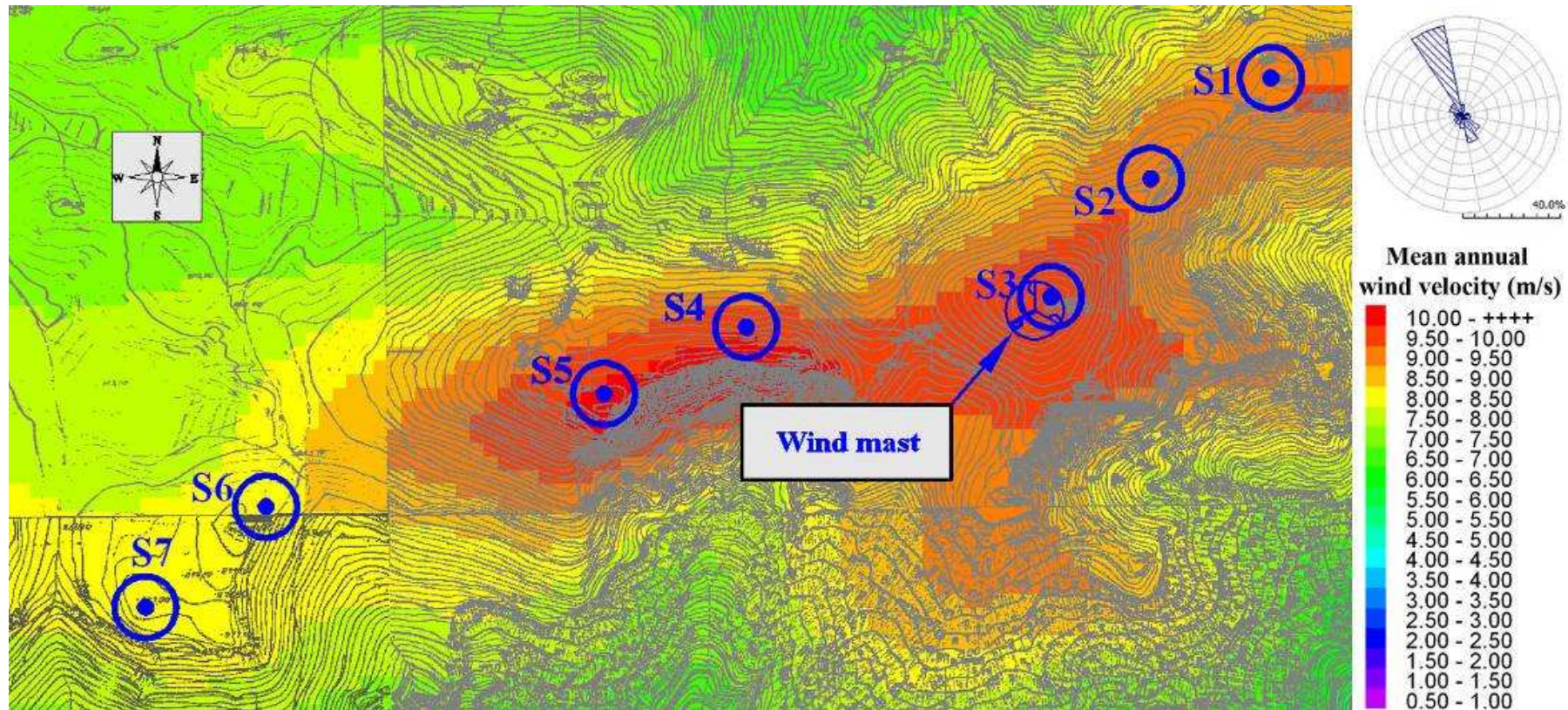
Διανομή ταχυτήτων στο οριζόντιο επίπεδο

Πηγή: Γ. Μπεργελές. Ανεμοκινητήρες. Εκδόσεις Συμεών. Αθήνα 1995.

