

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ**  
**ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ**



Φοιτητής: Φουλές Γεώργιος

Επιβλέπων καθηγητής: Κονταξάκης Κωνσταντίνος



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ).....</b>	<b>7</b>
1.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ.....	7
1.2. Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	7
1.3. ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΡΑΣΗΣ 20-20-20 .....	15
<b>2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....</b>	<b>16</b>
2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	16
2.2. Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ .....	18
2.3. Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....	21
2.4. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	24
<b>3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....</b>	<b>26</b>
3.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....	26
3.2. ΝΕΟΤΕΡΗ ΕΠΟΧΗ.....	29
<b>4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>34</b>
4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (Α/Κ) .....	34
4.2. ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ.....	37
Ως προς το μέγεθος .....	37
Ως προς τον αριθμό των πτερύγων .....	37
Ως προς τη θέση του άξονα περιστροφής της πτερύγωσης.....	37
Ως προς τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και την διεύθυνση του ανέμου.....	37
Ως προς το σύστημα προσανεμισμού της ανεμογεννήτριας .....	38
Ως προς το σύστημα ελέγχου της ισχύος.....	38
<b>5. ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ.....</b>	<b>42</b>
5.1. ΠΤΕΡΥΓΩΣΗ .....	42
5.2. ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΙΣ .....	42
5.3. ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ .....	43
5.4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΔΗΣΗΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ .....	43
5.5. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ .....	44
Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα).....	44

Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια .....	45
Μεταβλητών στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης	45
5.6. ΠΥΡΓΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	47
<b>6. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΓ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ .....</b>	<b>50</b>
6.1. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ .....	50
6.2. ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΒΗΜΑΤΑ .....	51
Από τον κατακόρυφο στον οριζόντιο άξονα περιστροφής.....	51
Από την αντίσταση στην άνωση.....	51
Από τους ανεμόμυλους στις ανεμογεννήτριες.....	52
6.3. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ .....	53
Το μέγεθος των ανεμογεννητριών.....	53
Λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου, λ.....	56
Αριθμός των πτερύγων .....	57
Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός της πτερύγωσης.....	58
Ο σχεδιασμός του ακροπτερυγίου .....	59
Το υλικό των φτερών .....	61
Ο τρόπος ελέγχου της ισχύος – Αεροδυναμικός έλεγχος.....	62
Το κιβώτιο ταχυτήτων .....	64
Η ηλεκτρική γεννήτρια.....	65
Ο πύργος στήριξης .....	66
Αποτελέσματα.....	68
6.4. ΠΛΩΤΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ .....	69
Γιατί στη θάλασσα.....	70
Περιγραφή.....	71
Πλεονεκτήματα.....	71
<b>7. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ .....</b>	<b>74</b>
7.1. ΤΟ ΣΗΜΕΡΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ.....	74
Συμπεράσματα.....	75
7.2. Μελλοντικές σκέψεις για το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.....	77
Αναζητώντας χώρο σε πόλεις .....	77

Αναζητώντας χώρο στον αέρα.....	78
Αναζητώντας χώρο στη θάλασσα .....	79
Αναζητώντας την ελαστικότητα .....	80
<b>8. ΘΕΣΕΙΣ ΡΕΚΟΡ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ .....</b>	<b>81</b>
8.1. Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη ισχύ .....	81
8.2. Η μεγαλύτερη σε επιφάνεια σάρωσης.....	82
8.3. Υψηλότερη τοποθέτηση .....	84
<b>9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>85</b>

## **ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η έρευνα της διαχρονικής εξέλιξης της ανεμογεννήτριας ως μέσο μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην προσπάθεια αυτή θα αναλυθεί η λειτουργία της ανεμογεννήτριας και θα γίνει καταγραφή της διαχρονικής εξέλιξης των κατασκευαστικών της στοιχείων, καθώς αποτελεί βασικό παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας.

Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι να προβλεφθεί για το άμεσο μέλλον η εξέλιξη της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων .

Έτσι θα γίνει δυνατό να βελτιστοποιηθούν κρίσιμες αποφάσεις σχετικά με τις μελλοντικές εγκαταστάσεις του πιο δυναμικού τομέα των ΑΠΕ, των αιολικών συστημάτων.

## **1. ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)**

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή η αιολική, η ηλιακή και η γεωθερμική ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια, τα αέρια τα εκλυόμενα από χώρους υγειονομικής ταφής, από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού και τα βιοαέρια, όπως ορίζει η ΟΔΗΓΙΑ 2001/77/ΕΚ.

### **a. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΠΕ**

Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ(σύμφωνα με τον Ν 2773/1999) είναι η Ηλεκτρική Ενέργεια η προερχόμενη από:

- Την εκμετάλλευση Αιολικής ή Ηλιακής Ενέργειας ή βιομάζας ή Βιοαερίου.
- Την εκμετάλλευση Γεωθερμικής Ενέργειας, εφόσον το δικαίωμα εκμετάλλευσης του σχετικού Γεωθερμικού Δυναμικού έχει παραχωρηθεί στον ενδιαφερόμενο, σύμφωνα με τις ισχύουσες κάθε φορά διατάξεις.
- Την εκμετάλλευση της Ενέργειας από την Θάλασσα.
- Την εκμετάλλευση Υδάτινου Δυναμικού με Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς μέχρι 10 MW.
- Συνδυασμό των ανωτέρω.
- Τη Συμπαγωγή, με χρήση των Πηγών Ενέργειας, των (1) και (2) και συνδυασμό τους.

### **b. Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

Η συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας είναι σταθερή και κυμαίνεται σε ποσοστό της τάξεως του 5,5 - 6,5%.

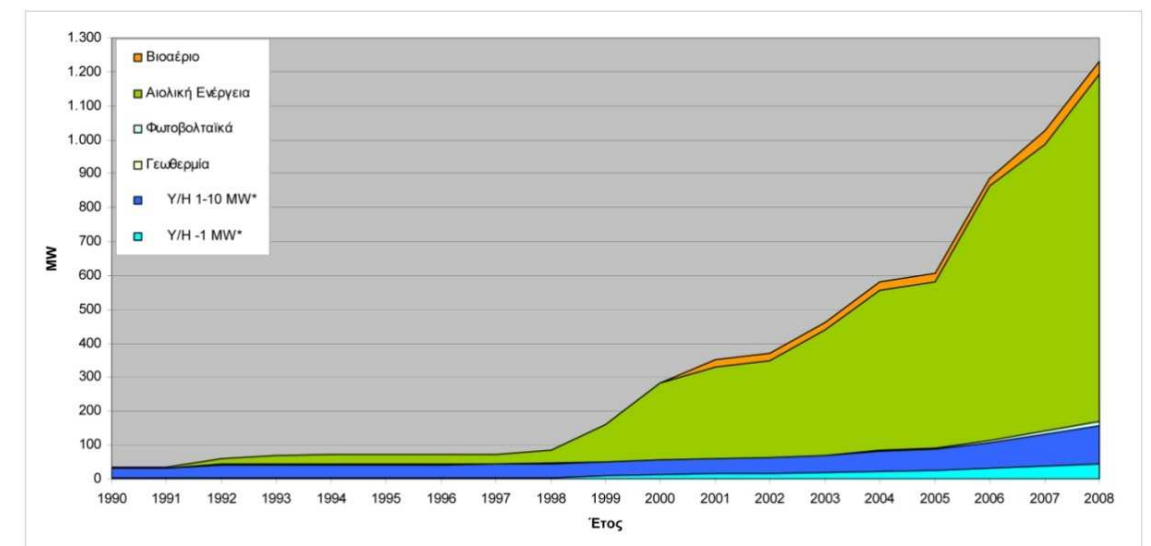
Η ηλεκτροπαραγωγή από «συμβατικές» ΑΠΕ στην Ελλάδα (μη συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών και των αντλητικών)

[7]

παρουσιάζει σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια και αντιστοιχεί στο 4,3% της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αφορά κυρίως σε αιολικά και μικρά υδροηλεκτρικά, σε μικρό βαθμό τη βιομάζα ενώ ήδη γίνεται πολύ αισθητή και η συνεισφορά των φωτοβολταϊκών.

Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγάλα υδροηλεκτρικά (εξαιρώντας την παραγωγή από άντληση), η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ είναι στα επίπεδα του 9% της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εγκατεστημένη ισχύς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (μη συμπεριλαμβανομένων των αντλητικών), ήταν 3.551 MW στο τέλος του 2008 με σταθερά αυξανόμενη εξέλιξη να έχουν τα αιολικά, τα μικρά υδροηλεκτρικά και η βιομάζα (Πίνακας 1).



Διάγραμμα 1: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά



**Πίνακας 1: Ισχύς παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας [MW], Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών και Βιοκαύσιμα**

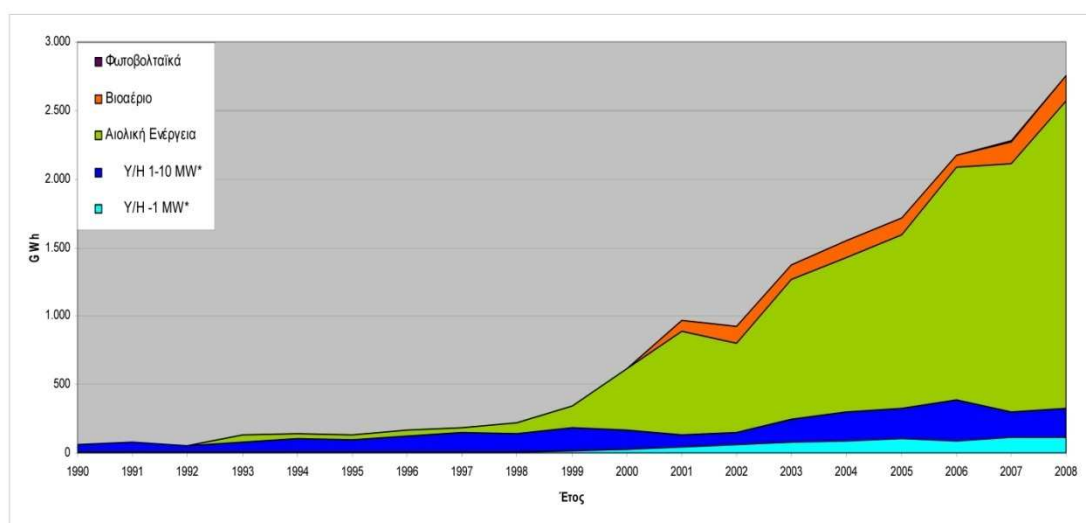
Πίνακας 1: Ισχύς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (MW), Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών και Βιοκαύσιμα		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Τεχνολογία ΑΠΕ																					
Σύνολο		2.411	2.515	2.541	2.552	2.552	2.552	2.551	2.757	2.896	3.068	3.299	3.369	3.388	3.473	3.597	3.621	3.902	4.044	4.250	
Υδροηλεκτρική Ενέργεια		2.408	2.512	2.523	2.523	2.523	2.523	2.522	2.728	2.856	2.959	3.072	3.076	3.078	3.079	3.099	3.105	3.124	3.150	3.176	
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα		315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	699	699	699	699	699	699	699	699	699	
Υ/Η-1 MW*		2	2	2	2	3	3	3	4	5	8	14	15	17	19	23	25	31	37	44	
Υ/Η 1-10 MW*		28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	59	64	77	95	114	
Υ/Η 10+MW*		2.063	2.167	2.167	2.167	2.166	2.166	2.165	2.165	2.197	2.294	2.317	2.317	2.317	2.311	2.317	2.317	2.317	2.319	2.319	
Γεωθερμία		2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Φωτοβολταϊκά		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	9	12	
Αιολική Ενέργεια		1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	226	270	287	371	472	491	749	846	1022	
Βιοαέριο		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	24	24	24	39	40	
Επιφάνεια Ηλιακών Συλλεκτών (1000 m <sup>2</sup> )		1.448	1.610	1.759	1.878	1.991	2.101	2.168	2.228	2.381	2.440	2.941	2.992	3.050	3.140	3.246	3.047	3.296	3.573	3.871	
Βιοκαύσιμα (τόννους)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	395.000	575.000	575.000	

\* δεν συμπεριλαμβάνεται η ισχύς των αντλητικών

Ειδικότερα, από 1 μόλις MW συνολικής ισχύος των αιολικών πάρκων το 1990, στο τέλος του 2008, λειτουργούσαν Αιολικά Πάρκα συνολικής ισχύος 1.022 MW.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έφθασαν τα 158 MW στο τέλος του 2008 από τα 43 MW της ΔΕΗ το 1997. Τέλος, οι εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής από βιοαέριο ΧΥΤΑ στην Θεσσαλονίκη, επεκτάθηκαν κατά 5 MW και, συμπαραγωγής από βιοαέριο λυμάτων στα Λιόσια κατά 9,7 MW, ανεβάζοντας έτσι το σύνολο ηλεκτρικής ισχύος μαζί με την Ψυτάλλεια, σε 29 και 10 MW αντίστοιχα.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ το 2008 έφθασε τις 6,6 TWh περίπου και προήλθε, κατά 63% από υδροηλεκτρικούς σταθμούς (4149 GWh), κατά 34% από αιολικά πάρκα (2242 GWh), 191GWh (3%) παρήχθησαν από βιοαέριο, ενώ υπήρχε και μία μικρή παραγωγή από φωτοβολταϊκούς σταθμούς (Διάγραμμα 2).



**Διάγραμμα 2.: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα υδροηλεκτρικά**

**Πίνακας 2.: Μικτή Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh)**

Πίνακας 2.: Μικτή Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh)																			
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Σύνολο	2.023	3.183	2.417	2.686	2.973	3.843	4.556	4.156	3.949	5.028	4.562	3.560	4.240	6.459	6.450	6.999	8.077	5.356	6.586
Υδροηλεκτρική Ενέργεια	2.021	3.181	2.408	2.639	2.936	3.808	4.518	4.119	3.876	4.865	4.111	2.725	3.463	5.332	5.205	5.610	6.292	3.377	4.149
εκ των οποίων αντλητικά συστήματα	228	72	186	259	243	253	156	214	149	237	418	628	663	566	533	593	427	785	837
Υ/Η-1 ΜW*	6	5	5	5	8	7	7	11	8	18	26	40	58	76	91	106	89	118	117
Υ/Η 1-10 ΜW*	54	70	43	77	97	89	119	138	137	164	140	95	92	169	212	218	299	177	207
Υ/Η 10+ΜW*	1.733	3.034	2.174	2.297	2.589	3.460	4.236	3.756	3.582	4.446	3.527	1.962	2.650	4.521	4.369	4.693	5.477	2.297	2.987
Αιολική Ενέργεια	2	2	8	47	37	34	38	37	73	162	451	756	651	1.021	1.121	1.266	1.699	1.818	2.242
Βιοαέριο	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	79	126	105	123	122	85	160	191
Φωτοβολταϊκά	0,1	0,0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6	0,8	0,9	1,3	1,4	5

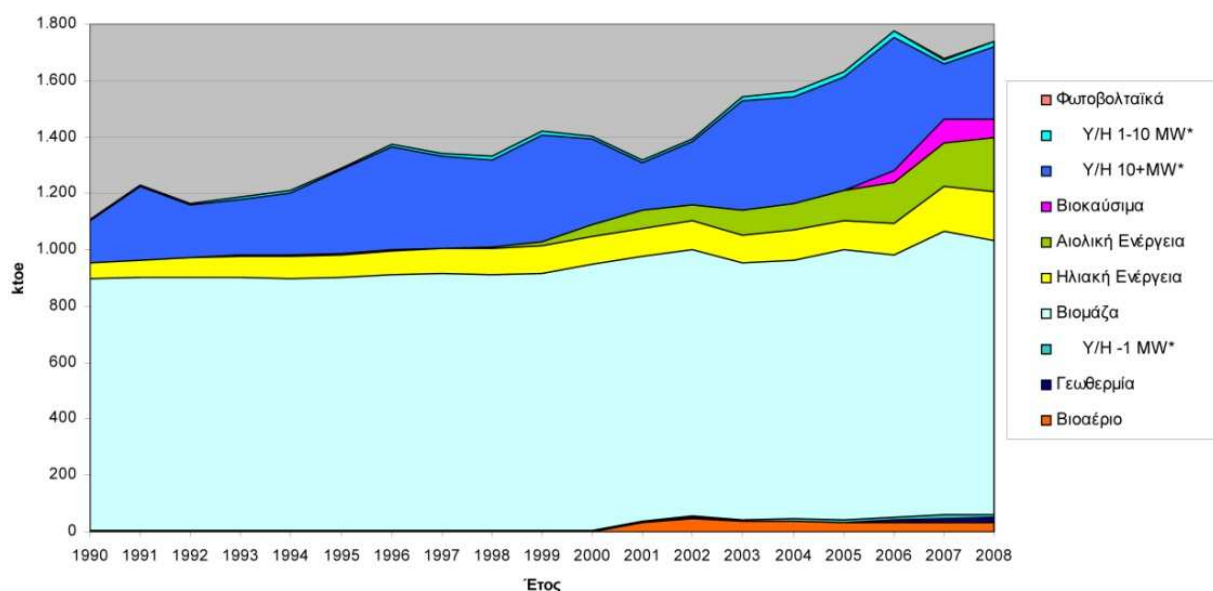
\* δεν συμπεριλαμβάνεται η παραγωγή των αντλητικών

Η ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας την ίδια χρονιά ήταν 63,7 TWh. Η εξέλιξη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ φαίνεται στο Διάγραμμα 2.

Για το 2008 η συνολική πρωτογενής παραγωγή θερμότητας ήταν της τάξεως των 46.000 TJ, προερχόμενη κυρίως από τη βιομάζα και σε μικρότερο ποσοστό από την ηλιακή ενέργεια και το βιοαέριο αντίστοιχα.

Η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ το 2008 ήταν 1,8 Mtoe, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του 90 ήταν 1,2 Mtoe. Εξ αυτών 600 ktoe περίπου οφείλονται στη χρήση βιομάζας στα νοικοκυριά, 264 ktoe στην χρήση βιομάζας στη βιομηχανία για ίδιες ανάγκες (συνολικό ποσοστό της βιομάζας 53,6%), από την παραγωγή βιοκαυσίμων 63 ktoe (3,5%), 357 ktoe (19,7%) από την παραγωγή των υδροηλεκτρικών σταθμών, 193 ktoe (10,7%) από την παραγωγή των αιολικών, 174 ktoe (9,6%) από την παραγωγή των θερμικών ηλιακών συστημάτων, 35 ktoe (2%) από το βιοαέριο, κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και 17 ktoe (1%) από την παραγωγή γεωθερμικών συστημάτων.

Η εξέλιξη της παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας από ΑΠΕ φαίνεται στο Διάγραμμα 3.



**Διάγραμμα 3.: Πρωτογενής παραγωγή από ΑΠΕ**

**Πίνακας 3.: Συμμετοχή των ΑΠΕ στο Ενεργειακό Ισοζύγιο**

Πίνακας 4: Συμμετοχή των ΑΠΕ στο Ενεργειακό Ισοζύγιο																			
Τεχνολογία ΑΠΕ	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Πρωτογενής Παραγωγή από ΑΠΕ (ktoe)	1.127	1.237	1.180	1.209	1.233	1.314	1.389	1.361	1.343	1.443	1.439	1.373	1.451	1.592	1.606	1.684	1.814	1.744	1.809
Παραγωγή από ΑΠΕ χωρίς μεγάλα Υ/Η, αντλητικά, και Βιομέζα στον Οικιακό τομέα (ktoe)	256	268	274	287	287	292	309	317	320	338	397	448	463	452	482	527	561	641	881
Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση (ktoe)	22.338	22.512	23.174	22.746	23.709	24.228	25.476	25.688	26.987	26.867	28.217	29.061	29.856	30.307	30.773	31.352	31.509	33.488	31.938
Συμμετοχή των ΑΠΕ στην Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση (ktoe)	5,0%	5,5%	5,1%	5,3%	5,2%	5,4%	5,5%	5,3%	5,0%	5,4%	5,1%	4,7%	4,9%	5,3%	5,2%	5,2%	5,8%	5,2%	5,7%
Σύνολο ΑΠΕ, εκτός μεγάλων Υ/Η, αντλητικών και Βιομέζας στον Οικιακό τομέα (ktoe)	1,1%	1,2%	1,2%	1,3%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,4%	1,5%	1,6%	1,49%	1,57%	1,68%	1,91%	2,16%	2,76%

[13]

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3, η συνολική συνεισφορά των ΑΠΕ, αν αφαιρέσει κανείς τη βιομάζα στον οικιακό τομέα και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά, παρουσιάζει σταδιακή ανοδική πορεία λόγω των μέτρων οικονομικής υποστήριξης. Δεδομένης πάντως της αύξησης της ζήτησης ενέργειας και της συνεχόμενης αύξησης της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης, το ποσοστό αυτό δεν φαίνεται να μεταβάλλεται.

Τα στατιστικά στοιχεία των τελευταίων ετών παρουσιάζουν διακύμανση του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή 10-12%, η οποία οφείλεται, κυρίως, στη μεταβλητότητα της λειτουργίας των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών που εξαρτάται, από το επίπεδο των υδατικών αποθεμάτων, ενώ οι «συμβατικές ΑΠΕ» έχουν μία σταθερά αυξανόμενη συμμετοχή που έφθασε το 4,3% το 2008. Σημειώνεται ότι το 9% του 2008, δεν είναι απόλυτα αντιπροσωπευτικό για τους εξής λόγους: Τα μεγάλα υδροηλεκτρικά στην Ελλάδα είναι σχεδόν αποκλειστικά τύπου φράγματος, χρησιμοποιούνται κυρίως για φορτία αιχμής και η παραγωγή τους εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα υδάτων στα φράγματα. Το ποσοστό 9% αντιστοιχεί σε αυξημένη χρήση των μεγάλων υδροηλεκτρικών δεδομένου ότι το 2008 ήταν χρονιά καλής υδραυλικότητας.

Η αιολική ενέργεια συνεπώς είναι μία αραιή ή ήπια μορφή ενέργειας δηλαδή είναι μικρή η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί σε κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη κατασκευής μονάδων, μεγάλων διαστάσεων. Σ' αυτό το μειονέκτημα ανταπεξέρχεται με επιτυχία η σημερινή τεχνολογία με την κατασκευή ανεμοκινητήρων μεγάλων διαστάσεων που ανταγωνίζονται οικονομικά τις συμβατικές μορφές ενέργειας. Παράλληλα η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι δίνει απ' ευθείας μηχανική ενέργεια μία αναβαθμισμένη κατά την τεχνική ορολογία, μορφή ενέργειας που με πολύ υψηλό βαθμό απόδοσης και απλά μέσα μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί συνεπώς μία αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μία από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού.



### γ. ΕΘΝΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΔΡΑΣΗΣ 20-20-20

Η Έκθεση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για την επίτευξη της συμβολής των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% έως το 2020, απορρέει από την Οδηγία 2009/28/ΕΚ, και περιλαμβάνει εκτιμήσεις για την εξέλιξη του ενεργειακού τομέα και τη διείσδυση των τεχνολογιών των ΑΠΕ έως το 2020. Οι εκτιμήσεις αυτές εξειδικεύονται στη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και ψύξης κυρίως για τον οικιακό τομέα, αλλά και στη χρήση βιοκαυσίμων στις μεταφορές. Αναφέρονται επίσης μέτρα για την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της αξιοποίησης των ΑΠΕ, καθώς και στοιχεία για τις βασικές διοικητικές δομές που θα επιταχύνουν τη διείσδυση αυτή.

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης μετά τις πιθανές βελτιώσεις που θα προέλθουν από τη διαβούλευση με την ΕΕ, θα αποτελέσει τη βάση για τη σύνταξη σχετικής Υπουργικής Απόφασης για τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης και η πρόοδος στην εφαρμογή του θα εξετάζεται ανά δύο χρόνια και θα επικαιροποιείται, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι εξελίξεις της αγοράς και της βελτίωσης των τεχνολογιών, αλλά και η ζήτηση της ενέργειας.



