

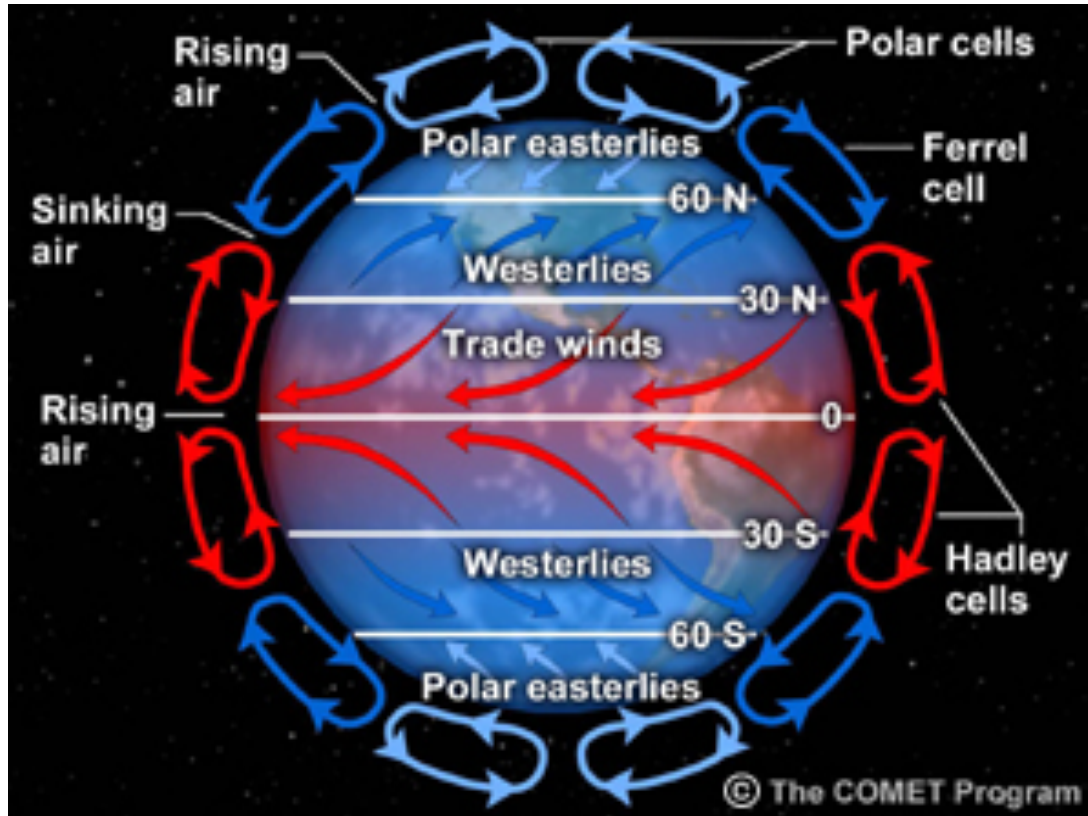
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Διδάσκων: Ιωάννης Γκιάλας

Κεφάλαιο 5

Ρευστά - Αιολική Ενέργεια - Ανεμογεννήτριες

Πώς δημιουργούνται οι άνεμοι;



Απλή εικόνα. Ο αέρας θερμαίνεται και ανεβαίνει. Καθώς στα τροπικά το φαινόμενο είναι πιο ισχυρό, υπάρχει κίνηση αερίων μαζών σε ύψος μέχρι 15km (τροπόσφαιρα) προς τους πόλους

Στην πραγματικότητα η κυκλοφορία σπάει σε 6 ζώνες. Δημιουργούνται οι

- Αληγεΐς άνεμοι (Trade winds)
- Δυτικοί άνεμοι (Westerlies)

Παγκόσμιοι άνεμοι

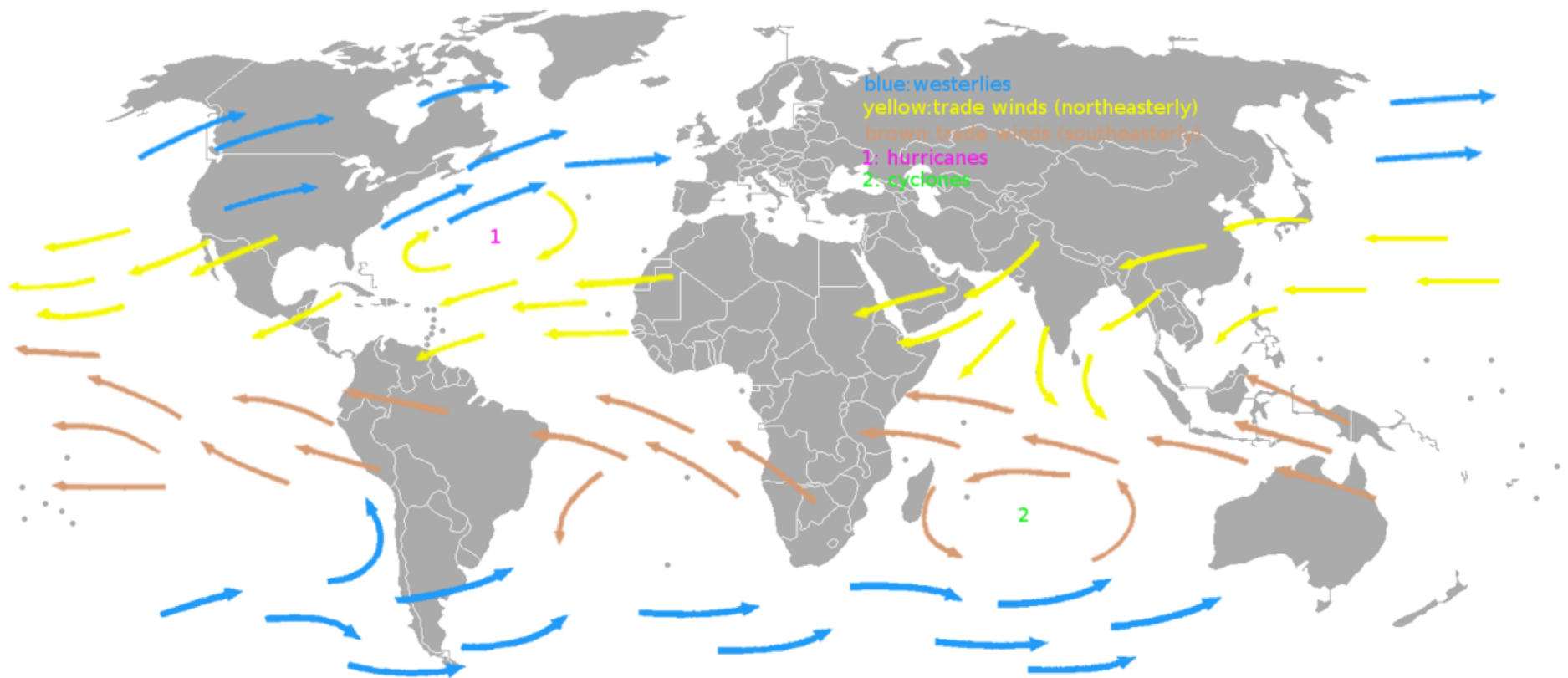
Κίτρινοι: Αληγεΐς άνεμοι (trade winds) Β.
Ημισφαίριο (BA)

Καφέ: Αληγεΐς άνεμοι (trade winds) Ν.
Ημισφαίριο (NA)

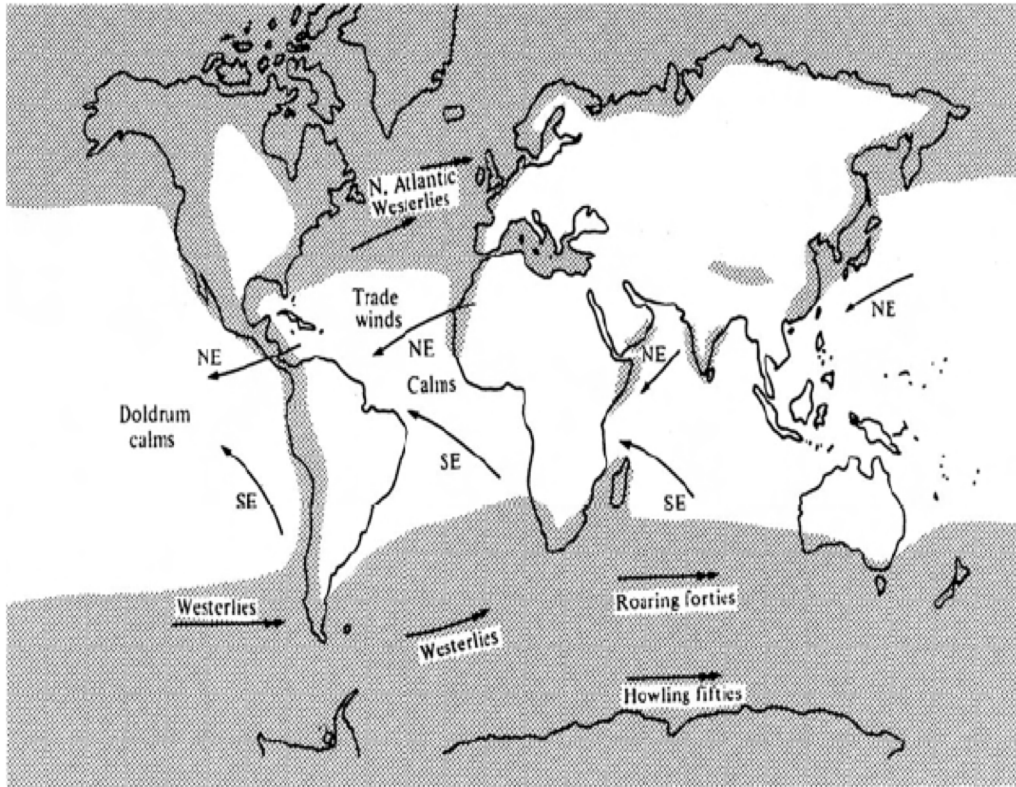
Μπλε: Δυτικοί άνεμοι (Westerlies)

(1) Hurricane (Β. Ατλαντικό)

(2) Κυκλώνες



Ο Αίολος στον κόσμο



25% ηλεκτρικής ενέργειας
μπορεί να καλυφθεί με αιολικά.

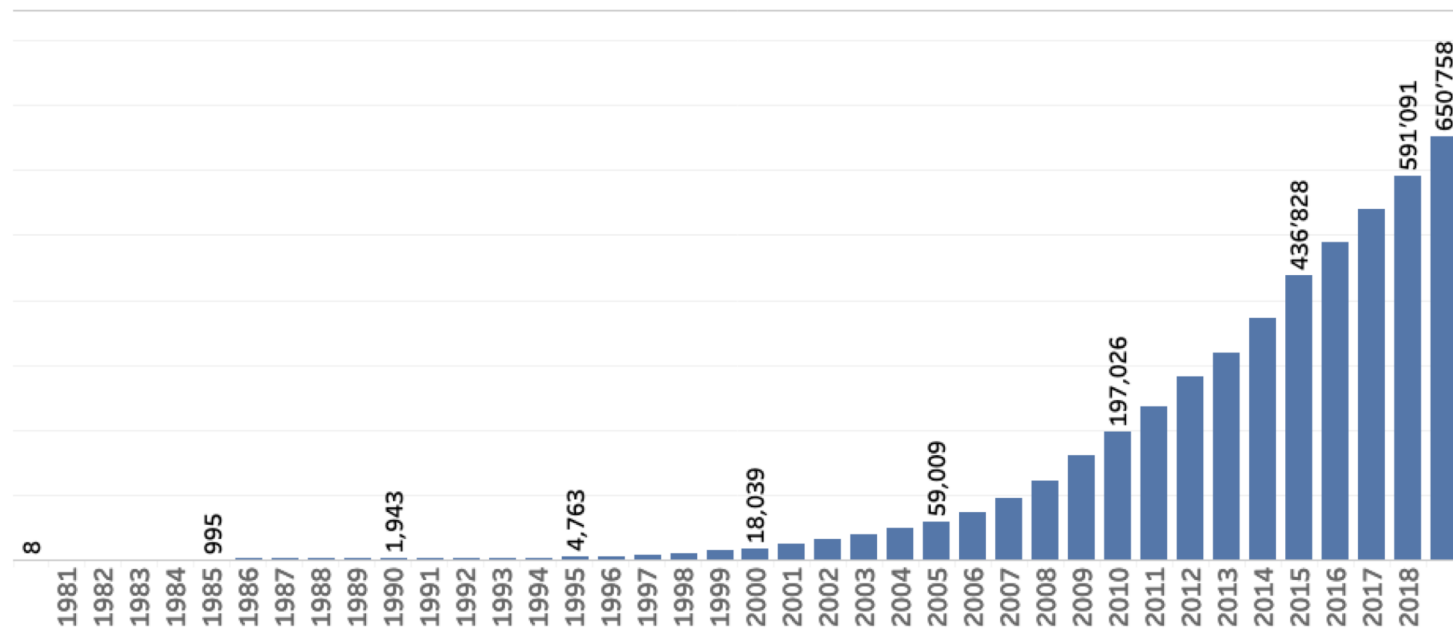
- Απορρόφηση ηλιακής ενέργειας, διαστολή αερίων μαζών
- Μετακινήσεις αέρα αυξάνονται με το ύψος, είναι κυρίως οριζόντιες
- 0.7×10^{21} J κινητική ενέργεια
- 1% απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας, 1200TW

Εγκατεστημένη παγκόσμια αιολική Ισχύς



GLOBAL WIND INSTALLATIONS

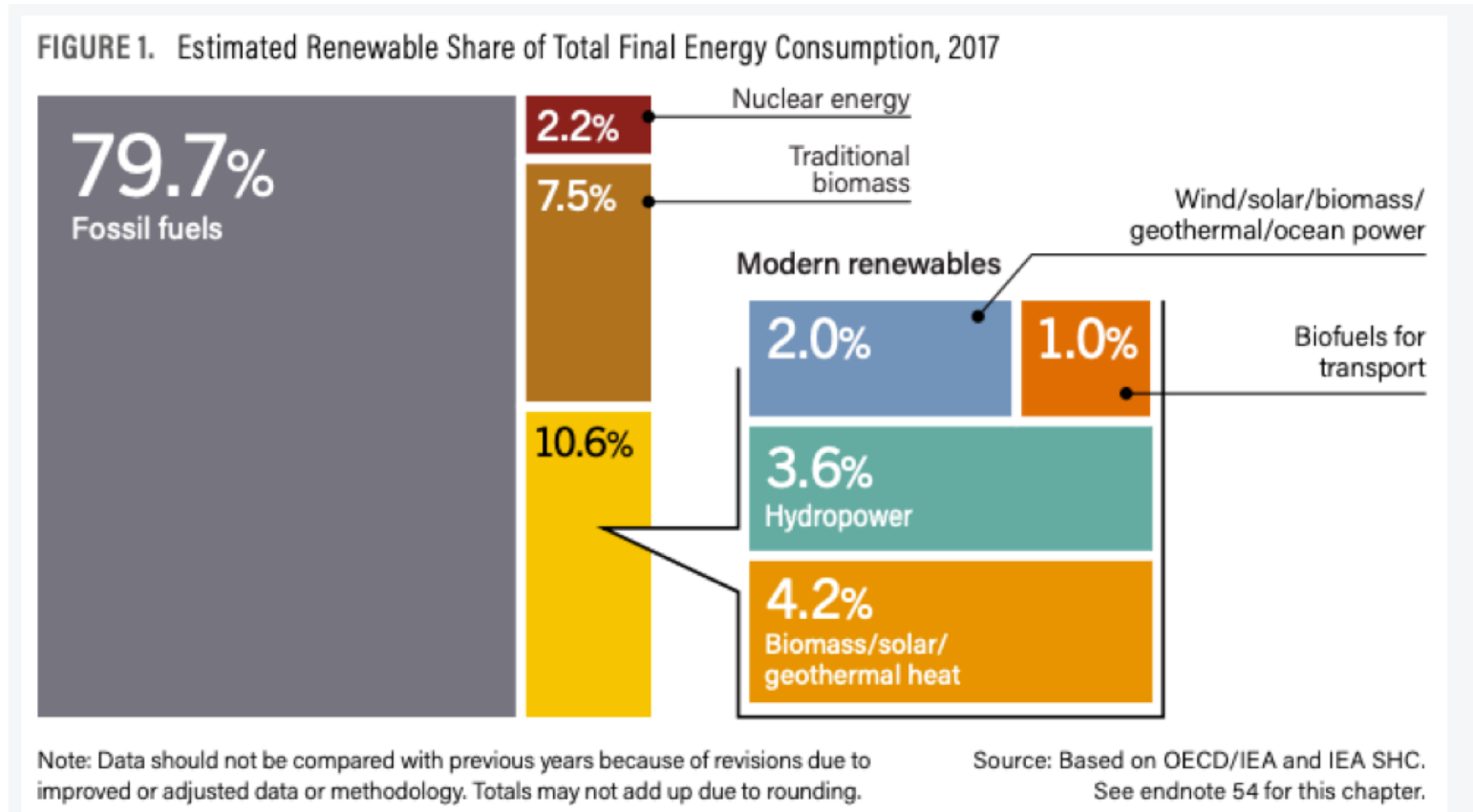
Total Installed Capacity [MW]