Βασικοί κανόνες χωροθέτησης ανεμογεννητριών

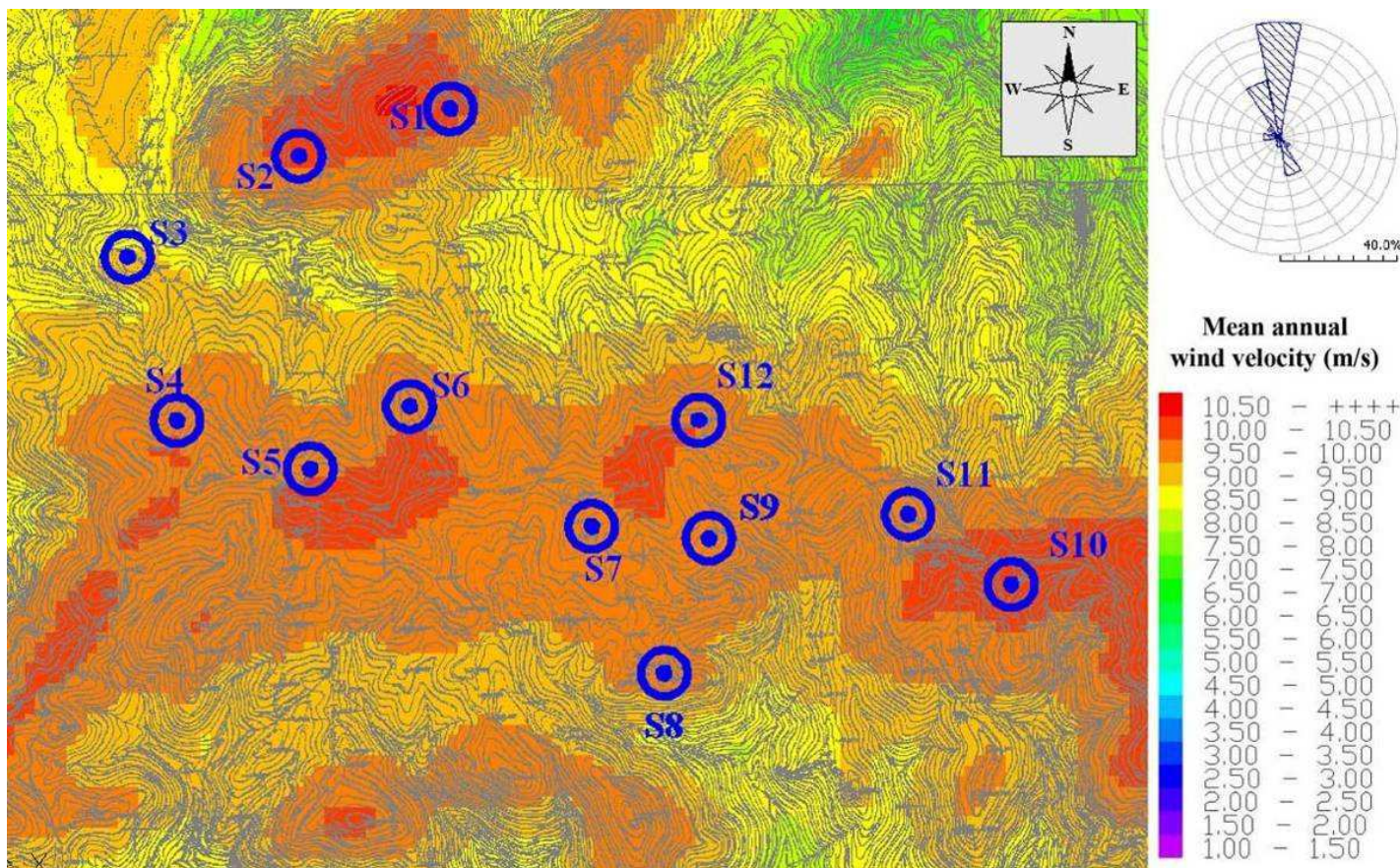


Παράδειγμα χωροθέτησης ανεμογεννητριών



Απώλειες σκίασης <1%

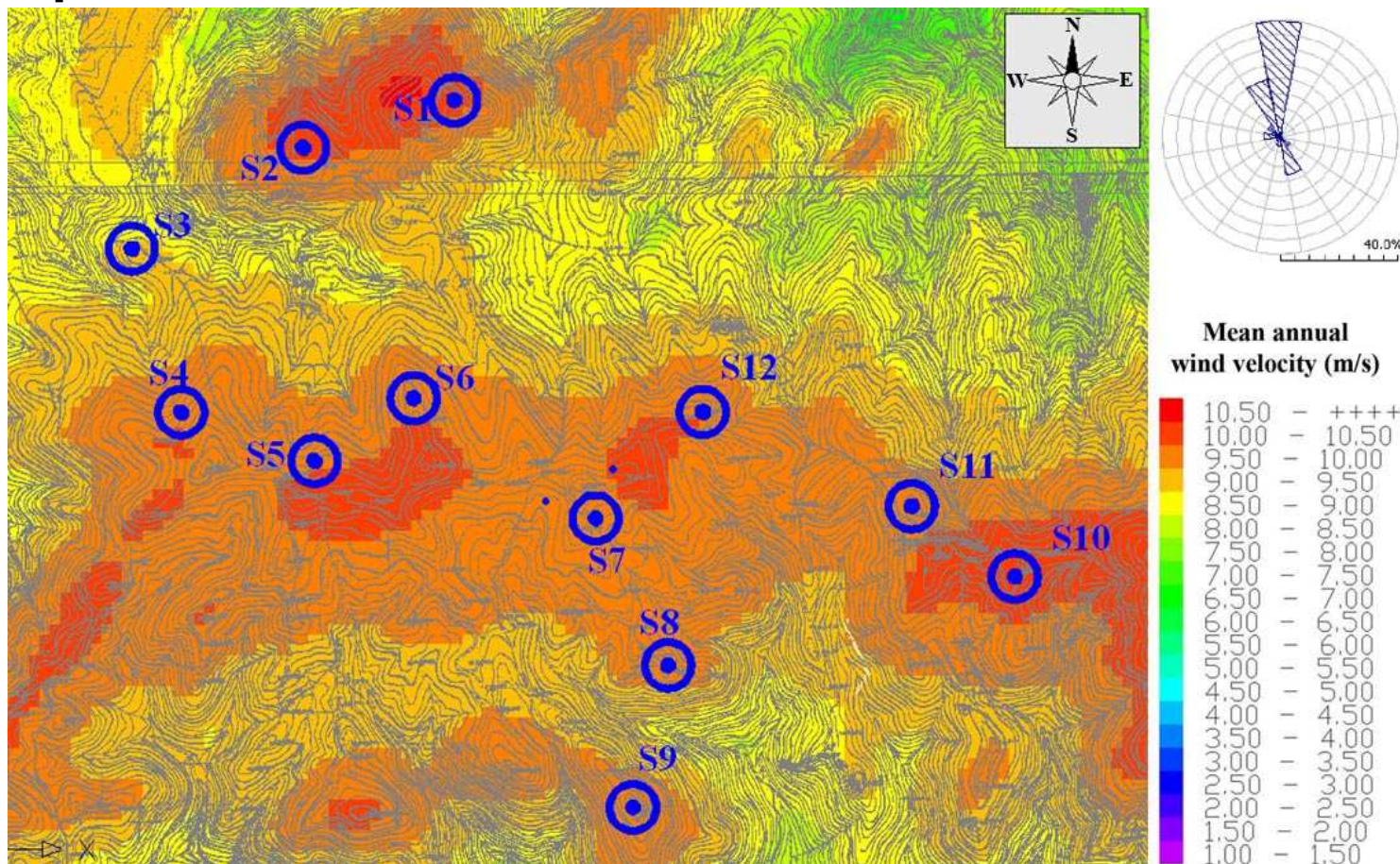
Παράδειγμα χωροθέτησης ανεμογεννητριών



Απώλειες σκίασης για τη μηχανή S8: 12,32%

Απώλειες σκίασης για τη μηχανή S9: 13,97%

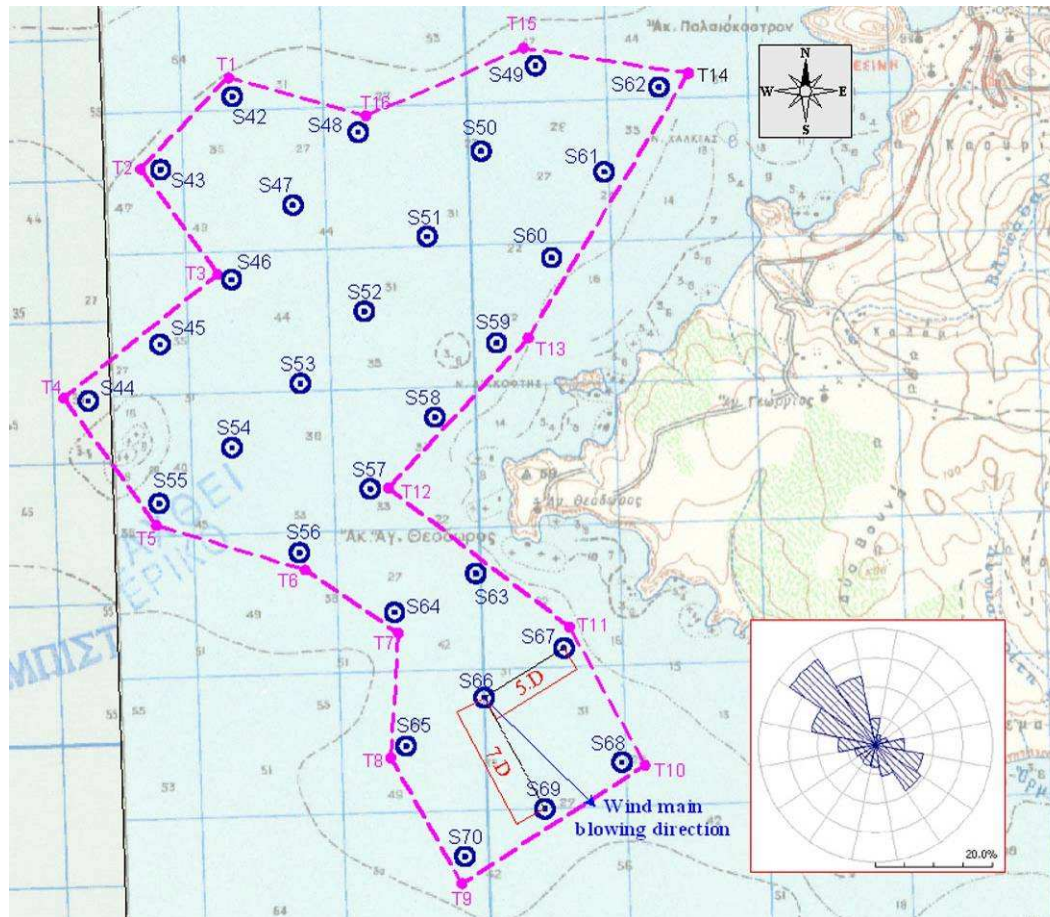
Παράδειγμα χωροθέτησης ανεμογεννητριών



Απώλειες σκίασης για τη μηχανή S8: 11,18%

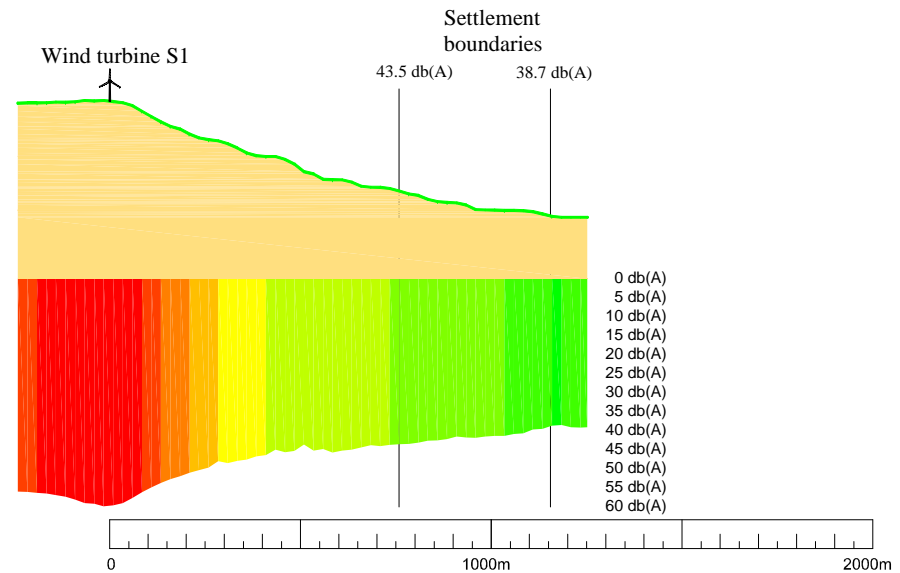
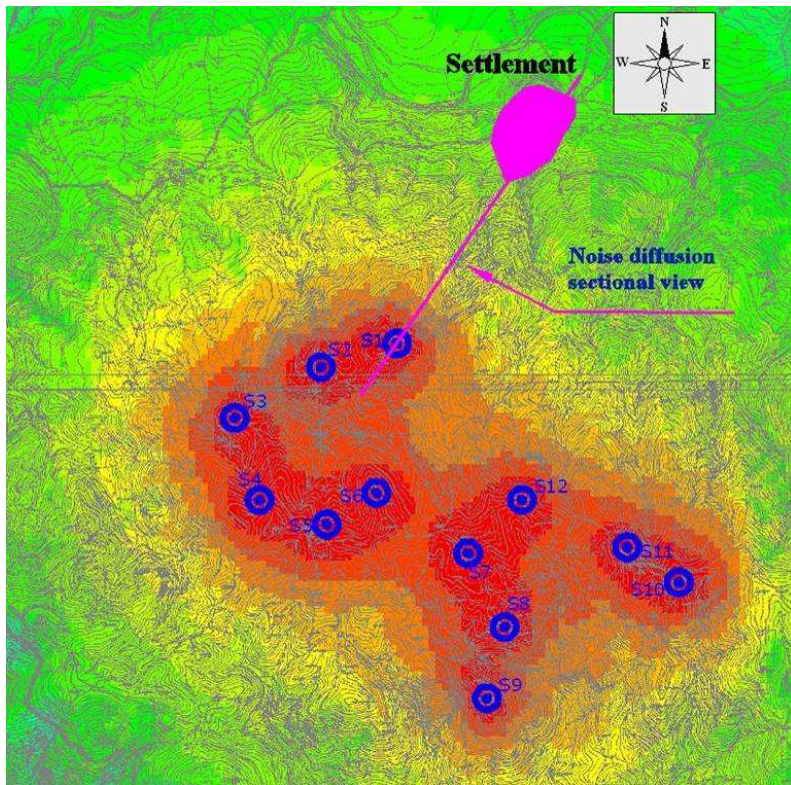
Απώλειες σκίασης για τη μηχανή S9: 10,30%

Παράδειγμα χωροθέτησης ανεμογεννητριών σε υπεράκτιο Α/Π



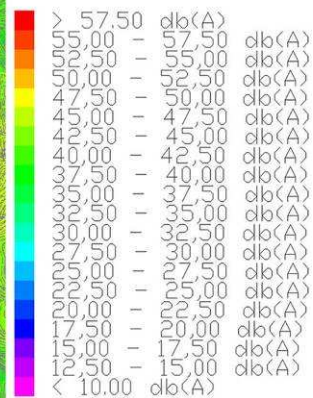
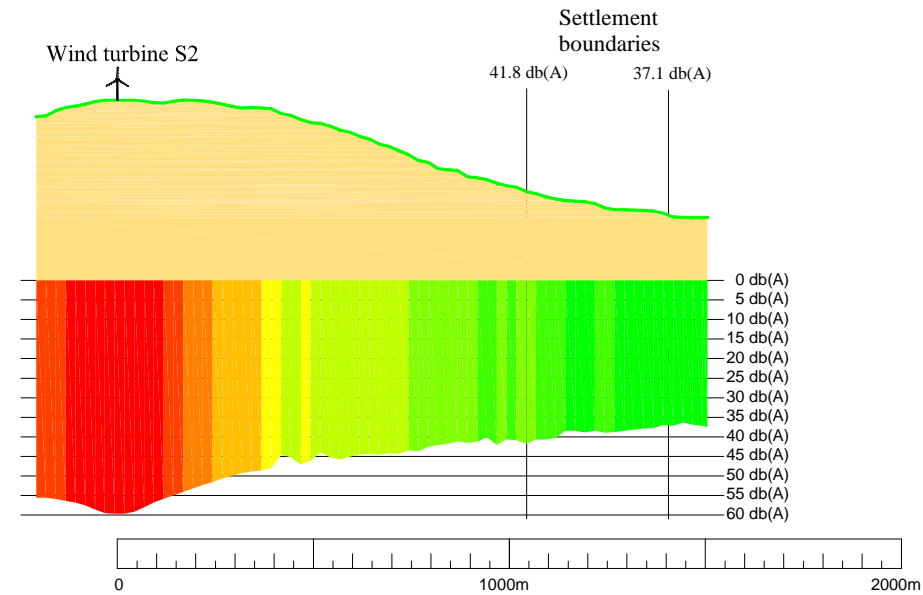
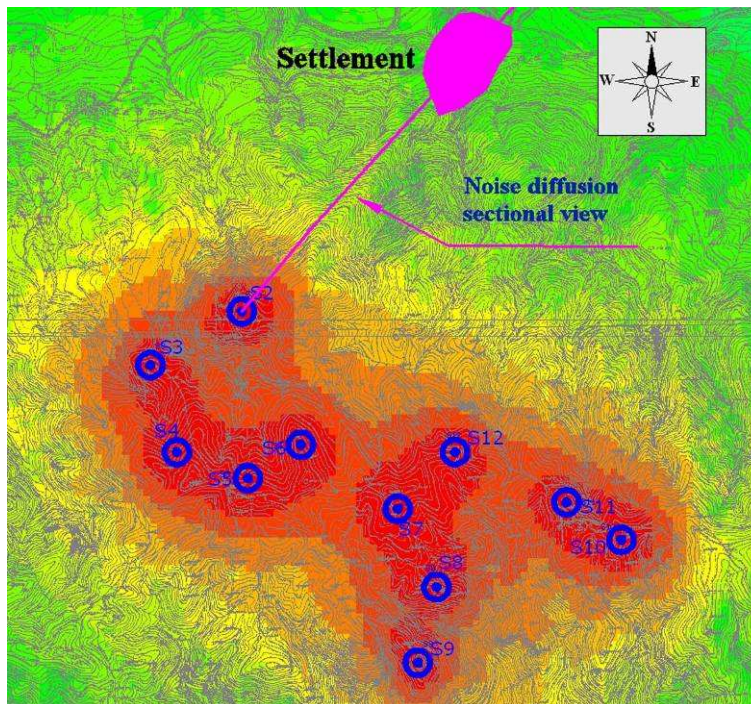
Απώλειες σκίασης : 2,33 – 8,50%

Χωροθέτηση ανεμογεννητριών συναρτήσει του θορύβου



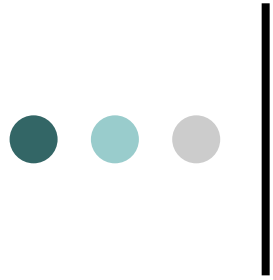
> 57,50	db(A)
55,00 - 57,50	db(A)
52,50 - 55,00	db(A)
50,00 - 52,50	db(A)
47,50 - 50,00	db(A)
45,00 - 47,50	db(A)
42,50 - 45,00	db(A)
40,00 - 42,50	db(A)
37,50 - 40,00	db(A)
35,00 - 37,50	db(A)