**Διάγραμμα 4.: Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο στην Ελλάδα.**

## 2. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### d. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια του ανέμου που προέρχεται από την μετακίνηση αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Καθώς ο αέρας θερμαίνεται, διαστέλλεται γίνεται πιο ελαφρύς, ανεβαίνει σε ύψος περίπου 10 km από το επίπεδο της θάλασσας και κατευθύνεται προς τα ψυχρότερα μέρη που είναι ο βορράς και ο νότος. Καθώς συμβαίνει αυτό η ατμοσφαιρική πίεση μειώνεται με αποτέλεσμα μάζες ψυχρού αέρα να κατευθύνονται προς την περιοχή του χαμηλού βαρομετρικού. Αυτή ακριβώς η κίνηση των αερίων μαζών δημιουργεί τον άνεμο.

Η κινητική ενέργεια των ανέμων είναι τόση που, με βάση τη σημερινή τεχνολογία εκμετάλλευσής της, θα μπορούσε να καλύψει πάνω από δύο φορές τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χάνεται στα βάθη της ιστορίας. Ο εγκλωβισμός, κατά τον Όμηρο, των ανέμων στον ασκό του Αιόλου δείχνει ακριβώς την ανάγκη των ανθρώπων να διαθέτουν τους ανέμους στον τόπο και χρόνο που οι ίδιοι θα ήθελαν. Για πολλές εκατοντάδες χρόνια η κίνηση των πλοίων στηριζόταν στη δύναμη του ανέμου, ενώ η χρήση του ανεμόμυλου ως κινητήριας μηχανής εγκαταλείπεται μόλις στα μέσα του προηγούμενου αιώνα. Είναι η εποχή που εξαπλώνονται ραγδαία τα συμβατικά καύσιμα και ο ηλεκτρισμός, ο οποίος φτάνει ως τα πιο απομακρυσμένα σημεία. Η πετρελαϊκή κρίση στις αρχές της δεκαετίας του 70, φέρνει ξανά στο προσκήνιο τις ΑΠΕ και την αιολική ενέργεια. Στο διάστημα μέχρι σήμερα, σημειώνεται μια αλματώδης ανάπτυξη, κάτι που ενισχύεται και από την επιτακτική ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος. Γίνεται πλέον συνείδηση σε όλο και περισσότερο κόσμο, πως ο άνεμος είναι μια καθαρή ανεξάντλητη πηγή ενέργειας.

Τα σύγχρονα συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας αφορούν κυρίως μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια και ονομάζονται «ανεμογεννήτριες».



Η σημαντικότερη οικονομικά εφαρμογή των ανεμογεννητριών είναι η σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο μιας χώρας. Στην περίπτωση αυτή, ένα αιολικό πάρκο, δηλαδή μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, εγκαθίσταται και λειτουργεί σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύει το σύνολο της παραγωγής του στο ηλεκτρικό σύστημα. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται, μηχανικής ενέργειας για χρήση σε αντλιοστάσια, καθώς και θερμότητας

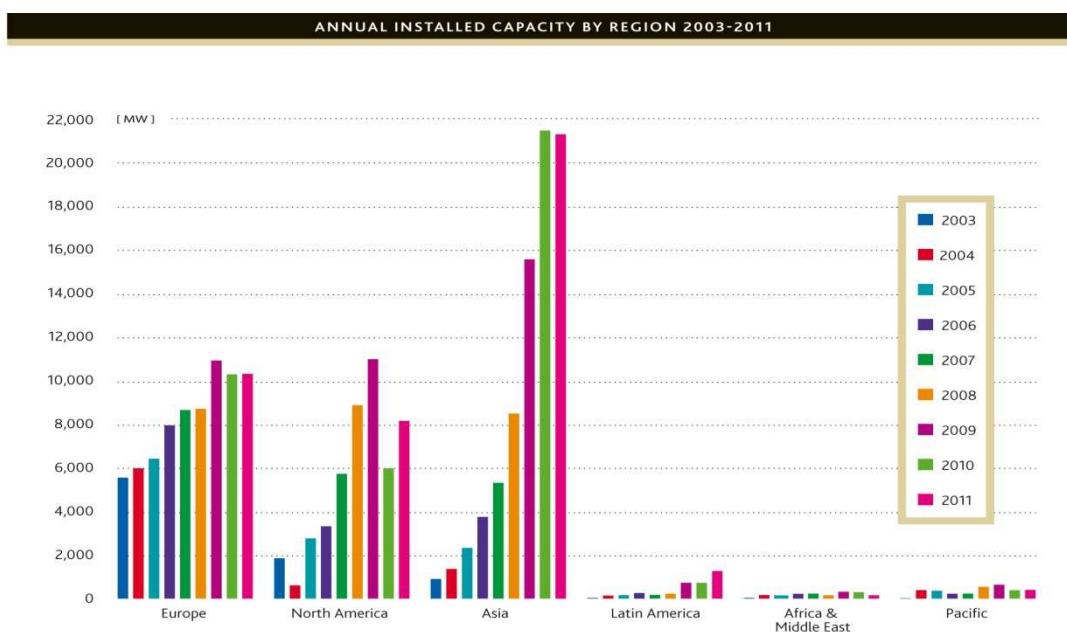


### ε. Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 η παγκόσμια παραγόμενη ισχύς από αιολικά συστήματα ήταν 15 MW. Το 1992, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την προώθηση των προγραμμάτων αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας, η ισχύς αυτή, παραγόμενη από περισσότερες από 25.000 ανεμογεννήτριες, έφτασε τα 2.652 MW.

Δεύτερη χώρα στον τομέα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έρχεται η Δανία, η οποία έχει αναπτύξει και την πιο αξιόπιστη τεχνολογία στον τομέα κατασκευής ανεμογεννητριών, κατέχοντας μεγάλο ποσοστό στην αντίστοιχη παγκόσμια αγορά.

Ακόμη, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 άρχισαν να λειτουργούν στη Δανία και την Ολλανδία τα πρώτα αιολικά πάρκα μέσα στη θάλασσα (off shore windparks), σε αβαθείς περιοχές κοντά στις ακτές. Οι εγκαταστάσεις αυτές, που προς το παρόν περιλαμβάνουν μικρό αριθμό ανεμογεννητριών και ηλεκτροδοτούν μικρές κοντινές περιοχές, επιφέρουν -λόγω της απομακρυσμένης θέσης τους- πολύ λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον από ότι οι αντίστοιχες εγκαταστάσεις της στεριάς. Παράλληλα, χάρη στην απουσία φυσικών εμποδίων παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη απόδοση.



Διάγραμμα 5.: Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε MW ανά περιοχή.

Κατά το έτος 2002 εγκαταστάθηκαν παγκοσμίως νέα αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 6.868 MW μέγεθος το οποίο αποτελεί δείκτη της εξέλιξης του κλάδου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος κατά 28% παγκοσμίως σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύτηκαν από τον AWEA (American Wind Energy Association) και τον αντίστοιχο του στην Ευρώπη EWEA (European Wind Energy Association).

Η αξία της τεχνολογίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη χρησιμοποίηση αιολικών γεννητριών ανήλθε στο ποσό των 6.800.000.000 € παγκοσμίως, έχοντας ως αποτέλεσμα την αύξηση της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος στα 31.000 MW ικανών για την κάλυψη των αναγκών 7,5 εκατομμυρίων τυπικών μέσων αμερικανικών σπιτιών ή 16 εκατομμυρίων τυπικών μέσων ευρωπαϊκών σπιτιών.

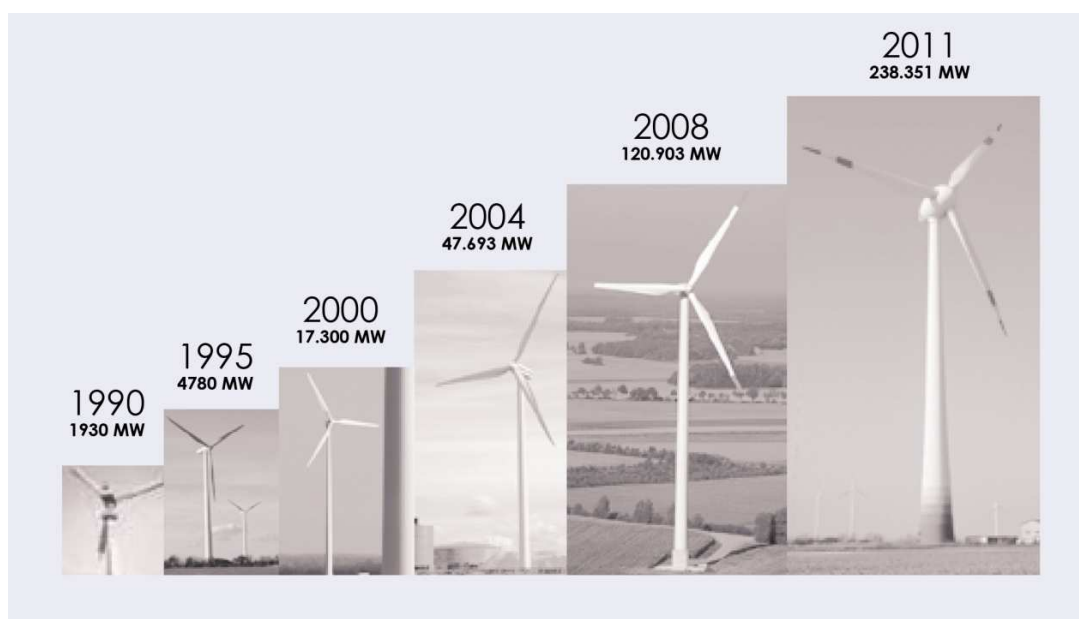
Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων παρατηρείται συνεχώς ανοδική στη πάροδο του χρόνου και ειδικά τα τελευταία τέσσερα χρόνια παρατηρείται να έχει μια αύξηση 22% σε σχέση με τα αλλά έτη.

Το 2010, περισσότερο από τη μισή νέα αιολική ενέργεια στράφηκε έξω από τις παραδοσιακές αγορές στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Αυτό ήταν σε μεγάλο βαθμό από τις νέες κατασκευές στην Κίνα, που αντιπροσωπεύει σχεδόν το ήμισυ των νέων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας (16,5 GW).

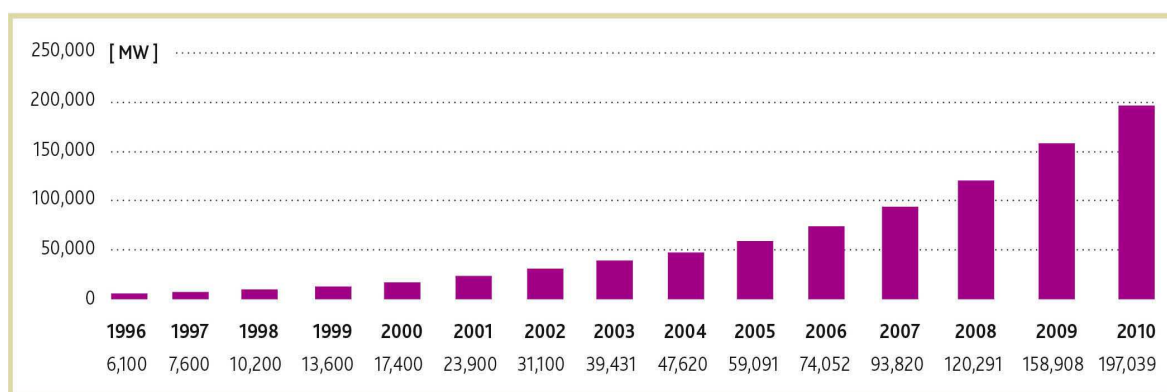
Σε όρους οικονομικής αξίας, ο τομέας της αιολικής ενέργειας έχει γίνει ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στις αγορές ενέργειας, με τη συνολική αξία του νέου εξοπλισμού παραγωγής που εγκαταστάθηκε το 2007, φθάνοντας τα € 25 δισ. ευρώ, ή 36 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ.

Αν και η βιομηχανία αιολικής ενέργειας έχει επηρεαστεί από την παγκόσμια οικονομική κρίση το 2009 και το 2010, η πενταετής πρόβλεψη της συμβουλευτικής εταιρείας BTM Consult δείχνει σημαντική ανάπτυξη των έργων μέχρι το 2013. Η Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας ανακοίνωσε στην ετήσια στατιστική της για το 2011 ότι στην Ευρωπαϊκή Ένωση εγκαταστάθηκαν νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 9.616 MW φτάνοντας συνολικά την εγκατεστημένη αιολική ισχύ σε 93.957 MW αρκετή για να καλύψει το 6,3% του ηλεκτρισμού της Ε.Ε.. Η βιομηχανία της αιολικής

ενέργειας τα τελευταία 17 χρόνια έχει μέση ετήσια αύξηση 15,6%. Κατά τα τελευταία πέντε χρόνια, η μέση αύξηση σε νέες εγκαταστάσεις ήταν 27,6 τοις εκατό κάθε χρόνο. Στην πρόβλεψη για το 2013, η αναμενόμενη μέση ετήσια αύξηση είναι 15,7 τοις εκατό. Πάνω από 200 GW νέας ισχύς αιολικής ενέργειας θα μπορούσε να παραχθεί πριν από το τέλος του 2013. Η διείσδυση της αγορά της αιολικής ενέργειας στην αγορά ενέργειας αναμένεται να φθάσει 3,35 τοις εκατό έως το 2013 και 8 τοις εκατό από το 2018.



GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 1996-2010



**Διάγραμμα 6.: Παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς.**

## f. Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αντιμετωπίζει μέχρι τώρα αρκετά προβλήματα. Παρά τη σημαντική αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τα τελευταία χρόνια, είναι κοινά αποδεκτό ότι αυτή η αύξηση είναι πολύ μικρή δεδομένου του πλούσιου αιολικού δυναμικού της χώρας μας.

Οι έρευνες και οι προσπάθειες για αξιοποίηση του δυναμικού αυτού άρχισαν κατά το τέλος της δεκαετίας του 1970. Στο πρώτο στάδιο έγιναν μετρήσεις του αιολικού δυναμικού των πιο ευνοϊκών περιοχών και συντάχθηκε η μελέτη ΑΙΟΛΟΣ με τη συνεργασία της Διεύθυνσης Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας (ΔΕΜΕ), της ΔΕΗ και πανεπιστημίων της χώρας. Από το 1982 έως το 1994 εγκαταστάθηκαν ανεμογεννήτριες στην Άνδρο, τα Ψαρά, τη Σάμο, τη Χίο, την Κρήτη, την Εύβοια, τη Σαμοθράκη, την Ικαρία, την Κάρπαθο, τη Λήμνο, την Κύθνο και τη Σκύρο, οι οποίες παράγουν συνολικά ισχύ 27 MW. Το πρώτο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε στην Κύθνο και άρχισε να λειτουργεί το 1982 περιλαμβάνοντας 5 ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύος αρχικά 20 KW και αργότερα 33 KW. Μέχρι το 1994 είχαν εγκατασταθεί συνολικά 13 αιολικά πάρκα σε νησιά του Αιγαίου.

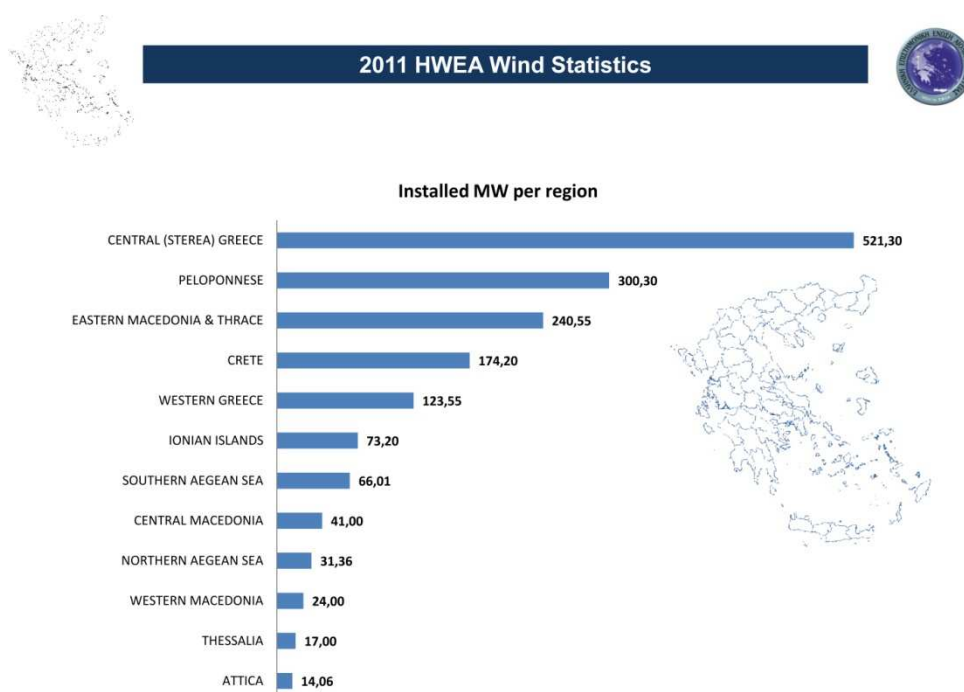
Το 1991 στο πλαίσιο ενός δεκαετούς αναπτυξιακού προγράμματος που εξήγγειλε η ΔΕΗ, υπογράφηκαν συμβάσεις για την κατασκευή αιολικών πάρκων στη Σάμο (2 MW), τη Χίο (2 MW), την Άνδρο (1,5 MW), τη Λέσβο (2 MW), τα Ψαρά (2 MW), την Εύβοια (5 MW) και την Κρήτη (5 MW) με 50% χρηματοδότηση από τα κοινοτικά προγράμματα ΜΟΠ (Μεσογειακά Ολοκληρωμένα Προγράμματα) και VALOREN. Το αιολικό πάρκο της Εύβοιας, που τέθηκε σε λειτουργία το 1993 με 17 ανεμογεννήτριες, και το δίδυμό του στη Σητεία Κρήτης είναι τα δύο μεγαλύτερα αιολικά πάρκα της Μεσογείου.

Από το 1995 δικαίωμα κατασκευής και λειτουργίας αιολικών μονάδων (όπως και μονάδων άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) έχουν, εκτός από τη ΔΕΗ, και ιδιώτες, οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης κ.λπ. είτε για δική τους χρήση (ιδιοπαραγωγή) είτε για εκμετάλλευση.

Μετά την υπογραφή της σύμβασης το 1991, ιδιαίτερη διάσταση έλαβε το θέμα κατασκευής του αιολικού πάρκου στη Λέσβο, λόγω του χώρου που επιλέχθηκε για την εγκατάστασή του. Ο χώρος αυτός ανήκει στην ευρύτερη περιοχή του Απολιθωμένου Δάσους (το οποίο με προεδρικό διάταγμα έχει

χαρακτηριστεί "διατηρητέο μνημείο της φύσης"), γεγονός που προκάλεσε την αντίδραση της Φιλοδασικής Ένωσης Αθηνών, η οποία εξέφρασε φόβους για ανεπανόρθωτη καταστροφή του μνημείου, ενώ από την άλλη, ΔΕΗ και παράγοντες της τοπικής αυτοδιοίκησης τάχτηκαν υπέρ της αναγκαιότητας του έργου, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ηλεκτροδότησης του νησιού.

Μετά από αλλεπάλληλες αναστολές, το έργο κατασκευάστηκε και άρχισε να λειτουργεί το 1994 (περιλαμβάνει δύο ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 600 KW).



**Διάγραμμα 7.:** Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα το 2011 ανά περιοχή

Με βάση τη Στατιστική της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) του Οκτωβρίου 2011, το σύνολο της αιολικής ισχύος που έχει εγκατασταθεί και έχει τεθεί σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία είναι: 1621,27 MW.

Η ισχύς αυτή κατανέμεται ως εξής:

Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά: 281,02 MW

Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα: 1340,25 MW

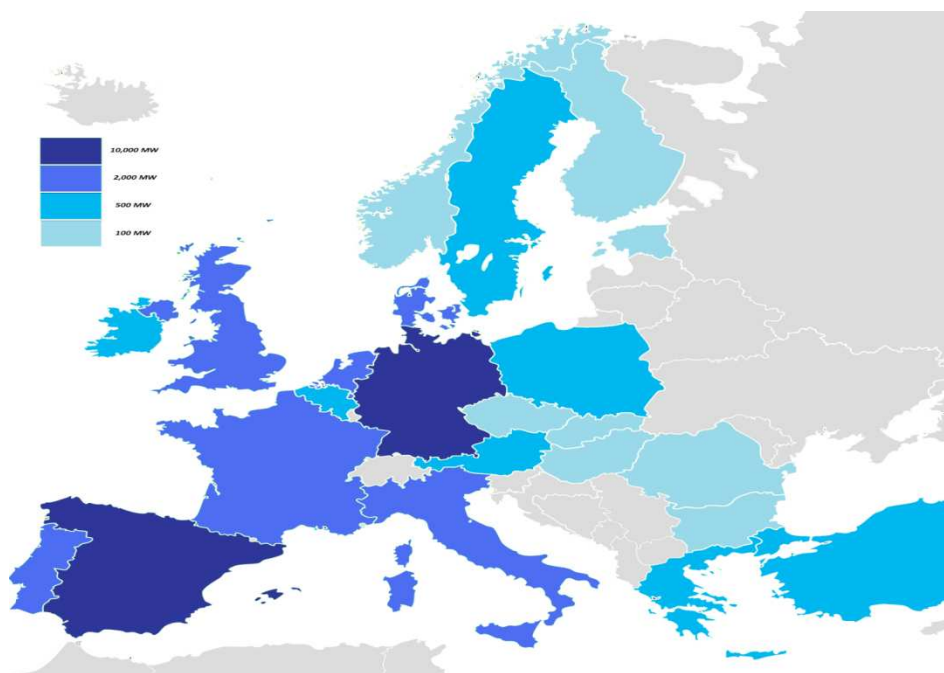
Η ανάπτυξη σε σχέση με το τέλος του 2010 είναι 18,5%

Σε επίπεδο Περιφερειών η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων αφού φιλοξενεί 537MW (33%) και ακολουθεί η Πελοπόννησος με 267MW (16,5%) που έχει πλέον περάσει την Ανατολική Μακεδονία – Θράκη όπου βρίσκονται 241MW (14,9%).

Για την τιμολόγηση ενέργειας η οποία παράγεται με τη χρήση ανεμογεννητριών υπάρχουν δύο κατηγορίες:

1. Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 50 kW, για τις οποίες η τιμή της kWh είναι 0,08785 €/kWh για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα ενώ για τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά είναι 0,09945 €/kWh.

2. Αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος μικρότερης ή ίσης των 50 kW, για τις οποίες η τιμή της kWh είναι 0,25 €/kWh.



Εικόνα 1.: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη το 2010

[23]



## **g. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

α) Πλεονεκτήματα:

- Δεν απαιτεί συμβατικό καύσιμο.
- Δεν μολύνει το περιβάλλον.
- Σχετικά ακίνδυνη λειτουργία.
- Δεν παρουσιάζει ιδιαίτερα τεχνολογικά προβλήματα.
- Υπάρχει άφθονη και είναι διασπαρμένη παντού και ανεξάντλητη.

β) Μειονεκτήματα:

- Η ισχύς εξαρτάται από την ταχύτητα (τον κύβο της ταχύτητας) και την διακύμανση του ανέμου.
- Μικρή πυκνότητα ισχύος.
- Ενέργεια διατίθεται μόνο όταν υπάρχουν άνεμοι.
- Πρόσθετες δαπάνες για αποταμίευση της ενέργειας.

Το 2 μεγαλύτερο πλεονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι σε αφθονία και ότι μπορεί, μέσω των ανεμογεννητριών, να μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική, ενώ αντίθετα, τα μειονεκτήματά της εντοπίζονται α) στη διακύμανση που παρουσιάζει ως προς την απόδοση ισχύος, διακύμανση που οφείλεται στη μεταβαλλόμενη -κατά τη διάρκεια της ημέρας, του μήνα και του έτους- ένταση του ανέμου, β) στη χαμηλή πυκνότητα που παρουσιάζει ως μορφή ενέργειας με συνέπεια να απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος, γ) στο χρόνο που απαιτείται για την έρευνα και τη χαρτογράφηση του αιολικού δυναμικού μεγάλων περιοχών, ώστε να εντοπιστούν τα ευνοϊκά σημεία.