* Preliminary data

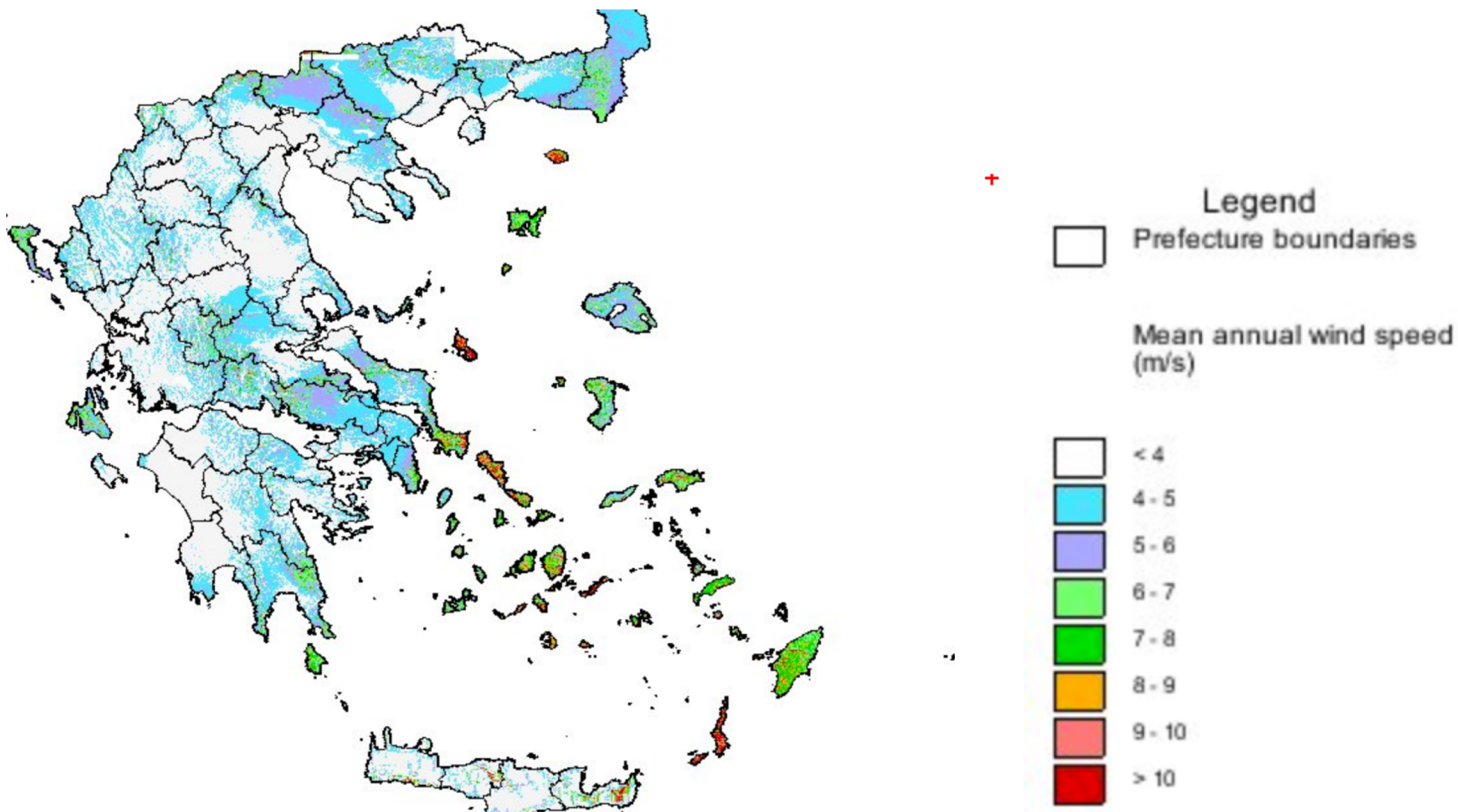
Εκτίμηση ποσοστού ΑΠΕ παγκοσμίως

(center for climate and energy solutions)



Wind power produced more than **5 percent** of global electricity in 2018 with 591 GW of global capacity (568.4 GW is onshore). Capacity is indicative of the maximum amount of electricity that can be generated when the wind is blowing at sufficient levels for a turbine. (4 IouV 2020)

Αιολικό δυναμικό στην Ελλάδα



Wind Energy Capacity (MW)^{[5][6]}

Country	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Greece	39	112	189	272	297	383	473	573	746	871	985	1,087	1,208	1,634	1,749	1,865	1,980	2,135	2,374	2,651

Ταχύτητα ανέμου - Χαρακτηριστικά (1)

Beaufort number	Wind Speed range at 10 m height				Description	Wind turbine effects	Power generation possibility for average speed in range at hub height	Observable effects	
	(ms ⁻¹)	(kmh ⁻¹)	(mi h ⁻¹)	(knot)				Land	Sea
0	0.0	0.0	0.0	0.0	Calm	None	–	Smoke rises vertically	Mirror smooth
	↓ 0.4	↓ 1.6	↓ 1	↓ 0.9					
1	0.4	1.6	1	0.9	Light	None	–	Smoke drifts but vanes unaffected	Small ripples
	↓ 1.8	↓ 6	↓ 4	↓ 3.5					
2	1.8	6	4	3.5	Light	None	Poor	Wind just felt across skin; leaves stir; vanes unaffected	Definite waves
	↓ 3.6	↓ 13	↓ 8	↓ 7.0					
3	3.6	13	8	7.0	Light	Start-up by turbines for light winds	Water pumping; minor electrical power	Leaves in movement; flags begin to extend	Occasional wave crest break, glassy appearance of whole sea
	↓ 5.8	↓ 21	↓ 13	↓ 11					
4	5.8	21	13	11	Moderate		Useful electrical power production	Small branches move; dust raised; pages of books lifted	Larger waves, white crests common
	↓ 8.5	↓ 31	↓ 19	↓ 17					
5	8.5	31	19	17	Fresh	Useful power generation	Extremely good prospects for power	Small trees in leaf sway, wind noticeable for comment	White crests everywhere
	↓ 11	↓ 40	↓ 25	↓ 22					
6	11	40	25	22	Strong	Rated range at full capacity	Only for the strongest machines	Large branches sway, telephone lines whistle	Larger waves appear, foaming crests extensive
	↓ 14	↓ 51	↓ 32	↓ 28					

Ταχύτητα ανέμου - Χαρακτηριστικά (2)

Beaufort number	Wind Speed range at 10 m height				Description	Wind turbine effects	Power generation possibility for average speed in range at hub height	Observable effects	
	(ms ⁻¹)	(km h ⁻¹)	(mi h ⁻¹)	(knot)				Land	Sea
7	14	51	32	28	Strong	Full capacity reached	Life not worth living here	Whole trees in motion	Foam begins to break from crests in streaks
	↓	↓	↓	↓					
8	17	63	39	34	Gale	Shutdown or self-stalling initiated		Twigs break off. Walking difficult	Dense streaks of blown foam
	↓	↓	↓	↓					
9	21	76	47	41	Gale	All machines shut down or stalled		Slight structural damage, e.g. chimneys	Blown foam extensive
	↓	↓	↓	↓					
10	25	88	55	48	Strong gale	Design criteria against damage Machines shut down		Trees uprooted. Much structural damage	Large waves with long breaking crests damage
	↓	↓	↓	↓					
11	29	103	64	56	Strong gale	Only strengthened machines would survive		Widespread damage	
	↓	↓	↓	↓					
12	34	121	75	65	Hurricane	Serious damage likely unless pre-collapse		Only occurs in tropical cyclones Countryside devastated. Disaster conditions.	Ships hidden in wave troughs. Air filled with spray
	>34	>121	>75	>65					

1 ms⁻¹ = 3.6 km h⁻¹ = 2.237 mi h⁻¹ = 1.943 knot
 0.278 m s⁻¹ = 1 km h⁻¹ = 0.658 mi h⁻¹ = 0.540 knot
 0.447 m s⁻¹ = 1.609 km h⁻¹ = 1 mi h⁻¹ = 0.869 knot
 0.515 m s⁻¹ = 1.853 km h⁻¹ = 1.151 mi h⁻¹ = 1 knot

ΑΠΕ στην ΕΕ. Στόχοι

Στη Συνάντηση κορυφής, Μάρτιος 2007

- Σχεδιάσθηκε η Ενεργειακή πολιτική για την Ευρώπη
- Εγκρίθηκε σχέδιο δράσης 2007-2009.
- Ολοκλήρωση και λειτουργία εσωτερικής αγοράς της ΕΕ στους τομείς Φυσικού Αερίου και ηλεκτρικής Ενέργειας
- Ασφάλεια Ενεργειακού σχεδιασμού

Στόχοι Μνημονίου ΕΕ

Στο επίκεντρο (Σχέδιο 20-20-20)

Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% μέχρι το 2020 σε σύγκριση με το 1990

Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κατά 20%

Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα 20%

Επί πλέον Βιοκαύσιμα στις μεταφορές 10% (με εξειδίκευση σε κράτη μέλη)

Για ηλεκτροπαραγωγή με ΑΠΕ ο στόχος είναι 30%

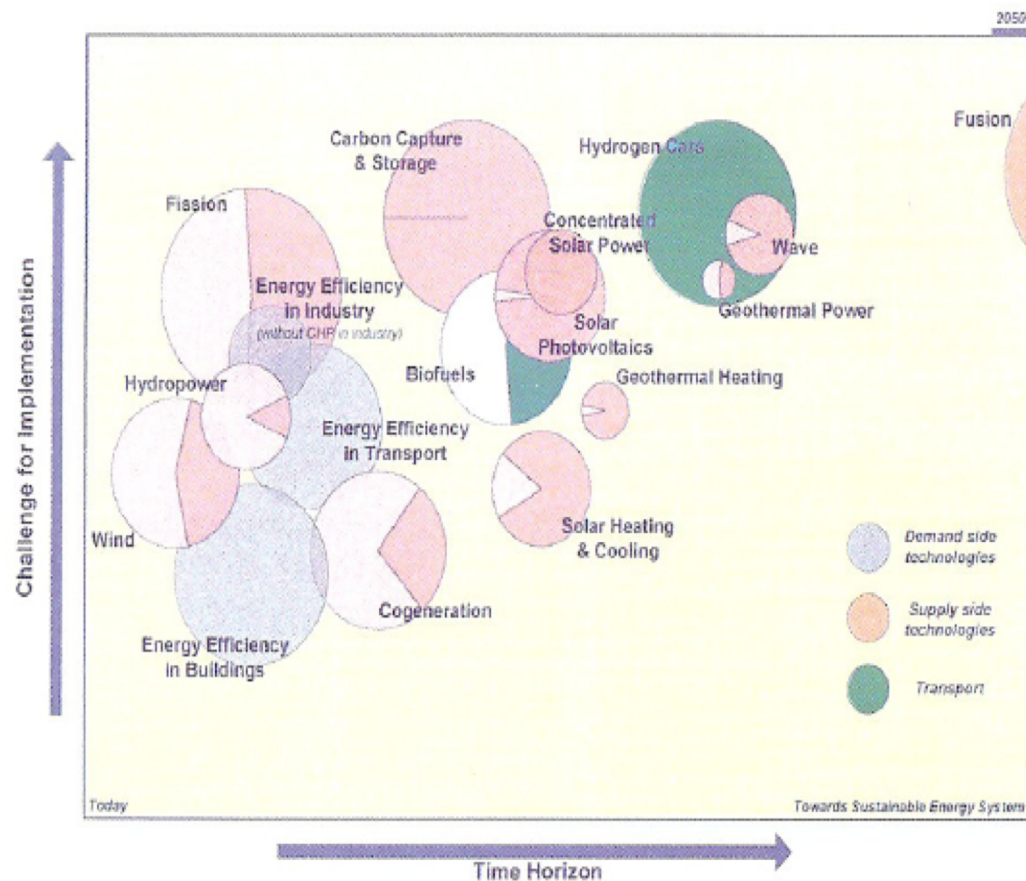
Νέος στόχος

Στόχος Ευρώπης να γίνει η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος μέχρι το 2050

Ευρωπαϊκός χάρτης ενεργειακών τεχνολογιών 2050

Πρώτο στάδιο 2020
– Σταθεροποίηση

Στρατηγικό σχέδιο
ενεργειακών τεχνολογιών
Δεύτερο στάδιο 2050



Σχήμα 1: Ευρωπαϊκός οδικός χάρτης ενεργειακών τεχνολογιών με ορίζοντα το 2050^[2].