32,50 - 35,00	db(A)
30,00 - 32,50	db(A)
27,50 - 30,00	db(A)
25,00 - 27,50	db(A)
22,50 - 25,00	db(A)
20,00 - 22,50	db(A)
17,50 - 20,00	db(A)
15,00 - 17,50	db(A)
12,50 - 15,00	db(A)
< 10,00	db(A)

Χωροθέτηση ανεμογεννητριών συναρτήσει του θορύβου



Χωροθέτηση ανεμογεννητριών συναρτήσει οπτικής όχλησης





Θεωρητική βάση υπολογισμού αιολικής ισχύος

Θεωρητικός υπολογισμός αιολικής ισχύος

Κινητική ενέργεια ανέμου:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

$$m = \rho \cdot U = \rho \cdot A \cdot S = \rho \cdot A \cdot V \cdot t$$

Θεωρώντας ότι ο αέρας διαπερνά κάθετα την επιφάνεια A με στιγμιαία ταχύτητα V ($V=S/t$)

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot t \Rightarrow P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Η δύναμη του ανέμου (ώση) θα είναι:

$$E_k = T \cdot S \Leftrightarrow T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot V^2$$

Θεωρητική βάση υπολογισμού ισχύος

Δέσμευση ισχύος από Α/Γ:

$$P = \frac{1}{2} C_P \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot V^3$$

C_P ο συντελεστής ισχύος.