Από τη δεκαετία του 1980 σημειώθηκε ραγδαία εξέλιξη στην έρευνα για την αιολική ενέργεια και στην τεχνολογία για την εκμετάλλευσή της. Έτσι, μειώθηκε σταδιακά το λειτουργικό κόστος των ανεμογεννητριών, σε επίπεδο που κατέστησε την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας οικονομικά συμφέρουσα, αντιμετωπίστηκαν ικανοποιητικά τα μηχανολογικά τους



προβλήματα και δόθηκε έμφαση στην ασφαλή τους λειτουργία και στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων.

Συγκεκριμένα, η απόδοσή τους αυξήθηκε σημαντικά χάρη στη βελτίωση του μηχανολογικού σχεδιασμού τους και της αεροδυναμικής συμπεριφοράς τους, στη χρησιμοποίηση σύγχρονων υλικών κατασκευής και στην εισαγωγή ηλεκτρονικών διατάξεων (μικροεπεξεργαστών και αισθητήρων ελέγχου) στο σύστημα λειτουργίας τους. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών συστημάτων (αλλοίωση του τοπίου, διατάραξη του οικοσυστήματος, ηχορύπανση) αντιμετωπίζονται με προσεκτική επιλογή του χώρου εγκατάστασης των αιολικών πάρκων, σωστό σχεδιασμό των ανεμογεννητριών και χωροθέτησή τους, καθώς και με πρωτοποριακές λύσεις, όπως η εγκατάσταση αιολικών πάρκων μέσα στη θάλασσα.

Επίσης, αξιοσημείωτη εφαρμογή της αιολικής ενέργειας είναι ο συνδυασμός της με την υδροηλεκτρική ενέργεια: ανεμοκινητήρες που κινούν αντλίες νερού μπορούν, τις ημέρες όπου το αιολικό δυναμικό παρουσιάζεται αυξημένο, να χρησιμοποιούν την παραγόμενη περίσσεια ισχύος για την αποταμίευση νερού σε ταμιευτήρες που βρίσκονται σε μεγάλο ύψος. Το νερό αυτό μπορεί να χρησιμοποιείται για άρδευση ή σε ημέρες άπνοιας να διατίθεται για την κίνηση υδροστροβίλων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



### 3. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

#### h. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι ανεμογεννήτριες είναι η συνέχεια των ανεμόμυλων. Ο ανεμόμυλος είναι μια διάταξη που χρησιμοποιεί ως κινητήρια δύναμη την κινητική ενέργεια του άνεμου (αιολική ενέργεια). Χρησιμοποιείται για την άλεση σιτηρών, την άντληση νερού και σε άλλες εργασίες.

Η χρήση των ανεμόμυλων για την άλεση των δημητριακών και την άρδευση εντοπίζεται αρχικά στις χώρες της Ανατολής, στη Μικρά Ασία και στο Αιγαίο και κατά τη Βυζαντινή εποχή. Στην Ευρώπη υποστηρίζεται ότι οι ανεμόμυλοι εμφανίστηκαν περίπου το 1200.



Εικόνα 2.: Από τον ανεμόμυλο στην ανεμογεννήτρια.

Φαίνεται ότι οι αρχαίοι λαοί της Ανατολής χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους, αν και η πρώτη αναφορά σε ανεμόμυλο (ένα περσικό συγκρότημα ανεμόμυλων του 644 μ.Χ.) εμφανίζεται σε έργα Αράβων συγγραφέων του 9<sup>ου</sup> μ.Χ. αιώνα. Αυτό το συγκρότημα των ανεμόμυλων βρισκόταν στο Σειστάν, στα σύνορα της Περσίας και Αφγανιστάν και ήταν "κατακόρυφου τύπου" δηλαδή με ιστία (φτερά) τοποθετημένα ακτινικά σε έναν "κατακόρυφο άξονα". Ο άξονας αυτός στηριζόταν σε ένα μόνιμο κτίσμα με ανοίγματα σε αντιδιαμετρικά σημεία για

την είσοδο και την έξοδο του αέρα. Κάθε μύλος έδινε απευθείας κίνηση σε ένα μόνο ζεύγος μολόπετρες.

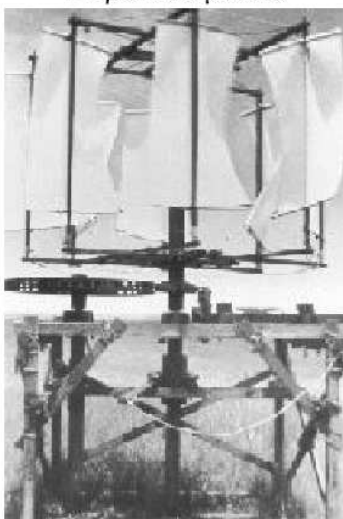
Ο πιο αντιπροσωπευτικός από όλους αυτούς τους τύπους των ανεμόμυλων είναι ο τύπος με το "στροφέιο σχήματος S" (S-Rotor) (εφευρέτης ο Φιλανδός S.J. Saviniou) που ακόμη και σήμερα χρησιμοποιείται σε απομονωμένες περιοχές λόγω της φτηνής και εύκολης κατασκευής του.

Οι αρχαιότεροι ανεμόμυλοι (κατακόρυφου άξονα) κατασκευάστηκαν στην Περσία τον 6<sup>ο</sup> έως τον 9<sup>ο</sup> αιώνα, ενώ η πρώτη γραπτή αναφορά γίνεται στην Κίνα το 13<sup>ο</sup> αιώνα.

Κατά την διάρκεια του 17<sup>ου</sup> αιώνα οι ανεμόμυλοι αντικαταστάθηκαν από τους ατμοστρόβιλους αλλά τον επόμενο αιώνα οι Δανοί «εκμεταλλεύτηκαν» τον άνεμο παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.

Ο ανεμόμυλος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ως ανεμογεννήτρια το 1890

Αντίγραφο του πρώτου  
Περσικού μύλου



Μεσογειακός



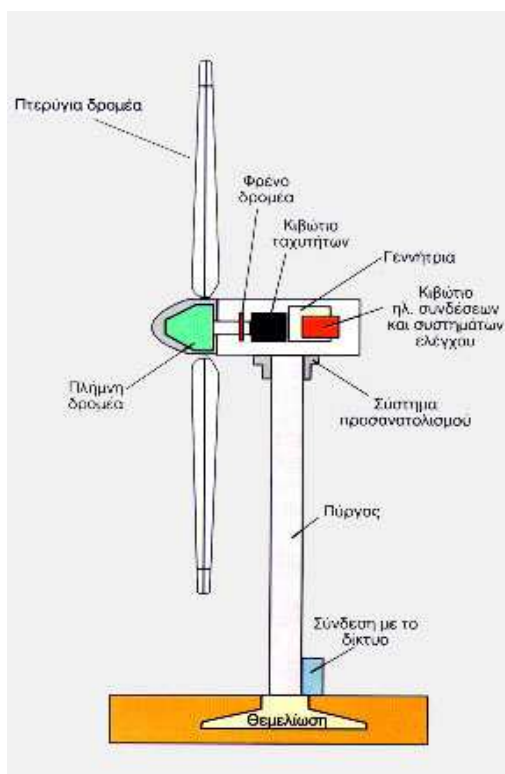
Αμερικάνικος  
(18<sup>ος</sup> αιώνας)



### Εικόνα 3.: Ιστορική εξέλιξη.

όταν εγκαταστάθηκε πάνω σε χαλύβδινο πύργο ο ανεμόμυλος του Π. Λα Κούρ στη Δανία, με ισχία, με σχισμές και διπλά πτερύγια αυτόματης μετάπτωσης προς τη διεύθυνση του ανέμου. Μετά τον Α' Παγκόσμιο πόλεμο, έγιναν πειράματα με ανεμόμυλους που είχαν πτέρυγες με γεωμετρία αεροτομής, δηλαδή όμοια με πτερύγια αεροπορικής έλικας.

Το 1931 μια τέτοια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στην Κριμαία και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς διοχετευόταν στο τμήμα χαμηλής τάσης του τοπικού δικτύου. Πραγματικές ανεμογεννήτριες με δύο πτερύγια λειτούργησαν κατά στις ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1940, στην Αγγλία στη δεκαετία του 1950 καθώς και στη Γαλλία. Η πιο πετυχημένη ανεμογεννήτρια αναπτύχθηκε στη Δανία από τον J.Juul με τρία πτερύγια αλληλοσυνδεόμενα μεταξύ τους και με έναν πρόβολο στο μπροστινό μέρος του άξονα περιστροφής. Στην Ολλανδία εκτελέστηκαν πειράματα από τον F.G. Pigeaud με αντικείμενο τη μετασκευή των παλαιών ανεμόμυλων άλεσης δημητριακών, έτσι ώστε η πλεονάζουσα ενέργεια να χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή. Χρησιμοποιήθηκε ένας ασύγχρονος ηλεκτροκινητήρας που κινούσε τον ανεμόμυλο (σε περίπτωση άπνοιας) ή λειτουργούσε σαν γεννήτρια, όταν φυσούσε.



Ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης περιλάμβανε συμπλέκτη παράκαμψης με σκοπό ο ηλεκτροκινητήρας να μην κινεί τα ιστία παρά μόνο να εκτελεί χρήσιμο έργο. Η οροφή στρεφόταν με τη βοήθεια σερβοκινητήρα που ελεγχόταν από έναν ανεμοδείκτη. Μετά τον Β' Παγκόσμιο πόλεμο πολλοί περίμεναν ότι η αιολική ενέργεια θα συνέβαλλε σημαντικά στην παραγωγή ηλεκτρισμού, αλλά οι προσπάθειες ανάπτυξης ανεμογεννητριών ατόνησαν μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι προσπάθειες αυτές ξανάρχισαν πιο

έντονες μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση (1973) και στηρίχθηκαν κατά μεγάλο μέρος στην σύγχρονη αεροδιαστημική τεχνολογία. Έτσι αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 διατίθονταν στο εμπόριο συγκροτήματα μικρής ισχύος (μέχρι 20-25 KW) ενώ είχαν κατασκευαστεί και ανεμογεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος (3-4 MW).

Οι ανεμογεννήτριες προηγμένης τεχνολογίας που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι κυρίως δύο τύπων: ανεμογεννήτριες οριζοντίου

άξονα με πτερύγια και ανεμογεννήτριες Νταρίους με κατακόρυφο άξονα (από τον Γάλλο G.J.M. Darrieus που τις εφεύρε το 1925).

Ελλάδα:

Στη χώρα μας αναπτύχθηκε ο λεγόμενος Μεσογειακός ανεμόμυλος (οριζοντίου άξονα). Οι ανεμόμυλοι αυτοί ήταν πέτρινοι με πάνινα πανιά. Από τα υπάρχοντα πέτρινα κτίσματα φαίνεται να λειτούργησαν και ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα.

Στη Μύκονο, η ύπαρξη ανεμόμυλων είναι εξακριβωμένη το 15<sup>ο</sup> αιώνα, με πρώτη αναφορά στον ανεμόμυλο της θέσης "Κάστρο".

Σήμερα γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης της Αιολικής ενέργειας με τη χρήση μεγάλων αιολικών μηχανών οριζόντιου άξονα με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά οι τοποθεσίες των παλαιών ανεμόμυλων αποτελούν ένδειξη περιοχών με αξιόλογο αιολικό δυναμικό.



**Εικόνα 4. : Ανεμόμυλος της Μυκόνου.**

## **i. ΝΕΟΤΕΡΗ ΕΠΟΧΗ**

Μέχρι το 1908 υπήρχαν 72 γεννήτριες κινούμενες από τον άνεμο από 5 kW έως 25 kW. Το 1957 ο Johannes Juul εγκατέστησε μια ανεμογεννήτρια με 24



μ. διάμετρο στο Gedser , η οποία διήρκεσε από το 1957 μέχρι το 1967. Ήταν μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων, οριζόντιου άξονα, σταθερού βήματος, παρόμοια με αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εμπορική εκμετάλευση της αιολικής ενέργειας.

Μια γιγαντιαία αλλαγή έγινε το 1978 όταν κατασκευάστηκε η πρώτη Α/Γ ισχύος πάνω από το 1 MWatt . Η μονάδα παραγωγής ενέργειας ήταν σε θέση να παρέχει 2MW, είχε ένα σωληνωτό πύργο και τα τρία πτερύγια ήταν μεταβλητού βήματος. Χτίστηκε από τους καθηγητές και τους μαθητές του σχολείου Tvind. Η τουρμπίνα λειτουργεί ακόμα και σήμερα και δείχνει σχεδόν ίδια με τους νεότερους και πιο σύγχρονους μύλους.



**Εικόνα 5.: Ανεμογεννήτρια Tvindmøllen, Δανία 1978**

Ένας πρόδρομος των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα ήταν η WIME-3D στην [Μπαλακλάβα](#) , κοντά στη [Γιάλτα](#) , [ΕΣΣΔ](#) που λειτούργησε από το 1931 μέχρι το 1942. Ήταν μια γεννήτρια 100 kW σε πάνω σε έναν 30μ. πύργο, που συνδεόταν με το τοπικό 6,3 kV σύστημα διανομής. Είχε τριών πτερυγίων ρότορα, διαμέτρου 30 μέτρων, σε ένα πύργο από χάλυβα. Έχει αναφερθεί ότι είχε ετήσιο [συντελεστή φορτίου](#) (capacity factor) 32%, που δεν διαφέρει και πολύ από τα σημερινά μηχανήματα.



Το 1941 η [πρώτη Α/Γ](#) μεγέθους μεγαβάτ στον κόσμο ήταν συνδεδεμένη με το τοπικό ηλεκτρικό σύστημα διανομής στο βουνό Grandpa's Knob στο [Castleton, Vermont](#), [ΗΠΑ](#). Σχεδιάστηκε από τον [Palmer Cosslett Putnam](#) και κατασκευάστηκε από την S. Morgan Smith. Αυτή η 1,25 MW Smith-Putnam (δες εικόνα δίπλα) Α/Γ λειτούργησε για 1.100 ώρες πριν από την αστοχία του ενός πτερυγίου που δεν είχε ενισχυθεί λόγω της εν καιρώ πολέμου έλλειψης υλικών. Καμία παρόμοιου μεγέθους μονάδα δεν τόλμησε να επαναλάβει αυτό το «τολμηρό πείραμα» για περίπου σαράντα χρόνια.

Το 1946 ο φάρος και οι κατοικίες στο νησί [Insel Neuwerk](#) εν μέρει τροφοδοτούνταν από μια Α/Γ 18 kW, με 15 μέτρα σε διάμετρο, για εξοικονόμηση του ντίζελ. Η εγκατάσταση αυτή έτρεξε για περίπου 20 χρόνια πριν να αντικατασταθεί από ένα υποβρύχιο καλώδιο με την ηπειρωτική χώρα. Στον γαλλικό οργανισμό Station d'Etude de l'Energie du Vent στο [Nogent-le-Roi](#) στη Γαλλία λειτούργησε μια πειραματική 800 KVA ανεμογεννήτρια τη περίοδο 1956 - 1966.



Εικόνα 6.: Station d'Etude de l'Energie du Vent στο [Nogent-le-Roi](#), Γαλλία. 1956.

Από το 1974 μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών εργάστηκε με τη βιομηχανία για την προώθηση της τεχνολογίας και τη δημιουργία μεγάλων ανεμογεννητριών. Οι [ανεμογεννήτριες της NASA](#) αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο ενός προγράμματος για τη δημιουργία βιομηχανίας Α/Γ στις ΗΠΑ, με χρηματοδότηση από το [Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών](#) και αργότερα το [Αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας](#) (DOE). Συνολικά 13 πειραματικές ανεμογεννήτριες είχαν τεθεί σε λειτουργία. Αυτό το πρόγραμμα έρευνας και ανάπτυξης ήταν πρωτοπόρο σε πολλές από τις τεχνολογίες των πολυ-μεγαβάτ ανεμογεννητριών που είναι σε χρήση σήμερα, όπως: πύργοι χαλυβδοσωλήνων, μεταβλητής ταχύτητας γεννήτριες, σύνθετα υλικά πτερυγίων, μερικός έλεγχος μεταβλητού βήματος, καθώς και δυνατότητες αεροδυναμικού σχεδιασμού των πτερυγώσεων. Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο αυτής της προσπάθειας έκαναν αρκετά παγκόσμια ρεκόρ για τη διάμετρο και την απόδοση ισχύος των.

Όταν οι τιμές του πετρελαίου μειώθηκαν από το 1980 μέχρι τις αρχές του 1990, πολλοί κατασκευαστές Α/Γ, τόσο της μεγάλης κλίμακας όσο και οι



κατασκευαστές των μικρών ανεμογεννητριών, φάνηκε να εγκαταλείπουν την προσπάθεια. Οι εμπορικές πωλήσεις της NASA / Boeing Mod-5B, για παράδειγμα, έλαβαν τέλος το 1987, όταν η Boeing Engineering and Construction ανακοίνωσε ότι σχεδιάζει να αποχωρήσει από την αγορά λόγω του ότι οι χαμηλές τιμές του πετρελαίου καθιστούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ αντισοικονομική.

Όλες οι μεγάλες [οριζοντίου άξονα](#) ανεμογεννήτριες σήμερα περιστρέφονται με τον ίδιο τρόπο (δεξιόστροφα). Ωστόσο, οι αρχικές Α/Γ περιστρέφονταν αριστερόστροφα, όπως τους παλιούς ανεμόμυλους, αλλά η αλλαγή συνέβη από το 1978 και μετά. Ο προμηθευτής πτερυγίων Økær Vind Energi έλαβε την απόφαση να αλλάξει τη κατεύθυνση, προκειμένου να διακρίνονται από τις ανεμογεννήτριες της [Tvind](#) και άλλων μικρότερων κατασκευαστών. Μερικοί από τους πελάτες των πτερυγίων ήταν οι εταιρείες που αργότερα εξελίχθηκαν σε [Vestas](#), [Siemens](#), [Enercon](#) και [Nordex](#).

Μετά την εμπειρία με επανεπισκευασμένες ανεμογεννήτριες του 1930, μια νέα γενιά Αμερικανών κατασκευαστών άρχισαν να δημιουργούν και να πωλούν μικρές ανεμογεννήτριες, όχι μόνο για φόρτιση μπαταριών, αλλά και για τη διασύνδεση με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα πρώτο παράδειγμα ήταν η Enertech Corporation του Norwich, στο Βερμόντ, το οποίο άρχισε να κατασκευάζει μοντέλα των 1,8 kW, στις αρχές του 1980.

Στη δεκαετία του 1990, οι ανεμογεννήτριες άρχισαν να τοποθετούνται επάνω σε χαλύβδινους σωλήνες ή από σπλισμένο σκυρόδεμα πύργους. Οι μικρές γεννήτριες συναρμολογούνταν με τον πύργο στο έδαφος και μετά ο πύργος υψώνεται στη θέση του. Οι μεγαλύτερες γεννήτριες συναρμολογούνται στη θέση τους στην κορυφή του πύργου και υπάρχει μια σκάλα στο εσωτερικό του πύργου για να μπορούν οι τεχνικοί να φτάσουν στη γεννήτρια, ενώ προστατεύονται από τις καιρικές συνθήκες.

## 4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

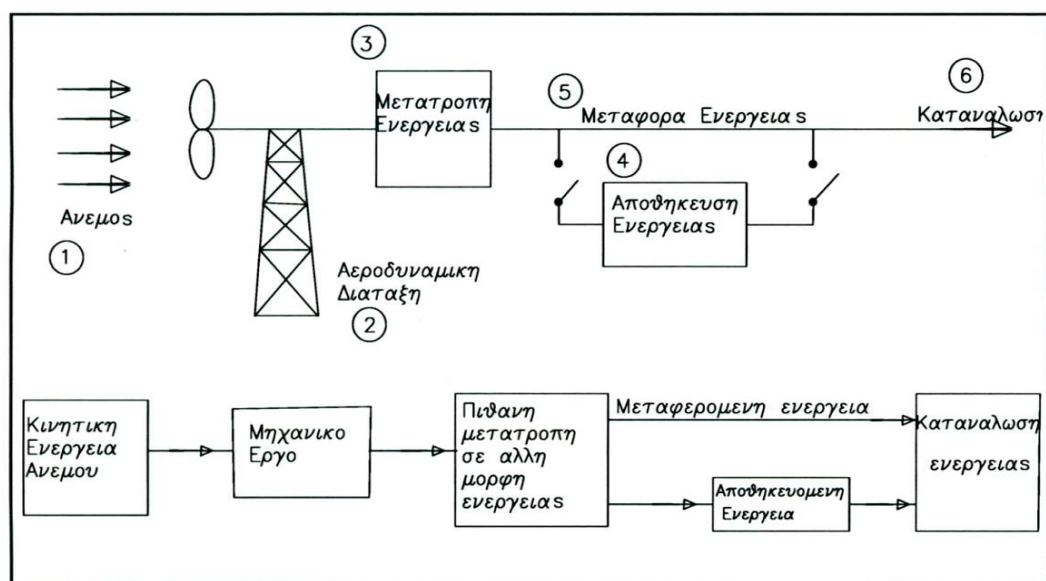
### j. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΥΣ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΕΣ (Α/Κ)

Ο Α/Κ από την εποχή της εμφάνισης του μέχρι σήμερα έχει περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο του (οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα) όσο και ως προς τα υποσυστήματά του (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, πύργος, αυτοματισμοί, γεννήτρια κλπ.). Εξελίξεις έχουν σημειωθεί και στον τρόπο δέσμευσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τον Α/Κ σε άλλη αναβαθμισμένη μορφή ενέργειας.

Τα Βασικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι τα ακόλουθα:

- Η πτερωτή ή ρότορας ή δρομέας
- Το κιβώτιο ταχυτήτων.
- Η ηλεκτρική γεννήτρια.
- Ο πύργος στήριξης.
- Το σύστημα ελέγχου της όλης λειτουργίας.

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στο



Σχήμα 1.: Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας

Η διάταξη αυτή (σχ. 1.), είναι μία γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης (πχ. μιας έλικας). Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί είναι εκμεταλλεύσιμο επί τόπου στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε γιατί δεν χρειαζόμαστε μόνο μηχανικό έργο, είτε γιατί ο τόπος κατανάλωσης δεν συμπίπτει με τον τόπο που είναι εγκατεστημένος ο Α/Κ, δηλ. απαιτείται η μεταφορά της δεσμευόμενης αιολικής ενέργειας. Σ' αυτή την περίπτωση η πιο πρόσφορη διάταξη είναι εκείνη που μετατρέπει το μηχανικό έργο σε άλλη μορφή ενέργειας, που μπορεί να μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά στο τόπο κατανάλωσης. Εδώ και πολύ καιρό οι έρευνες έχουν στραφεί προς την κατεύθυνση μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα του Α/Κ σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς της.

Είναι γνωστές οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο. Είναι επίσης γεγονός ότι πολλές φορές δεν πνέει καθόλου άνεμος για ορισμένα χρονικά διαστήματα. Αυτά έχουν ως συνέπεια χρονική ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Η λύση στο πρόβλημα βρίσκεται βασικά στην αποθήκευση ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό πρόβλημα που παρουσιάζεται, όταν η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά ενεργειακής ζήτησης και τα χαρακτηριστικά άλλων πηγών ενέργειας που υπάρχουν για την ικανοποίηση της ζήτησης αυτής.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει:

1. Μελέτη των χαρακτηριστικών του ανέμου με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση του Α/Κ και την πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας.
2. Σχεδιασμός της αεροδυναμικής διάταξης, που να μετατρέπει κατά τον αποδοτικό τρόπο την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο.
3. Μελέτη της περίπτωσης μετατροπής του μηχανικού έργου σε άλλη πιο

συμφέρουσα μορφή ενέργειας και βέλτιστο σχεδιασμό του συστήματος μετατροπής του μηχανικού έργου του δρομέα.

4. Εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ενέργειας του ανέμου.
5. Μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειας, αν απαιτείται.
6. Διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς κατανάλωση.