Επικαιροποιημένο Εθνικό Σχέδιο για την ενέργεια και το κλίμα (ΕΣΕΚ 2030)

Μείωση εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και περιβαλλοντικοί στόχοι

οι συνολικές εκπομπές ΑτΘ να μειωθούν κατά τουλάχιστον 40% σε σχέση με το 1990 (επιτυγχάνεται ποσοστό μείωσης >42%)

- να επιτευχθούν ισοδύναμοι στόχοι μείωσης εκπομπών στους επιμέρους τομείς εντός και εκτός του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών με τους αντίστοιχους κεντρικούς Ευρωπαϊκούς
- επίτευξη ποσοτικών στόχων για τη μείωση των εθνικών εκπομπών συγκεκριμένων ατμοσφαιρικών ρύπων
- **απόσυρση λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής έως το έτος 2028**

Αύξηση συμμετοχής ΑΠΕ στην κατανάλωση ενέργειας

το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας να ανέλθει τουλάχιστον στο 35%

- το μερίδιο συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να ανέλθει τουλάχιστον στο 60%
- το μερίδιο των ΑΠΕ για τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης να ξεπεράσει το 40%
- το μερίδιο των ΑΠΕ στον τομέα των μεταφορών να ξεπεράσει το 14% (επιτυγχάνεται 19%) σύμφωνα με τη σχετική μεθοδολογία υπολογισμού της ΕΕ

Επίτευξη βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης

να επιτευχθεί βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 38% σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή μεθοδολογία

- η τελική κατανάλωση ενέργειας να μην ξεπεράσει τα **16,5Mtoe*** το έτος 2030
- η πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας να μην ξεπεράσει τα 22,5Mtoe το έτος 2030
- να επιτευχθούν τουλάχιστον 7 Mtoe σωρευτικής εξοικονόμησης ενέργειας κατά την περίοδο 2021-2030**.
- να γίνει σε ετήσια βάση ενεργειακή ανακαίνιση του 3% του συνολικού εμβαδού της θερμικής ζώνης των κτιρίων της κεντρικής δημόσιας διοίκησης έως το έτος 2030

Mtoe

Ο τόνος ισοδύναμου πετρελαίου είναι μονάδα ενέργειας. Ένας Τ.Ι.Π. ισοδυναμεί με την ενέργεια που εκλύεται από την καύση ενός τόνου αργού πετρελαίου και είναι περίπου ίσος με 42 GJ

Σύνοψη Εθνικών Στόχων ΕΣΕΚ 2030

Έτος στόχου: 2030	Τελικό ΕΣΕΚ	Αρχικό σχέδιο ΕΣΕΚ	νέοι Στόχοι ΕΣΕΚ σε σχέση με στόχους Ευρωπαϊκής Ένωσης
Μερίδιο ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Τελική Κατανάλωση Ενέργειας	≥35%	31%	Αυξημένος βαθμός φιλοδοξίας σε σχέση με Ευρωπαϊκό κεντρικό στόχο 32% ΕΕ
Μερίδιο ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Τελική Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας	≈61-64%	56%	
Τελική Κατανάλωση Ενέργειας	≈16,1-16,5 Mtoe (≥38% σε σχέση με προβλέψεις 2007)	18,1 Mtoe	Αυξημένος βαθμός φιλοδοξίας σε σχέση με Ευρωπαϊκό κεντρικό στόχο 32.5% και επίτευξη στόχου βάσει νέου δείκτη ΕΕ για μείωση κατανάλωσης σε σχέση με το έτος 2017
Μερίδιο Λιγνίτη στην Ηλεκτροπαραγωγή	0%	16,5%	
Μείωση ΑτΘ	≥42% vs σε σχέση με 1990, ≥55% σε σχέση με 2005	32% σε σχέση με 1990, 48% σε σχέση με 2005	Σε ταύτιση με κεντρικούς Ευρωπαϊκούς στόχους και υπεραπόδοση σε σχέση με εθνικές δεσμεύσεις στους τομείς εκτός ΣΕΔΕ

Αιολική ισχύς στην Ελλάδα

Wind Energy Capacity (MW)^{[5][6]}

Country	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Greece	39	112	189	272	297	383	473	573	746	871	985	1,087	1,208	1,634	1,749	1,865	1,980	2,135	2,374	2,651

2018 : 2844 MW

2019 : 3576 MW

2020: 4113 MW

Πίνακας 8: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος μονάδων ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή.

Ηλεκτροπαραγωγή - Εγκατεστημένη Ισχύς [GW]	2020	2022	2025	2027	2030
Βιομάζα & Βιοαέριο	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
Υ/Η	3,4	3,7	3,7	3,7	3,7
Αιολικά	3,6	4,2	5,2	6,0	7,0
Φ/Β	3,0	3,9	5,3	6,3	7,7
Ηλιοθερμικοί σταθμοί	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Γεωθερμία	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
Σύνολο	10,1	11,9	14,5	16,3	18,9

Εμπόδια που πρέπει να υπερπηδηθούν

- Έντονη προσπάθεια υπό εξέλιξη.
- Εμπόδια

Μη Τεχνικά

Απλοποίηση αδειοδοτικού πλαισίου, Αποδοχή τοπικής κοινωνίας

Τεχνικά

Ενίσχυση δικτύων μεταφοράς στο διασυνδεδεμένο σύστημα

Διασυνδέσεις νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα

Διασυνοριακές συνδέσεις

Ενημέρωση πληθυσμού

Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα αιολικών μηχανών

Θετικές επιπτώσεις

Τι υπάρχει μέσα σε μία ανεμογεννήτρια:

Περιβαλλοντικά

Μείωση αερίων εκπομπών

Μία ανεμογεννήτρια 10MW αποτρέπει ετησίως:

- 465 τόνους SO₂
- 36 Τόνους N_xO
- 24 τόνους αιωρούμενων σωματιδίων
- 25000 Τόνους CO₂

Αρνητικές Επιπτώσεις

- Χρήσεις γης
- Απώλειες πουλιών κυρίως σε μικρά ύψη πύργων
- Θόρυβος Μηχανικός και αεροδυναμικός
- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- Αισθητικές επιπτώσεις

ΙΣΧΥΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΑΝΕΜΟ

– Γενικά χαρακτηριστικά

Σύνηθες πλέον φαινόμενο οι ανεμογεννήτριες με διάμετρο 1m-100m. Κυρίως για παραγωγή ηλεκτρισμού. Πρόσφατα και στη θάλασσα (θεμελιωμένες ή και πλωτές)

$$P_T = \frac{1}{2} C_P A \rho u_0^3$$

όπου C_P ο συντελεστής ισχύος. Τα μεγέθη μπορούν να είναι και τα μέσα ετήσια

Μία ανεμογεννήτρια αποτελείται από ρότορα, ηλεκτρογεννήτρια και ηλεκτρονικά (Wind Energy Conversion System)

Μέγιστη ισχύς πιστοποιείται για συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου αναφοράς 12 m/s

Τύποι αιολικών μηχανών – κριτήρια (1)

Μερικά γενικά χαρακτηριστικά

Τυπικός χρόνος ζωής 20-25 έτη

Τυπικό κόστος: 700-1000 €/kW

Αιολικές ηλεκτρογεννήτριες υπάρχουν από το 1890

Από το 1973 αυξάνεται ο αριθμός τους.

Τύποι αιολικών μηχανών

- Άξονας παράλληλος ή κάθετος στη ροή αέρα
- Κυρίαρχη δύναμη είναι η άνωση ή η αντίσταση
- Ποια είναι η στιβαρότητα;

Μεγάλη στιβαρότητα (solidity) δηλ. πολλά πτερύγια

- Ξεκινούν ευκολότερα
- Έχουν μεγάλη αρχική ροπή
- Φθάνουν σε μεγιστη ισχύ με μικρή συχνότητα περιστροφής
- Εφαρμογή πχ. Στην άντληση νερού.

Τύποι αιολικών μηχανών – κριτήρια (2)

Μηχανές μικρής στιβαρότητας (χρήση σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας)

- Σκοπός της μηχανής (να δώσει Μηχανική ή ηλεκτρική ισχύ)
- Συχνότητα περιστροφής. Σταθερή ή προσαρμοζόμενη στην ταχύτητα του αέρα;
- Πώς η κίνηση του άξονα συζεύγνυται με την γεννήτρια, άμεσα ή έμμεσα
- Αδράνεια της μηχανής και η ελαστικότητα του τρόπου σύζευξης απορροφούν τις μεγάλες και απότομες αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου

Στρωτή-Τυρβώδης ροή

Στρωτή ροή όπου όλα τα στοιχεία του ρευστού κινούνται παράλληλα χωρίς να τέμνονται οι τροχιές τους.

Η γρήγορη ροή ρευστού είναι ασταθής. Μία τυχαία διαταραχή της ροής προκαλεί στοιχεία όγκου να κινούνται γρήγορα σε άλλη κατεύθυνση.

Μία αρχική διαταραχή αρκεί και όλη η ροή περνάει σε ημιχαιτική κατάσταση, την **τυρβώδη ροή** ή στροβιλισμό.

Όταν κινούνται στοιχεία εγκάρσια στη ροή μεταφέρουν μάζα και ορμή. Και αυτή η διαδικασία μεταφοράς είναι πολύ πιο έντονη από την αντίστοιχη μοριακή διαδικασία που επικρατεί στην στρωτή ροή.

Ο αριθμός Reynolds διαχωρίζει στρωτή από την τυρβώδη ροή

Πχ. Ροή σε σωλήνες με αριθμό Reynolds $R > 2300$ είναι τυρβώδης

Ο αριθμός Reynolds ορίζεται ως ο λόγος της ορμής του ρευστού προς την τριβή λόγω ιξώδους $R = uX/\nu$ όπου u η ταχύτητα του ρευστού, ν το κινηματικό ιξώδες και X ένα χαρακτηριστικό μήκος της ροής



(a) Laminar flow

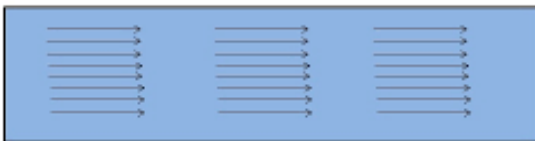
Στρωτή ροή



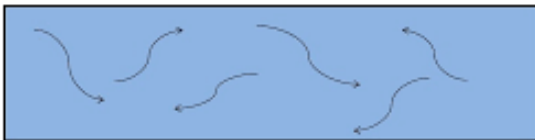
(b) Turbulent flow

τυρβώδης ροή

Στρωτή ροή



Laminar Flow

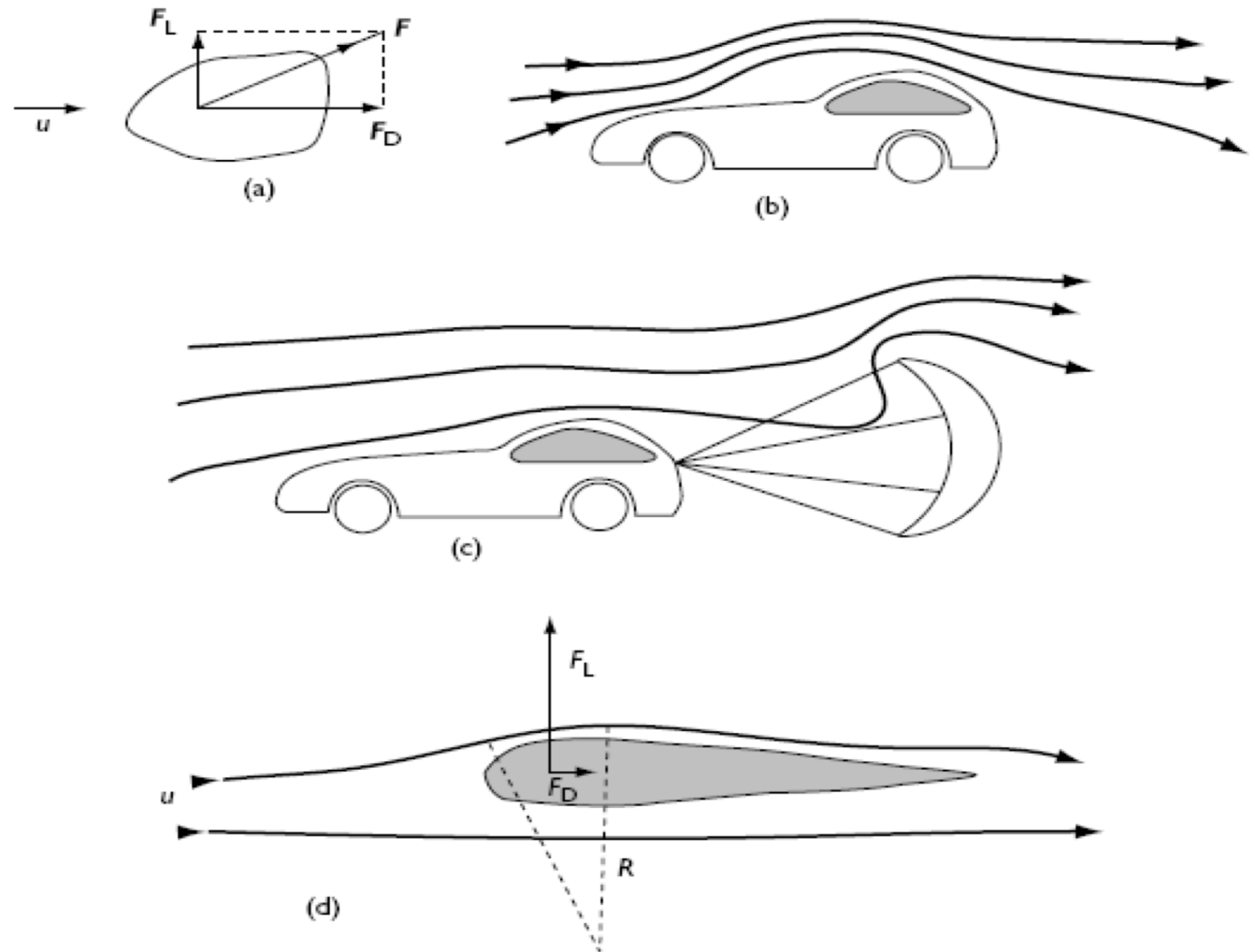


Turbulent Flow

τυρβώδης ροή

Άνωση και Οπισθέλκουσα

Όλα τα σώματα υφίστανται άνωση και οπισθέλκουσα



Αιολικές μηχανές με άξονα κάθετο στο ρεύμα αέρα (1)

Δέχεται ανέμους από κάθε κατεύθυνση

Πχ. Ανεμόμετρο σε σχήμα κυπέλλου: Βασική δύναμη η Αντίσταση F_D

Πλεονέκτημα: Δεν επηρεάζονται από τάσεις λόγω βαρύτητας

Μειονέκτημα: Κόπωση λόγω συντονισμών

Περιστροφική ροπή αλλάζει περιοδικά -> μη σταθερή έξοδος ισχύος

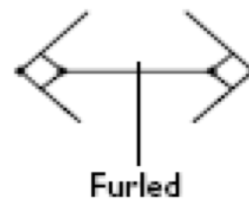
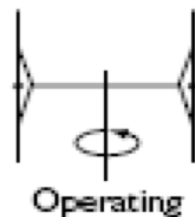
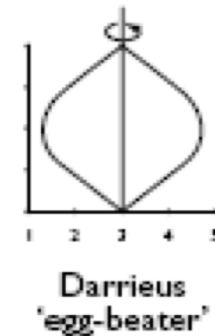
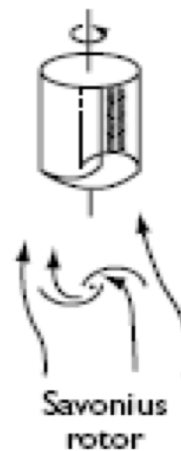
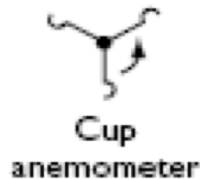
Παραδείγματα

Savonius: Μεγάλη
στιβαρότητα -> μεγάλη ροπή

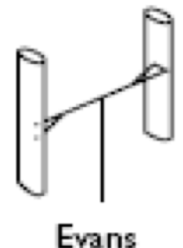
Darrieus: F_L

Musgrove: F_L

Evans: F_L

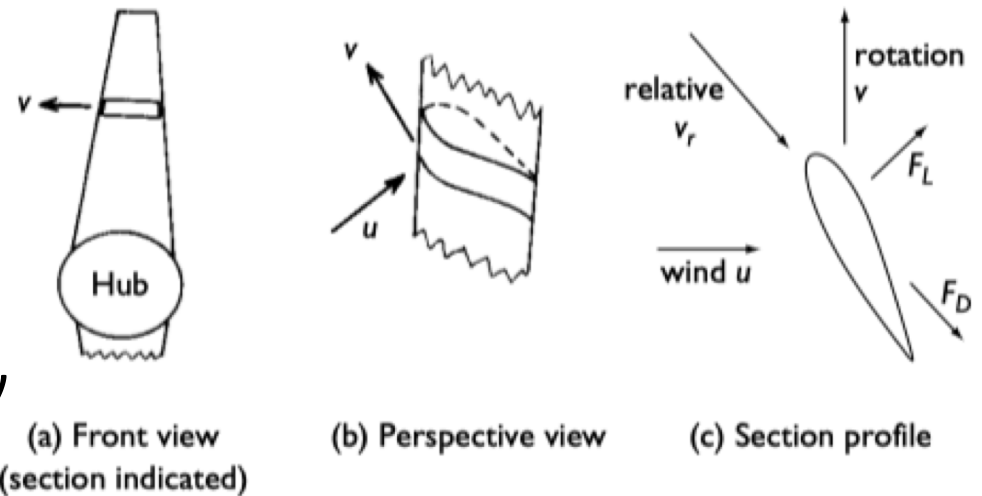


Musgrove



Αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα

- Βασική δύναμη είναι η άνωση.
- Ο άξονας μπορεί να περιστραφεί στο οριζόντιο επίπεδο (Yaw)
- Αν η μηχανή έχει τα πτερύγια πίσω από τον πύργο (σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου) επηρεάζεται από την σκιά του πύργου και τύρβη.
- Σήμερα σχεδόν όλες οι Α/Γ έχουν τα πτερύγια μπροστά από τον πύργο