Ασκούμενη δύναμη από τον αέρα στην πτερωτή:

$$T = \frac{1}{2} C_T \cdot \rho \cdot A_\delta \cdot V^2$$

C_T ο συντελεστής ώσης.

$$C_P = 4a \cdot (1 - a)^2$$

$$C_T = 4a \cdot (1 - a)$$

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\%$$

Θεωρητική βάση υπολογισμού ισχύος

Για τους συντελεστές ισχύος και ώσης αποδεικνύεται από τη θεωρία δίσκου ενέργειας ότι:

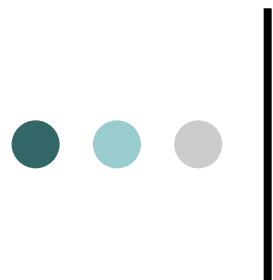
$$C_P = 4a \cdot (1 - a)^2 \qquad C_T = 4a \cdot (1 - a)$$

Με παραγωγή της σχέσης του συντελεστής ισχύος αποδεικνύεται ότι έχουμε μέγιστη δέσμευση ισχύος για $a=1/3$.

Στην περίπτωση αυτή ο μέγιστος συντελεστής ισχύος προκύπτει:

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\%$$

και αποτελεί το μέγιστο θεωρητικό ποσοστό δέσμευσης αιολικής ισχύος από μία αιολική μηχανή. Ονομάζεται όριο Betz.

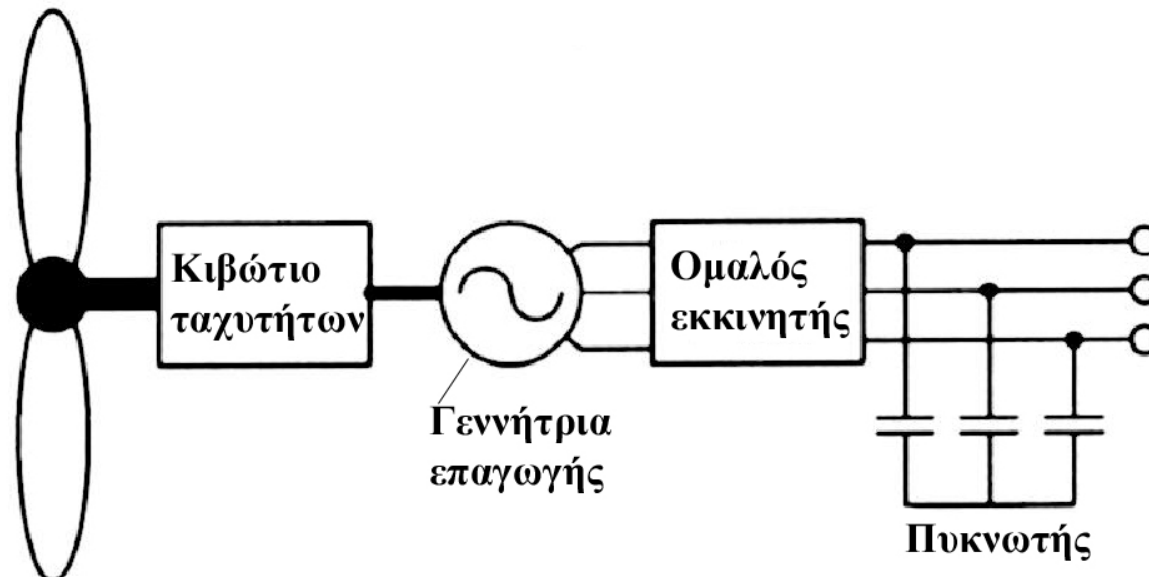


Ποιότητα ισχύος και δυναμική ασφάλεια

Τύποι ανεμογεννητριών

A/Γ σταθερών στροφών, μη ελεγχόμενου βήματος πτερυγίων
(fixed-speed, stall regulated wind turbines)

- επαγωγική γεννήτρια, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο
- πυκνωτής συνδεδεμένος στη γεννήτρια με χωρητικότητα ίση με την κατανάλωση αέργου ισχύος από την A/Γ
- χρήση ομαλού εκκινητή για σύνδεση με το δίκτυο.



Τύποι ανεμογεννητριών

Α/Γ ελεγχόμενου βήματος, ημι-μεταβλητών στροφών
(semi-variable speed, pitch-regulated wind turbine)

- επαγωγική γεννήτρια, απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο
- πυκνωτής συνδεδεμένος στη γεννήτρια
- χρήση ομαλού εκκινητή
- αλλαγή βήματος πτερυγίων από την άτρακτο του δρομέα
- ρότορας μεταβλητής αντίστασης.

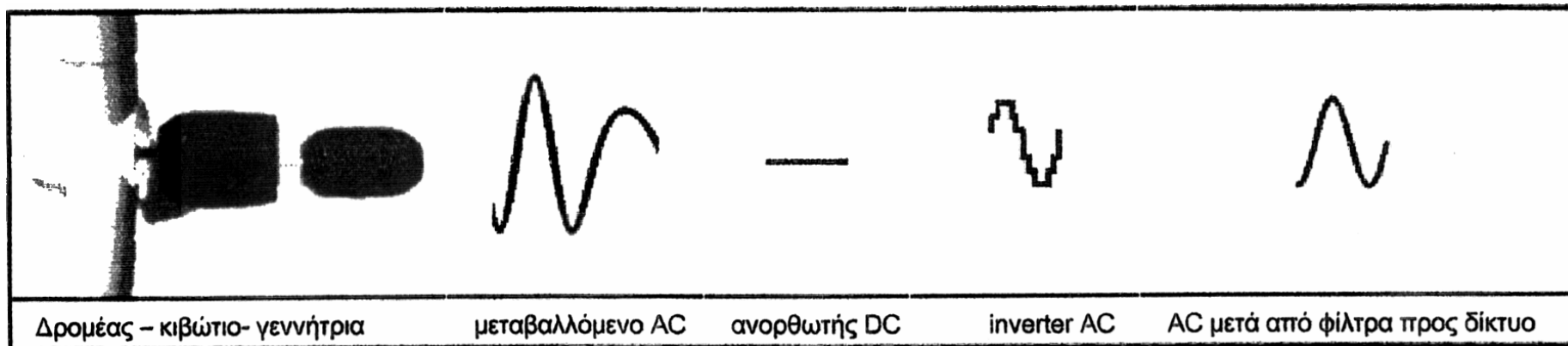




Τύποι ανεμογεννητριών

A/Γ μεταβλητών στροφών, με εναλλάκτη πλήρους ισχύος (variable-speed, full-power converter wind turbines)

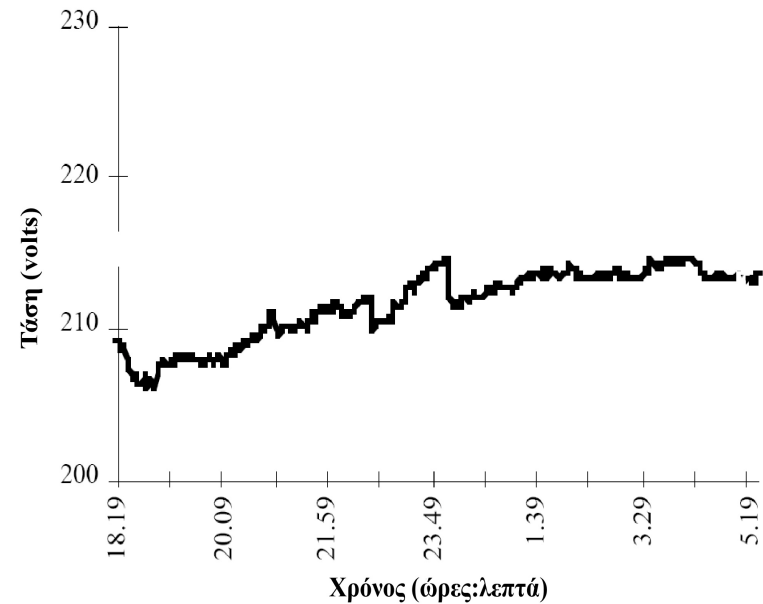
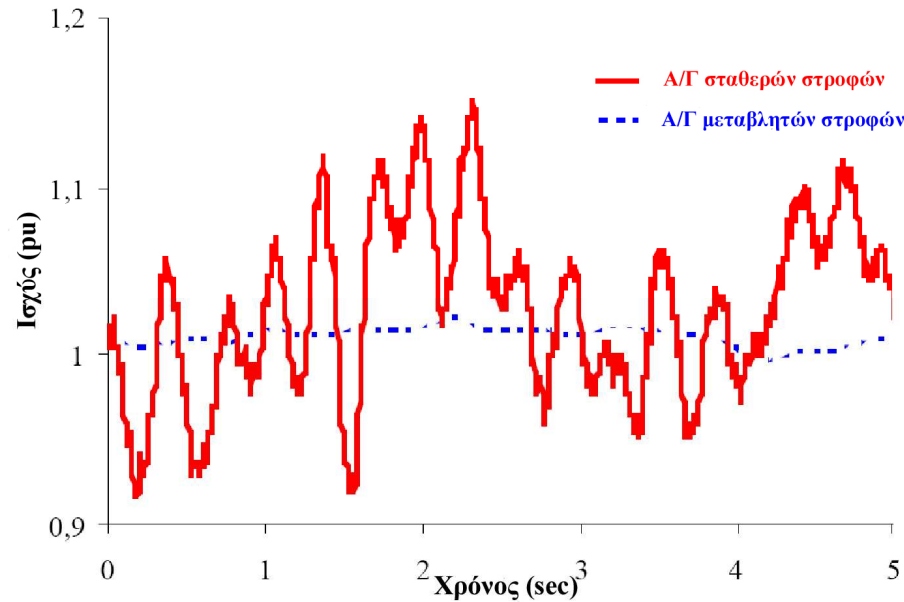
- πολυπολική σύγχρονη γεννήτρια αποσυνδεδεμένη από το δίκτυο
- έλεγχος άεργου ισχύος με μετασχηματιστή πλήρους ισχύος.