## **κ. ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

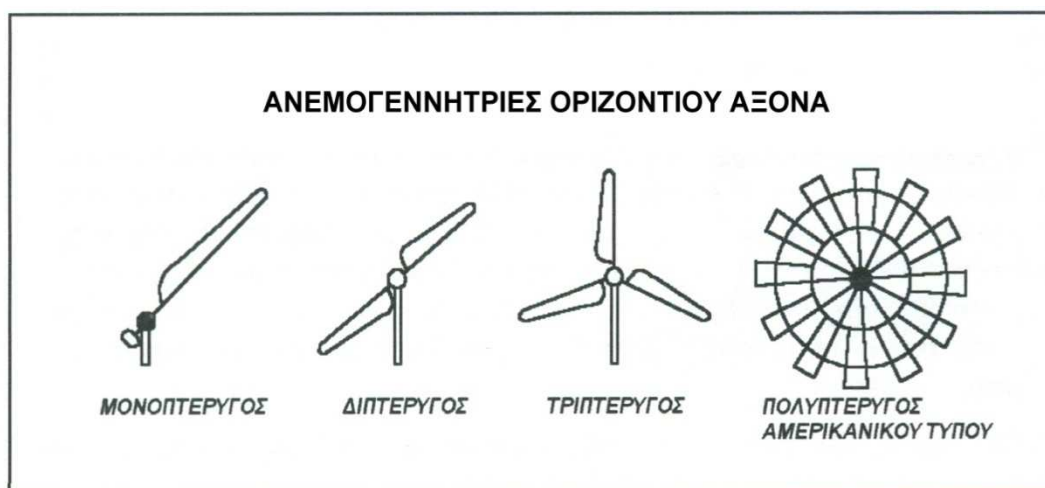
Οι ανεμοκινητήρες διακρίνονται:

### **Ως προς το μέγεθος**

Σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 61400-XX οι ανεμογεννήτριες με επιφάνεια σάρωσης μέχρι 200m<sup>2</sup> διακρίνονται στις μικρές ανεμογεννήτριες και διέπονται από το πρότυπο IEC 61400-2 σε αντίθεση με τις μεγάλες ανεμογεννήτριες που διέπονται από το πρότυπο IEC 61400-1.

### **Ως προς τον αριθμό των πτερύγων**

Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός τέτοιων μηχανών, που καλείται δρομέας, μπορεί να έχει από ένα πτερύγιο μέχρι 10 ή και περισσότερα.



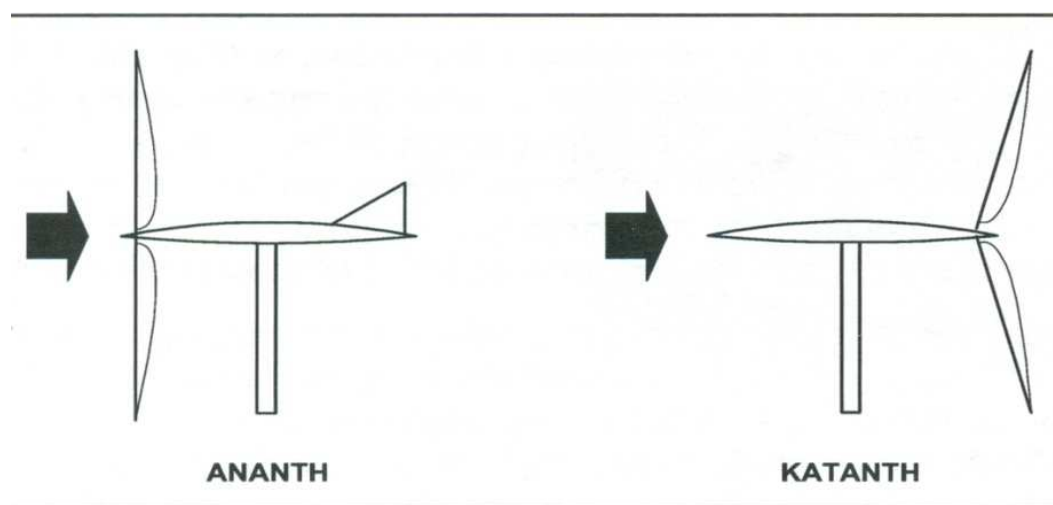
Εικόνα 7.: Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με διαφορετικό αριθμό πτερύγων.

### **Ως προς τη θέση του άξονα περιστροφής της πτερύγωσης**

Ανάλογα με τη θέση του άξονα περιστροφής της πτερύγωσης οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα.

### **Ως προς τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και την διεύθυνση του ανέμου**

Σε σχέση με τη θέση του δρομέα ως προς τον πύργο στήριξης και την διεύθυνση του ανέμου, οι Α/Κ αυτού του τύπου μπορούν να έχουν τον δρομέα μπροστά από τον πύργο (άναντι) - πίσω (κάταντι), σχ. 4.4.



Εικόνα 8.: Θέση δρομέα ως προς πύργο και τον άνεμο.

### **Ως προς το σύστημα προσανεμισμού της ανεμογεννήτριας**

Για τη μεγιστοποίηση της δέσμευσης της κινητικής ενέργειας του ανέμου απαιτείται όπως το επίπεδο του δρομέα του Α/Κ να είναι κάθετο στην κατεύθυνση του ανέμου. Για το σκοπό αυτό στους μεν μικρής ισχύος Α/Κ (και στον ανάντι τύπο) υπάρχει συνήθως ουραίο πτερύγιο που ευθυγραμμίζει τον άξονα του δρομέα στον άνεμο, στους δε μεγάλους Α/Κ εφαρμόζονται συστήματα αυτόματης ρύθμισης της σωστής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο μέσω σερβομηχανισμού. Στους μικρούς ατμοκινητήρες με το δρομέα κατάντι δεν τοποθετείται πτερύγιο προσανατολισμού γιατί το κουβούκλιο που καλύπτει τα εξαρτήματα της διάταξης μετατροπής της ενέργειας του δρομέα έχει τέτοιο σχήμα ώστε το ίδιο να αποτελεί πτερύγιο προσανατολισμού, σχήμα.

### **Ως προς το σύστημα ελέγχου της ισχύος**

Για τον έλεγχο της ισχύος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μέθοδοι:

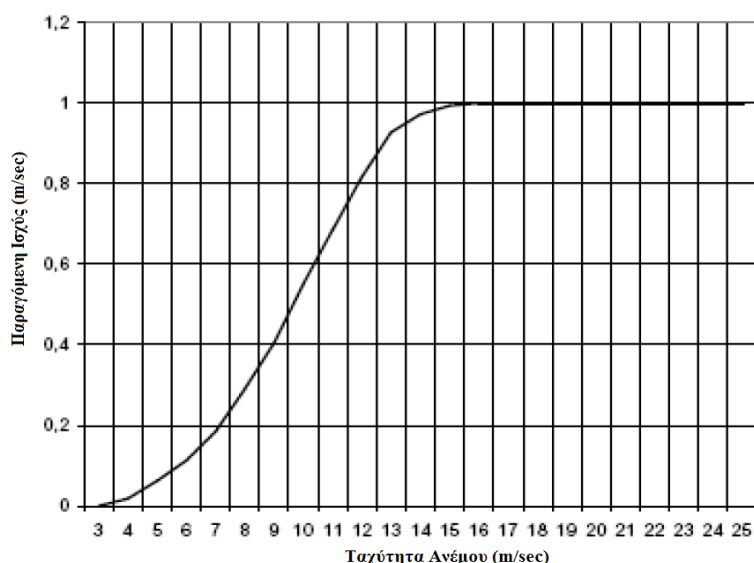
1. Pitch control (έλεγχος μέσω μεταβολής βήματος πτερυγίων): Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει συνεχή έλεγχο των πτερυγίων, προσφέροντας έτσι αναβαθμισμένο έλεγχο ισχύος, εύκολες εκκινήσεις

καθώς και άμεση αεροδυναμική πένδη σε περίπτωση κινδύνου. Σε αυτόν τον έλεγχο, ο ελεγκτής της ανεμογεννήτριας υπολογίζει συνέχεια την παραγόμενη ενέργεια και αν υπερβαίνει κάποιο όριο ρυθμίζει αυτόματα την κλίση των πτερυγίων (γωνία σφήνωσης) ως προς τον άνεμο, μεταβάλλοντας έτσι τη γωνία προσβολής άρα και την παραγόμενη άνωση. Ο τύπος αυτός ελέγχου χρησιμοποιείται κατά κόρον από τις ανεμογεννήτριες τελευταίας γενιάς. Το μειονέκτημα του ωστόσο, πέρα από το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με το stall έλεγχο, είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις στην ισχύ για μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλες ταχύτητες. Ο μηχανισμός δεν είναι τόσο γρήγορος ώστε να αποφύγει τελείως διακυμάνσεις στην ισχύ. Έτσι, ναι μεν ο μηχανισμός είναι ικανός να απορροφά αργές μεταβολές του ανέμου, ωστόσο αυτό δεν είναι εφικτό να εξαλειφθούν οι ριπές.

2. **Passive Stall control** (παθητικός έλεγχος μέσω αποκόλλησης της ροής): Οι ανεμογεννήτριες στις οποίες εφαρμόζεται αυτός ο έλεγχος έχουν τα πτερύγια τους συναρμολογημένα στη πλήμνη σε σταθερή γωνία. Το γεωμετρικό προφίλ όμως των πτερυγίων, είναι αεροδυναμικά σχεδιασμένο ώστε να διασφαλίσει ότι τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου γίνει αρκετά υψηλή, να δημιουργεί δίνες στην πλευρά του πτερυγίου που δεν βλέπει τον αέρα, γεγονός που οδηγεί σε αποκόλληση του οριακού στρώματος και συνεπώς σε επιβράδυνση των πτερυγίων. Αυτή η επιβράδυνση προλαμβάνει την άσκηση ανεπιθύμητων δυνάμεων των πτερυγίων στον ρότορα, εμποδίζοντας την υπερτάχυνση. Έχει το μειονέκτημα ότι σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου υπάρχει μείωση της παραγόμενης ενέργειας κάτω από την ονομαστική.
3. **Active Stall control** (ενεργητικός έλεγχος μέσω αποκόλλησης της ροής): Το σύστημα αυτό έχει γίνει αρκετά αποδεκτό τελευταία σε μεγάλες ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας γιατί συνδυάζει τα βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος stall control (απλότητα κατασκευής → μειωμένο αρχικό κόστος και κόστος συντήρησης), με τις αυξημένες δυνατότητες ελέγχου του συστήματος pitch control, παρέχοντας παράλληλα και μία ευελιξία για αεροδυναμική πένδη σε περίπτωση



κινδύνου όπως και εύκολες εκκινήσεις. Τα πτερύγια στρέφονται προς την αντίθετη κατεύθυνση από ότι στον έλεγχο pitch control (σε ένα μικρό εύρος  $0^{\circ} - 4^{\circ}$  περίπου).



**Διάγραμμα 8.: Ενδεικτική Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας με έλεγχο active-stall control.**

4. Yaw control (έλεγχος μέσω προσανεμισμού – αποπροσανεμισμού της πτερύγωσης): Η ανεμογεννήτρια πρέπει να βρίσκεται σε κάθετη διεύθυνση ως προς το πεδίο ροής του ανέμου, ανάντι ή κατάντι, καθ' όλη τη διάρκεια που επιθυμείται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, Αυτό εξασφαλίζεται με το σύστημα προσανατολισμού ή προσανεμισμού της ανεμογεννήτριας (yaw control). Καθώς τα δεδομένα από τον ανεμοδείκτη στην κορυφή της νασέλας περνούν από επεξεργασία και η ανεμογεννήτρια στρέφεται κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου. Συγχρόνως βέβαια υπεισέρχεται κι ένα σφάλμα το οποίο προκαλεί ανομοιομορφία στις φορτίσεις του πύργου και στη ροπή του κάθε πτερυγίου. Επιπλέον υπάρχει έλεγχος για την αποφυγή περιστροφής των καλωδίων σε περίπτωση σταθερής σε φορά περιστροφής.

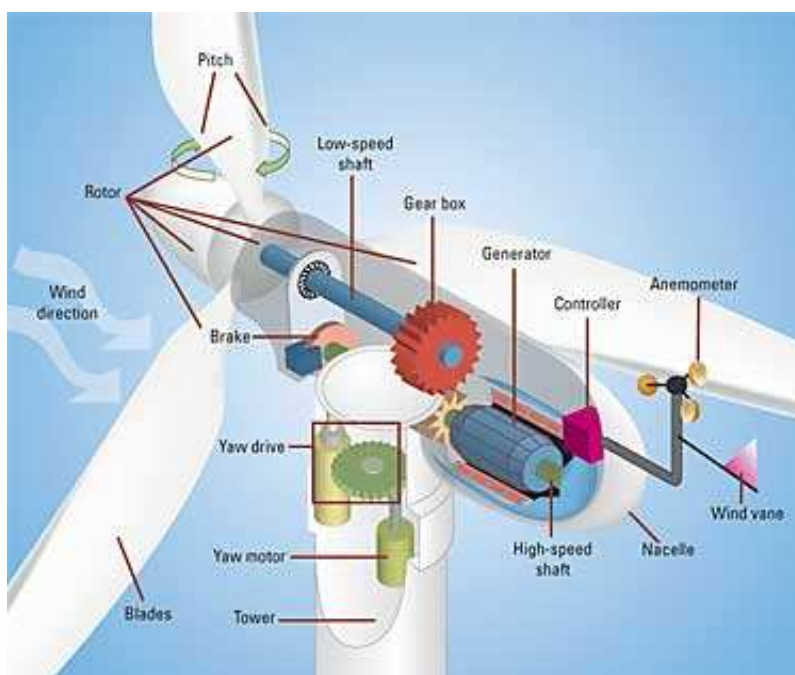
Από τους τέσσερεις τύπους ελέγχου, αυτός που χρησιμοποιείται κατά κόρον από της ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών είναι ο μηχανισμός με συνεχή έλεγχο της γωνίας των πτερυγίων (pitch control). Επιδιώκεται ο σχεδιασμός όσο το δυνατό γρηγορότερου συστήματος ενώ η ευελιξία και τα οφέλη που παρέχονται από την αποτελεσματικότερη ρύθμιση

ισχύος είναι ικανά να αντισταθμίσουν το μεγαλύτερο κόστος του συγκεκριμένου μηχανισμού σε σχέση με τους άλλους δύο.

## 5. ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

### 1. ΠΤΕΡΥΓΩΣΗ

Ο σχεδιασμός της πτερύγωσης είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων που συνθέτουν τον δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός πτερυγίων, κατανομή της χορδής του πτερυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές, κατανομή της συστροφής του πτερυγίου, γεωμετρικό βήμα στο ακροπτερύγιο. Τα κριτήρια επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της. Η διάμετρος του δρομέα θα εξαρτηθεί από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του Α/Κ.



Εικόνα 9.: Τυπική διάταξη κουβουκλίου (νασέλας) Α/Κ

### m. ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΠΤΕΡΥΓΩΣΕΙΣ

Στους μικρούς Α/Κ χρησιμοποιείται κυρίως υαλόνημα και ξύλο, υλικά που δεν υποφέρουν από διάβρωση. Στους μεσαίου και μεγάλου μεγέθους δρομείς

χρησιμοποιούνται υαλονήματα ή ανθρακονήματα με εναλλαγή κατεύθυνσης των υαλονημάτων σε πολλαπλές στρώσεις.

#### **n. ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ**

Βασικά κριτήρια επιλογής του είναι η διάρκεια ζωής του, ο βαθμός απόδοσης του και ο θόρυβος λειτουργίας του. Λόγω της συνεχούς μεταβολής της ισχύος του ανέμου, το κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί συνεχώς με παρουσία κρουστικών φορτίων τα οποία οδηγούν σε πρόωρη φθορά του υλικού και μείωση της διάρκειας ζωής του κιβωτίου. Για το λόγο αυτό, το κιβώτιο ταχυτήτων της ανεμογεννήτριας επιλέγεται να έχει ονομαστικό μέγεθος ισχύος πολύ μεγαλύτερο από το ονομαστικό μέγεθος της μηχανής, ακόμα και ονομαστική ροπή 200% μεγαλύτερη της ονομαστικής ροπής της μηχανής. Διακρίνονται δύο είδη κιβωτίων.

#### **ο. ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΕΔΗΣΗΣ ΑΤΡΑΚΤΟΥ ΔΡΟΜΕΑ**

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ακινητοποίησης του δρομέα του Α/Κ:

- Μεταβολή του βήματος του πτερυγίου ή του ακροπτερυγίου ή και ενεργοποίησης της αεροπέδης στο ακροπτερύγιο.
- Στροφή του ίδιου του δρομέα ώστε να γυρίσει παράλληλα προς τον άνεμο.
- Αύξηση της αεροδυναμικής αντίστασης του πτερυγίου με την ενεργοποίηση αεροπέδης.
- Ηλεκτρομηχανική πέδηση της ατράκτου, συνήθως της δευτερεύουσας ατράκτου (άτρακτος υψηλής ταχύτητας - χαμηλής ροπής).

Είναι φανερό ότι ο προτιμότερος τρόπος ακινητοποίησης της μηχανής είναι η σταδιακή μείωση των αεροδυναμικών φορτίων στη μηχανή με παράλληλη αύξηση της αντιροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν αναπτύσσονται κρουστικά φορτία στη φάση πέδησης της μηχανής. Σε περίπτωση αστοχίας όμως των μηχανισμών ρύθμισης του βήματος του πτερυγίου ή των άλλων μεθόδων ρύθμισης ισχύος απαιτεί η πέδηση του άξονα του δρομέα. Η πέδηση αυτή

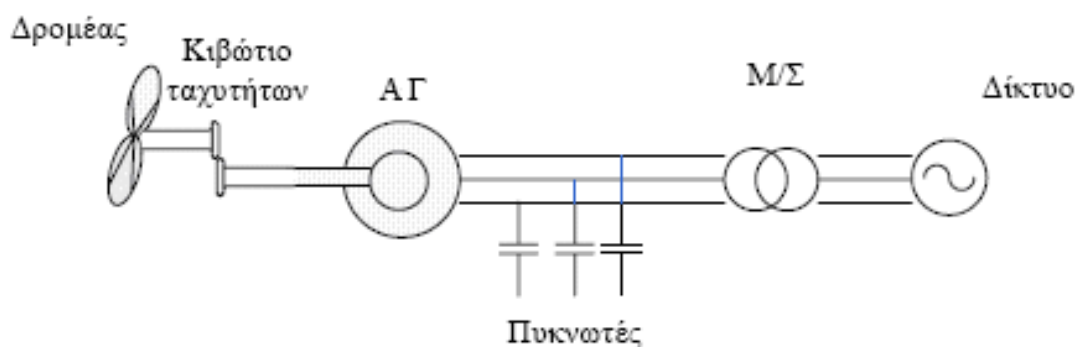
γίνεται συνήθως με δισκόφρενο τύπου ασφάλειας αστοχίας που ενεργεί αυτόματα στον άξονα.

## ρ. ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Υπάρχουν διάφορες τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους της Α/Γ, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με το είδος της γεννήτριας που χρησιμοποιείται, η οποία μπορεί να είναι επαγωγής, σύγχρονη ή συνεχούς ρεύματος. Η γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού χρησιμοποιείται σε σχετικά μικρά μεγέθη Α/Γ που παράγουν ισχύ της τάξης των KW, ενώ αυτή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους απαντάται σε Α/Γ μέσου και μεγάλου μεγέθους, με παραγωγή ισχύος έως και 5MW. Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μεσαίου και μεγάλου μεγέθους Α/Γ, οι οποίες είναι είτε ηλεκτρικά διεγερόμενες είτε με μόνιμους μαγνήτες. Τέλος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται από μικρού μεγέθους Α/Γ και σε πολύ μικρή έκταση, λόγω αυξημένης πολυπλοκότητας και αναγκών συντήρησης.

Παρακάτω, παρουσιάζονται οι βασικοί τρόποι σύνδεσης των Α/Γ στο δίκτυο και τα βασικά χαρακτηριστικά κάθε τοπολογίας:

### Σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής κλωβού (βραχυκυκλωμένου δρομέα)



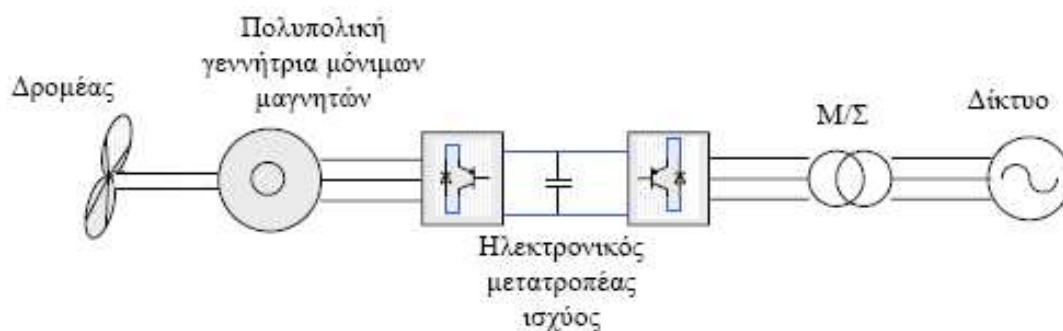
Σχήμα 2.: Γεννήτρια επαγωγής κλωβού, σταθερών στροφών.

Σε αυτήν την τοπολογία, καθώς οι ταχύτητες του δρομέα και της γεννήτριας διαφέρουν, απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο επιτυγχάνει τη σύζευξή τους. Η ολίσθηση της γεννήτριας είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1%, οπότε γενικά αυτές οι Α/Γ θεωρούνται σταθερών στροφών. Η σταθερή ταχύτητα του δρομέα προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, το λόγο του κιβωτίου ταχυτήτων και τον αριθμό ζευγών πόλων της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο

στάτης συνδέεται στο δίκτυο μέσω μιας διάταξης ομαλής εκκίνησης και μιας συστοιχίας πυκνωτών, για περιορισμό της κατανάλωσης έργου ισχύος. Αυτή η διάταξη είναι γνωστή ως “the Danish design” και συνήθως συνδυάζεται με stall control.

Το πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητα και το χαμηλό κόστος της. Παρ’ όλα αυτά, πρέπει να είναι και μηχανικά πιο στιβαρή, λόγω των μεγάλων μηχανικών καταπονήσεων, καθώς η ταχύτητα του δρομέα δεν μπορεί να αλλάζει αισθητά, με αποτέλεσμα οι διαταραχές του ανέμου να μεταφράζονται απευθείας σε διαταραχές της ροπής. Επίσης, παρατηρούνται μεγαλύτερες διαταραχές στην ισχύ εξόδου, οι οποίες σε ασθενή δίκτυα συνεπάγονται και διαταραχές στην τάση (flicker).

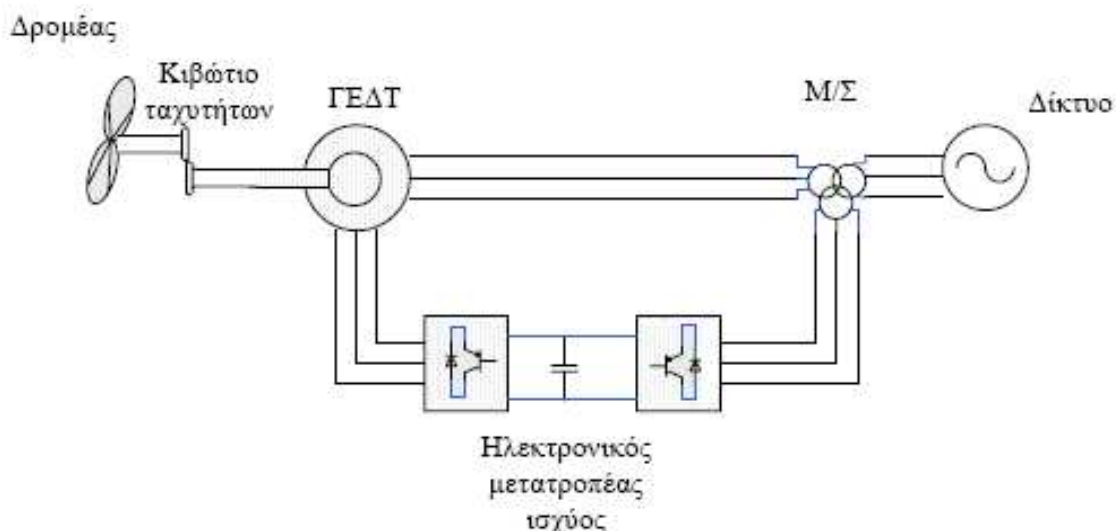
### **Μεταβλητών στροφών με σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια**



**Σχήμα 3.: Σύγχρονη πολυπολική Γεννήτρια.**

Σε αυτές τις Α/Γ, η σύγχρονη γεννήτρια έχει την ίδια ταχύτητα με το δρομέα, γι’ αυτό δεν απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το κόστος και το βάρος της διάταξης, αυξάνεται η αξιοπιστία και ελαττώνεται ο θόρυβος. Η γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο μέσω ηλεκτρονικών ισχύος, που της επιτρέπουν να λειτουργεί με μεταβλητή ταχύτητα και να παράγει ισχύ ακόμη και σε αρκετά χαμηλό αριθμό στροφών. Επιπλέον, η γεννήτρια μπορεί να αυτοδιεγείρεται είτε με μόνιμους μαγνήτες, είτε με ηλεκτρική διέγερση. Τα μειονεκτήματα αυτής της διάταξης είναι ότι απαιτεί μεγάλη και πολύπλοκη γεννήτρια και μεγάλο μετατροπέα ο οποίος διαχειρίζεται το 100% της παραγόμενης ισχύος, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες και το κόστος του.