- Κυκλικές τάσεις-> κόπωση υλικών
- Θόρυβος
- Τύρβη στην έξοδο
- 2 και 3 πτερυγίων για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Αιολικές μηχανές με οριζόντιο άξονα

(a)



Single-bladed



Two-bladed



Three-bladed



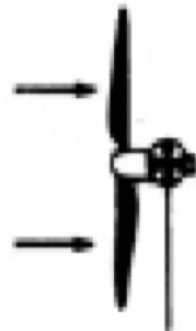
Multi-bladed



Tip vane



Upwind with fan tail passive steering



Upwind with active steering from side rotors



Upwind with active powered steering switched by wind vane

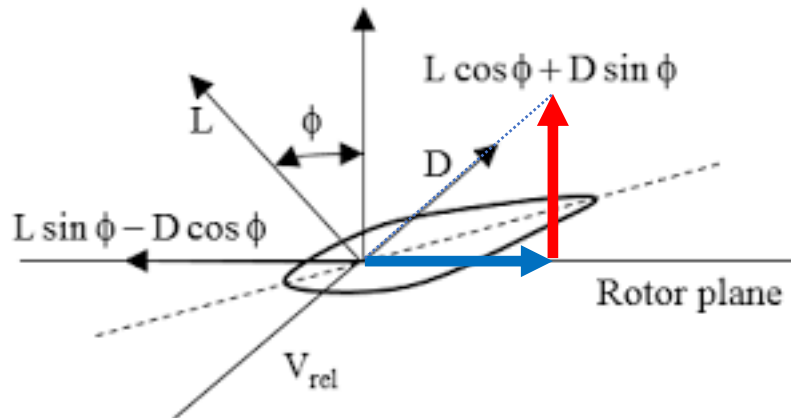


Downwind self-oriented or power steered

Γεωμετρία πτερυγίων

Θεωρία Στοιχείων Πτερυγίων

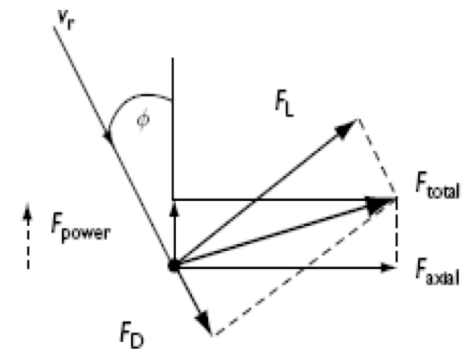
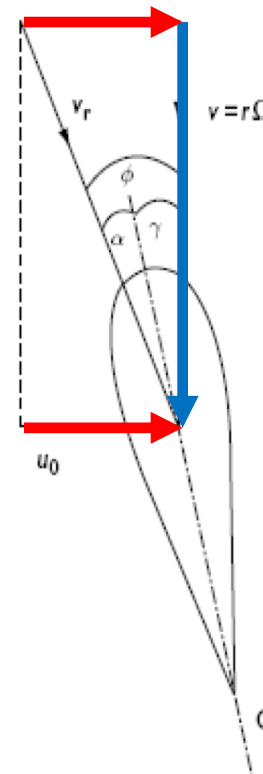
- Κάθε στοιχείο πτερυγίου είναι μία αεροτομή
- Η οπισθέλκουσα και η άνωση είναι γνωστές.
- Γνωρίζοντας και την γωνία προσβολής α μπορούμε να υπολογίσουμε την δύναμη για κάθε στοιχείο.



$$\tan \phi = u_0 / R\omega = 1/\lambda$$

$$F_{axial} = F_L \cos \phi + F_D \sin \phi$$

$$F_{power} = F_L \sin \phi + F_D \cos \phi$$

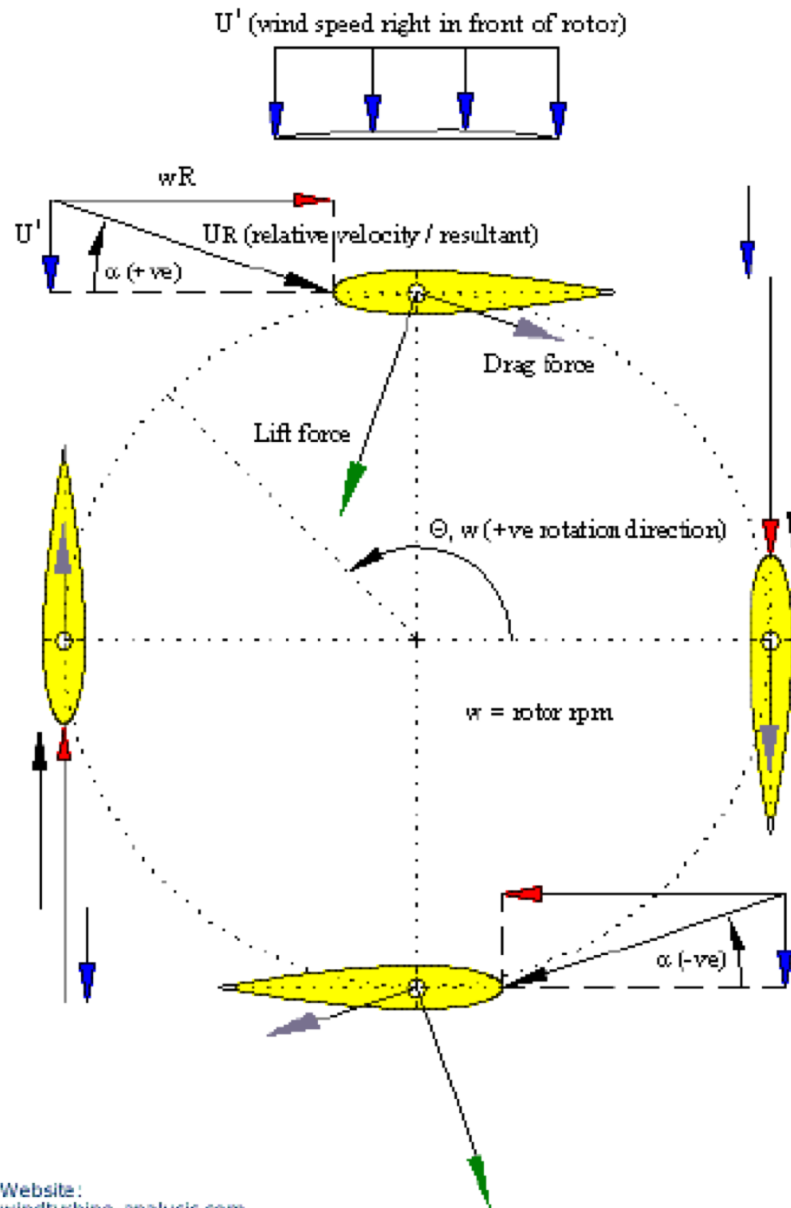


Δυνάμεις

Ταχύτητες

Chord line

Δυνάμεις σε πτερύγιο – Κατακόρυφος άξονας



Legend:

Blue arrow - air velocity relative to the ground

Red arrow - velocity of the ground relative to the airfoil

Black arrow - resultant air velocity relative to the airfoil

Green arrow - lift force

Grey arrow - drag force

Website:
windturbine-analysis.com

Figure 2: Top view of forces on a Darrieus blade throughout 360° of rotation

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

- Λίγα λόγια για μηχανική ρευστών
- Υπολογισμός ισχύος ανέμου και μετατροπής ισχύος στη μηχανή
- Υπολογισμός δύναμης
- Υπολογισμός ροπής
- Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (Spin-tip ratio)

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΡΕΥΣΤΩΝ

Η μεταφορά ενέργειας από και προς το ρευστό είναι στη βάση της μετεωρολογίας και πολλών συστημάτων ανανεωσιμων πηγών ενέργειας

Πχ. Αιολικές μηχανές, ενέργεια από τα κύματα, θερμικά ηλιακά σώματα κλπ

Για σταθερή, ασυμπίεστη ροή

$$m_1 = \rho A_1 (v_1 \Delta t) \Rightarrow$$

$$\dot{m}_1 = \frac{m_1}{\Delta t} = \rho A_1 v_1$$

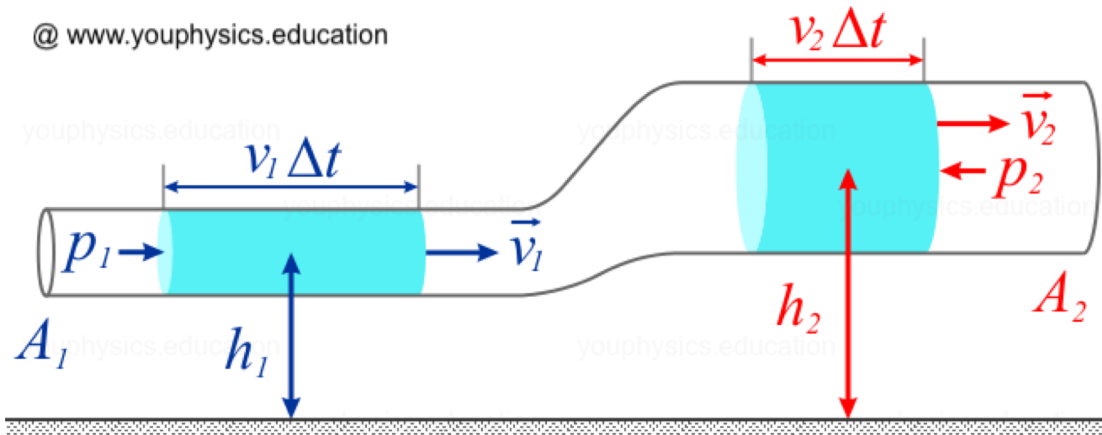
Αντίστοιχα

$$\dot{m}_2 = \frac{m_2}{\Delta t} = \rho A_2 v_2$$

Αλλά από διατήρηση της μάζας

$$m_1 = m_2 = m$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$$



Εξίσωση Bernoulli

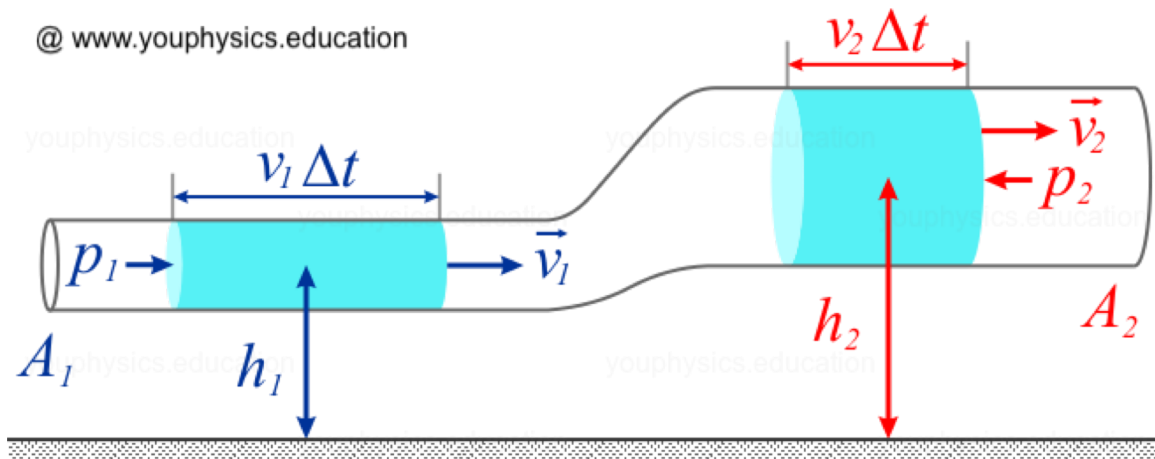
Μεταβολή της δυναμικής ενέργειας και έργο από δυνάμεις που οφείλονται στις πιέσεις = Μεταβολή κινητικής ενέργειας + απώλειες από θερμότητα λόγω τριβών

Αφού $m_1 = m_2 = m$

$$mg(h_1 - h_2) + [(P_1 A_1 (v_1 \Delta t)) - (P_2 A_2 (v_2 \Delta t))] = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + Q$$

Αγνοώντας απώλειες λόγω τριβών και διαιρώντας δια Δt

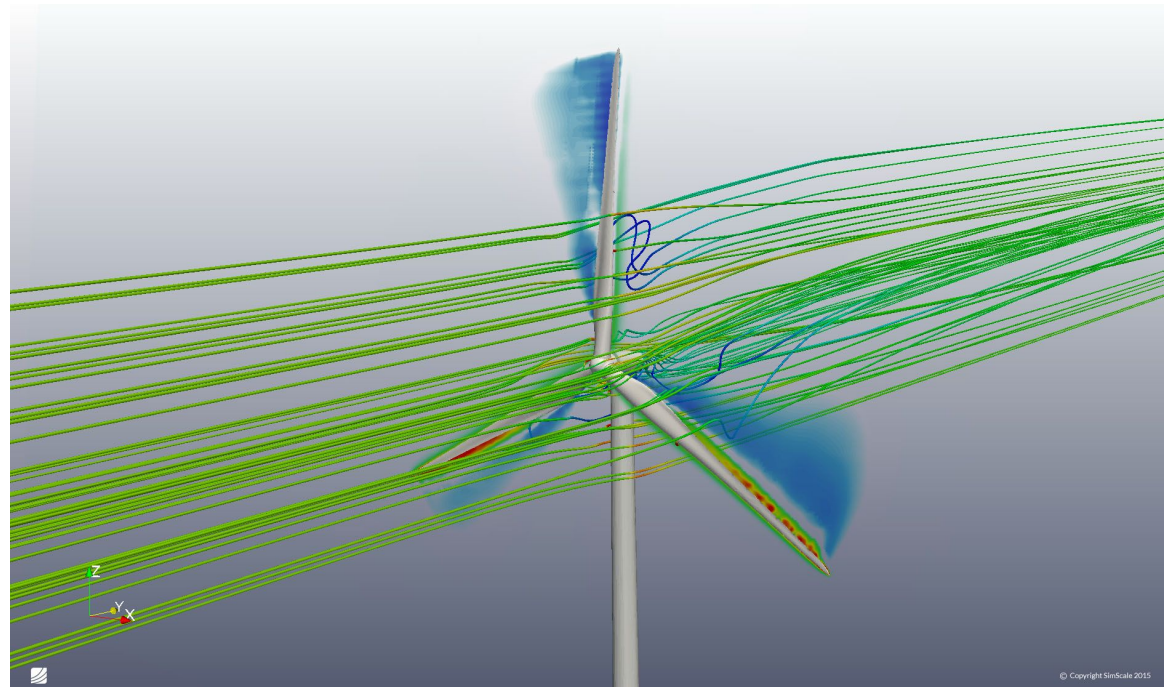
$$\frac{P_1}{\rho} + gh_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = \frac{P_2}{\rho} + gh_2 + \frac{1}{2} v_2^2$$



$$F_1 = A_1 P_1$$

Ροϊκές γραμμές στην Α/Γ

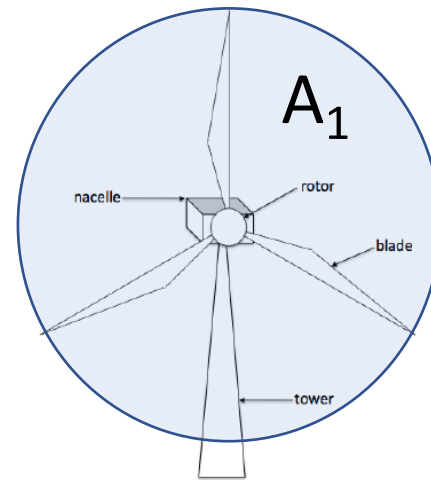
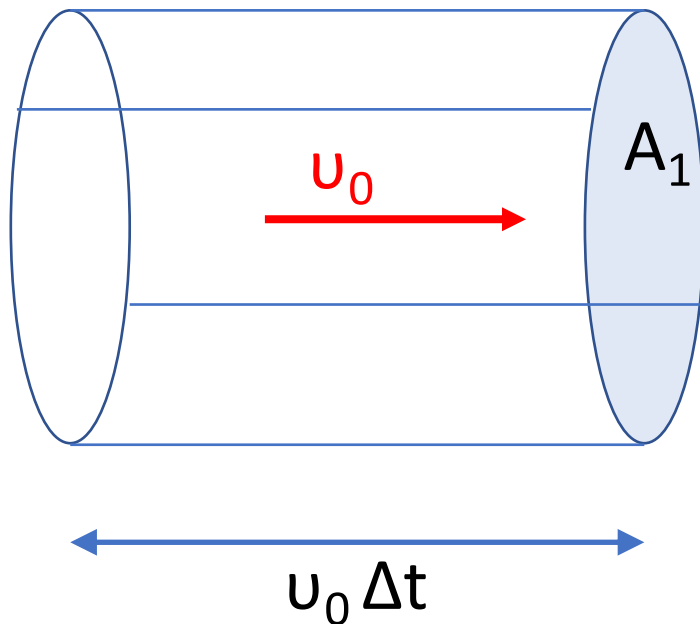
<https://www.youtube.com/watch?v=hsOVuEffb0A>