Ανεμογεννήτριες και ποιότητα ισχύος

Μεταβατικά φαινόμενα

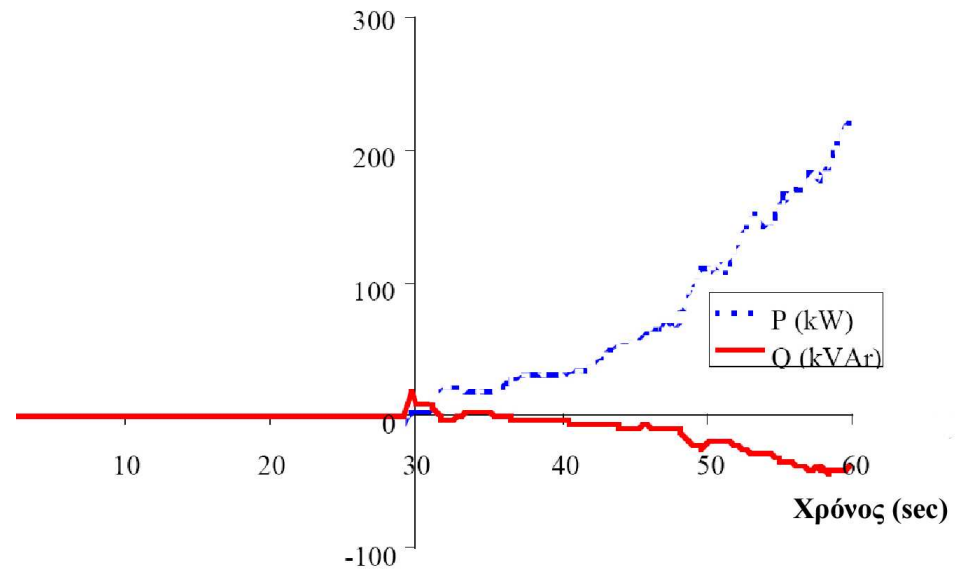
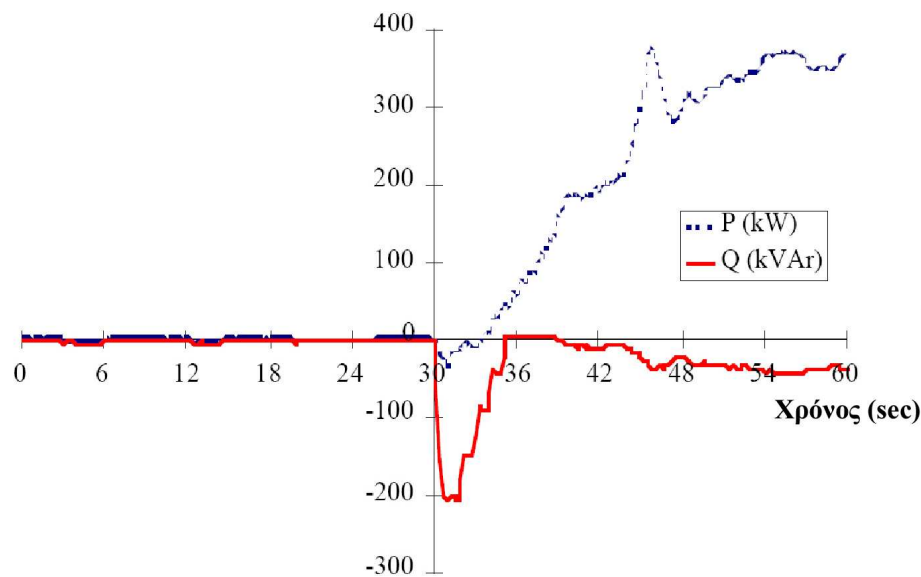
- πτώση τάσης κατά την εκκίνηση Α/Γ
- μεταβατικά φαινόμενα κατά την ηλεκτρίση πυκνωτών.



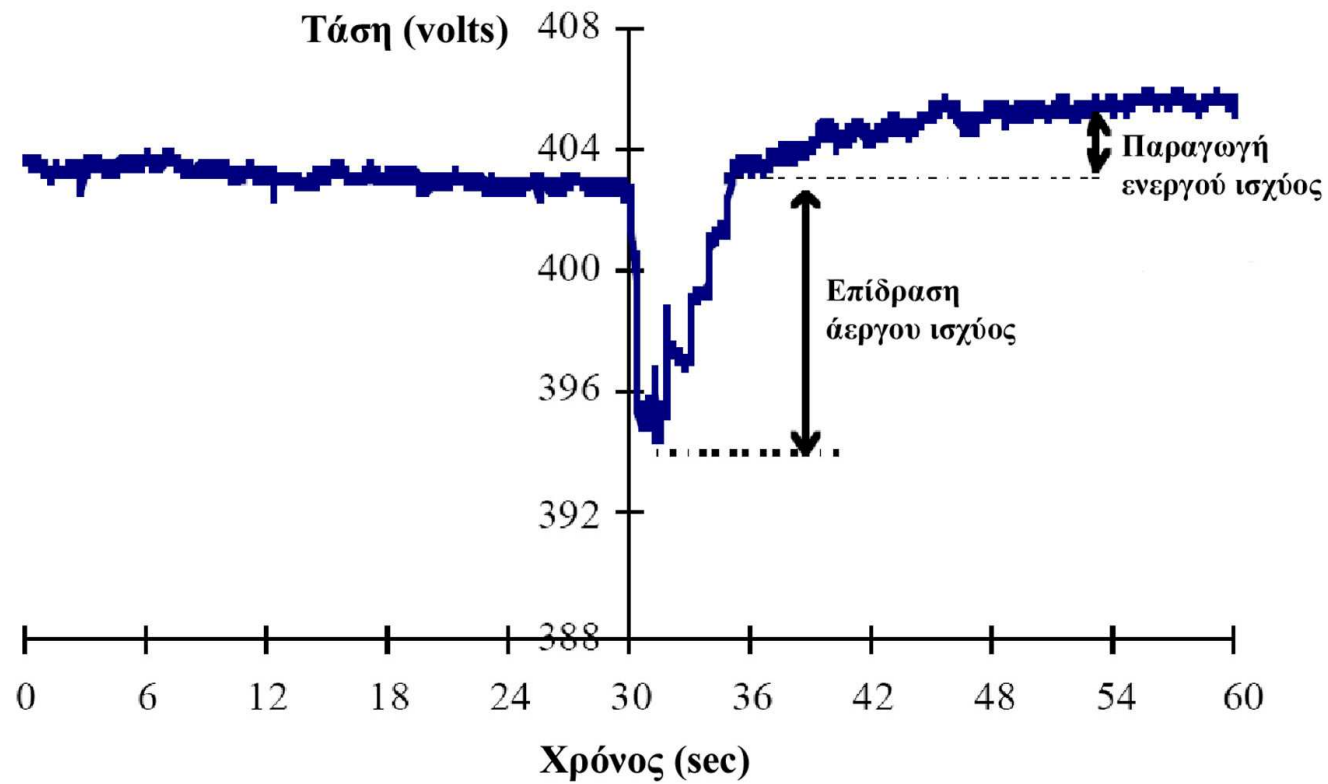
Ανεμογεννήτριες και ποιότητα ισχύος

Μεταβατικά φαινόμενα

- πτώση τάσης κατά την εκκίνηση Α/Γ
- μεταβατικά φαινόμενα κατά την ηλέκτριση πυκνωτών.



