



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΚΟΠΙΜΟΤΗΤΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ ΣΕ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΜΕ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΣΕ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ: ΚΑΝΕΛΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ  
ΚΟΛΟΚΟΤΡΩΝΗΣ ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΖΟΥΒΑΔΑΚΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

## ΣΥΝΟΨΗ

---

Έχοντας πλέον αναγνωρίσει το παγκόσμιο πρόβλημα των κλιματικών αλλαγών, έχει καταστεί σαφές, ότι επιβάλλεται η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και η άμεση στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τόσο από τεχνολογική όσο και από οικονομική άποψη, η αιολική ενέργεια είναι σήμερα αρκετά ώριμη ώστε να συμβάλλει στην αποτροπή των κλιματικών αλλαγών, προσφέροντας συγχρόνως ποικίλα περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Η Ελλάδα είναι μία χώρα ιστορικά συνδεδεμένη με την αιολική ενέργεια, που έχει την εμπειρία της βιωσιμότητάς της, και ταυτόχρονα προικισμένη από τη φύση με αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της σκοπιμότητας τοποθέτησης μικρών ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα στον αστικό ιστό και συγκεκριμένα σε οροφές πολυκατοικιών, για την αξιοποίηση του υπάρχοντος αιολικού δυναμικού. Για τη διερεύνηση του προβλήματος και αφού ορίστηκε συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, εν πρώτοις εξετάστηκαν οι νόμοι που διέπουν την κίνηση του ανέμου στο αστικό περιβάλλον και αναλύθηκε η επιλογή του καταλληλότερου τύπου ανεμογεννήτριας. Συλλέχθηκαν πραγματικά κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής των οποίων η επεξεργασία έγινε με το λογισμικό WindRose Pro και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με το πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής Envi-met, μέσω της χρήσης του οποίου επιχειρήθηκε να αναλυθεί η χρησιμότητα και οι δυνατότητες του στην περιγραφή και επεξεργασία ανεμολογικών μεγεθών. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αναλύθηκαν για τις περιπτώσεις τριών χαρακτηριστικών θέσεων της περιοχής και μετά από την αναγωγή τους στα υπαρκτά και σε υποθετικά ανεμολογικά μεγέθη, επιχειρήθηκε η εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση την πιθανή ετήσια ενεργειακή παραγωγή στην εκάστοτε θέση.

### Λέξεις κλειδιά

ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αιολική ενέργεια, μικρές ανεμογεννήτριες, κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες, αστικό περιβάλλον, άνεμος στον αστικό ιστό, ηλεκτροπαραγωγή, προσομοίωση, μικροδίκτυο, πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

## ABSTRACT

---

Having recognized the world problem of climatic changes, it has become obvious that it is essential to reduce the dependence by fossil fuels, and turn into the renewable energy sources. Both from technological and economic point of view, wind energy is nowadays mature enough to contribute in the prevention of the climate changes, as well as offer simultaneously various environmental, social and economic advantages. Moreover, Greece, a country with historical bonds with wind energy, where the viability of wind energy has been proved, presents a significant wind potential.

The purpose of this diploma thesis is to evaluate the feasibility of installing vertical axis small wind turbines in urban environment, specifically on rooftops of buildings, in order to take advantage of the urban wind potential. For this purpose, and after the study area was defined, the principals of wind flow in urban environment were presented, the adjective wine turbine type was selected and climatological data from the area were collected and analyzed using WindRose Pro software. The computational fluid dynamics software Envi-met was used to simulate the wind flow through and over the study area, while useful conclusions were made about the software's capability in describing and processing anemological data. Finally the results of the simulations were evaluated for three specific locations of possible wind turbine installation, and following the estimation of the annual energy output in each location, the thesis ended up with general conclusions.