Βασική Θεωρία (1)

Μάζα Δm περνάει σε χρόνο Δt μέσω της διατομής A_1

$$\left. \begin{aligned} \Delta m &= A_1(v_1 \Delta t)\rho \\ \Rightarrow \dot{m} &= A_1 \rho v_1 \\ \Delta K &= \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_0 = \frac{\Delta K}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} A_1 (v_1 \Delta t) \rho v_1^2}{\Delta t} \Rightarrow P_0 = \frac{1}{2} A_1 \rho v_1^3$$



Βασική Θεωρία (2)

Θεωρούμε ασυμπίεστο ρευστό με πυκνότητα $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$

Παράδειγμα

$$v_0 \sim 10 \text{ m s}^{-1} \rightarrow v_0^3 = 1000 (\text{m s}^{-1})^3 \rightarrow P_0 = 0.6 \text{ kW m}^{-2}$$

$$v_0 \sim 25 \text{ m s}^{-1} \rightarrow v_0^3 = 15625 (\text{m s}^{-1})^3 \rightarrow P_0 = 10 \text{ kW m}^{-2} \quad (\text{Θύελλα, 12 B})$$

Διάμετρος	6m	90m	130m	210m
Ονομαστική ισχύς	10kW	2MW	4MW	9.5MW
Περίοδος περιτροφής	0.2s	4 s	5.7 s	

Βασική Θεωρία (3)

Ιδεατή στρωτή ροή

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) = \frac{dm}{dt}v + m\frac{dv}{dt} = \frac{dm}{dt}v$$

$$F = \dot{m}v$$

Ορμή ανέμου σε μονάδα χρόνου

$$\dot{p} = \dot{m}v = A_1\rho v_1^2$$

Στο επίπεδο των πτερύγων (actuator disk) έχουμε μείωση της πίεσης και της ορμής

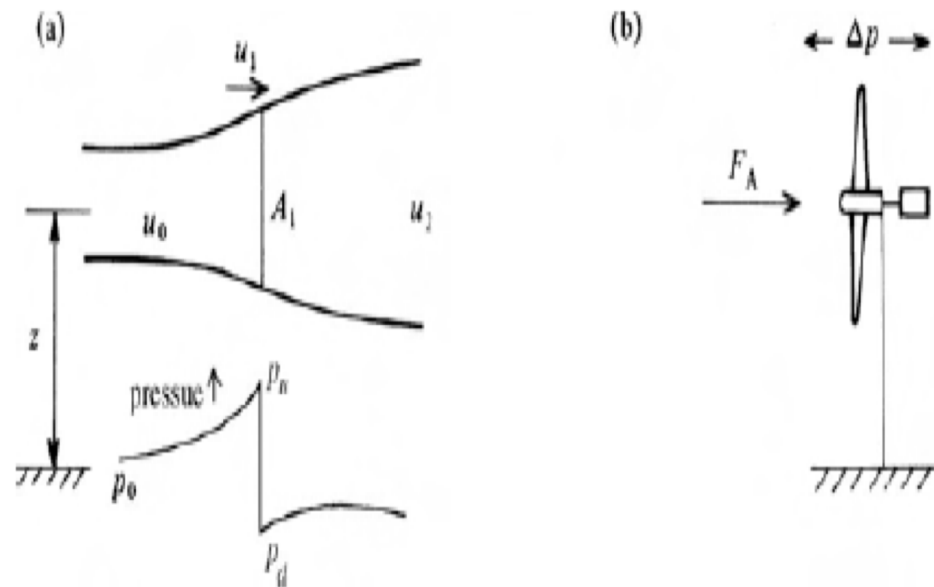
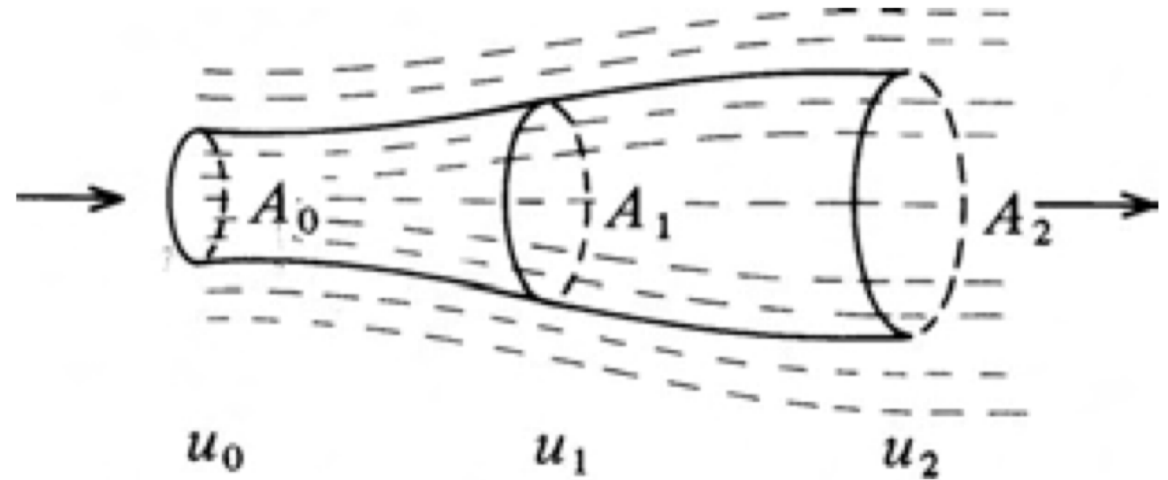


Figure 9.8 Thrust on turbines. (a) Air flow speed u , pressure p , height z . (b) Axial thrust F_A , pressure difference Δp .

Δύναμη

2^{ος} νόμος του Νεύτωνα.

Η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα ισούται με την μεταβολή της ορμής του.

$$F = \rho(A_2 v_2^2 - A_1 v_1^2)$$

Αλλά

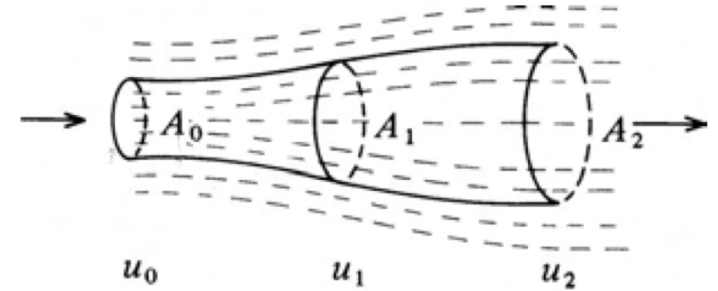
$$\rho A_1 v_1 \Delta t = \Delta m \Rightarrow \dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho \dot{A}_1 v_1 = \rho A_2 v_2$$

Άρα

$$F = \dot{m}(v_2 - v_1)$$

Βασική Θεωρία (4)

$$\text{Δύναμη } F = \dot{m}v_0 - \dot{m}v_2$$



Θα υπολογίσουμε την ισχύ που δεσμεύει η αιολική μηχανή

$$P_T = Fv_1 = \dot{m}(v_0 - v_2)v_1$$

Η ισχύς που απελευθερώνει ο άνεμος

$$P_W = \frac{1}{2} \dot{m}(v_0^2 - v_2^2)$$

Θέτοντας

$$P_T = P_W \Rightarrow v_1 = \frac{1}{2}(v_0 + v_2)$$

Βασική Θεωρία (5)

Συντελεστής διατάραξης : $\alpha = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \Rightarrow v_1 = (1 - \alpha)v_0$

Επειδή $v_1 = \frac{1}{2}(v_0 + v_2)$ ισχύει επίσης $\alpha = \frac{v_0 - v_2}{2v_0} \Rightarrow v_2 = (1 - 2\alpha)v_0$

Γνωρίζουμε ότι $\Delta m = A_1(v_1 \Delta t)\rho \Rightarrow \dot{m} = \rho A_1(1 - \alpha)v_0$

$$P_T = \dot{m}(v_0 - v_2)v_1 = (\rho A_1(1 - \alpha)v_0)[v_0 - ((1 - 2\alpha)v_0)](1 - \alpha)v_0 = [4\alpha(1 - \alpha)^2] \frac{1}{2} \rho A_1 v_0^3 \Rightarrow P_T = \frac{1}{2} C_P \rho A_1 v_0^3$$

Όπου $C_P = [4\alpha(1 - \alpha)^2]$ ο συντελεστής ισχύος

Τελικά $P_T = C_P P_0$

Βασική Θεωρία (7)

Θεωρητικό μέγιστο δέσμευσης ενέργειας ανέμου

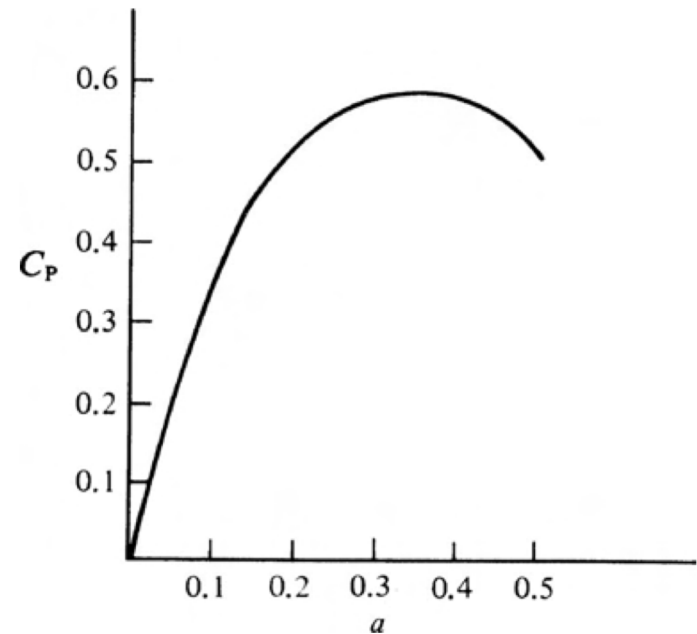
C_P^{max} ισχύει όταν $\alpha = \frac{1}{3}$

$C_P^{max} = \frac{16}{27} = 0.59$ (Κριτήριο BETZ)

$$C_P = [4\alpha(1 - \alpha)^2]$$

Όταν $\alpha = \frac{1}{3} \Rightarrow v_1 = \frac{3v_0}{4}$ και $v_2 = \frac{v_0}{2}$

Όταν $\alpha = \frac{1}{2} \Rightarrow v_1 = \frac{v_0}{2}$ και $v_2 = 0$



Αν δεν έχουμε εξαγωγή ενέργειας,
συνάγουμε από την εξίσωση του Bernoulli

Αξονική δύναμη

$$\frac{P_0}{\rho_0} + gz_0 + \frac{v_0^2}{2} = \frac{P_d}{\rho_d} + gz_d + \frac{v_d^2}{2}$$

$$\Delta\rho \approx \Delta z \approx 0$$

$$\Delta P = (P_d - P_0) = \frac{\rho}{2}(v_0^2 - v_d^2)$$

άρα

$$\begin{aligned} \Delta P_{max} &= \frac{\rho v_0^2}{2} \Rightarrow F_{A,max} = A_1 \Delta P_{max} \\ &= \frac{1}{2} \rho A_1 v_0^2 \end{aligned}$$

Συντελεστής αξονικής δύναμης

F_A = Αξονική δύναμη -> ρυθμός μεταβολής της ορμής του αέρα

$$\begin{aligned} F_A &= \dot{m}(v_0 - v_2) = A_1 \rho v_1 (v_0 - (1 - 2\alpha)v_0) = (\rho A_1 v_1)(2\alpha v_0) \\ &= \rho A_1 (1 - \alpha) v_0 (2\alpha v_0) = \frac{1}{2} \rho A_1 v_0^2 [4\alpha(1 - \alpha)] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow F_A = \frac{1}{2} \rho A_1 v_0^2 [4\alpha(1 - \alpha)]$$

$$\text{Αλλά } F_{A,max} = \frac{1}{2} \rho A_1 v_0^2$$

Ορίζουμε τον συντελεστή αξονικής δύναμης $C_F = 4\alpha(1 - \alpha)$
Και τελικά

$$F_A = C_F F_{A,max}$$

Μέγιστη εξαγωγή ισχύος

Υπενθύμιση: $v_2 = (1 - 2\alpha)v_0$

Για $\alpha = \frac{1}{2}$

$C_F = 4\alpha(1 - \alpha) = 1$ άρα μέγιστο και $v_2 = 0$ (Συμπαγής δίσκος)

Η μέγιστη εξαγωγή ισχύος συμβαίνει όταν $\alpha = \frac{1}{3}$ (Κριτήριο Betz)

$$C_F = 4\alpha(1 - \alpha) = \frac{8}{9}$$

Παρατήρηση:

Όταν εξάγει ισχύ

- Η αιολική μηχανή παρουσιάζεται σαν σχεδόν συμπαγής δίσκος στον άνεμο.
- Τα διάκενα μεταξύ των πτερυγίων δεν είναι ορατά στον άνεμο

Αύξηση δύναμης

Αφού $F \propto v_0^2$ αυξάνει γρήγορα. Πρακτικά πρέπει να λειτουργεί η Α/Γ σε ανέμους με ταχύτητα

$$v_0 < 15 - 20 \text{ m s}^{-1}$$

Για να αποφευχθεί η καταστροφή της μηχανής

- Αλλάζουμε κατεύθυνση του οριζόντιου άξονα περιστροφής του στροφείου
- Μειώνουμε την εξαγωγή ισχύος (προτιμάται)
- Πτερύγια σταθερού βήματος
- Σταματάει μηχανικά η περιστροφή