### **Μεταβλητών στροφών με Γεννήτρια Επαγωγής Διπλής Τροφοδότησης**



**Σχήμα 4.: Γεννήτρια επαγωγής διπλής τροφοδότησης.**

Σε αυτήν την τοπολογία απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων, καθώς ο δρομέας στρέφεται με διαφορετική ταχύτητα από αυτήν της ασύγχρονης γεννήτριας. Ο στάτης συνδέεται απευθείας στο δίκτυο ενώ ο δρομέας συνδέεται στο δίκτυο μέσω μετατροπέα ισχύος ΕΡ/ΣΡ/ΕΡ (back to back AC/DC/AC), στον οποίο συνδέεται μέσω δαχτυλιδιών (slip rings). Ο μετατροπέας αυτός είναι διπλής κατεύθυνσης και αποτελείται από δύο ανεξάρτητα ελεγχόμενους μετατροπείς πηγής τάσης: το μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά της μηχανής και τον μετατροπέα που συνδέεται στην πλευρά του δικτύου. Μεταξύ τους συνδέονται σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος. Ανάμεσα στους δύο μετατροπείς τοποθετείται ένας πυκνωτής στόχος του οποίου είναι να διατηρεί μικρές τις διακυμάνσεις στην τάση της συνεχούς σύνδεσης. Οι μετατροπείς ελέγχουν την τάση του δρομέα και επομένως την ενεργό και την άεργο ισχύ που παράγεται. Με το μετατροπέα στην πλευρά της μηχανής είναι δυνατό να ελεγχθεί η ροπή ή η ταχύτητα της ΓΕΔΤ και επίσης ο συντελεστής ισχύος στα τερματικά του στάτη, ενώ ο βασικός στόχος για το μετατροπέα από την πλευρά του δικτύου είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος που ανταλλάσσεται με αυτό.

Χάρη στο μετατροπέα, η λειτουργία της ΓΕΔΤ είναι πιο ευέλικτη, συγκρινόμενη με τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου δρομέα. Ο μετατροπέας αντισταθμίζει τη διαφορά ανάμεσα στη μηχανική και την ηλεκτρική ταχύτητα του ρότορα, εγχύοντας στο δρομέα ρεύματα μεταβλητής συχνότητας. Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι επιτρέπει τον



ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, ενώ ταυτόχρονα δε διαχειρίζεται την πλήρη ισχύ, αλλά μόνο ένα ποσοστό της, περίπου 20-30%, μειώνοντας τις απώλειες και το κόστος του.

#### q. ΠΥΡΓΟΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ

Οι πύργοι για μεγάλες ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι σωληνοειδείς χαλύβδινοι πύργοι, πύργοι δικτυωτού πλέγματος ή συμπαγείς τσιμεντένιοι πύργοι. Επιτονοειδείς σωληνοειδείς πύργοι χρησιμοποιούνται μόνο για μικρές ανεμογεννήτριες.

- Σωληνοειδείς χαλύβδινοι αυτοφερόμενοι πύργοι: Οι περισσότερες μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν σωληνοειδείς χαλύβδινους πύργους που κατασκευάζονται σε τμήματα ύψους 20-30 μέτρων με φλάντζες σε κάθε άκρο και που ενώνονται όλα μαζί. Οι πύργοι έχουν σχήμα κώνου (δηλαδή με αύξηση της διαμέτρου τους προς τη βάση) προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή τους και για την εξοικονόμηση υλικών ταυτόχρονα.
- Πύργοι δικτυωτού πλέγματος (αυτοφερόμενο χωροδικτύωμα) : Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας συγκολλημένα κομμάτια χάλυβα. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το κόστος, καθώς ένας πύργος δικτυωτού πλέγματος απαιτεί μόνο την μισή ποσότητα υλικών απ' ότι ένας σωληνοειδής πύργος με την ίδια ακαμψία. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι η εμφάνισή τους γι' αυτό για λόγους αισθητικής έχει σχεδόν καταργηθεί η χρήση τους για μεγάλες σύγχρονες ανεμογεννήτριες.
- Επιτονοειδείς πύργοι: Πολλές μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν στενούς πύργους που στηρίζονται με συρμάτινα καλώδια (επίτονα). Το πλεονέκτημά τους είναι η εξοικονόμηση βάρους, που συνεπάγεται μικρότερο κόστος κατασκευής. Το μειονέκτημά τους είναι η δύσκολη πρόσβαση γύρω τους, γεγονός που τους καθιστά λιγότερο κατάλληλους για αγροτικές περιοχές. Τέλος είναι περισσότερο

επιρρεπείς σε βανδαλισμούς με αποτέλεσμα να περιορίζεται η συνολική ασφάλεια της εγκατάστασης.



Πύργοι από χωροδικτύωμα



Επιτονοειδής πύργοι



Σωληνοειδής αυτοφερόμενοι πύργοι

**Εικόνα 10.: Πύργοι ανεμογεννητριών**

## 6. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ Α/Γ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

### γ. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Η έρευνα πάνω σε θέματα αιολικής ενέργειας καθώς και η εξέλιξη της τεχνολογίας είχαν σαν αποτέλεσμα οι σημερινοί ανεμοκινητήρες να μοιάζουν ελάχιστα ή και καθόλου με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους. Χαρακτηριστική είναι η διαφορά που υπάρχει στην αρχή λειτουργία τους. Οι παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κινούνται είτε με τη βοήθεια της αντίστασης (Drag) των πτερυγίων (πανιών) τους στον άνεμο, είτε με (κακή) εκμετάλλευση της άνωσης (Lift) που ασκείται πάνω τους.

Στους σύγχρονους ανεμοκινητήρες η κίνηση οφείλεται κατά κύριο λόγο στην **άνωση**. Η υπεροχή των σημερινών μονάδων γίνεται προφανής αν ληφθεί υπ' όψη ότι σε μια αεροτομή η άνωση μπορεί να γίνει 40-100 φορές μεγαλύτερη της αντίστασης.

Η εξέλιξη των συγχρόνων ανεμογεννητριών (Α/Γ) βασίζεται σε έναν εντυπωσιακό συνδυασμό τεχνολογικής- επιστημονικής δεξιότητας και επιχειρηματικού πνεύματος. Τα τελευταία τριάντα χρόνια η **ονομαστική ισχύς των Α/Γ έχει αυξηθεί κατά δύο τάξεις μεγέθους**, το κόστος της παραγόμενης ενέργειας έχει μειωθεί δραστικά και η αιολική βιομηχανία έχει μεταλλαχθεί από μία ιδεολογικής βάσης δραστηριότητα σε μία δραστηριότητα αιχμής στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής.

Παράλληλα, **η τεχνολογική βάση και τα αναγκαία υπολογιστικά εργαλεία** έχουν εξελιχθεί ώστε να καλύπτουν κάθε φορά τις νέες ανάγκες και προκλήσεις. Η εξέλιξη των Α/Γ είναι μια συναρπαστική ιστορία που απέχει πολύ από το να έχει ολοκληρωθεί. Πολλές τεχνικές προκλήσεις εξακολουθούν να υφίστανται και είναι κοινή πίστη ότι το μέλλον θα μας καταπλήξει ακόμα περισσότερο. Χρειάζεται, βέβαια, σημαντική επένδυση σε έρευνα και ανάπτυξη προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την υπάρχουσα δυναμική.

## **s. ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΒΗΜΑΤΑ**

### **Από τον κατακόρυφο στον οριζόντιο άξονα περιστροφής**

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3., ήταν κατακόρυφου άξονα. Μια μεγάλη εξέλιξη συνέβη περίπου στον 12<sup>ο</sup> αι. όταν για να κατασκευαστεί ανεμόμυλος με φτερωτή οριζοντίου άξονα χρησιμοποιήθηκε σύστημα οδοντωτών τροχών (cog and ring gear) με γωνία 90°. Ταυτόχρονα τα φτερά ή πανιά του ανεμόμυλου τοποθετήθηκαν σε μικρή κλίση σχετικά με το επίπεδο περιστροφής της φτερωτής. Η κατασκευή του νέου αυτού τύπου είχε σημαντικές δυσκολίες εκτός της μεταφοράς της ισχύος μεταξύ δύο κάθετων ατράκτων που επιλύθηκε μέσω της σύμπλεξης των κάθετων οδοντωτών τροχών. Ο προσανεμισμός του ανεμόμυλου αλλά και ο έλεγχος της ισχύος του ήταν δύο από αυτά τα προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα λύθηκε δίνοντας τη δυνατότητα μιας κυκλικής μετατόπισης της συνολικής διάταξης του ανεμόμυλου γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, επιτρέποντας έτσι τον προσανεμισμό του. Στο δεύτερο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκε η μετατόπιση του ανεμόμυλου κυκλικά, όπως παραπάνω, με στόχο τον αποπροσανεμισμό της διάταξης σε συνδυασμό με ένα σύστημα πέδησης μέσω τριβής. Παρά τα τεράστια τεχνολογικά προβλήματα που αντιμετώπισε ο ανεμόμυλος οριζοντίου άξονα επικράτησε πολύ γρήγορα λόγω της μεγάλης απόδοσης του σε σχέση με τους ανεμόμυλους «περσικού» τύπου.

Σοβαρές ενστάσεις υπάρχουν στο κατά πόσο αυτή η σημαντική εξέλιξη σε σχέση με τον προϋπάρχοντα ανεμόμυλο κατακόρυφου άξονα οφείλεται σε μια λογική εξέλιξη ή κατά πόσο ήταν μια εξέλιξη του, ήδη υπάρχοντος εκείνη την εποχή, νερόμυλου όπως και αν αναπτύχθηκε για πρώτη φορά στην Ευρώπη ή αν το έφεραν οι Σταυροφόροι κατά την επιστροφή τους.

### **Από την αντίσταση στην άνωση**

Η αλλαγή της διεύθυνσης του άξονα από κατακόρυφο σε οριζόντιο είχε ως συνέπεια μια μεγάλη αλλαγή στην περύγωση του ανεμόμυλου: τα φτερά επίσης χρειάστηκε να περιστραφούν κατά 90°. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί επαναστατικό γιατί από φτερά που έμπαιναν σε κίνηση εξαιτίας της πίεσης που ασκούσε ο άνεμος πάνω τους (ανεμόμυλος κατακόρυφου άξονα) τώρα



πλέον ο άνεμος έπνεε γύρω από το φτερό και αυτή ακριβώς η ροή κινούσε τη φτερωτή. Τον 13<sup>ο</sup> αι. οι άνθρωποι δεν γνώριζαν για την άνωση, την αντίσταση και την γωνία προσβολής (θα περίμεναν μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αι. γι αυτό), αλλά αξιοποίησαν παρατηρήσεις σχετικά με την απόδοση του ανεμόμυλου και είχαν καταλήξει σε βέλτιστες γωνίες κλίσης των φτερών.

Αυτοί οι δύο μεγάλοι σταθμοί στην εξέλιξη των ανεμόμυλων είχαν σαν αποτέλεσμα τη ραγδαία εξάπλωση τους σε όλη τη Δυτική και Ανατολική Ευρώπη κατά τον 13<sup>ο</sup> αι. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο αυτές αλλαγές ακολουθήθηκαν στη συνέχεια από πολλές άλλες όπως η περιστροφή μόνο της κεφαλής του ανεμόμυλου (αντί όλης της εγκατάστασης) για τον προσανεμισμό ή η τοποθέτηση του ιστίου που στήριζε το πανί κάθε φτερού στο 1/3 ή 1/4 ης χορδής από τη μέση που ήταν στους πρώτους ανεμόμυλους (16<sup>ος</sup> αι.). Μένει κανείς έκπληκτος μπροστά στη διαπίστωση ότι η γωνία κλίσης (σφήνωσης) των φτερών που είχαν σταθερή γωνία ήταν 20<sup>ο</sup> και η γωνία κάποιων άλλων φτερών μεταβαλλόταν από 22.5<sup>ο</sup> στη ρίζα μέχρι λιγότερο από 0<sup>ο</sup> στο ακροπτερύγιο, κατασκευασμένα από τεχνίτες που αγνοούσαν τι είναι η συνισταμένη ταχύτητα του ανέμου ή η γωνία προσβολής.

### **Από τους ανεμόμυλους στις ανεμογεννήτριες**

Στο τέλος του 19<sup>ου</sup> αι. η ραγδαία διάδοση του ηλεκτρισμού ανέδειξε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για γεννήτριες που θα κινούνταν με τη βοήθεια του ανέμου λόγω των εμποδίων που οφείλονταν στις πολύ ακριβές γραμμές μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Έτσι στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αι. σχεδιάζονται ανεμογεννήτριες εκμεταλλεόμενοι την αεροδυναμική θεωρία και χρησιμοποιώντας αεροσήραγκα (Paul la Cour) για την επαλήθευση των ερευνητικών αποτελεσμάτων. Το 1925 ο Jacobs στην Αμερική αναπτύσσει και το 1931 εμφανίζει σαν προϊόν μικρή ανεμογεννήτρια που φόρτιζε συσσωρευτές. Το 1931, στη Ρωσία, η πρώτη ανεμογεννήτρια 100kW , ονομαζόμενη Balaclava, συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1941 κατασκευάζεται η Smith-Putnam ανεμογεννήτρια 1.25 MW με σημαντικές καινοτομίες όπως ο έλεγχος κλίσης όλης της πτέρυγας.

Με την πετρελαϊκή κρίση του 1973 και περισσότερο με αυτήν του 1979, το ενδιαφέρον για επιτάχυνση στην εξέλιξη των ανεμογεννητριών άρχισε να γίνεται πολύ συγκεκριμένο.

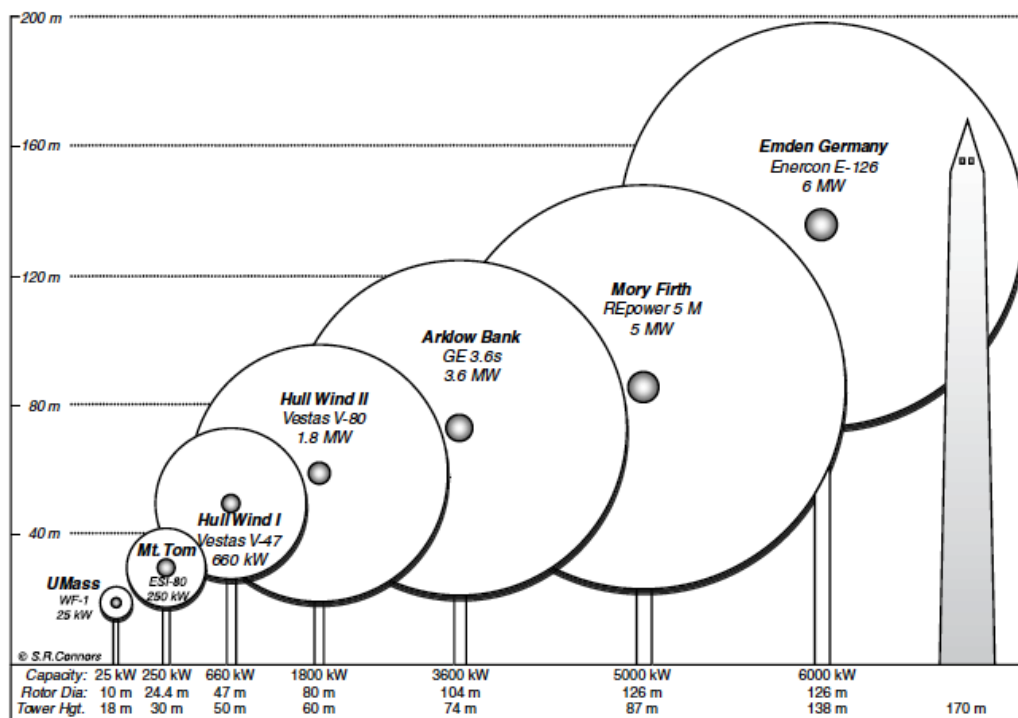
Έννοιες όπως η ασφάλεια και η πολύ-ποικιλότητα της ενεργειακής παραγωγής και σε μικρότερο βαθμό, τότε, η αιφορία δημιούργησαν έντονο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## τ. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

Ας δούμε όμως μερικά στοιχεία για την αρχιτεκτονική των σύγχρονων Α/Γ και πως αυτή εξελίχθηκε στο χρόνο.

### Το μέγεθος των ανεμογεννητριών

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών συνεχώς αυξάνεται τα τελευταία 30 έτη και το ζήτημα για την επιλογή ανεμογεννητριών βέλτιστου μεγέθους παραμένει πολυπαραμετρικό και χωρίς μια γενική απάντηση που να καλύπτει τους υποψήφιους μελετητές και επενδυτές.

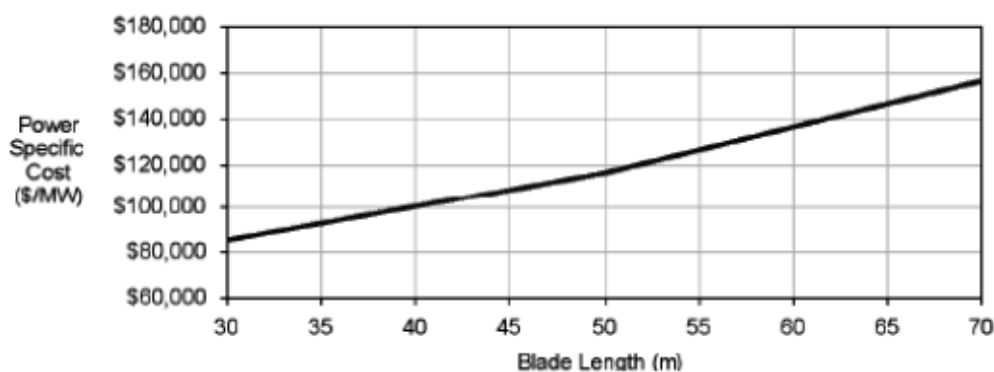
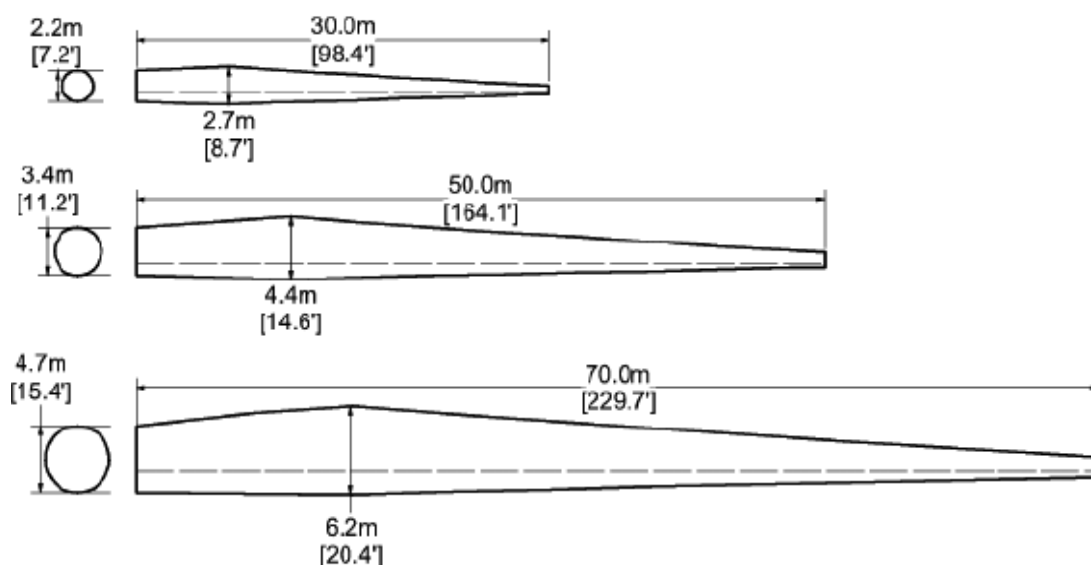


Representative size, height, and diameter of wind turbines (Steve Connors, MIT)

Εικόνα 11. Εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών.



Το ουσιαστικό πρόβλημα τίθεται ως εξής: η ισχύς της ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται ανάλογα με το τετράγωνο της διαμέτρου του ρότορα αλλά η μάζα και το κόστος του ρότορα μεταβάλλονται ανάλογα με τον κύβο της διαμέτρου του, για γεωμετρικά όμοιες πτερυγώσεις. Αυτή η σχέση τετραγώνου/κύβου καθιστά από πρώτη ματιά δύσκολη την αύξηση της διαμέτρου του ρότορα αφού και η δυναμική συμπεριφορά της πτερύγωσης επηρεάζεται άμεσα αλλά και το κόστος προμήθειας, μεταφοράς και εγκατάστασης αυξάνεται κατακόρυφα.



Εικόνα 12. Σχέση ειδικού κόστους ισχύος και μεγέθους πτέρυγας.

Όμως η αύξηση της επιφάνειας σάρωσης (δηλ. της διαμέτρου) οδηγεί στην αύξηση του ύψους της πλήμνης και συνεπώς σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου που έχει σαν αποτέλεσμα τη δέσμευση περισσότερης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σάρωσης και δέσμευση μικρότερης επιφάνειας γης για την

εγκατάσταση ανεμογεννητριών ίδιας ισχύος. Επίσης κάποια από τα μέρη της ανεμογεννήτριας, όπως τα συστήματα ελέγχου και ασφάλειας δεν επηρεάζονται όσον αφορά το μέγεθος ή το κόστος τους όταν αυξάνεται το μέγεθος της πτερύγωσης.

Αυτό που κάθε φορά επικρατεί σχετικά με το ρυθμό αύξησης του μεγέθους των ανεμογεννητριών είναι το κόστος της ενέργειας (COE: cost of energy) που προκύπτει. Στον υπολογισμό αυτό λαμβάνονται υπόψη και οι δυνατότητες μεταφοράς και εγκατάστασης στον υποψήφιο χώρο αλλά και ο τεχνολογικός κίνδυνος που είναι πολύ μεγαλύτερος σε νέες μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Τα διαθέσιμα κεφάλαια μιας τέτοιας επένδυσης είναι επίσης από τις καθοριστικές παραμέτρους επιλογής του μεγέθους των ανεμογεννητριών.