### Key Words

Renewable energy sources, wind energy, small wind turbines (SWTs), vertical axis wind turbines (VAWTs), wind generator, urban environment, wind flow in urban environment, electrical energy production, simulation, micro grid, computational fluid dynamics software (CFD)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε με σκοπό να μελετηθεί η σκοπιμότητα μιας ενδεχόμενης τοποθέτησης ανεμογεννητριών εντός του αστικού ιστού, και ειδικότερα σε συγκεκριμένες θέσεις στις οροφές πολυκατοικιών, για την εκμετάλλευση του υπάρχοντος αιολικού δυναμικού για ηλεκτροπαραγωγή. Στα πλαίσια της εργασίας επιλέχθηκε συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, αντιπροσωπευτική για τα δεδομένα της Αθήνας, και κρίθηκε αναγκαία η διερεύνηση της ροής του ανέμου εντός αυτής, μέσω προσομοίωσης σε λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής, το Envi-met.

Αρχικά αναλύθηκε η υπάρχουσα ενεργειακή κατάσταση σήμερα παγκοσμίως, και οι λόγοι που καθιστούν την μεγαλύτερη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αναγκαία. Αφού παρουσιάστηκαν συνοπτικά όλες οι μορφές Α.Π.Ε., δόθηκε έμφαση στην αιολική ενέργεια, παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματά της καθώς και η κατάσταση σε παγκόσμιο και εγχώριο επίπεδο, με αναφορά στις εφαρμογές μικρής κλίμακας.

Η περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος απαιτούσε τη μελέτη του ανέμου ως φυσικού φαινομένου και της αιολικής ενέργειας. Στο κεφάλαιο 2 επιχειρήθηκε η παρουσίαση των αρχών που διέπουν την δημιουργία και κίνησή του, αναλύθηκαν οι τύποι ανέμου και τα βασικά χαρακτηριστικά τους, μελετήθηκε η ροή του καθ' ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και δόθηκε έμφαση στην κίνησή του σε οικιστικό επίπεδο καθώς και στους παράγοντες που επιδρούν σε αυτήν.

Στη συνέχεια, στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο, έγινε αρχικά μια προσέγγιση στην τεχνολογία των ανεμογεννητριών με ιστορική αναδρομή στην εξέλιξή τους και παρουσίαση των αρχών λειτουργίας τους και των βασικών υποσυστημάτων που τις απαρτίζουν. Εξετάστηκαν τόσο οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου όσο και κατακόρυφου άξονα, με αναφορά στις υποκατηγορίες των τελευταίων και στα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε τύπου και τέλος μελετήθηκαν τα μεγέθη που επηρεάζουν τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Η πιο ενδελεχής μελέτη των μικρών ανεμογεννητριών πραγματοποιήθηκε στο επόμενο κεφάλαιο, όπου με έμφαση στις μικρές ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που κρίθηκαν προσφορότερες για το σκοπό της παρούσας διπλωματικής, αναλύθηκαν οι διάφορες χρήσεις τους, ιδίως στο αστικό περιβάλλον, τα φορτία που επηρεάζουν τη λειτουργία τους και οι έλεγχοι και δοκιμές που τις χαρακτηρίζουν. Τέλος εισήχθη η έννοια του μικροδικτύου και αναλύθηκαν οι διάφοροι τρόποι σύνδεσής τους.

Το 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο ασχολείται με την παρουσίαση και ανάλυση των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις της ροής του ανέμου στο σύνθετο αστικό περιβάλλον της περιοχής μελέτης. Αρχικά γίνεται παρουσίαση του Envi-met, αναλύεται η λειτουργία του, περιγράφονται οι παράγοντες πρόγνωσης του μοντέλου και οι μαθηματικές σχέσεις που τους ορίζουν, με έμφαση στα δεδομένα που αφορούν την πρόγνωση ανεμολογικών μεγεθών. Εν συνεχεία, παρουσιάζεται συνοπτικά το πρόγραμμα WindRose Pro, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων της περιοχής τα οποία συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στη Ν. Σμύρνη.

Έχοντας παρουσιάσει το θεωρητικό υπόβαθρο των λογισμικών, ακολουθεί η ανάλυση των πραγματικών δεδομένων της υπό μελέτη περιοχής και περιγράφεται εκτενώς η διαδικασία του πειράματος που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για το αναγκαίο αιολικό δυναμικό προκειμένου η εγκατάσταση αστικών ανεμογεννητριών να θεωρηθεί βιώσιμη. Τέλος μέσω του υποπρογράμματος Leonardo, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο Envi-met, παρουσιάζονται οπτικοποιημένα τα αποτελέσματά της, τα οποία εν συνεχεία αναλύονται.