Ροπή δύναμης στον ρότορα

Μέγιστη δυνατή ροπή (υποθέτοντας ότι η δύναμη που περιστρέφει το στροφέιο δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη αξονική δύναμη)

$$\left. \begin{array}{l} \Gamma_{max} = F_{max}R \\ F_{A,max} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_0^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \Gamma_{max} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_0^2 R$$

Η πραγματική ροπή $\Gamma = C_\Gamma \Gamma_{max}$ με το $C_\Gamma < 0.3$

Λόγος ακροπτερυγίου- ταχύτητας λ (tip-speed ratio)

$$\lambda = \frac{v_t}{v_0} = \frac{R\omega}{v_0}$$

Επομένως

$$\Gamma_{max} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_0^2 \left(\frac{v_0 \lambda}{\omega}\right) = \frac{1}{2}\rho A_1 v_0^3 \left(\frac{\lambda}{\omega}\right) = P_0 \frac{\lambda}{\omega}$$

Εξαγωγή ισχύος

Ισχύς που εξάγει η αιολική μηχανή από τον άνεμο $P_T = \Gamma \omega$

Αλλά $P_T = C_P P_0$

$$C_P P_0 = \Gamma \omega \Rightarrow C_P P_0 = (C_\Gamma \Gamma_{max}) \omega = C_\Gamma P_0 \frac{\lambda}{\omega} \omega \Rightarrow$$

$$C_P = \lambda C_\Gamma$$

Αφού $C_{P,max} = 0.59 \rightarrow C_\Gamma \leq \frac{0.59}{\lambda}$

Εξαγωγή ισχύος- χρόνος αλληλεπίδρασης

Η εξαγωγή ισχύος είναι συνάρτηση του χρόνου t_D για να φθάσει ένα πτερύγιο στη θέση που ήταν το προηγούμενο και του χρόνου t_W αποκατάστασης της ήρεμης ροής ανέμου, δηλαδή του χρόνου που χρειάζεται ο αέρας που περνάει από τον δίσκο ενέργειας (δηλαδή το επίπεδο των πτερυγίων ή actuator disk) να επανέλθει στην στρωτή ροή

Η μέγιστη εξαγωγή ισχύος προκύπτει όταν $t_D \approx t_W$
Αν n είναι ο αριθμός των πτερυγίων και d είναι η απόσταση που καλύπτει ο αέρας που έχει διαταραχθεί από το πτερύγιο, μπορούμε να γράψουμε:

$$\left. \begin{aligned} t_D &= \frac{2\pi}{n\omega} \\ t_W &= \frac{d}{v_0} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

Λόγος tip-speed

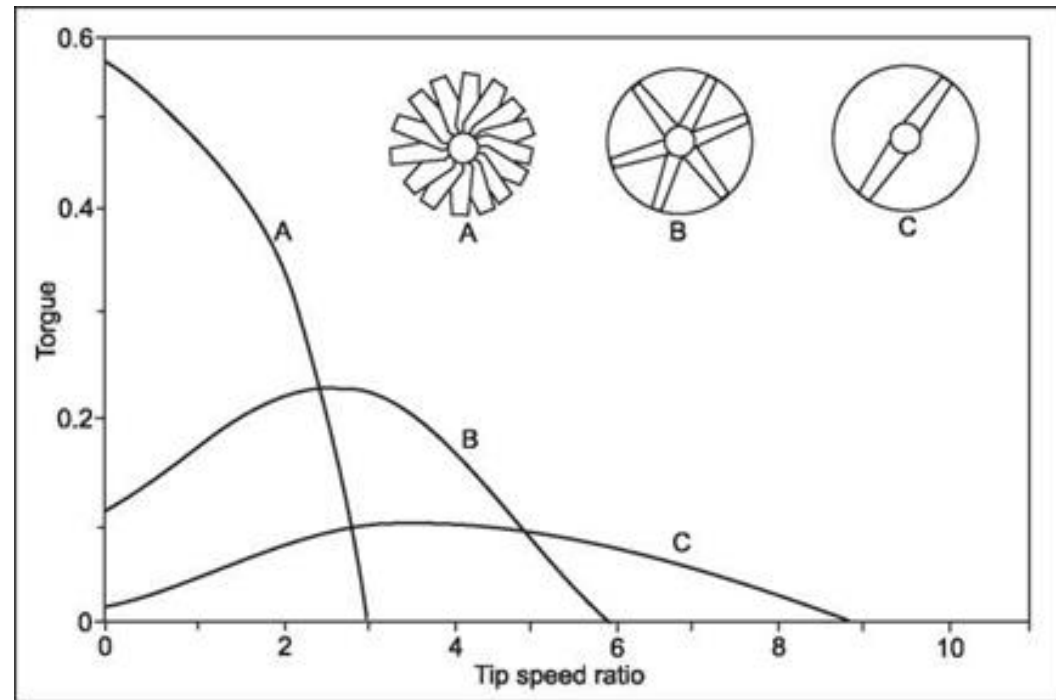
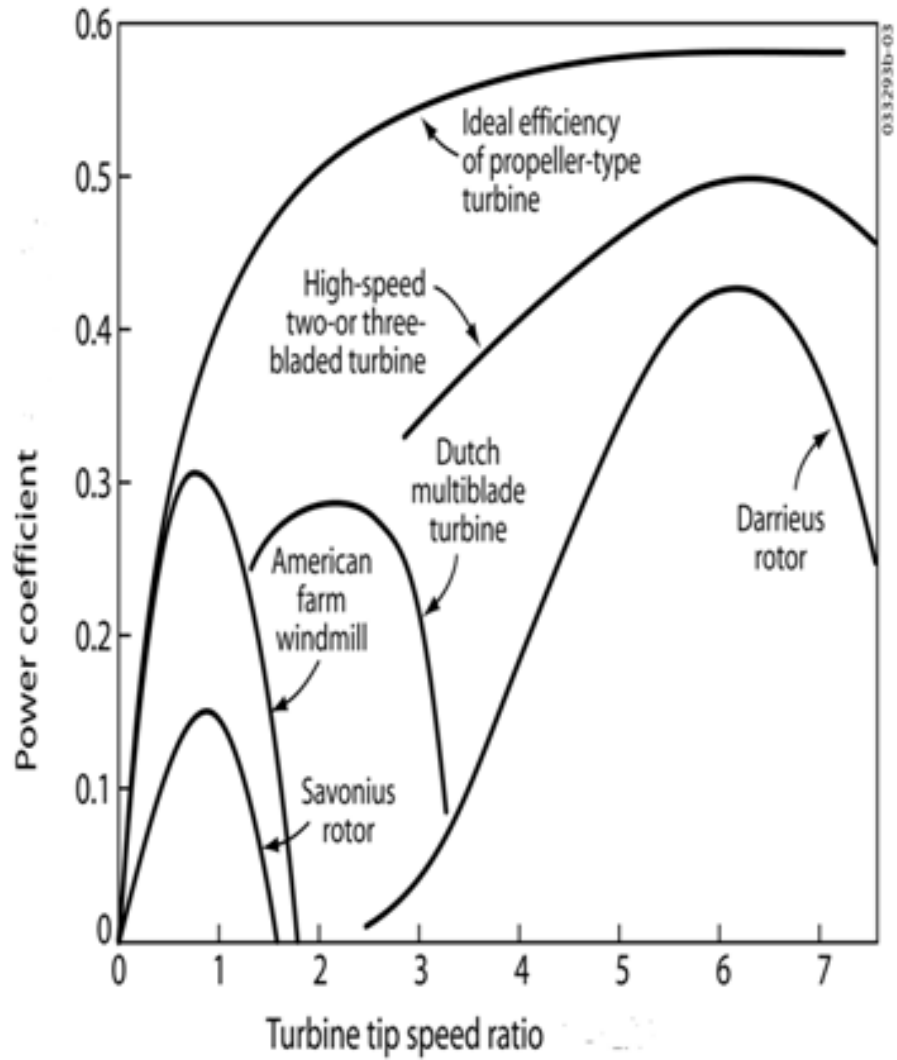
Για βέλτιστη εξαγωγή ισχύος

$$\left. \begin{array}{l} t_D = \frac{2\pi}{n\omega} \\ t_W = \frac{d}{v_0} \\ t_D \approx t_W \end{array} \right\} \Rightarrow R \frac{\omega}{v_0} \approx R \frac{2\pi}{nd} \Rightarrow \lambda_0 \approx \frac{2\pi}{n} \left(\frac{R}{d} \right)$$

Θέτουμε $d=kR$ όπου k προσδιορίζεται πειραματικά
 $k \approx \frac{1}{2}$ οπότε $\lambda_0 \approx \frac{4\pi}{n}$

Για ανεμογεννήτριες με 2 πτερύγια $\lambda_0 \approx \frac{4\pi}{2} \approx 6.3$

Για ανεμογεννήτριες με 3 πτερύγια $\lambda_0 \approx \frac{4\pi}{3} \approx 4.2$



The Betz efficiency criterion of Section 9.3 takes no account of any dynamic effects. There are several approaches to such dynamic calculation (see the review by Shepherd). Glauert's criterion, describing the variation of power coefficient C_p with tip-speed ratio, becomes of value. Both criteria and the relationship of C_p and for a variety of wind turbine types. A further constraint on the design of high angular velocity turbines is that the tip-speed should not reach the speed of sound 330ms^{-1} , so creating shock waves. This is possible for well-matched two-bladed turbines in strong winds of speed $\sim 50\text{ms}^{-1}$.

Tip-speed ratio is probably the most important parameter of a wind turbine, since it relates to the angles of attack of the relative wind speed on the blade airfoil. I

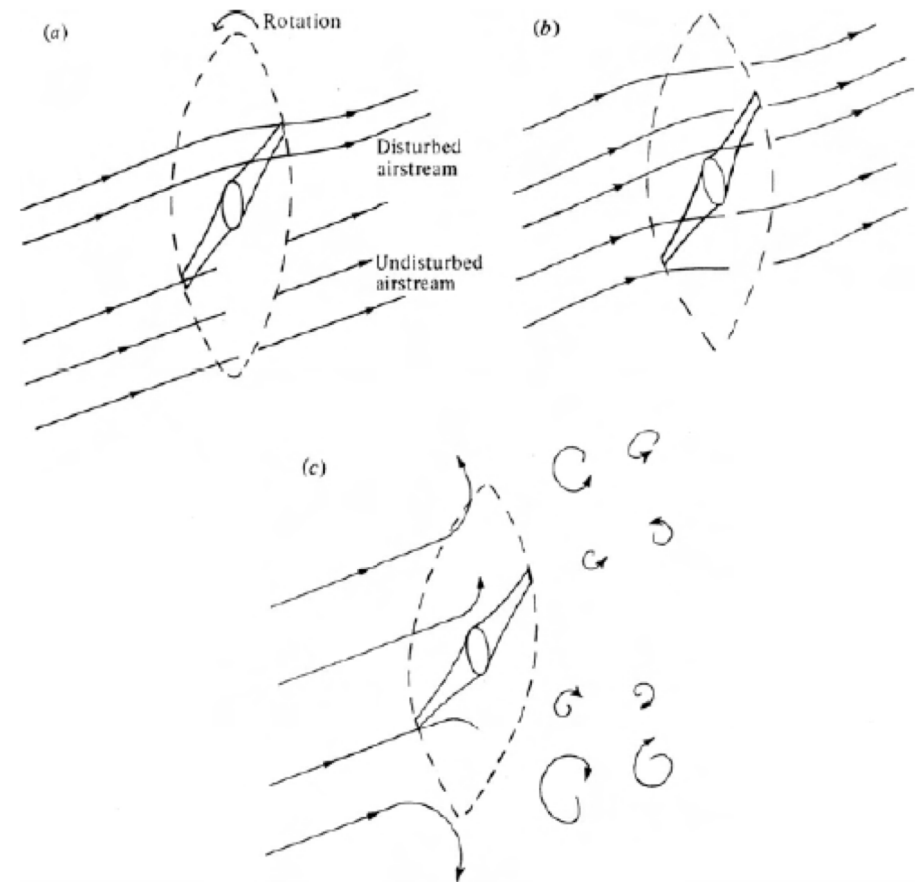
Εξαγωγή ενέργειας σαν συνάρτηση της συχνότητας περιστροφής

Δυναμικό ταίριασμα

Ο αέρας μετά την μηχανή πρέπει να έχει αρκετή ενέργεια για να απομακρυνθεί. Ποια είναι εκείνα τα δυναμικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας της αιολικής μηχανής για να φθάσουμε την μέγιστη αποδοτικότητα; (κριτήριο Betz)

Η απόδοση στην εξαγωγή ισχύος μειώνεται όταν:

- Τα πτερύγια είναι κοντά το ένα στο άλλο ή περιστρέφονται γρήγορα
- Στις αντίθετες συνθήκες οπότε ο αέρας περνάει ανάμεσα χωρίς να διαταράσσεται



Χρονοσειρές ανέμου και θερμοκρασίας

Μετεωρολογικά Δεδομένα.

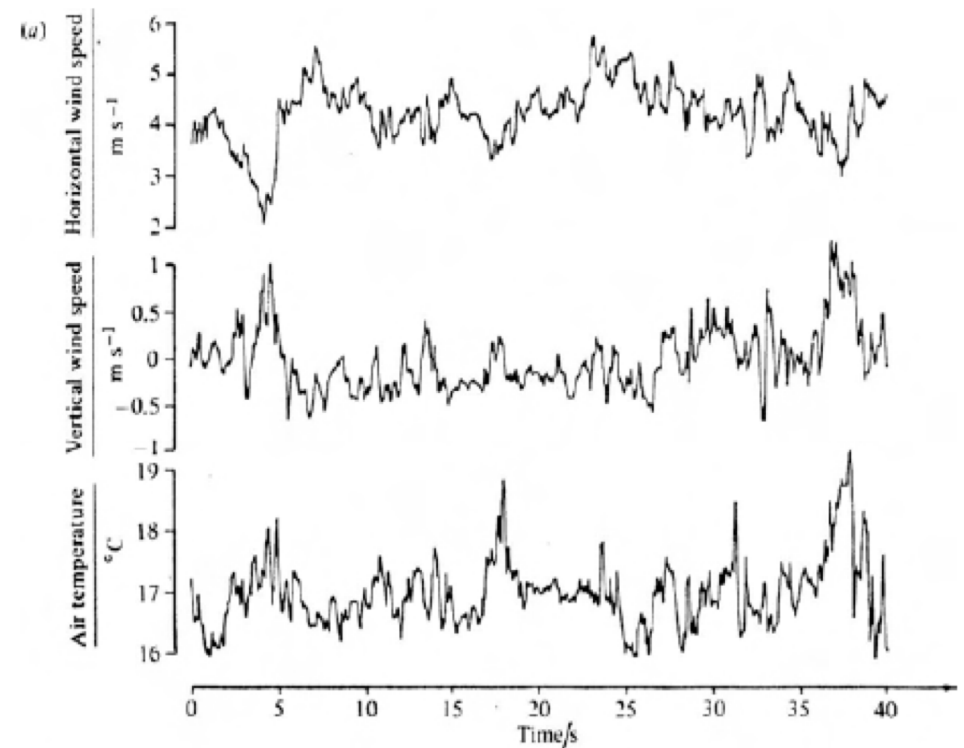
Άνεμος σε ύψος 10m κοντά σε
αεροδρόμια

Χρειάζονται συνεχή δεδομένα σε
διάφορα ύψη για **τουλάχιστον ένα έτος**
στην περιοχή που θα εγκατασταθε

ανεμογεννήτρια

Τυχαία μεταβολή ανέμου (γράφημ
δεδομένων)