Ανεμογεννήτριες και ποιότητα ισχύος



Ανεμογεννήτριες και δυναμική ασφάλεια αυτόνομου Σ.Η.Ε.

Η διατήρηση δυναμικής ασφάλειας σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ανάγεται στην εξασφάλιση των απαιτούμενων από την κατανάλωση ροών ενεργού και άεργου ισχύος, με ρυθμούς απόκρισης μεταβολών φορτίου τέτοιους, ώστε οι προκαλούμενες μεταβολές συχνότητας και τάσης να διατηρούνται πάντα εντός των ανεκτών ορίων λειτουργίας των γεννητριών.

Ανεμογεννήτριες και δυναμική ασφάλεια αυτόνομου Σ.Η.Ε.

Η επίδραση της λειτουργίας Α/Γ στη δυναμική ισορροπία ενός συστήματος εξαρτάται από:

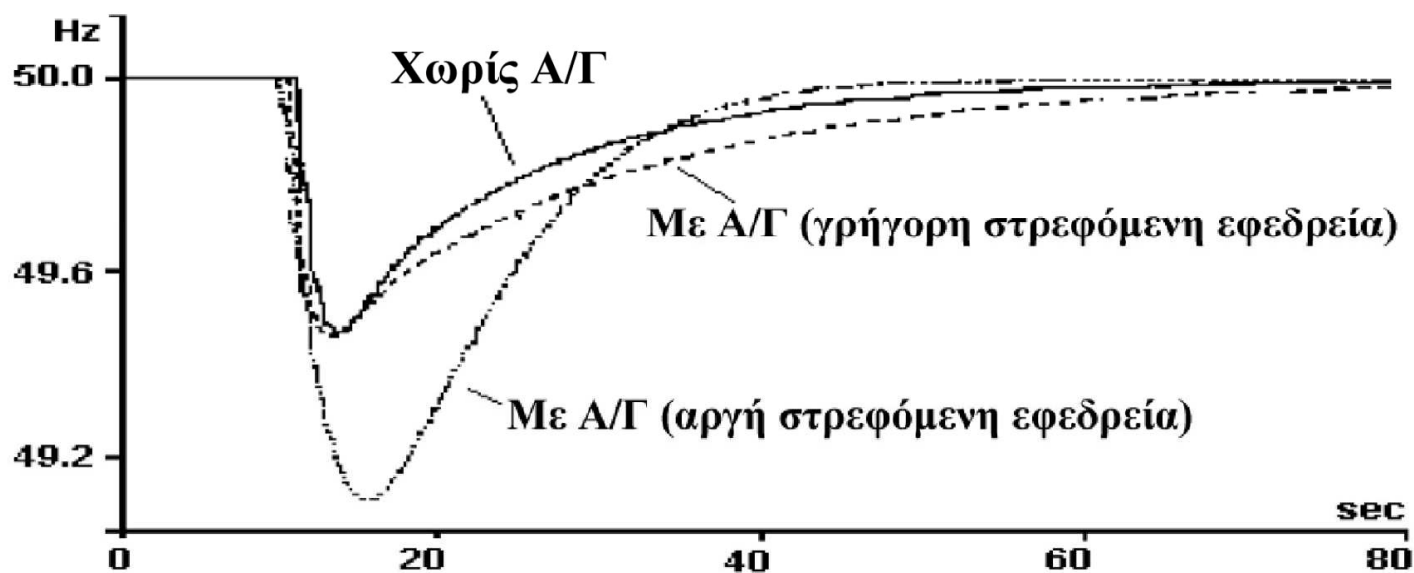
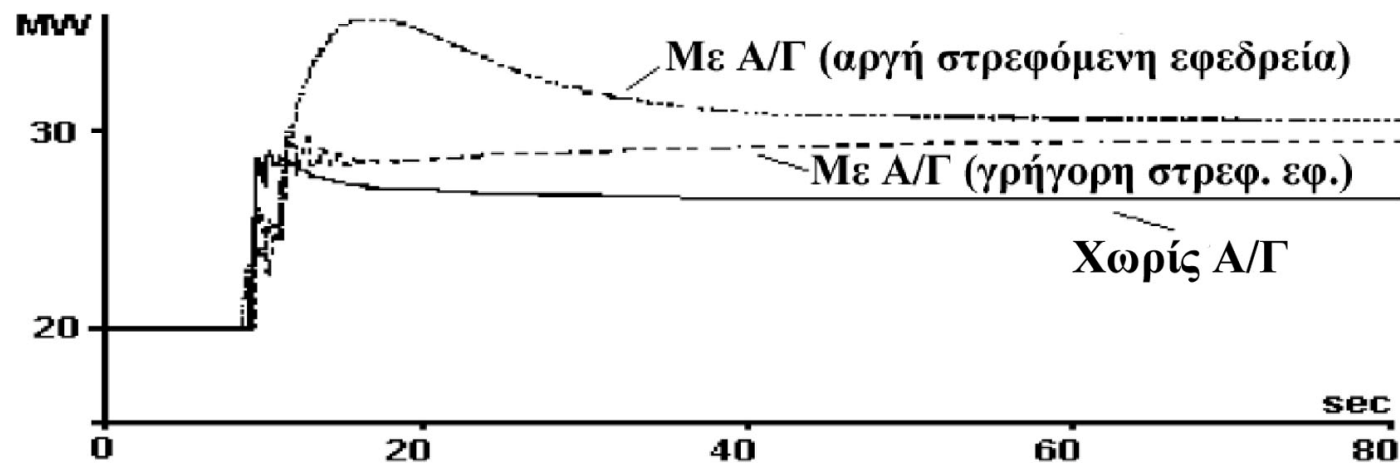
- το ποσοστό στιγμιαίας διείσδυσης αιολικής ισχύος στην παραγωγή
- τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων θερμοηλεκτρικών μηχανών, ειδικότερα δε, τους ρυθμούς απόκρισής τους σε ταχείς μεταβολές του φορτίου
- το ποσοστό επί της αιολικής διείσδυσης και το είδος της στρεφόμενης εφεδρείας
- τα όρια ανοχής σε διαταραχές τάσης και συχνότητας των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών.

Ανεμογεννήτριες και δυναμική ασφάλεια αυτόνομου Σ.Η.Ε.

Ανοχές διαταραχών τάσης και συχνότητας ανεμογεννητριών

Διαταραχή	Μεταβολή (%)	Χρονοκαθυστέρηση (sec)
Υπόταση	90,0	60,0
Υπέρταση	110,0	60,0
Υποσυχνότητα	94,0 (47 Hz)	0,2
Υπερσυχνότητα	102,0 (51 Hz)	0,2

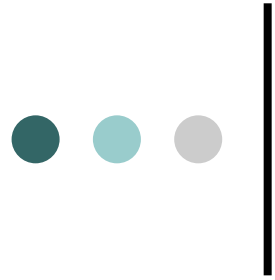
Ανεμογεννήτριες και δυναμική ασφάλεια αυτόνομου Σ.Η.Ε.