Ακολούθως, και βάση αυτών των αποτελεσμάτων, εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα της παρούσας εργασίας, και παρουσιάζονται προτάσεις για λεπτομερέστερη ενασχόληση με το θέμα.

Τέλος, στα παραρτήματα που επισυνάπτονται αρχικά αναλύεται το ισχύον νομικό πλαίσιο για μικρές ανεμογεννήτριες στην Ελλάδα, και παρουσιάζεται ένας κατάλογος κατασκευαστών μικρών ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα για εφαρμογή σε αστικό περιβάλλον, με τα βασικά χαρακτηριστικά τους.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στον τομέα Δομοστατικής της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την ολοκλήρωσή της θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Ιωάννη Τζουβαδάκη για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ'όλη τη διάρκειά της, τον κ. Κανελλακόπουλο Δημήτρη, για τη βοήθεια του στην ολοκλήρωση του πειράματος και τέλος ιδιαίτερα ευχαριστούμε τους γονείς μας για τη συμπαράσταση και στήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

*Στις διαδρομές που τελειώνουν  
και σε όσες αρχίζουν*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

<b>ΣΥΝΟΨΗ</b> .....	2
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	4
<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</b> .....	7
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ</b> .....	10
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ</b> .....	16

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το ενεργειακό ζήτημα σήμερα.....	17
1.2 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	19
1.2.1 Εισαγωγή στις Α. Π. Ε.....	19
1.2.2 Μορφές των Α. Π. Ε.....	24
1.2.3 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα Α.Π.Ε. ....	38
1.3 Η αιολική ενέργεια.....	39
1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για την αιολική ενέργεια.....	39
1.3.2 Οι τάσεις παγκοσμίως.....	41
1.3.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα.....	45
1.4 Μικρής κλίμακας εφαρμογές Α.Π.Ε. ....	48
Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	49

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Ο άνεμος ως φυσικό φαινόμενο.....	50
2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία μικρομετεωρολογίας.....	50
2.1.2 Δημιουργία των ρευμάτων του αέρα.....	51
2.1.3 Μέτωπα των ρευμάτων του αέρα.....	54
2.2 Οι δυνάμεις που ενεργούν σε μια μάζα στην ατμόσφαιρα.....	55
2.2.1 Δύναμη βαρύτητας.....	55
2.2.2 Δύναμη Coriolis.....	56
2.2.3 Δύναμη βαροβαθμίδας.....	57
2.2.4 Δύναμη τριβής.....	58
2.2.5 Φυγοκεντρική δύναμη του ανέμου. ....	60
2.3 Τύποι ανέμου.....	60
2.3.1 Γεωστροφικοί άνεμοι.....	60
2.3.2 Άνεμος βαθμίδας ή βαροβαθμίδας (Gradient wind) ....	61
2.3.3 Άνεμος Τριβής (Επιφανείας) ....	62
2.3.4 Ημερήσιοι άνεμοι.....	62
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά των ανέμων.....	62
2.4.1 Κατεύθυνση του ανέμου.....	63
2.4.2 Ένταση του ανέμου.....	64
2.4.3 Οι ανεμομετρικές κλίμακες.....	65
2.4.4 Απεικόνιση των ανέμων - Ανεμολόγια συχνότητας.....	66
2.4.5 Αιολικό δυναμικό και σχετική κατανομή του ανέμου.....	71
2.4.6 Αύξηση της ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος ....	72

2.4.7	Ενεργειακό περιεχόμενο και ισχύς ανέμου.....	73
2.4.8	Πυκνότητα του αέρα .....	74
2.4.9	Η φύση της τύρβης.....	74
2.5	Το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (Α.Ο.Σ.) .....	76
2.5.1	Διαστρωμάτωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από πόλεις.....	77
2.5.2	Χαρακτηριστικά του στρώματος αέρα ανάμεσα στα κτίρια (Urban canopy layer).....	78
2.5.3	Κατανομή του ανέμου πάνω και κάτω από το επίπεδο που ορίζουν οι κορυφές των κτιρίων.....	79
2.6	Ο άνεμος σε οικιστικό επίπεδο.....	80
2.6.1	Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας.....	80
2.6.2	Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη ροή του αέρα σε αστικούς χώρους.....	81
2.6.3	Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας.....	81
2.6.4	Κυριότεροι τύποι ροής σε αστική χαράδρα.....	82
	Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	84