Διεύθυνση ανέμου και μεταβολές
τον χρόνο, την διεύθυνση και την
ένταση

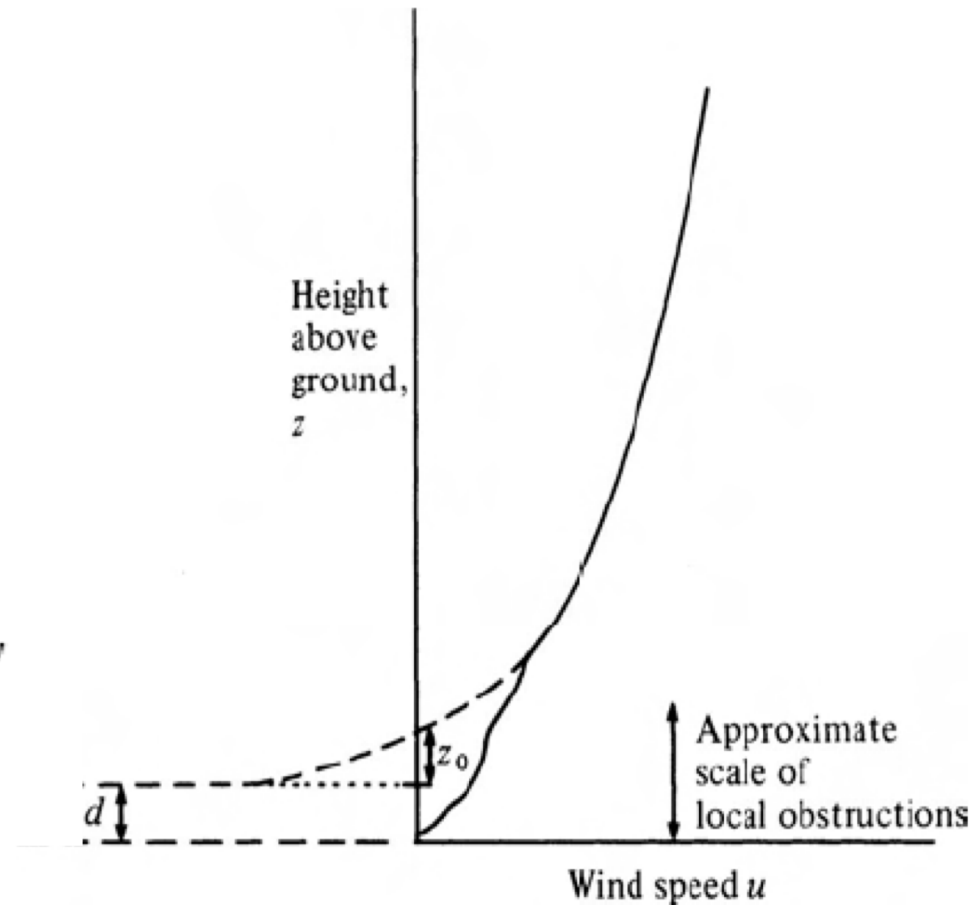


Μεταβολή ανέμου με το ύψος

$$z - d = z_0 \exp(u_z/V)$$

$$u_z = V \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right)$$

$$u_z = u_s \left(\frac{z}{10 \text{ m}} \right)^{b'}$$



Εξαγωγή ισχύος από ανεμογεννήτρια

Το C_p εξαρτάται από το λ

Τι επιζητούμε;

- Μεγιστοποίηση της συνολικής παραγωγής ενέργειας σε ένα χρόνο;
- Ελάχιστη παραγωγή ακόμα και σε ασθενείς ανέμους

C_p μπορεί να μεταβληθεί λόγω ελέγχου. Γεννήτριες ή αντλίες πρέπει να συζευχθούν με την αιολική μηχανή

Παράγοντας δυναμικότητας (Capacity factor)

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μία ανεμογεννήτρια με βαθμονομημένη ισχύ P_R σε άνεμο ταχύτητας u_R

Έστω Φ_u η πιθανότητα ότι η ταχύτητα θα είναι μεταξύ u και $u+du$

Παράγοντας δυναμικότητας: Είναι η μέση παραγόμενη ισχύς διαιρεμένη με την μέγιστη ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Μέση ισχύς που εξάγεται (Ε ενέργεια σε χρονικό διάστημα τ)

$$\overline{P_T} = \frac{E}{\tau} = \int_{v=0}^{\infty} \Phi_v \left[C_P(v) \frac{1}{2} \rho A_1 v^3 \right] dv$$

Βαθμονομημένη ισχύς της Ανεμογεννήτριας σε ταχύτητα u_R

$$P_R = \frac{1}{2} C_P \rho A_1 u_R^3$$

$$\text{Παράγοντας δυναμικότητας} = \frac{\overline{P_T}}{P_R}$$

Περιοχές λειτουργίας του στροβίλου

Ποιες είναι οι περιοχές λειτουργίας του στροβίλου; (E_u η ενέργεια που παράγεται σε ταχύτητα ανέμου u)

$u_0 < u_{ci}$ (Cut-in Speed) $E_u = 0$

$u_{co} > u_0 > u_R$ $E_u = \Phi_{u > u_R} P_R \tau$

$u_0 > u_{co}$ $E_u = 0$

$u_R > u > u_{ci}$

$$P_T \approx au_0^3 - bP_R$$

$$\text{Cut-in } P_T = 0 \Rightarrow u_{ci}^3 = \frac{b}{a} P_R$$

$$\text{At } P_T = P_R \Rightarrow u_R^3 = \frac{1+b}{a} P_R$$

$$\left(\frac{u_{ci}}{u_R}\right)^3 = \frac{b}{1+b}$$

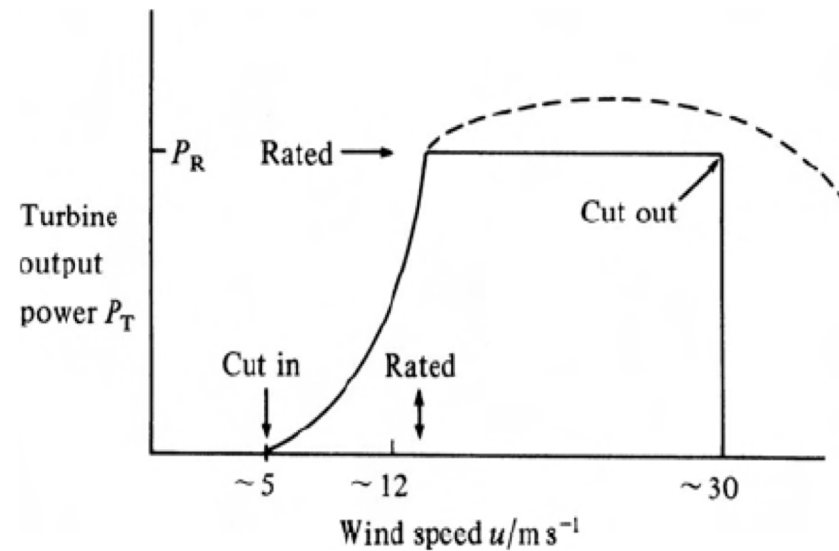
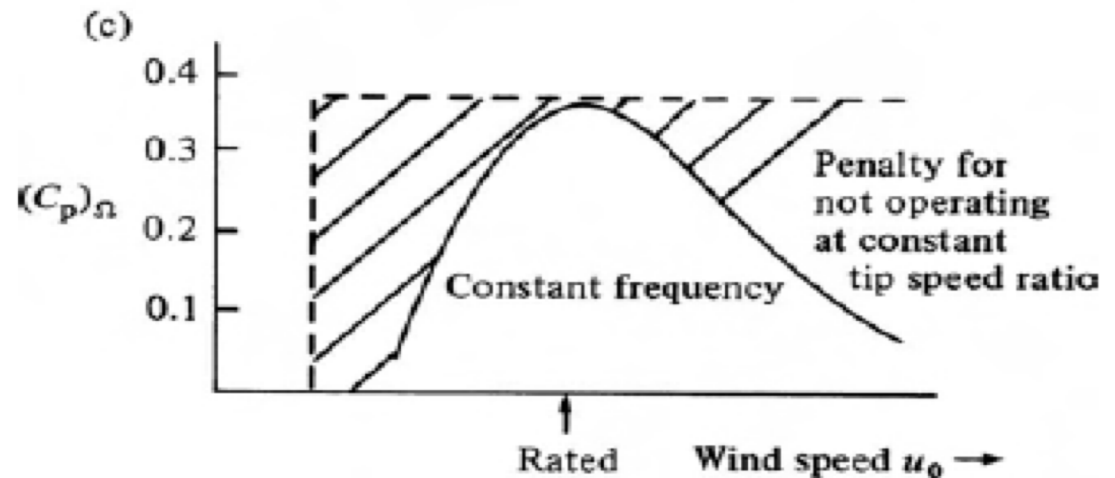
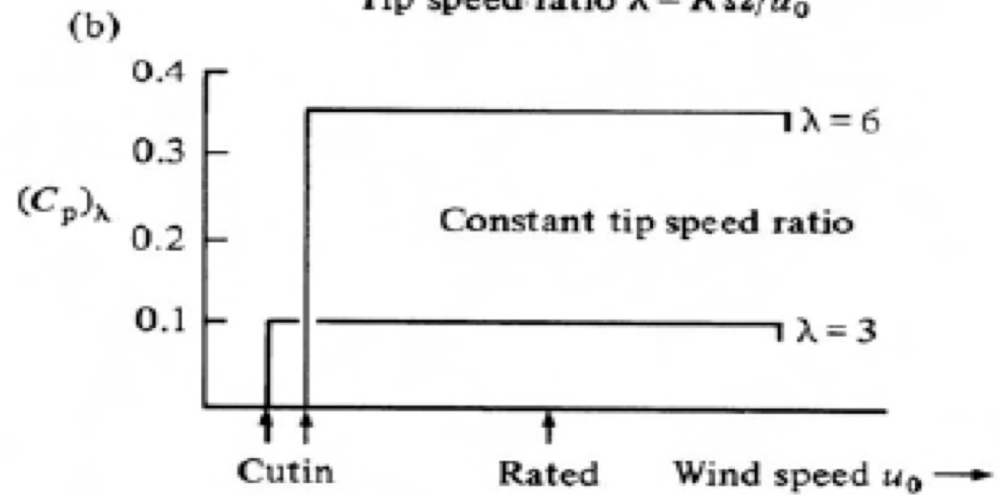
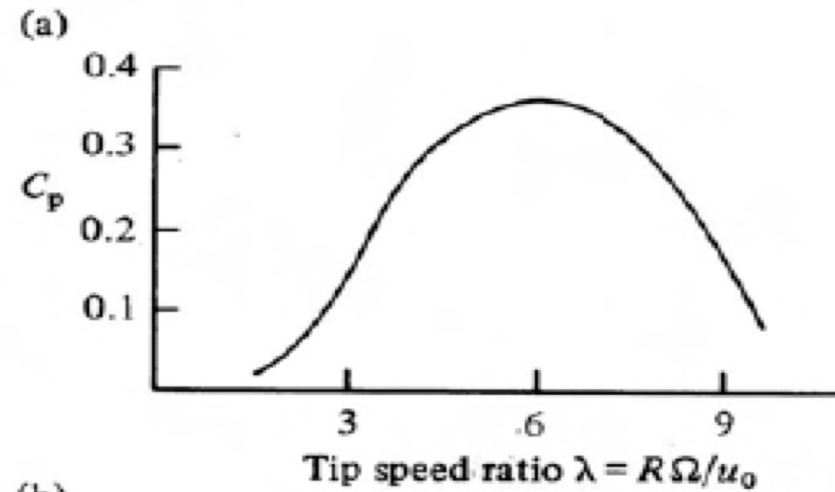


Figure 9.23 Wind turbine operating regions and power performance
 _____ standard characteristics; requiring exact blade pitch control
 ----- actual operating characteristics of many machines, including stall regulation.

C_p vs λ, u_0

Δύο ακραίες καταστάσεις λειτουργίας

- Μεταβλητή ταχύτητα ρότορα (δρομέα) για σταθερό λ άρα σταθερό C_p
- Σταθερή συχνότητα περιστροφής \rightarrow μεταβλητό C_p άρα λιγότερο αποδοτική



Σκοπός απαιτούμενης ισχύος

Εξαγωγή Ισχύος

Πολύπλοκο θέμα. Για ποιο σκοπό είναι η επιδιωκόμενη ισχύς; μέγιστη διάρκεια παραγωγής ή ελάχιστη παραγωγή με ελάχιστον άνεμο;

Γεννήτριες και αντλίες

Παραγωγή ηλεκτρισμού

Ο ηλεκτρισμός είναι πολύ καλή μορφή ενέργειας

- Απόδοση στην παραγωγή 95%
- Απώλειες <10%
- Η κατανάλωση γίνεται σε σταθερή τάση και συχνότητα 110V, 60Hz ή 220V, 50Hz
- Η ηλεκτρική ενέργεια από τον άνεμο μεταβάλλεται τυχαία
- Αν $P_T < 20\%P_{tot}$ τότε οι μεταβολές είναι ανεκτές όταν η ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο
- Αν η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου $> 5 \text{ m/s}$ σε ύψος 10m ίσως ενδείκνυται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

1. Η απόδοση μίας ανεμογεννητριας είναι μεγαλύτερη όταν η συχνότητα περιστροφής αλλάζει ώστε ο λόγος λ (tip-speed) να παραμένει σταθερός
2. Όμως η παραγωγή ηλεκτρισμού είναι αποδοτική σε σταθερή συχνότητα
3. Ο μηχανικός έλεγχος αυξάνει την πολυπλοκότητα και το κόστος.
4. Έλεγχος μέσω προσαρμογής του ηλεκτρικού φορτίου ώστε να ελεγχθεί η συχνότητα περιστροφής

Συχνότητα περιστροφής

1. Για δεδομένη ταχύτητα ανέμου η βέλτιστη συχνότητα περιστροφής μειώνεται όσο αυξάνεται η ακτίνα ώστε ο λόγος λ (tip-speed) να παραμένει σταθερός. Έτσι μεγάλες μηχανές χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων επειδή η συχνότητα περιστροφής τους είναι μικρή
2. Ο ρότορας αποσυμπλέκεται από το φορτίο ώστε να μπορεί να βελτιστοποιείται ανάλογα με τον άνεμο. Χρειάζεται αποθήκευση (πχ. Μπαταρίες για αυτονομία). Για τα διασυνδεδεμένα συστήματα AC-> DC-> AC(220). Αποθήκευση για λίγο χρόνο λόγω «αδράνειας ρότορα»
3. Επειδή δεν υπάρχει πάντα άνεμος, αποθήκευση και δίκτυο

Ταξινόμηση ηλεκτρικών συστημάτων (1)

P_G : Ισχύς άλλων γεννητριών ενέργειας

$$P_T \geq 5P_G$$

Συνήθως πρόκειται για μία γεννήτρια χωρίς σύνδεση στο δίκτυο.

Απαιτείται μπαταρία

Αν θέλουμε ελεγχόμενη συχνότητα

1. Μηχανικός έλεγχος πτερυγίων
2. Έλεγχος φορτίου. Βελτιστοποίηση του λόγου λ .

Ταξινόμηση ηλεκτρικών συστημάτων (2)

$$P_T \approx 5P_G$$

Απομακρυσμένες περιοχές, μικρό δίκτυο. Λειτουργία ανεμογεννήτριας συμπληρωματικά με ντίζελ

Μοναδικός τρόπος λειτουργίας (single mode)

Τάση 220 V σταθερή.

>70% της παραγόμενης ισχύος μπορεί να πεταχθεί λόγω ασυμβατότητας παραγωγής και ζήτησης

Πολλαπλοί τρόποι διανομής (multi-mode)

Χρησιμοποιείται όλη η παραγόμενη από την ανεμογεννήτρια ισχύς

Ταξινόμηση ηλεκτρικών συστημάτων (3)

$$P_T < 0.2P_G$$

Μεγάλες ανεμογεννήτριες σε περιβάλλον μεγάλου δικτύου διανομής.