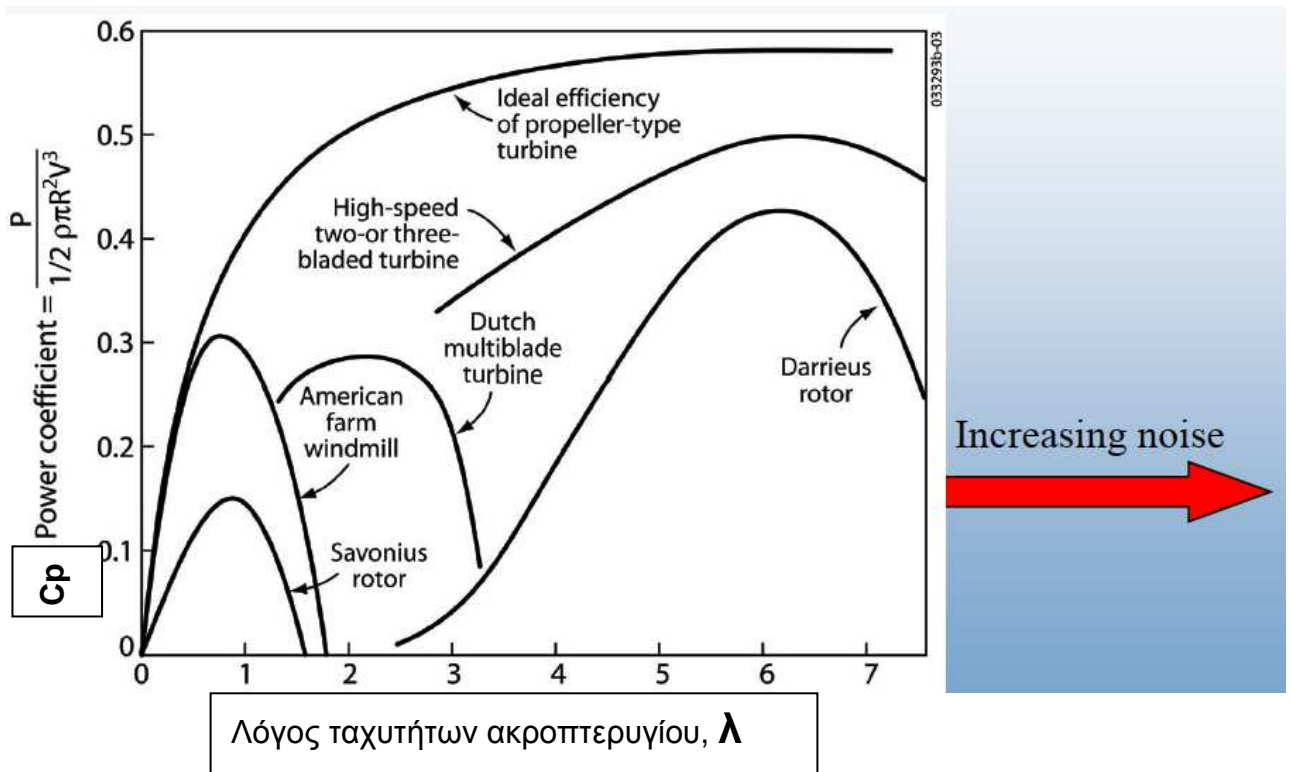
Συμπερασματικά φαίνεται ότι η εξέλιξη της τεχνολογίας επιτρέπει και ωθεί στο σχεδιασμό όλο και περισσότερων μεγάλων ανεμογεννητριών αλλά το εμπορικό μέγεθος μεταβάλλεται με πολύ πιο αργούς ρυθμούς πάντα βέβαια αυξανόμενο.



Εικόνα 13. Εξέλιξη του εμπορικού μεγέθους ανεμογεννητριών στις Η.Π.Α.

### Λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου, $\lambda$

Ο λόγος ταχυτήτων του ακροπτερυγίου (Tip speed ratio,  $\lambda = \Omega R / V$ ) αποτελεί μια παράμετρο κλειδί στην εξέλιξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών αυξανόμενος συνεχώς από την εποχή ακόμα των ανεμόμυλων, αν και με μικρότερο ρυθμό τα τελευταία χρόνια. Μεγάλο  $\lambda$  σημαίνει αυξημένη απόδοση, λιγότερες απώλειες στον ομίχου (wake losses) και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής του ρότορα της ανεμογεννήτριας και κατά συνέπεια μικρότερο πολλαπλασιαστή στροφών ή μικρότερη γεννήτρια αν δεν χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων. Επίσης σημαίνει λεπτότερες (και άρα ελαφρύτερες) πτέρυγες κάτι που είναι πολύ σημαντικό ειδικά στις μεγάλες ανεμογεννήτριες όπου το κόστος της πτερύγωσης είναι σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Δυο παράγοντες που καθιστούν δύσκολη την αύξηση του  $\lambda$  κατά το σχεδιασμό μιας πτερύγωσης είναι η δυσκολία ξεκινήματος που οφείλεται στη χαμηλή ροπή εκκίνησης της φτερωτής και ο παραγόμενος θόρυβος.



Εικόνα 14. Επίδραση του  $\lambda$ , στην απόδοση αλλά και στον παραγόμενο θόρυβο.

### **Αριθμός των πτερύγων**

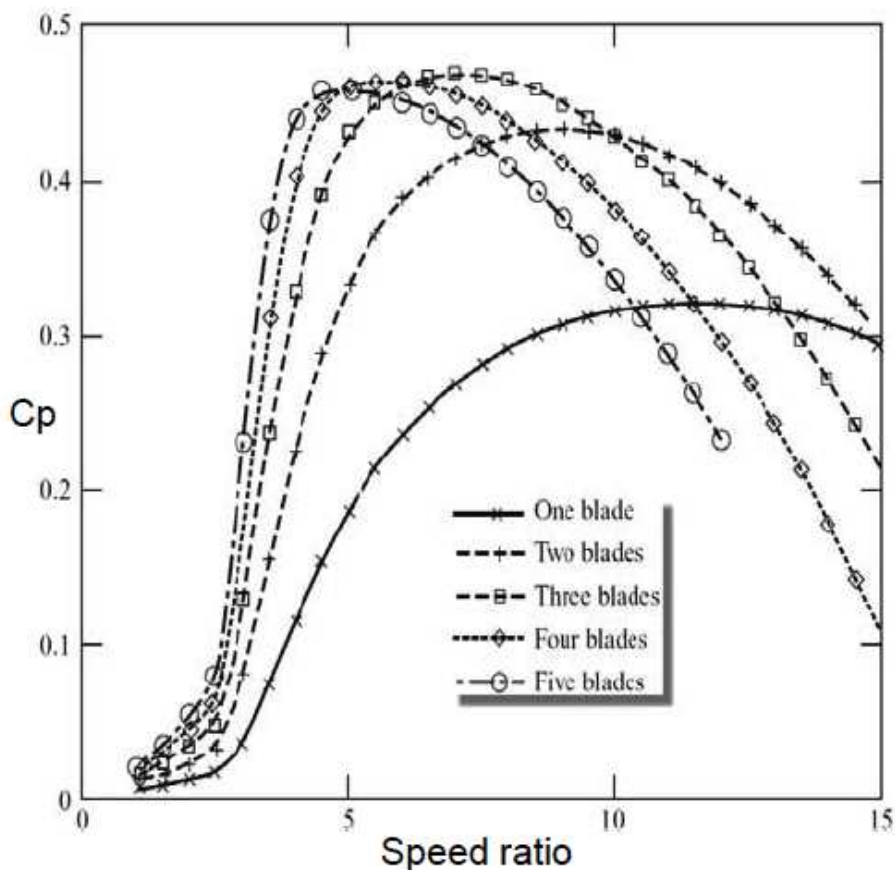
Ο κυρίαρχος τύπος Α/Γ έχει **τριπτέρυγο δρομέα** παρόλο που προηγήθηκαν αρκετές προσπάθειες με διπτέρυγους (Εικ.15) ή και μονοπτέρυγους (Εικ.16) δρομείς.



**Εικόνα 15.: Μονοπτέρυγος δρομέας**

**Εικόνα 16.: Διπτέρυγος δρομέας**

Οι λόγοι για την επικράτηση των τριών πτερυγίων σχετίζονται άμεσα με τον αεροδυναμικό θόρυβο και την οπτική αποδοχή. Οι τριπτέρυγες Α/Γ, λειτουργούν με μικρότερες ταχύτητες ακροπτερυγίου και συνεπώς παράγουν χαμηλότερης έντασης αεροδυναμικό θόρυβο. Επιπρόσθετα δίνουν και μια πιο ισορροπημένη εικόνα στο ανθρώπινο μάτι. Τεχνικά, η ισορροπία αυτή αφορά και στη δυναμική συμπεριφορά της Α/Γ και, επομένως, και τα φορτία που δέχεται ο δρομέας και η άτρακτος. Παρόλα αυτά, οι διπτέρυγες μηχανές παραμένουν ως μια βιώσιμη εναλλακτική, ιδιαίτερα σε απομακρυσμένες περιοχές (στη στεριά ή στη θάλασσα) αν πραγματικά καταφέρουν να προσφέρουν λύσεις χαμηλότερου κόστους, που δεν θα οφείλεται μάλλον στο κόστος των λιγότερων (αλλά στιβαρότερων) πτερυγίων αλλά σε ένα γενικότερο και περισσότερο «εύκαμπτο» επανασχεδιασμό τους. Επίσης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα όσο λιγότερα φτερά έχει ο ρότορας τόσο πιο γρήγορα φτάνει στην μέγιστη ισχύ ενώ για τρεις πτέρυγες είναι ένας πολύ καλός συμβιβασμός για να έχει κι ένα πολύ καλό συντελεστή ισχύος.

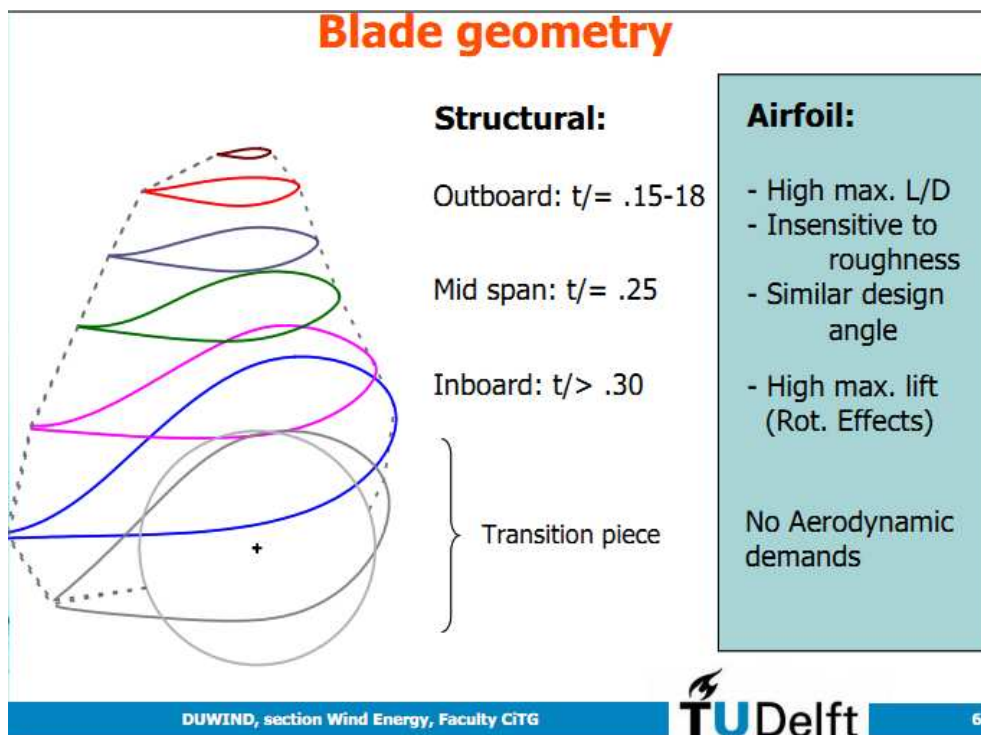


Εικόνα 17. Συντελεστής ισχύος  $C_p$  ως προς  $\lambda$  με παράμετρο των αριθμό των φτερών

### Ο αεροδυναμικός σχεδιασμός της πτερόνωσης

Αν και η βασική αεροδυναμική θεωρία ήταν γνωστή από τον περασμένο αιώνα, ειδικά εργαλεία που να μπορούν να υποστηρίξουν το σχεδιασμό αεροτομών και πτερυγώσεων για ανεμογεννήτριες δεν υπήρχαν μέχρι πριν από 25 χρόνια. Οι αεροτομές που υπήρχαν είχαν σχεδιασθεί για φτερά ή έλικες αεροπλάνων και ελικοπτέρων. Επρόκειτο δηλαδή για πολύ λεπτές αεροτομές μια και το πρώτο που ενδιέφερε ήταν το βάρος. Όμως στις πτερυγώσεις ανεμογεννητριών το πιο σημαντικό είναι η αύξηση της διάρκειας ζωής της πτερόνωσης έναντι των κοπωτικών φορτίων έστω και με αεροτομές με παχύτερη διατομή. Επίσης οι μετρήσεις των αεροδυναμικών χαρακτηριστικών των αεροτομών ήταν σε μεγάλους αριθμούς Reynolds και σε περιοχές γωνιών προσβολής πριν την αποκόλληση του οριακού στρώματος (μέχρι  $18^\circ$  περίπου) όταν το μισό φτερό μιας ανεμογεννήτριας βρίσκεται πολύ συχνά κατά τη λειτουργία του πέραν αυτής της περιοχής. Μετά τη δημιουργία

εξειδικευμένων εργαλείων και λογισμικών σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν σε αεροσήραγκες νέες αεροτομές που προσφέρουν βέλτιστη δέσμευση της ενέργειας σε μέτριους και χαμηλούς ανέμους και περιορισμένη ισχύ εξόδου σε ισχυρούς ανέμους.

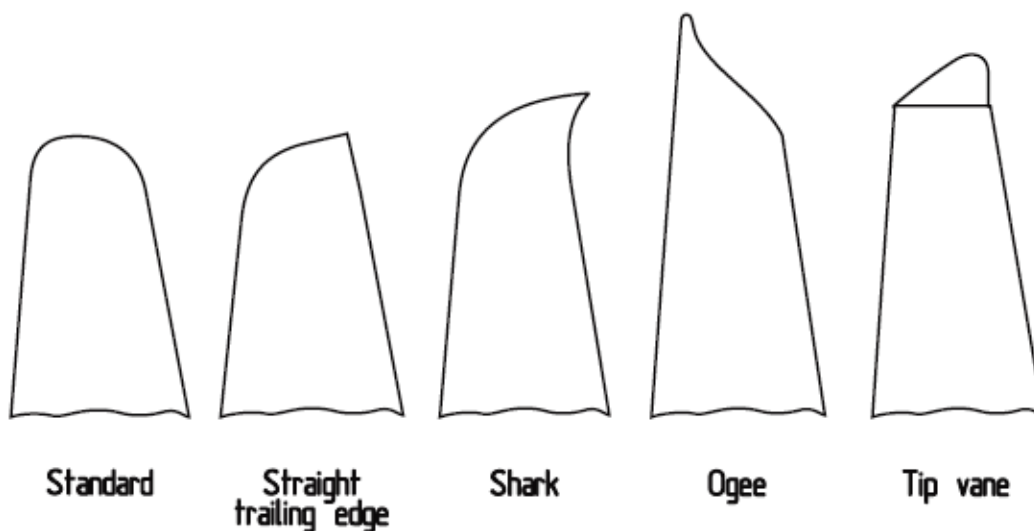


Εικόνα 18. Αεροτομές για ανεμογεννήτριες.

### Ο σχεδιασμός του ακροπτερυγίου

Το ακροπτερύγιο της πτέρυγας έχει πολύ μεγάλη σημασία για την απόδοση ρότορα από αεροδυναμική άποψη. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του σχήματος και την ποιότητα της επιφάνειας. Όπως και για τα φτερά του αεροπλάνου, η γεωμετρία του ακροπτερυγίου επηρεάζει τις δίνες που αναπτύσσονται και, συνεπώς, την αεροδυναμική αντίσταση που προκαλείται. Επιπλέον, η γεωμετρία του ακροπτερυγίου έχει σημαντική επίδραση στην αεροδυναμική εκπομπή θορύβου του ρότορα.

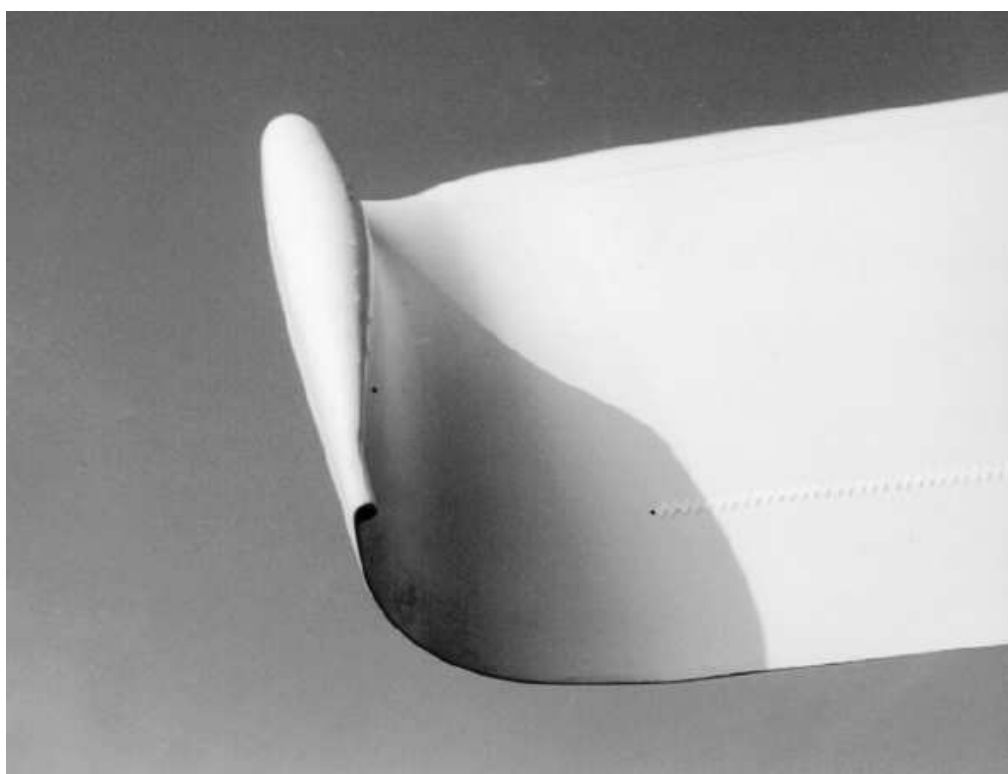




Rotor blade tip shapes and tip vane

**Εικόνα 19. Διάφοροι τύποι ακροπτερυγίων.**

Εκτός από τα ακροπτερύγια τα τελευταία χρόνια συναντιώνται και προεκτάσεις (tip vanes) με σχεδιασμό και στόχο παρόμοια με αυτούς των ακροπτερυγίων.



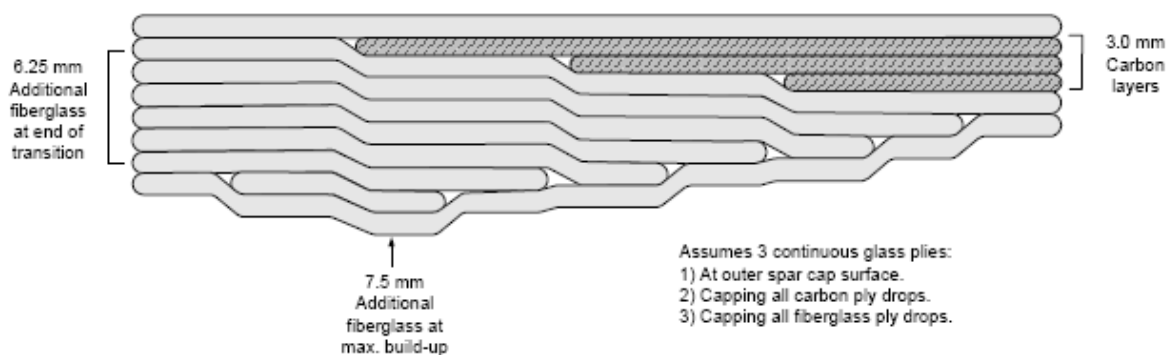
Tip vane extension on the rotor blade of the Enercon E-66 wind turbine

**Εικόνα 20. Επέκταση ακροπτερυγίου σε φτερό ανεμογεννήτριας.**



## **Το υλικό των φτερών**

Οι πρώτες πτέρυγες είχαν κατασκευαστεί από ξύλο και στη συνέχεια από φύλλο αλουμινίου που συνδεόταν με κοχλίες και ήλους αντιγράφοντας την τεχνολογία για πτέρυγες αεροπλάνων. Αυτός ο σχεδιασμός όμως δεν ευνοήθηκε στη συνέχεια γιατί είχε υψηλό εργατικό κόστος και αστοχούσε στα εφαρμοζόμενα κοπωτικά φορτία. Στη συνέχεια (1980) χρησιμοποιήθηκαν φύλλα χάλυβα στην αρχή συνδεδεμένα όπως και τα φύλλα αλουμινίου και μετά συγκολλημένα. Τα σύνθετα υλικά είτε μαζί με ξύλο είτε σε στρώσεις υφάσματος άρχισαν να δοκιμάζονται από το 1984 και λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους επικράτησαν.



**Εικόνα 21. Συνδυασμός ινών γυαλιού και άνθρακα σε σύνθετο υλικό.**

Η εισαγωγή νέων υλικών, συμπεριλαμβανομένων υλικών με βελτιωμένες ίνες γυαλιού και αυξανόμενες ποσότητες των ινών άνθρακα αυξάνει συνεχώς την απόδοση των μεγάλων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, αλλά λόγω της μάζας και των περιορισμών της μεταφοράς των πτερυγώσεων αυτών η εξέλιξη αυτή δεν είναι μια απεριόριστη διαδικασία. Είναι πιθανό ότι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι πολύ κοντά στα όρια της ανάπτυξής τους.

Αν χαμηλού κόστους διαδικασίες παραγωγής μπορούν να αξιοποιηθούν αποτελεσματικά, τότε είναι δυνατόν να αναπτυχθεί μια νέα γενιά ανεμογεννητριών στην περιοχή ισχύος 10-20 MW ενώ η διατήρηση ή ακόμη και η μείωση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας είναι εφικτή.

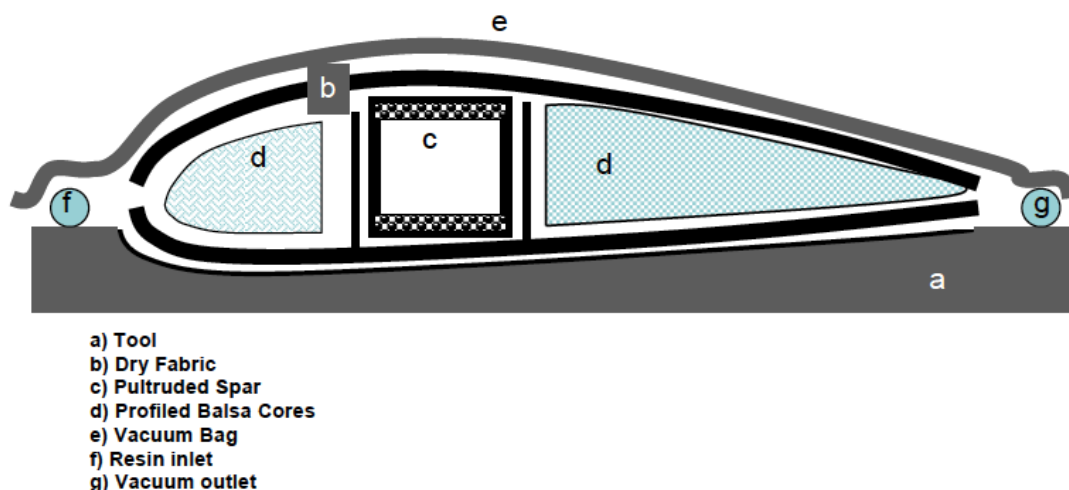


Figure 12. An alternative approach whereby individual elements such as the pultruded spar, c, and profiled balsa cores, d, are consolidated into a single blade via an infusion process. The skins and connection layer, b, would be dry glass fabrics.