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ**

3.1	Ιστορική αναδρομή.....	86
3.1.1	Σύντομη ιστορία των ανεμόμυλων.....	86
3.1.2	Πρώιμες ανεμογεννήτριες.....	90
3.1.3	Μεταγενέστερες Εξελίξεις.....	92
3.1.4	Πρόσφατες εξελίξεις.....	94
3.2	Ορισμός αιολικής μηχανής - ανεμογεννήτριας.....	95
3.3	Αρχές λειτουργίας ανεμογεννήτριας – αεροδυναμική των πτερυγίων.....	97
3.4	Το μέγεθος των ανεμογεννητριών.....	99
3.5	Κατασκευαστική διαμόρφωση ανεμογεννητριών.....	101
3.5.1	Βασικά υποσυστήματα.....	101
3.5.2	Ανεμογεννήτριες σταθερών-μεταβλητών στροφών.....	106
3.5.3	Ασύγχρονες - σύγχρονες γεννήτριες.....	108
3.6	Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	111
3.6.1	Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWTs) .....	111
3.6.2	Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWTs) .....	122
3.7	Τύποι έλεγχου των πτερυγίων των ανεμογεννητριών.....	134
3.8	Μετατροπή αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.....	135
3.8.1	Καμπύλη ισχύος.....	135
3.8.2	Αεροδυναμική ισχύς.....	137
3.8.3	Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, λ.....	138
3.8.4	Διαθεσιμότητα ανεμογεννήτριας.....	139
3.8.5	Απώλειες ενέργειας.....	140
3.9	Καθορισμός ονομαστικής ισχύος ανεμογεννήτριας.....	141
3.10	Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας – Ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή.....	141
	Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	143

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ**

4.1	Ταξινόμηση ανεμογεννητριών βάσει της ονομαστικής ισχύος.....	146
-----	--	-----



4.2	Πλεονεκτήματα μικρών ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα.....	148
4.3	Χρήσεις και περιοχές τοποθέτησης.....	148
4.4	Μικρές ανεμογεννήτριες στο αστικό περιβάλλον.....	149
4.5	Φορτία – Δράσεις δυνάμεις στις ανεμογεννήτριες.....	151
4.6	Διάρκεια ζωής και συντήρηση.....	152
4.7	Έλεγχοι και δοκιμές στις μικρές ανεμογεννήτριες.....	152
4.7.1	Διαγνωστικοί έλεγχοι για μικρές ανεμογεννήτριες.....	152
4.7.2	Έλεγχοι της απόδοσης.....	153
4.7.3	Έλεγχοι των αντοχών.....	154
4.7.4	Έλεγχος της ασφαλούς λειτουργίας.....	155
4.7.5	Έλεγχος των ακουστικών εκπομπών θορύβου.....	155
4.8	Μετρήσεις αιολικού δυναμικού για εγκατάσταση μικρών Α/Γ.....	158
4.9	Σύνδεση Ανεμογεννητριών σε Αυτόνομο Δίκτυο.....	159
4.10	Μικροδίκτυα.....	159
4.10.1	Η Έννοια του Μικροδικτύου.....	159
4.11	Τρόποι Σύνδεσης Ανεμογεννητριών.....	161
4.11.1	Η AC Σύνδεση.....	162
4.11.2	Δομή της AC Σύνδεσης.....	162
4.11.3	Λειτουργία Μεγιστοποίησης Αποδιδόμενης Ισχύος (MPPT).....	163
4.11.4	Η DC Σύνδεση.....	164
	Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	166