Πώς θα παράγουμε ηλεκτρική ισχύ σε περίπου σταθερή συχνότητα αλλά με μεταβαλλόμενη συχνότητα περιστροφής;

- Περισσότερες περιελίξεις στην γεννήτρια
- Δύο γεννήτριες σε ένα κάλυμμα
- Γεννήτρια μεταβαλλόμενης συχνότητας AC->DC->AC σταθερής συχνότητας

Φάρμες ανεμογεννητριών

Ανεμογεννητριες μερικών MW λειτουργούν σε ομάδες (10-100).

Περιορίζουν τα κόστη λειτουργίας κατά 10-20%.

Φάρμες στη θάλασσα μερικά km από την ακτή.

Πλεονεκτήματα

ΕΓΧΥΣΗ στο δίκτυο από 1MW βεθμονομημένη ανεμογεννήτρια ή 1 MW από «φαιά» πηγή.

Δεν είναι το ίδιο

Παράγοντας χωρητικότητας (Capacity factor)

- Ανεμογεννήτρια 20-35%
- Θερμικός σταθμός 70-90%

Πίστωση χωρητικότητας

Capacity credit

Πίστωση χωρητικότητας, Βαθμονομημένη ισχύς θερμικού σταθμού που θα αντικατασταθεί από το αιολικό σύστημα

Πχ. 1000 MW βαθμονομημένη αιολική ισχύς -> 250-400MW

πίστωση χωρητικότητας

Μικρές ξεχωριστές Ανεμογεννήτριες

50—1kW

5-100 kW

Ολοκληρωμένη Διαχείριση Ενέργειας (από τα πρώτα παραδείγματα: το νησί “FAIR ISLE”)

Κλάσεις ανεμογεννητριών

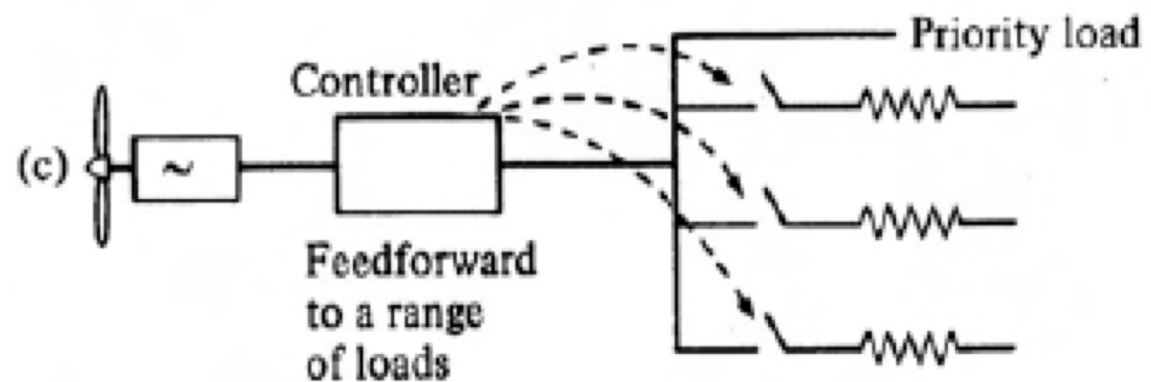
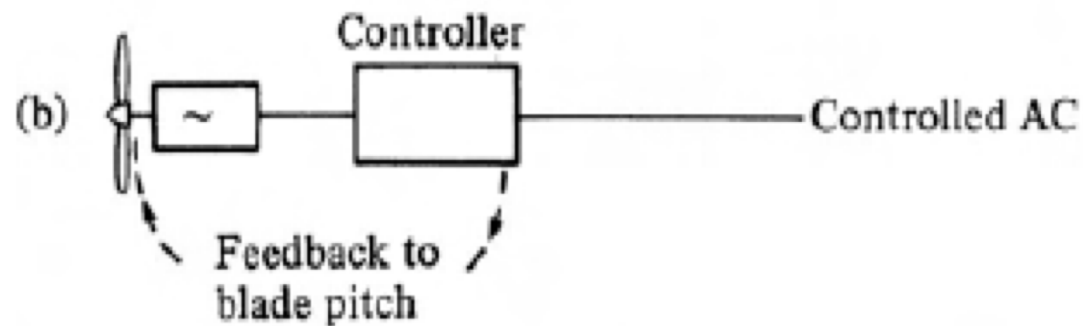
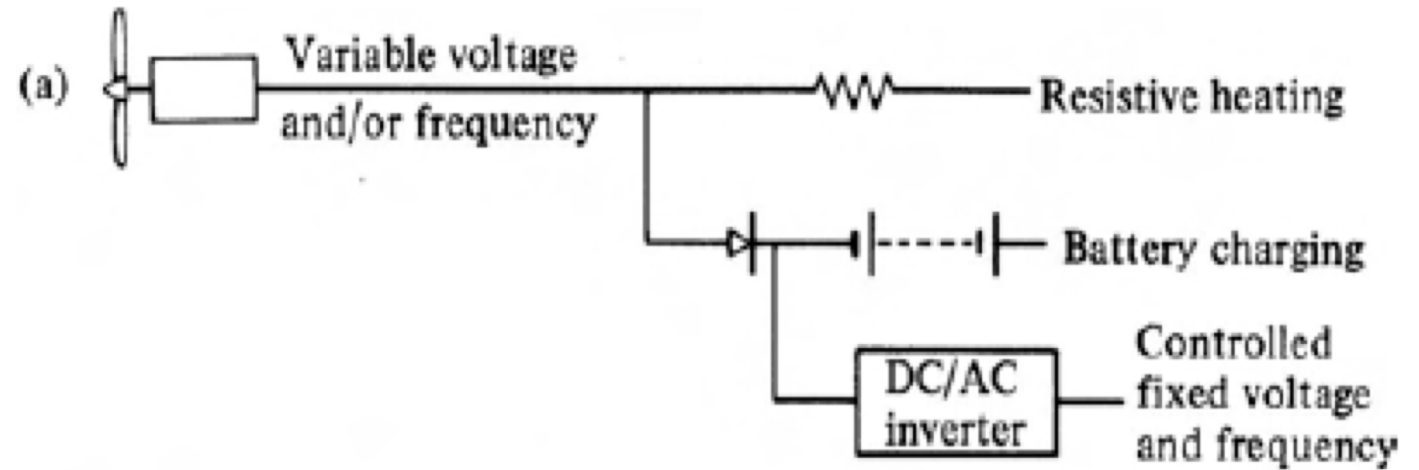
Table 9.4 Classes of wind turbine electricity systems

Class	A	B	C
P_T : wind turbine generator	$P_T \gg P_G$	$P_T \sim P_G$	$P_T \ll P_G$
P_G : other generator Capacity			
Example	Autonomous	Wind/diesel	Grid embedded
Control modes	(a) Blade pitch (b) Load matching	(a) Wind or diesel separately (b) Wind and diesel together	(a) Direct induction generator (b) To DC then AC (c) Increased slip induction generator

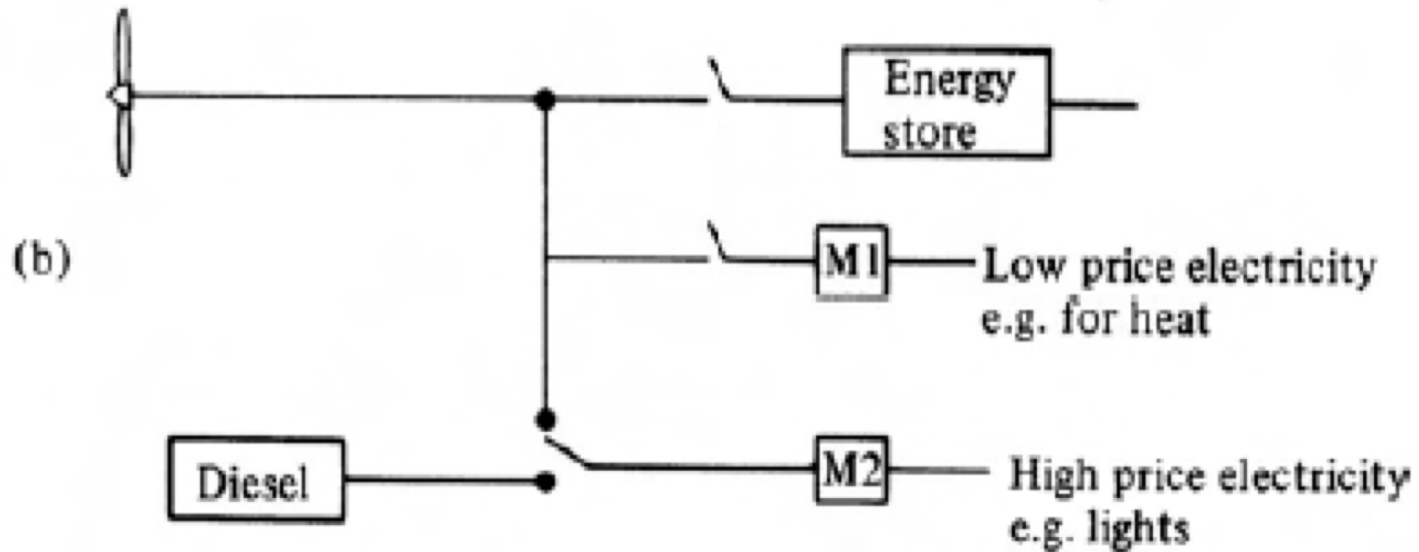
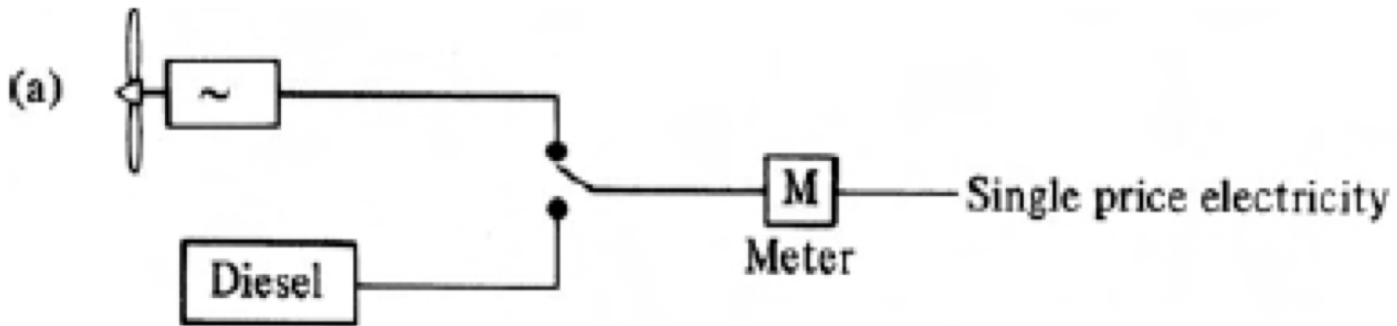
P_T : Ισχύς από τον άνεμο

P_G : Ισχύς από άλλες ενεργειακές πηγές

$$P_T \gg P_G$$



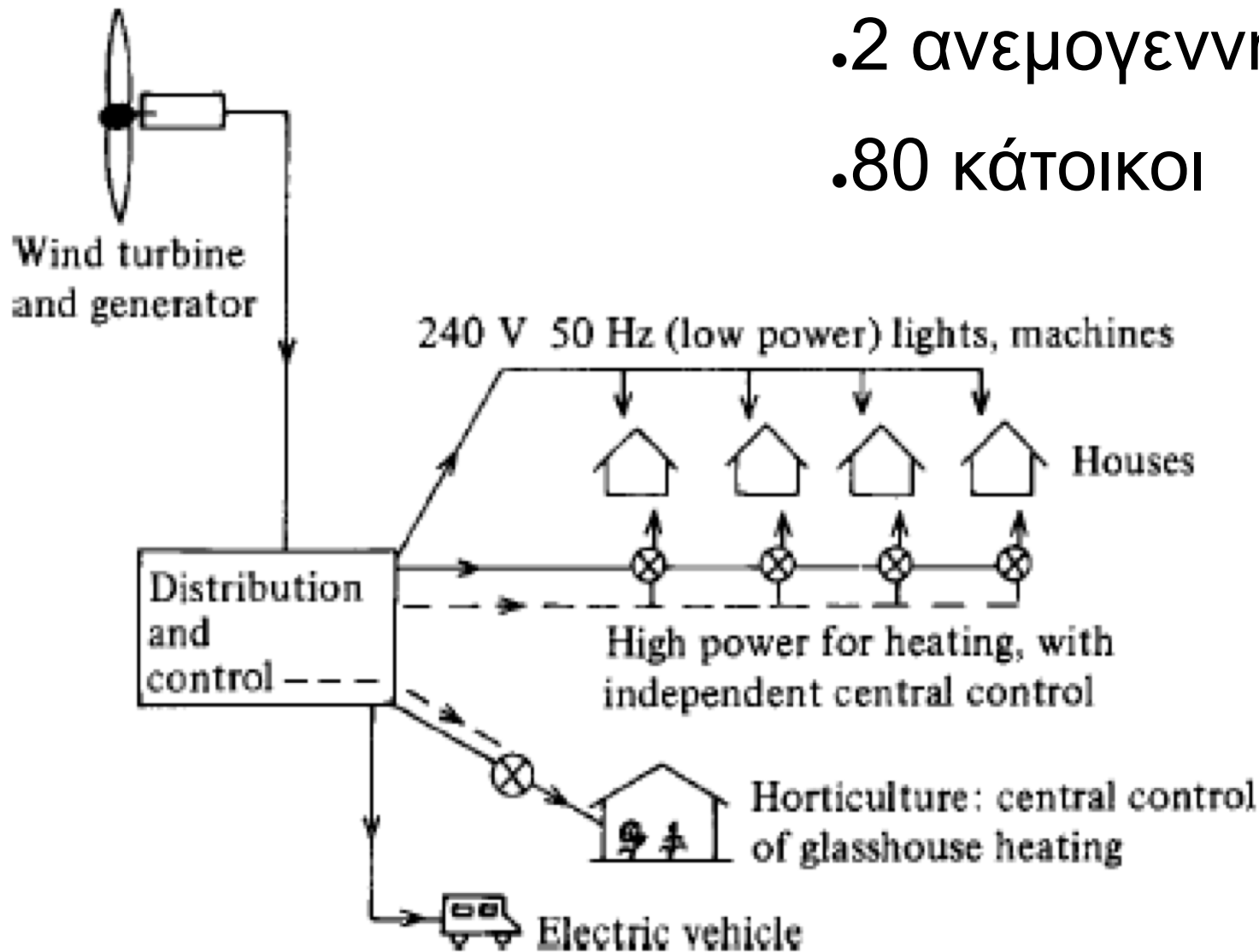
$$P_T \approx P_G$$



Fair Isle

.2 ανεμογεννήτριες

.80 κάτοικοι



Άλλου τύπου προβληματισμοί και συμπεράσματα

- Ανεμογεννήτριες σε περιοχές φυσικού κάλλους (προβλήματα αισθητικής, θόρυβος)
- Προβληματισμοί σχετικά με την οικολογία (Πουλιά, πρόβατα, κλπ)
- Αργές διαδικασίες χωροθέτησης, έγκρισης, εγκατάστασης
- Συνολικά η τεχνολογία προχωράει, η χρήση μεγαλώνει σημαντικά, με ότι αυτό συνεπάγεται για την μείωση των ρύπων και την ενεργειακή αυτάρκεια και την εξοικονόμηση των αναλώσιμων ορυκτών.
- Απαιτείται συστηματική ενημέρωση για την σταδιακή αποδοχή των νέων τεχνολογιών



593596873