## Εικόνα 22. Εναλλακτικοί μέθοδοι παραγωγής.

### Ο τρόπος ελέγχου της ισχύος – Αεροδυναμικός έλεγχος

Στις πρώτες μηχανές, ο έλεγχος της ισχύος γινόταν κατά κύριο λόγο παθητικά (μηχανές σταθερού βήματος – stall controlled) σε συνδυασμό με τη λειτουργία τους σε σταθερές στροφές (fixed speed), εκμεταλλευόμενες την αποκόλληση της ροής στις μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου. Ως εναλλακτική λύση εμφανίστηκαν οι Α/Γ μεταβλητού βήματος (**pitch control**) οι οποίες, έχοντας τη δυνατότητα να ρυθμίζουν ενεργητικά, μέσω ενός συστήματος ελέγχου, το βήμα των πτερυγίων σε σχέση με την ταχύτητα του αέρα, εκτιμήθηκε ότι θα εξασφάλιζαν καλύτερη δυνατότητα ελέγχου της ισχύος αλλά και μικρότερα αεροδυναμικά φορτία στις μεγάλες ταχύτητες του ανέμου. Στην πράξη φάνηκε ότι οι μηχανές μεταβλητού βήματος δεν θα μπορούσαν να λειτουργήσουν με σταθερές στροφές, αφού κάθε φορά που το σύστημα ελέγχου αποτύγχανε να παρακολουθήσει τον στοχαστικό άνεμο (ιδιαίτερα στην περιοχή γύρω και πάνω από το ονομαστικό σημείο λειτουργίας, ταχύτητες ανέμου 15-25 m/s) εμφανίζονταν σημαντικές αυξήσεις της ισχύος και των φορτίων πάνω από τα επιτρεπόμενα όρια. Το πρόβλημα λύθηκε συνδυάζοντας το μεταβλητό βήμα με τις μεταβλητές στροφές. Οι πρώτοι τέτοιοι συνδυασμοί βασίστηκαν σε μικρές διακυμάνσεις των στροφών (της τάξης του 10% γύρω από τις ονομαστικές, σύστημα OptiSlip της VESTAS χρησιμοποιώντας επαγωγική γεννήτρια μεγάλης ολίσθησης).

Η μεταβολή των στροφών ευνοεί τον έλεγχο της ισχύος αλλά και μειώνει την **ικανότητα** για ταχύτατες μεταβολές του βήματος. Ακολούθησαν σχεδιασμοί με πλήρη δυνατότητα μεταβολής των στροφών, μια δυνατότητα που προσφέρει πλεονεκτήματα αλλά και προβληματισμούς ως προς το κόστος και την αξιοπιστία της. Οι περισσότεροι από τους προβληματισμούς αυτούς έχουν ήδη ξεπεραστεί όχι τόσο για τα ενεργειακά πλεονεκτήματα των μεταβλητών στροφών όσο για την επιπλέον δυνατότητα ελέγχου και ευελιξίας που προσφέρουν. Η αρχιτεκτονική του σταθερού βήματος παραμένει μια βιώσιμη λύση, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με ασύγχρονες γεννήτριες δύο-στροφών, αλλά οι μεταβλητές στροφές προσφέρουν καλύτερη ποιότητα ισχύος στο δίκτυο και για τον λόγο αυτό οδηγούν και τις εξελίξεις προς τις μεγάλες μηχανές. Παρόλο που έχουν δοκιμαστεί και κάποιοι συνδυασμοί μεταβλητών στροφών με σταθερό βήμα (μεταξύ των οποίων και τα ελληνικά πρωτότυπα που σχεδιάστηκαν από τους Ν. Αθανασιάδη και Μιχαηλίδη), οι μεταβλητές στροφές κατά κύριο λόγο ταιριάζουν με την αρχιτεκτονική του μεταβλητού βήματος, προσφέροντας ιδιαίτερη ευελιξία στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα μεγάλα αιολικά πάρκα του μέλλοντος (κάποιες εκατοντάδες MW το καθένα) τα οποία θα είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν σαν πραγματικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής προσαρμόζοντας την απόδοση τους στην επιθυμητή ζήτηση.

Στον τομέα του ελέγχου της ισχύος των Α/Γ μεταβλητού βήματος υπάρχει μια έντονη στροφή από τον έλεγχο του δρομέα προς τον έλεγχο των πτερυγίων (**κάθε πτερύγιο ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα**) με πολύ-παραμετρικά συστήματα ελέγχου. Πέρα από το γεγονός ότι η τεχνική αυτή καθιστά το σύστημα πέδησης της Α/Γ περισσότερο αξιόπιστο, φαίνεται ότι προσφέρει και σημαντικό περιθώριο μείωσης των φορτίων συνδυάζοντας τον στοχαστικό έλεγχο με μια κατάλληλη ημιτονοειδή μεταβολή του βήματος κάθε πτερυγίου (με διαφορά φάσης  $120^\circ$  για τριπτέρυγους δρομείς), μια τεχνική δανεισμένη από τα στροφέα των ελικοπτέρων.

Ανεπτύχθησαν επίσης μια σειρά προσεγγίσεις για **πτερυγώσεις παθητικού ελέγχου**. Διερευνάται δηλαδή ο σχεδιασμός μιας πτερύγωσης που να προσαρμόζει αυτόματα την κλίση της πτέρυγας στην εκάστοτε συνθήκη λειτουργίας και ταχύτητας ανέμου χωρίς την παρουσία υδραυλικών ή

ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων ελέγχου. Σε κάποιες τέτοιες μεθόδους η αρθρωμένη πτέρυγα μπορεί να στρέφεται εξαιτίας των φυγόκεντρων φορτίων που αναπτύσσονται κατά την περιστροφή της και χρησιμοποιώντας ελατήρια για τη δύναμη της επαναφοράς στην αρχική θέση. Χρησιμοποιείται σήμερα με επιτυχία σε μικρές ανεμογεννήτριες. Άλλες μέθοδοι στηρίζονται στον υπολογισμό της κατάλληλης γεωμετρίας της πτέρυγας και του κατάλληλου σύνθετου υλικού της που της προσδίνει την ιδιότητα να αυτοπροσαρμόζεται στην εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας.

### **Το κιβώτιο ταχυτήτων**

Τα πρώτα κιβώτια ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ μεγάλα και βαριά αποτελούμενα από κλασικούς οδοντωτούς τροχούς. Διέθεταν δύο ξεχωριστές ατράκτους, μία υψηλής ροπής (πτερύγωση) και μια υψηλής ταχύτητας περιστροφής (γεννήτρια). Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιούνται και μέχρι σήμερα πλανητικά κιβώτια που είναι πολύ ελαφρύτερα. Τα τελευταία χρόνια η καλύτερη κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μειωτήρων αλλά και κυρίως η ανάπτυξη γεννητριών μεταβλητών στροφών μείωσε σημαντικά την εξάρτηση του σχεδιασμού των ανεμογεννητριών από τα κιβώτια ταχυτήτων.

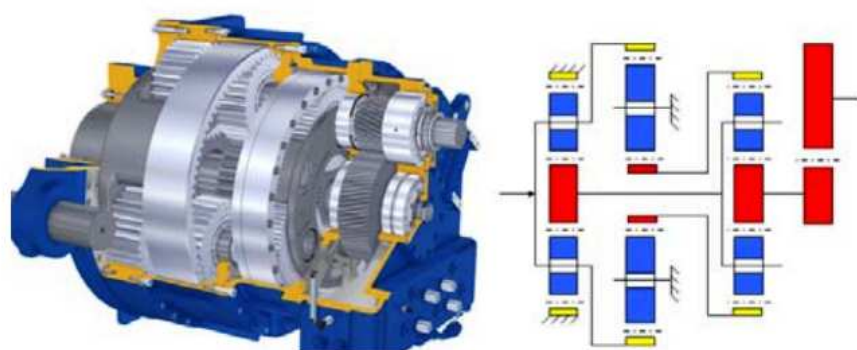


Fig. 4 Differential gearbox, Bosch Rexroth, working principle

### **Εικόνα 23. Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας.**

Δύο σημαντικά στοιχεία εξέλιξης παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια στον τομέα των κιβωτίων ταχυτήτων των ανεμογεννητριών. Τα ένα είναι η χρησιμοποίηση του κελύφους του κιβωτίου (περίβλημα) σαν λειτουργικό μέρος, μειώνοντας τον όγκο και τη μάζα του. Το δεύτερο είναι η πλήρης

κατάργηση του και η χρησιμοποίηση πολυπολικών γεννητριών μεταβλητών στροφών. Αυτό μπορεί να οδηγεί σε μικρή αύξηση της συνολικής μάζα της ανεμογεννήτριας γιατί οι πολυπολικές γεννήτριες είναι πολύ πιο ογκώδεις αλλά η αξιοπιστία και η ελαστικότητα της συμπεριφοράς τους κατακτά όλο και περισσότερο την αγορά.

### **Η ηλεκτρική γεννήτρια**

Οι πρώτες ηλεκτρικές γεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν παρήγαγαν συνεχές ρεύμα (DC) και φόρτιζαν συσσωρευτές σε αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, διαθέτοντας ένα πολύ φτωχό έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης με το δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αναζητήθηκαν γεννήτριες που να παράγουν εναλλασσόμενο ρεύμα και να προσφέρουν καλή ποιότητα ισχύος και δυνατότητα συγχρονισμού. Χρησιμοποιήθηκαν λοιπόν επαγωγικές γεννήτριες λόγω του χαμηλού τους κόστους και τις δυνατότητες τους για συγχρονισμό με το δίκτυο. Καταναλώνουν όμως άεργη ισχύ και γιαυτό εφοδιάζονται με πυκνωτές αέργου ισχύος και ειδικά συστήματα ασφάλειας. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονες γεννήτριες οι οποίες παράγουν άεργη ισχύ και μπορούν να την παρέχουν στο δίκτυο όταν χρειαστεί.



**Εικόνα 24. ABB 1.5 – 3 MW σύγχρονη πολυπολική γεννήτρια.**

Στη συνέχεια εμφανίστηκαν γεννήτριες με διπλά τυλίγματα (2 γεννήτριες μαζί) ένα για τις χαμηλές ταχύτητες και ένα για τις υψηλές ταχύτητες περιστροφής, αυξάνοντας έτσι την απόδοση της γεννήτριας σε όλο το εύρος λειτουργίας της.

Τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί σύγχρονες πολυπολικές γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες σε επίπεδο MW με πολύ καλές αποδόσεις.

### **Ο πύργος στήριξης**

Οι πύργοι των πρώτων ανεμογεννητριών αποτελούνταν από πολύ βαριά δικτυώματα από χάλυβα που είχαν σαν κύριο στόχο την ακαμψία της κατασκευής περισσότερο από την αντοχή της. Σε μικρότερες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται και σήμερα επίτονα για να προσθέσουν ακαμψία σε σωληνωτούς ιστούς.



**Εικόνα 25. Μεταφορά πύργου ανεμογεννήτριας.**

Η εξέλιξη του σχεδιασμού και τα νέα προηγμένα εργαλεία υπολογισμού επέτρεψαν το σχεδιασμό με κελύφη από χάλυβα. Πρόκειται για ένα βέλτιστος ελαφρύ σχεδιασμό, οδηγώντας την κύρια ιδιοσυχνότητα του πύργου να βρίσκεται χαμηλότερα από τη συχνότητα περιστροφής της πτερύγωσης.

Κωδικοποιώντας και συνοψίζοντας η τεχνολογική εξέλιξη των ανεμογεννητριών εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα:



	1970	1980	1990	2000	2010
<b>Διασκέτιε</b>					
<b>Περίγωση</b>	Ρότορας ανώτατη ή κατώτατη, 2 ή 3 πτέρυγες, ξύλο αλουμίνιο, χάλυβας, μεγάλες μάζες.	Αναθεώρηση σχεδόν όλων των βασικών παραμέτρων του μέχρι τότε σχεδιασμού. Παρατηρήσεις για υπερβολικά ακραίες τιμές ισχύος σε περυσινώσεις σταθερού βήματος, ελεγχόμενες με απώλεια στήριξης. Σύνθετα υλικά.	Ρότορας 3 πτερύγων ή 2 με άρθρωση (teetering). Νέες αεροτομές ειδικά σχεδιασμένες για ΑΓ με χαμηλό αρ. Reynolds. Μείωση της μάζας λόγω χρησιμοποίησης προηγμένων σύνθετων υλικών.	Προχωρημένος σχεδιασμός, δυναμική ανάλυση. Καλύτερες διαδικασίες παραγωγής. Νέες καλύτερα σχεδιασμένες αεροτομές. Ξύτινες περυσινώσεις αυτοπροσαρμοζόμενες.	Προχωρημένος σχεδιασμός, αεροδυναμική ανάλυση προηγμένα σύνθετα υβριδικά υλικά. Ξύτινες περυσινώσεις αυτοπροσαρμοζόμενες.
<b>Κιβώτιο τεχνήτων</b>	Σχεδιασμός με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς.	Σχεδιασμός με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς.	Απουσία κιβωτίου ή κιβώτιο με πλευρικό σύστημα οδοντωτών τροχών.	Απουσία κιβωτίου ή κιβώτιο με πλευρικό σύστημα οδοντωτών τροχών με μειωμένη μάζα και απλοποιημένη σχεδίαση.	Απουσία κιβωτίου ή κιβώτιο με πλευρικό σύστημα οδοντωτών τροχών, προηγμένης σχεδίασης.
<b>Γεννήτρια</b>	Γεννήτρια επαγωγής κλωβού.	Γεννήτρια επαγωγής κλωβού ή σύγχρονη γεννήτρια.	Γεννήτρια επαγωγής κλωβού ή διπλής προφοδότησης. Σύγχρονη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες.	Γεννήτρια επαγωγής κλωβού διπλής προφοδότησης. Σύγχρονη προηγμένη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες.	Γεννήτρια επαγωγής κλωβού διπλής προφοδότησης. Σύγχρονη προηγμένη γεννήτρια με μόνιμους μαγνήτες.
<b>Τεχνητε περιστροφής</b>	Σταθερή.	Σταθερή. Μετατροπή της σταθερής ισχύος σε μεταβλητή με τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.	Σταθερή ή μεταβλητή. Χρησιμοποίηση προηγμένων ηλεκτρονικών.	Μεταβλητή με τη χρήση προηγμένων ηλεκτρονικών.	Μεταβλητή με τη χρήση προηγμένων ηλεκτρονικών.
<b>Συστήματα ελέγχου ισχύος και ασφάλειας</b>	Δύσκολος έλεγχος. Μηχανικά συστήματα πέδησης.	Ηλεκτρονικά και μηχανικά συστήματα ελέγχου και ασφάλειας (αερόφρενα, πέδες κτλ)	Έλεγχος με προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος και δευτερεύοντες μηχανικά συστήματα.	Κατάργηση μηχανικών συστημάτων. Έλεγχος ισχύος και ασφάλεια υποστηρίξιμενα από ηλεκτρονικά ισχύος μέσω της γεννήτριας.	Έλεγχος ισχύος και ασφάλεια υποστηρίξιμενα από ηλεκτρονικά ισχύος μέσω της γεννήτριας.

Πίνακας 4. Τεχνολογική εξέλιξη.



## **Αποτελέσματα**

Σήμερα, σαν αποτέλεσμα της τεχνολογικής εξέλιξης των ανεμογεννητριών, μπορούμε να καταγράψουμε τους παρακάτω τεχνολογικούς δείκτες:

- Η **μηχανική διαθεσιμότητα** των μεγάλων αιολικών πάρκων με «δοκιμασμένες» Α/Γ μεσαίου μεγέθους (500-1000 kW) κυμαίνεται σε ετήσια βάση σταθερά στο 98%. Οι πρόσφατες μεγαλύτερες μηχανές προσεγγίζουν και αυτές το ίδιο μέγεθος.
- Μερικές από τις παλιότερες Α/Γ ήταν αρκετά **θορυβώδεις**, τόσο εξ αιτίας του μηχανολογικού σχεδιασμού όσο και εξ αιτίας της αεροδυναμικής τους, και ο θόρυβος ήταν ένα υπαρκτό πρόβλημα τους. Σήμερα, ο μηχανικός θόρυβος έχει πρακτικά απαλειφθεί ενώ ο αεροδυναμικός έχει δραστηκότητα μειωθεί.
- Οι Α/Γ είναι πλέον εγκαταστάσεις υψηλού **βαθμού απόδοσης** με λιγότερο από 10% θερμικές απώλειες στο σύστημα μετάδοσης της ισχύος τους. Ο αεροδυναμικός βαθμός απόδοσης έχει αυξηθεί από το 44% της δεκαετίας του 80 στο 50% περίπου (όριο Betz 59%).
- Παλιότερα υπήρχε η εντύπωση ότι η αιολική **διείσδυση** σε τοπικά ηλεκτρικά συστήματα δεν θα μπορούσε να ξεπερνά το 10% για λόγους ευστάθειας του συστήματος. Σήμερα η εικόνα είναι πολύ πιο σύνθετη. Τοπικές ενισχύσεις των δικτύων σε συνδυασμό με τη δυνατότητα των Α/Γ μεταβλητών στροφών να συνεισφέρουν στην ευστάθεια του δικτύου και τις σύγχρονες τεχνικές μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης της διαλείπουσας αιολικής παραγωγής, ξεπερνούν κάποιους προβληματισμούς για τη μεταβλητότητα της παραγωγής και την ανάγκη για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Διεισδύσεις της τάξης του 30% είναι ήδη εφικτές για ένα τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο (Δανία 17%, Γερμανία και Ισπανία 15% σε τοπικά δίκτυα).
- Το **κόστος** της αιολικής κιλοβατώρας έχει δραστηκά μειωθεί τα τελευταία χρόνια. Αυτό οφείλεται τόσο στις τεχνολογικές βελτιώσεις όσο και σε οικονομίες κλίμακας που σχετίζονται με το μέγεθος της αγοράς. Σε θέσεις με καλό αιολικό δυναμικό η αιολική ενέργεια μπορεί ήδη να ανταγωνιστεί σε εμπορική βάση νέους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής από άνθρακα ή φυσικό αέριο.

- Οι οπτικές και γενικότερες **περιβαλλοντικές επιπτώσεις** των Α/Γ, παρότι σαφώς μικρότερες από αυτές των συμβατικών σταθμών παραγωγής, απαιτούν ευαίσθητους χειρισμούς. Εντούτοις, η ευρωπαϊκή τουλάχιστον κοινή γνώμη είναι γενικότερα θετική προς την αιολική ενέργεια.

#### **υ. ΠΛΩΤΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ**

Την Δευτέρα 20 Οκτωβρίου 2008 πραγματοποιήθηκε στην Ελευσίνα η επίσημη παρουσίαση της πρώτης πλωτής ανεμογεννήτριας στον κόσμο, η οποία μάλιστα εκμεταλλεύεται άμεσα την παραγόμενη ενέργεια παράγοντας πόσιμο νερό. Η εν λόγω πρωτοποριακή ελληνική κατασκευή πρόκειται να συμβάλει στην κάλυψη της ζήτησης νερού στα νησιά με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον και με μειωμένο κόστος. Το σύστημα αποτελείται από μία πλωτή πλατφόρμα ειδικά σχεδιασμένη ώστε να επιτρέπει την λειτουργία ανεμογεννήτριας πάνω σε αυτή ακόμα και όταν είναι εκτεθειμένη σε άσχημο καιρό (αέρα, κύματα).

Η παραγωγή γίνεται μέσω ενός φιλικού προς το περιβάλλον συστήματος αφαλάτωσης θαλάσσιου ύδατος αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ανεμογεννήτρια και φωτοβολταϊκό), που θα συμβάλει στην κάλυψη της ζήτησης νερού στα νησιά με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον και με βέλτιστη ενεργειακή απόδοση της μονάδας αφαλάτωσης.



**Εικόνα 26.: Πλωτή ανεμογεννήτρια.**

Για την δημιουργία της χρησιμοποιήθηκαν γνώσεις, ιδέες εργασία και συνεργασίες με ένα πολύ μεγάλο μέρος της σχετικής με το θέμα επιστημονικής και παραγωγικής κοινότητας της Ελλάδας. Πανεπιστήμια, Ερευνητικά Κέντρα, Τοπική Αυτοδιοίκηση, Εταιρείες (από πολύ μικρές μελετητικές μέχρι μεγαλύτερες ΜΜΕ), ενώ σημαντική ήταν η συμμετοχή και η εμπειρία ανθρώπων από την παραγωγή που ασχολούνται με τις πλωτές κατασκευές και από το ναυπηγείο και από μηχανουργεία του Πειραιά και του Ασπρόπυργου και από την ΝΖ Περάματος. Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του συστήματος είναι 100% Ελληνική, ενώ σαν εξαρτήματα και συνιστώσες του αγοράστηκε ότι ποιο τεχνολογικά προχωρημένο αλλά και αξιόπιστο υπάρχει στην αγορά.

### **Γιατί στη θάλασσα**

- Όταν οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες σε κορυφογραμμές, είναι σημαντικά υψηλό το κόστος εγκατάστασης τους και μεταφοράς ισχύος προς τη μονάδα αφαλάτωσης, η οποία βρίσκεται μακριά από την πηγή ενέργειας.
- Στην θάλασσα υπάρχουν λιγότεροι περιβαλλοντολογικοί περιορισμοί από ότι στη στεριά διότι υπάρχει πολύς ανοιχτός χώρος και οι περιορισμοί στους θορύβους είναι μικρότεροι.
- Η πλωτή εξέδρα έχει το πλεονέκτημα απέναντι στην θεμελιωμένη στο βυθό της θάλασσας ότι μπορεί να τοποθετηθεί σε βαθύτερα νερά και επομένως σε μεγαλύτερες αποστάσεις από τη στεριά όπου η αιολική ενέργεια είναι ποιοτικά καλύτερη. Σε κάποια απόσταση από τη στεριά η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει 20%. Η ενέργεια του ανέμου αυξάνει με το κύβο (στη τρίτη δύναμη) της ταχύτητας του ανέμου. Οπότε για παράδειγμα ένα 10% αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου αντιστοιχεί σε 30% αύξηση στην αιολική ενέργεια. Συνεπώς είναι φανερό ότι η διαθέσιμη αιολική ενέργεια στη θάλασσα είναι πολύ μεγαλύτερη από τη στεριά.
- Επιπλέον στη θάλασσα ο άνεμος είναι πιο σταθερός (δεν υπάρχουν τόσο έντονα φαινόμενα αυξομειώσεων όπως στη στεριά) με συνέπεια η παραγόμενη ενέργεια να αυξάνει σε σημαντικό ποσοστό σε σχέση με τη στεριά. Επίσης η επιφάνεια της θάλασσας είναι πολύ πιο ομαλή από της στεριάς με συνέπεια η αιολική ενέργεια να είναι διαθέσιμη σε χαμηλότερα ύψη

από ότι στη στεριά. Σαν αποτέλεσμα οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν σε πιο κοντούς πυλώνες και έτσι να μειώνεται το κόστος του πυλώνα.

- Ο άνεμος στη θάλασσα παρουσιάζει πολύ μικρότερες αναταράξεις από ότι στη στεριά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερα φορτία μηχανικής καταπόνησης και επομένως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής για τις ανεμογεννήτριες.

### **Περιγραφή**

Η πλωτή κατασκευή αποτελείται από 4 περιφερειακούς κυλινδρικούς πλωτήρες και ένα κεντρικό, που συνδέονται με κατάλληλο δικτύωμα, ώστε σε συνδυασμό με την γεωμετρία του να ελαχιστοποιείται η επίδραση των κυμάτων σε αυτό. Μέσα στον κεντρικό πλωτήρα, στους 3 ορόφους, του βρίσκονται εγκατεστημένα όλα τα συστήματα. Στον ένα όροφο υπάρχει ένα «εργοστάσιο» αφαλάτωσης που βασίζεται στην μέθοδο αντίστροφης όσμωσης και έχει την ικανότητα να παράγει νερό αρκετό για 300 άτομα.

Στον άλλο όροφο έχει εγκατασταθεί το κέντρο ελέγχου του συστήματος με τα ηλεκτρολογικά / ηλεκτρονικά συστήματα και τους αυτοματισμούς (για τοπική και απομακρυσμένη λειτουργία). Ο κάτω όροφος χρησιμοποιείται σαν δεξαμενή αποθήκευσης πόσιμου νερού. Πάνω στην πλωτή κατασκευή υπάρχει τοποθετημένη ανεμογεννήτρια μεταβλητής γωνίας πτερυγίων, μεταβλητού αριθμού στροφών και άμεσης μετάδοσης (χωρίς κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών). Στο σύστημα υπάρχει και βοηθητικό φωτοβολταϊκό σύστημα σαν εναλλακτική πηγή ενέργειας.