Περιορισμοί εισαγωγής αιολικών μηχανών

Διαταραχές στο ηλεκτρικό δίκτυο

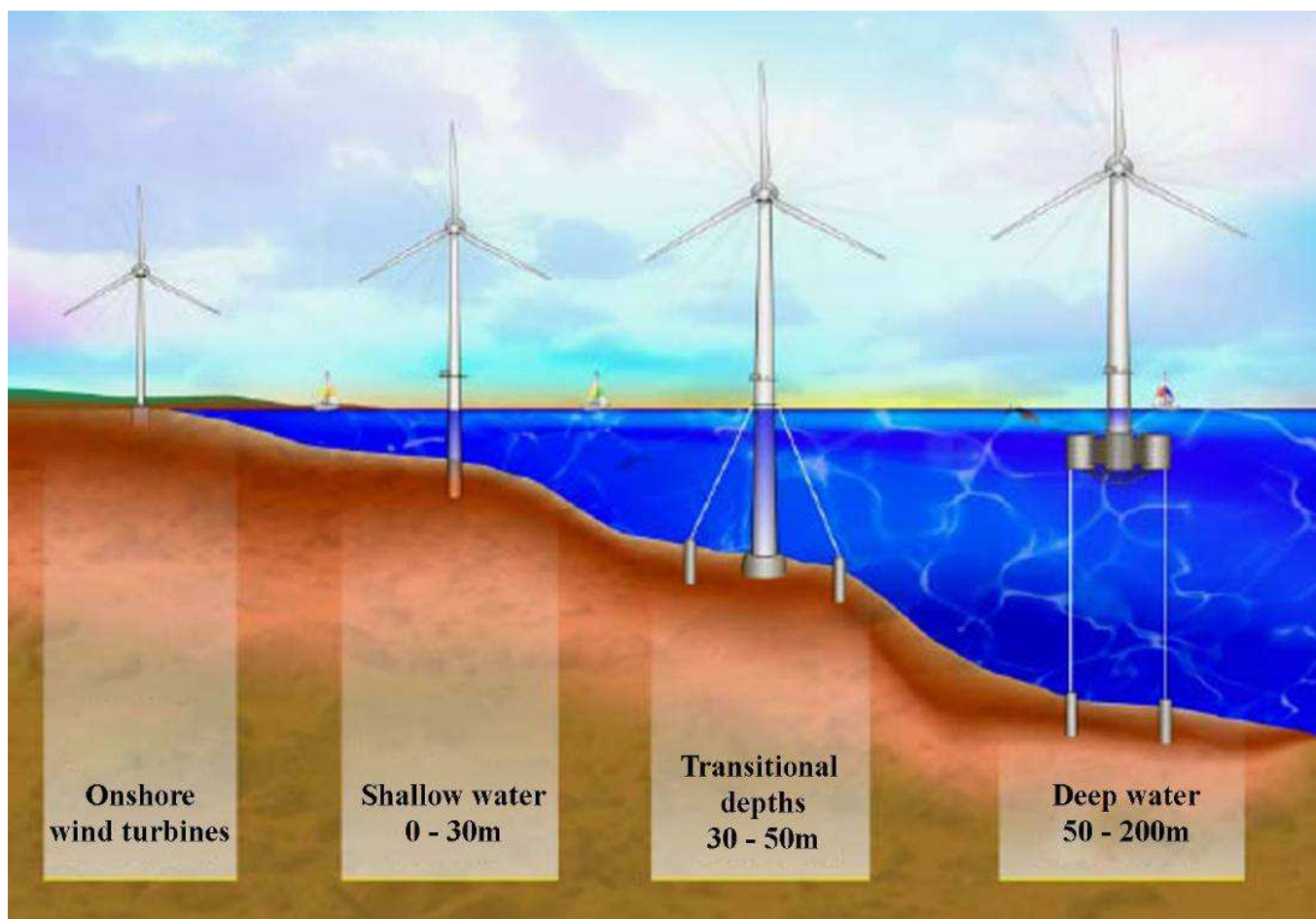
- Δημιουργία διαταραχών στο δίκτυο λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς του ανέμου.
- Μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό διείσδυσης σε Α.Ε.Σ.:
30% του ετήσιου φορτίου αιχμής για μονάδες βάσης από ΜΕΚ.