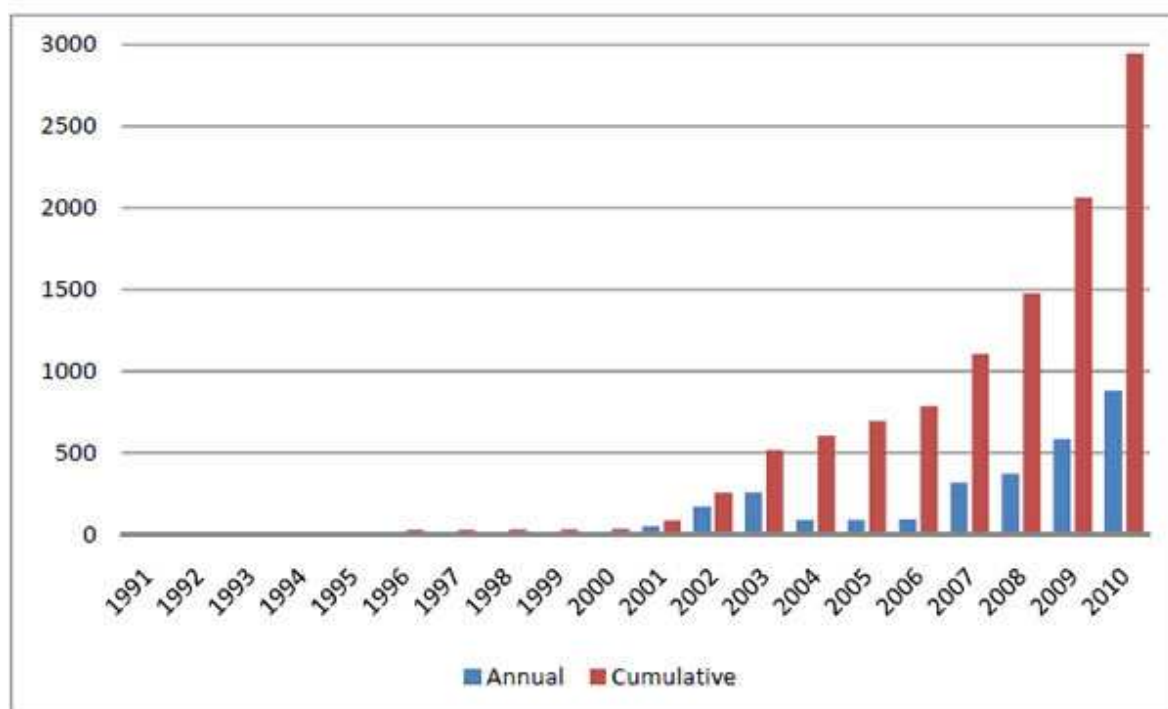
### **Πλεονεκτήματα**

Η σύζευξη της ανεμογεννήτριας με βελτιωμένο σύστημα αντίστροφης και εξελιγμένο σύστημα τηλε-ελέγχου και τηλεχειρισμού έχει σαν αποτέλεσμα να έχουμε:

- Μειωμένο κόστος σύνδεσης των μονάδων, καθώς δεν έχουμε δίκτυο μεταφοράς

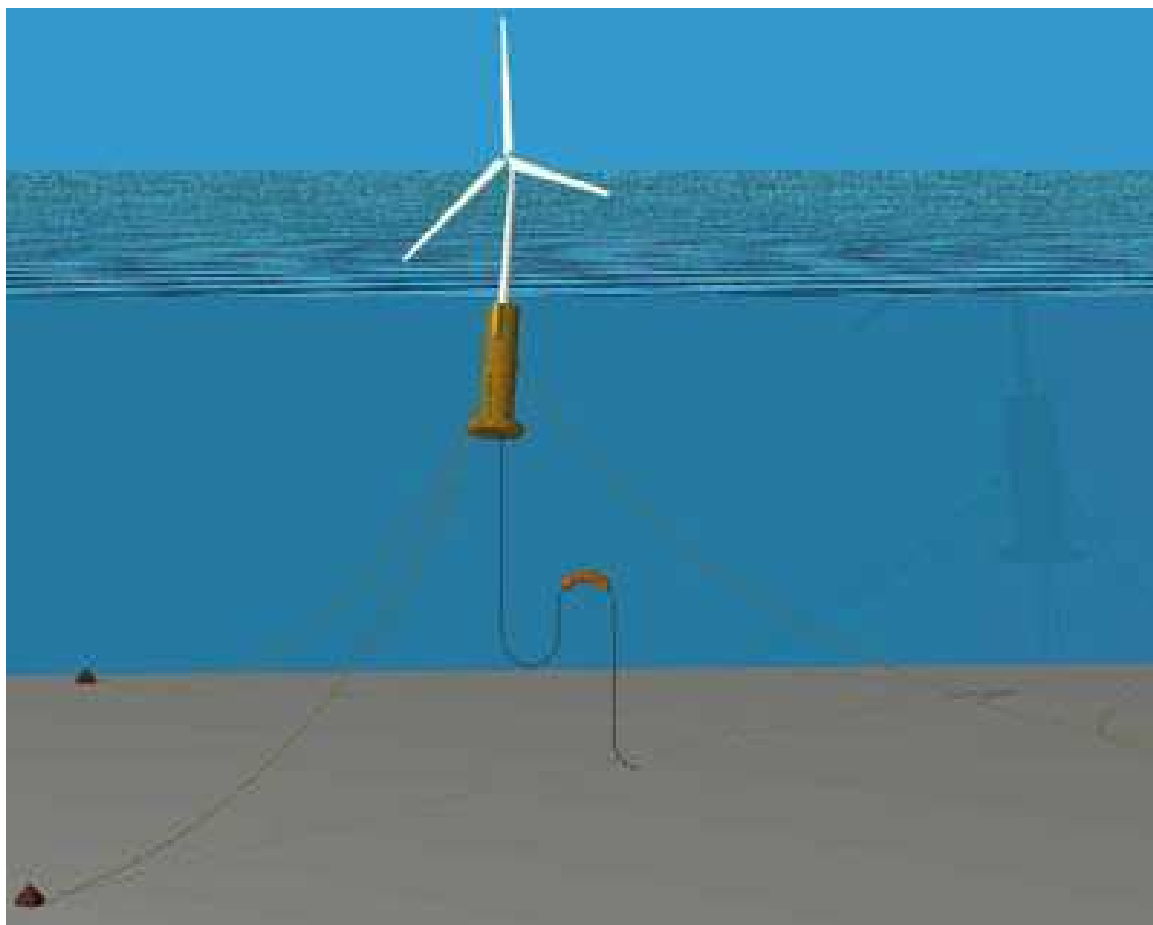
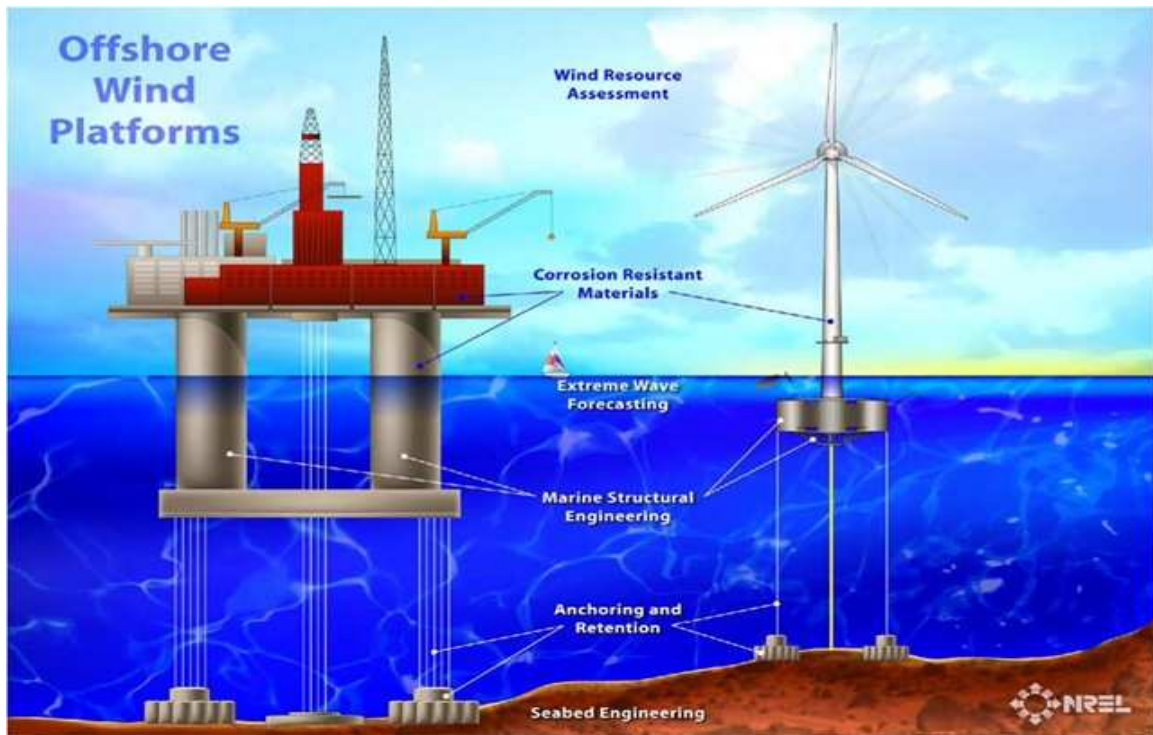
- Δυνατότητα τοποθέτησης της μονάδας μακριά από κατοικημένες περιοχές, ώστε να μην ενοχλεί τους κατοίκους
- Δυνατότητα μετακίνησης της μονάδας, ώστε να είναι δυνατή η εκμετάλλευση αιολικού δυναμικού σε διαφορετικές περιοχές ανάλογα με τις συνθήκες.
- Ελαχιστοποίηση κόστους παραγόμενου νερού
- Εύκολη μεταφορά στο τόπο λειτουργίας και ελαχιστοποίηση εξόδων εγκατάστασης
- Δεν απαιτεί έργα με περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις, όπως η διάνοιξη δρόμων, η θεμελίωση ανεμογεννητριών, και τέλος η μεταφορά ενέργειας ή νερού στο τόπο αφαλάτωσης.
- Δυνατότητα μεγέθυνσης του συστήματος χωρίς προβλήματα εγκατάστασης.

#### Development installed offshore wind power capacity in Megawatt (MW)



Source: EWEA

Εικόνα 27.: Εγκατεστημένη υπεράκτια αιολική ισχύς σε MW.



**Εικόνα 28.: Εγκαταστάσεις υπεράκτιων πλωτών ανεμογεννητριών.**

## 7. ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### v. ΤΟ ΣΗΜΕΡΑ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ

Η βιομηχανία των συστημάτων αιολικής ενέργειας αναπτύσσεται ραγδαία σε παγκόσμιο επίπεδο. Με τις τεχνολογίες να έχουν ωριμάσει για τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, τις ενεργειακές αγορές να έχουν αποδείξει ότι οι επενδύσεις τον συγκεκριμένο κλάδο είναι βιώσιμες και δελεαστικές και με τις δεσμεύσεις των αναπτυγμένων χωρών για μείωση των ρύπων προβλέπεται, τουλάχιστον για την επόμενη δεκαετία, θεαματική άνοδος στο ρυθμό εγκατάστασης αιολικών πάρκων.

Η Αιολική ενέργεια ήταν ο «πρωταθλητής» των νέων εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών το 2011, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA). Συγκεκριμένα, σε έκθεση της EWEA αναφέρεται ότι πέρυσι το 21% των νέων εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής αφορούσε αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος 9.616 MW, ενώ η αξία τους διαμορφώθηκε στο επίπεδο των 12,6 δισ. ευρώ, σχεδόν αμετάβλητη σε σύγκριση με το 2010. Συνολικά, το 2011 στην Ευρώπη εγκαταστάθηκαν 32.043 MW μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές (37% περισσότερα σε σχέση με το 2010), με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ των ανανεώσιμων πηγών να φθάνει στα 895.878 MW και των αιολικών στα 93.957 MW.

Σε ότι αφορά τις χώρες της, η Ελλάδα καλύπτει με την αιολική ισχύ το 5,2% του συνόλου του ηλεκτρισμού της. Τη μεγαλύτερη ποσοστιαία κάλυψη παρουσιάζει η Δανία, με 25,9%, και ακολουθούν Ισπανία (15,9%), Πορτογαλία (15,6%), Ιρλανδία, Γερμανία, Κύπρος και Ελλάδα. Συνολικά, η Γερμανία παραμένει η ευρωπαϊκή χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ. Ακολουθούν οι Ισπανία, Γαλλία, Ιταλία και Βρετανία.

Περισσότερες από 75 χώρες του κόσμου διαθέτουν σήμερα εγκαταστάσεις για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας και 22 από αυτές έχουν ξεπεράσει το ορόσημο του 1 GW εγκατεστημένης ισχύος. Αίσθηση όμως προκαλεί ότι η πλειοψηφία αυτών ανήκει σε αναδυόμενες οικονομίες, οι οποίες ανταμείβονται για τις επενδύσεις στην πράσινη ανάπτυξη.



Σύμφωνα με έκθεση του Παγκοσμίου Συμβουλίου Αιολικής Ενέργειας (GWEC), η οποία δημοσιεύθηκε αυτήν την εβδομάδα, η συνολική ισχύς από τα έργα που ολοκληρώθηκαν μέσα στο 2011 έφθασε τα 41 GW, ανεβάζοντας έτσι την απόδοση παγκοσμίως στα 238 GW στο τέλος της χρονιάς που μας πέρασε. Αυτό μεταφράζεται σε αύξηση της τάξης του 21%, ποσοστό άκρως ικανοποιητικό δεδομένων των προβλημάτων που έχει προκαλέσει η παγκόσμια οικονομική κρίση. Η Κίνα εδραίωσε την ηγεμονική θέση της, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 62 GW. Για την Ινδία, οι εγκαταστάσεις του 2011 ανέβασαν την απόδοση του εθνικού δικτύου σε 16 GW. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, 9.616 MW αιολικής ενέργειας προστέθηκαν τη χρονιά που πέρασε, ανεβάζοντας έτσι την εγκατεστημένη ισχύ σε 94 GW, ενέργεια ικανή να καλύψει το 6,3% των αναγκών της. Εξαιρετική ήταν τέλος η χρονιά για τη Λατινική Αμερική, όπου η Βραζιλία φαίνεται πως κερδίζει ολοένα και περισσότερο το ενδιαφέρον ξένων επενδυτών.

Παρά την κατάσταση της παγκόσμιας οικονομίας, η αιολική ενέργεια εξακολουθεί να διεκδικεί τη μερίδα του λέοντος στις τεχνολογίες εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το 2011 ήταν μία δύσκολη χρονιά, όπως θα είναι και το 2012. Ωστόσο τα θεμέλια της βιομηχανίας παραμένουν σταθερά.

Το 20% των ενεργειακών απαιτήσεων του κόσμου θα μπορεί να καλύψει η αιολική ενέργεια το 2030.

### **Συμπεράσματα**

Οι ανεμογεννήτριες έχουν εξελιχθεί, όπως είδαμε παραπάνω, πολύ τα τελευταία 35 χρόνια. Είναι πιο αξιόπιστες, πιο αποδοτικές και πιο ήσυχες. Δεν μπορεί να συναχθεί ωστόσο το συμπέρασμα ότι η εξελικτική περίοδος έχει τελειώσει, αν και πρόκειται για μια ώριμη πια τεχνολογία. Είναι δυνατή η προσπάθεια για περεταίρω μείωση του κόστους της ενέργειας και ειδικά σε περιοχές με χαμηλές ταχύτητες του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες για χρήση σε απομακρυσμένες κοινότητες εξακολουθούν να χρειάζονται προσπάθειες για να γίνουν εμπορικά βιώσιμες. Ο κόσμος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι μόνο στα σπάργανα. Υπάρχουν τεράστιες ευκαιρίες σε υπεράκτιες τοποθεσίες, αλλά πολλές δυσκολίες να ξεπεραστούν.

Αν και είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθούν τα επόμενα στάδια της εξέλιξης είναι σίγουρο ότι ο στόχος για ανεμογεννήτριες:

- αυξημένης αξιοπιστίας
- που να προσαρμόζονται ευκολότερα στις εξωτερικές συνθήκες του χώρου εγκατάστασής των και
- να έχουν αυξημένη διάρκεια ζωής

παραμένει σε πλήρη ισχύ. Αναμένεται βελτίωση της αντοχής σε κόπωση διαφόρων τμημάτων της ανεμογεννήτριας και ειδικά της πτερύγωσης, όπως και νέοι σχεδιασμοί για δυνατότητες προσαρμοστικότητας και παθητικού ελέγχου. Επίσης θα πρέπει να περιμένουμε την εμφάνιση πιο αποδοτικών αεροτομών για μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των όπως και το σχεδιασμό νέων συστημάτων ελέγχου για λειτουργία σε μεταβλητές ταχύτητες.



**w. Μελλοντικές σκέψεις για το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.**

**Αναζητώντας χώρο σε πόλεις**



## Αναζητώντας χώρο στον αέρα



## Αναζητώντας χώρο στη θάλασσα



## Αναζητώντας την ελαστικότητα





## 8. ΘΕΣΕΙΣ ΡΕΚΟΡ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

### x. Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη ισχύ

Η Enercon E-126 έχει ονομαστική χωρητικότητα 7,58 MW, έχει συνολικό ύψος από 198 m (650 ft), με διάμετρο από 126 m (413 ft), και είναι η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια στον κόσμο από το 2007.



Τουλάχιστον τρεις εταιρείες εργάζονται για την ανάπτυξη μιας 10MW ανεμογεννητριας:

Η Wind Power Ltd αναπτύσσει μια 10 MW VAWT ανεμογεννήτρια, την Aerogenerator X.

Η Sway ανακοίνωσε την ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου μιας ανεμογεννήτριας 10MW με ύψος 162,5 μέτρα και ενός ρότορα διαμέτρου 145 m.



Η Astralux Ltd αναπτύσσει έναν κάθετο μαγνητικό άξονα 10 MW με 230 μ. ύψος και ρότορα διαμέτρου 260 μ.

Η Clipper Windpower ξεκίνησε το έργο της Britannia 10 MW Hawt, αλλά δεν πραγματοποιήθηκε λόγω οικονομικών δυσκολιών.

#### **γ. Η μεγαλύτερη σε επιφάνεια σάρωσης**

Η ανεμογεννήτρια με τη μεγαλύτερη περιοχή σάρωσης είναι εγκατεστημένη από την Gamesa στο Jaulín, στη Σαραγόσα, στην Ισπανία το 2009. Η G10X - 4,5 MW διαθέτει ρότορα διαμέτρου 128 μ.

#### **Η Ψηλότερη ανεμογεννήτρια**

Η ψηλότερη ανεμογεννήτρια είναι της Fuhrländer Laasow. Ο άξονας της είναι 160 μέτρα πάνω από το έδαφος και το στρόφας της μπορεί να φτάσει σε ύψος από 205 μέτρα. Είναι η μόνη ανεμογεννήτρια στον κόσμο ψηλότερη από 200 μέτρα.



#### **Η πιο παραγωγική**

Τέσσερις ανεμογεννήτριες στο Rønland αιολικό πάρκο στη Δανία μοιράζονται το ρεκόρ για τις πιο παραγωγικές ανεμογεννήτριες, με τη καθεμία να παράγει 63,2 GWh τον Ιούνιο του 2010.



## **z. Υψηλότερη τοποθέτηση**

Η Υψηλότερα τοποθετημένη ανεμογεννήτρια στον κόσμο βρίσκεται είναι από την DeWind και εγκαταστάθηκε από την Seawind. Και βρίσκεται στις Άνδεις, περίπου στα 4.100 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Χρησιμοποίησε έναν τύπο D8.2 - 2000 kW / 50 Hz γεννήτριας. Αυτή η γεννήτρια έχει μια νέα φιλοσοφία κίνησης με ένα ειδικό μετατροπέα ροπής (WinDrive). Η WKA τέθηκε σε λειτουργία το Δεκέμβριο του 2007 και δίνει στο ορυχείο της Veladero Barrick Gold ηλεκτρική ενέργεια από τότε.



## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Geuzendam, C. (1998) *Wind energy and public acceptance* in Ratto, F. & Solari, (1998: 135) *Wind Energy and landscape*. Rotterdam: G. ,Balkema
2. GLOBAL INSTALLED WIND POWER CAPACITY (MW)-2008. [www.gwec.net](http://www.gwec.net)
3. Kabouris, J.& Hatziaargyriou, N. (2006). Wind Power in Greece – Current Situation, Future Developments and Prospects. *Power Engineering Society General Meeting. 18-22 June*.
4. Wind in Power 2009 European Statistics. <http://www.ewea.org/index.php?id=1665>
5. Βάου Ζ., Νομικού Σ. Ο Ανεμόμυλος στις Κυκλάδες- Αθήνα: Δωδώνη.
6. Έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών. [http://tw.innopolo-wm.eu/index.php?option=com\\_content&task=view&id=33&Itemid=50](http://tw.innopolo-wm.eu/index.php?option=com_content&task=view&id=33&Itemid=50)
7. Καλδέλλης Ι., Διαχείριση της αιολικής ενέργειας. Εκδοτικός Οίκος ΣΤΑΜΟΥΛΗ, 2005
8. Κανελλόπουλος Δ. Β., Αιολική Ενέργεια – Σχεδιάζοντας στις Αυλές των ανέμων, Εκδοτικός οίκος ΙΩΝ, 2008
9. ΚΑΠΕ: Ετήσια Έκθεση 2009. Στατιστικά στοιχεία ΑΠΕ και ΕΞΕ [www.cres.gr/kape/pdf/download/ETHSIA\\_EKTHESH\\_2009\\_SITE.pdf](http://www.cres.gr/kape/pdf/download/ETHSIA_EKTHESH_2009_SITE.pdf)
10. Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
11. Κιβώτιο ταχυτήτων για ανεμογεννήτριες. [www.gears-gearbox.com/wind-turbines.html](http://www.gears-gearbox.com/wind-turbines.html)
12. Συστήματα ελέγχου ανεμογεννήτριας. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/9233>
13. Τσούτσος Θ., Edge Μ., Παπαστεφανάκης Δ., Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Περιβάλλον, ΚΑΠΕ, ALTENER, 1997
14. Τσούτσος Θ., Σκίκος Γ., Ανανεώσιμες/εναλλακτικές και ήπιες πηγές ενέργειας- Εισαγωγή στο Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον, τόμος Β, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 1999
15. Φωτιάδης, Μ., Ξανθάκου, Π., Καΐλα, Μ., Αναστασάτος, Ν. (2008). Αιολική ενέργεια και αειφόρος ανάπτυξη: Εμπειρική έρευνα

καταγραφής γνώσεων και στάσεων των κατοίκων της Ικαρίας.  
Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Πανεπιστήμιο Αιγαίου. ΤΕΠΑΕΣ.  
Π.Μ..Σ. «Περιβαλλοντική Εκπαίδευση

16. David Spera, Wind turbine Technology, ASME Press, New York 1994
17. Guidelines for Design of Wind Turbines, DNV/Riso
18. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, Second Edition  
James Manwell, Jon McGowan and Anthony Rogers, 2009 John Wiley &  
Sons, Ltd
19. Turaj Ashuri, M.B. Zaaijer, REVIEW OF DESIGN CONCEPTS, METHODS  
AND CONSIDERATIONS OF OFFSHORE WIND TURBINES, Faculty of  
Aerospace Engineering, Wind Energy Research Group, Delft University of  
Technology, The Netherlands.
20. P J Hogg, G Ren, S Peace and P Marsh, THE ADVANTAGES OF  
COMPOSITE MATERIALS IN NEW DESIGN CONCEPTS FOR WIND  
TURBINES, Queen Mary, University of London and Eurowind  
Developments Ltd.
21. C.A. Tsampazis, D.G. Christakis, C.G. Condaxakis, T.A. Chortatsos, «The  
evolution of the Wind Turbine design concept», EWEC 01, 2-6 July 2001,  
Copenhagen, Denmark.