Θεμελίωση υπεράκτιου αιολικού πάρκου

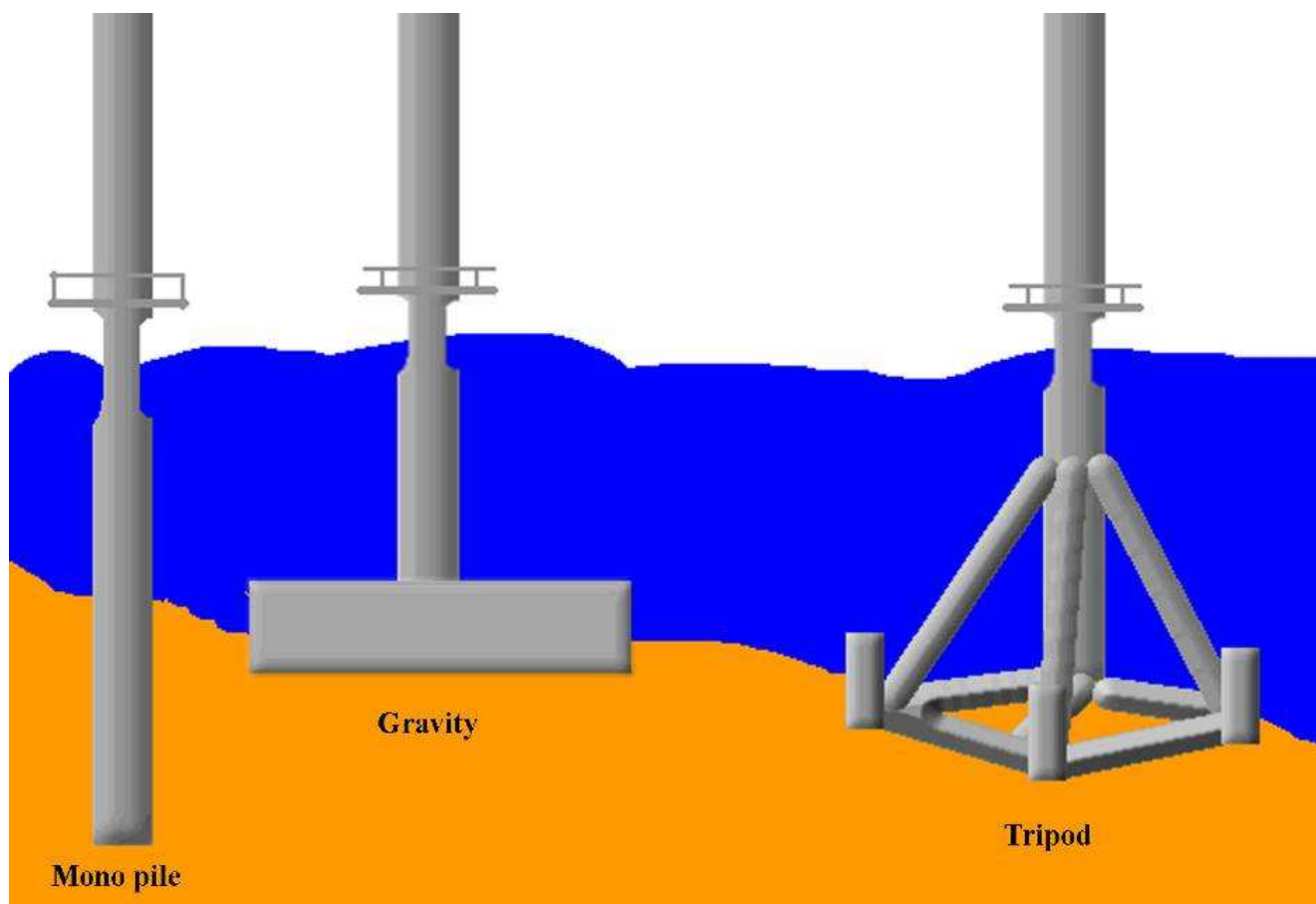
Υπεράκτια αιολικά πάρκα

Τεχνικές θεμελίωσης



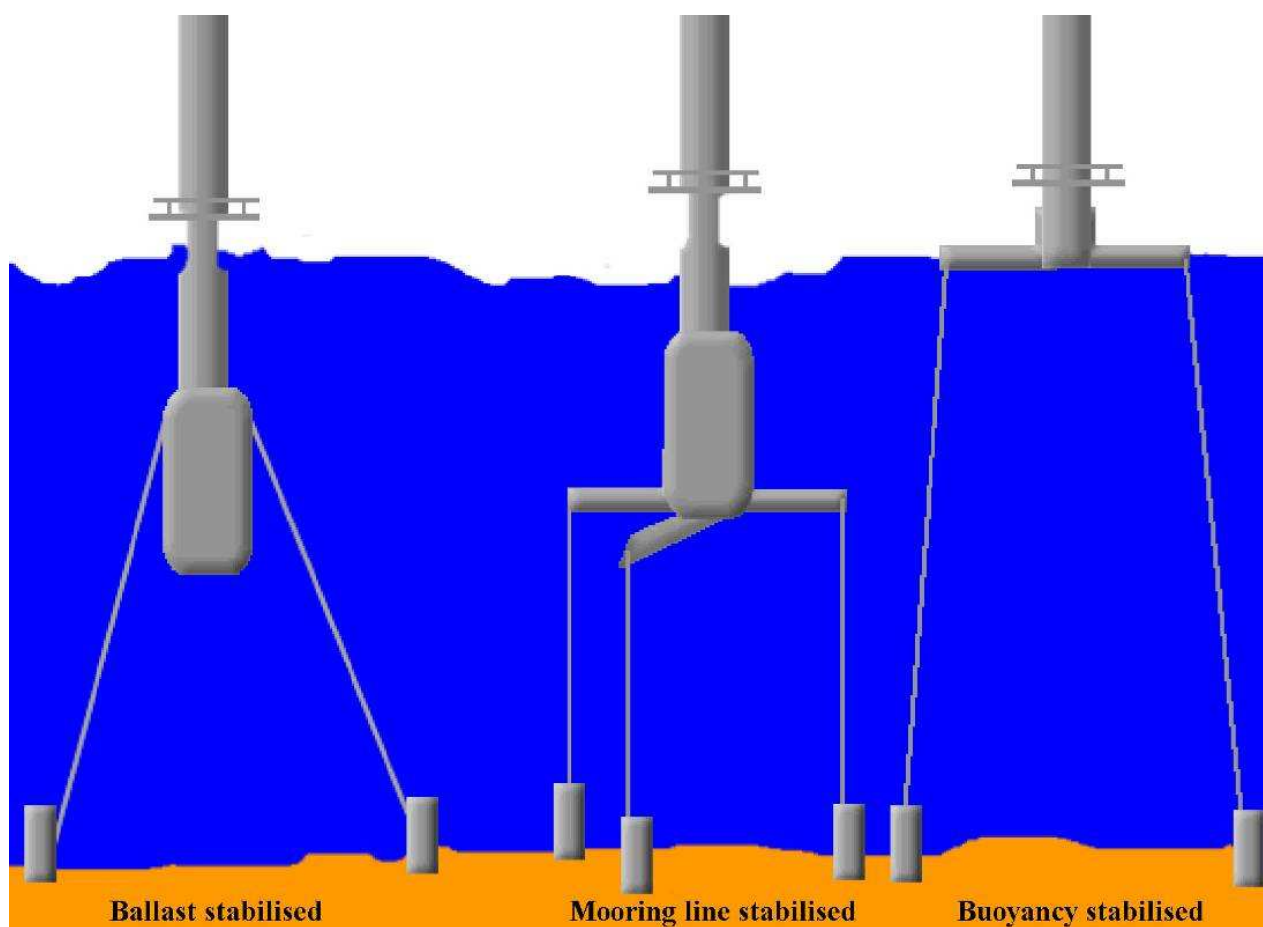
Υπεράκτια αιολικά πάρκα

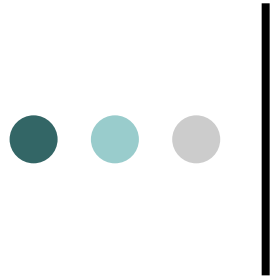
Τεχνικές πάκτωσης



Υπεράκτια αιολικά πάρκα

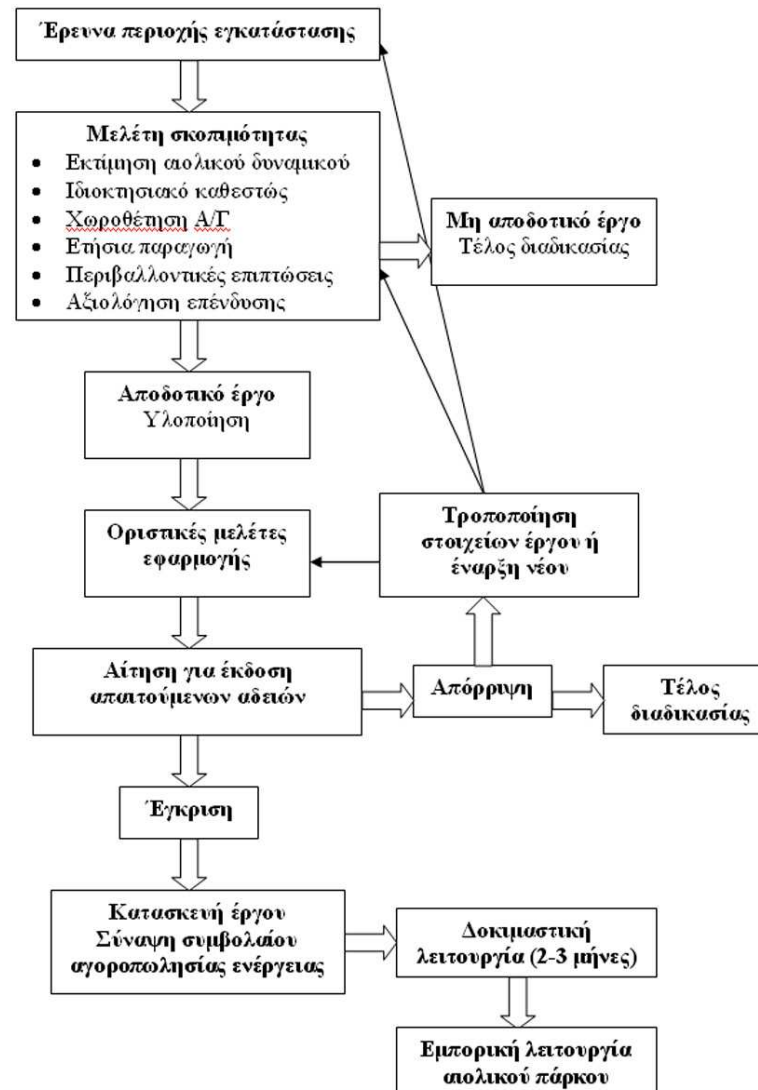
Τεχνικές πλωτών ανεμογεννητριών





Ανάπτυξη αιολικού πάρκου

Πλάνο ανάπτυξης αιολικού πάρκου



Κατασκευή αιολικού πάρκου





Κατασκευή αιολικού πάρκου





Κατασκευή αιολικού πάρκου





Κατασκευή αιολικού πάρκου

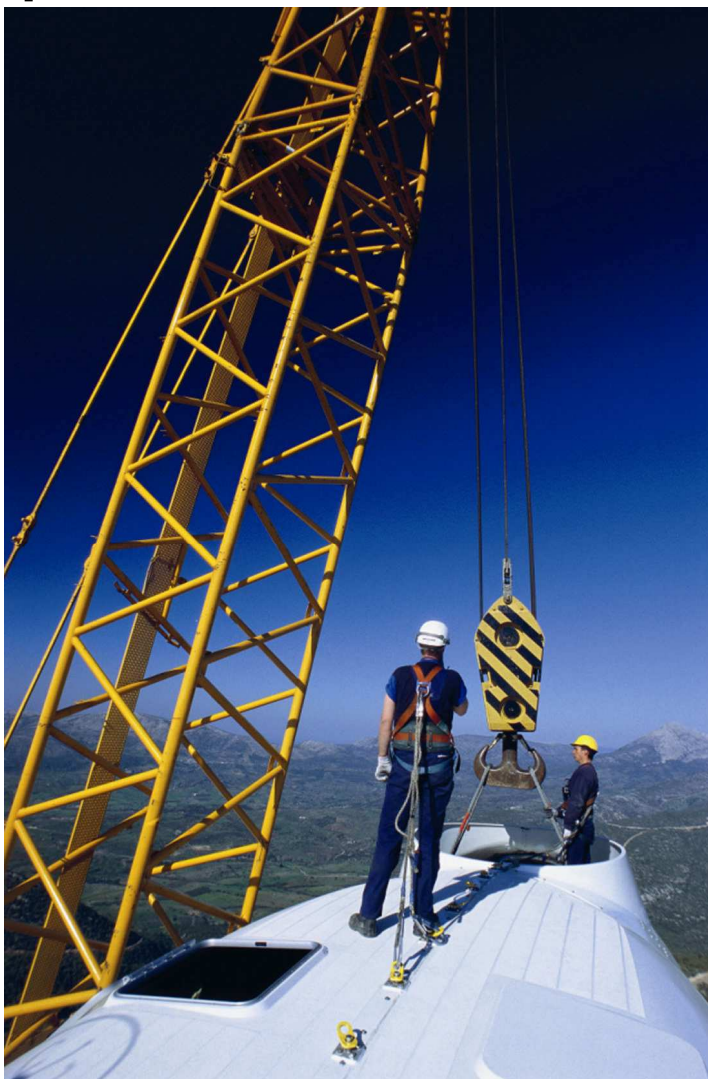




Κατασκευή αιολικού πάρκου



Κατασκευή αιολικού πάρκου





Κατασκευή αιολικού πάρκου





Κατασκευή αιολικού πάρκου