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

5.1	Το πρόγραμμα Envi-met και η χρήση του.....	168
5.2	Δομή του Envi-met 3.1.....	169
5.3	Ροή δεδομένων στο Envi-met 3.1.....	170
5.4	Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στο Envi-met.....	172
5.4.1	Κύρια ροή ανέμου.....	172
5.4.2	Θερμοκρασία και υγρασία.....	174
5.4.3	Ατμοσφαιρική τύρβη.....	174
5.4.4	Το μοντέλο του εδάφους.....	176
5.4.5	Αριθμητικά στοιχεία – μεθοδολογία.....	177
5.5	Συμπεράσματα – Μειονεκτήματα παρούσας έκδοσης.....	178
5.6	Η εφαρμογή WindRose Pro.....	179
	Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	179

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

6.1	Δεδομένα για περιοχή μελέτης.....	181
6.2	Ανεμολογικά Δεδομένα.....	183
6.3	Περιγραφή των βημάτων της μελέτης.....	186
6.4	Επιλογή μοντέλου ανεμογεννήτριας.....	188
6.5	Μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα Envi-met.....	190
6.5.1	Δημιουργία του αρχείου εισαγωγής περιοχής .IN (Area Input File).....	190
6.5.2	Δημιουργία του κύριου αρχείου διαμόρφωσης .CF (Main Configuratin File).....	193
6.6	Προσομοιώσεις.....	194

6.7	Αξιοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων για την εξαγωγή της Ετήσιας Ενεργειακής Παραγωγής για κάθε θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας.....	211
	Βιβλιογραφία – Πηγές κεφαλαίου.....	216

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1	Συμπεράσματα για το λογισμικό Envi-met.....	217
7.2	Συμπεράσματα του αντικειμένου της μελέτης.....	218

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄ - ΝΟΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

A.1	Τιμολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.....	221
A.2	Βασικές άδειες ενεργειακής νομοθεσίας.....	221
A.3	Περιβαλλοντική αδειοδότηση.....	221
A.4	Πολεοδομικά θέματα και θέματα χρήσεων γης.....	224
A.5	Σύνδεση στο δίκτυο.....	225
A.6	Σύναψη Σύμβασης πώλησης και αγοράς της ενέργειας.....	227
A.7	Χρήσιμες διευθύνσεις από όπου μπορεί να αντλούνται πληροφορίες .....	227
A.8	Πιστοποιήσεις (Certifications) Μικρών Ανεμογεννητριών.....	228
	Βιβλιογραφία – Πηγές Παραρτήματος Α΄.....	229

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄ - ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΥΡΩΠΑΪΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ Α/Γ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ..... 230

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εικ. 1.1	Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση, 1800-2010.....	18
Εικ. 1.2	Παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση του πλανήτη τα έτη 1973 και 2010.....	18
Εικ. 1.3	Εξέλιξη της συγκέντρωσης CO <sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 50 έτη.....	20
Εικ. 1.4	Εξέλιξη της τιμής του πετρελαίου.....	21
Εικ. 1.5	Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. 2012.....	22
Εικ. 1.6	Εγχώρια παραγωγή Η.Ε. ανα μορφή καυσίμου – Διασυνδεδεμένο σύστημα... ..	23
Εικ. 1.7	Μέση ημερησια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα (W/m <sup>2</sup> ).....	25
Εικ. 1.8	(α) Ανεμόμυλοι στην Ολλανδία, (β) Αιολικό πάρκο στη Γερμανία, (γ) Α/Γ συνδυασμένου τύπου Darrieus και Savonius στην Ταϊβάν.....	26
Εικ. 1.9	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (MW) στην Ελλάδα 1997-2011.....	27
Εικ. 1.10	Θερμοκρασία της γης σε σχέση με το βάθος.....	28
Εικ. 1.11	(α) Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Larderello το 1904 κατά την πρώτη πειραματική απόπειρα παραγωγής Η.Ε. από γεωθερμικό ατμό (β) Οικία με εγκατεστημένο οριζόντιο σύστημα γεωθερμικής αντλίας (γ) Εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα .....	29
Εικ. 1.12	Η συμμετοχή της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας.....	31
Εικ. 1.13	(α) Μικρό υδροηλεκτρικό έργο στην Κίνα (β) Μικρό υδροηλεκτρικό έργο στην Γιτάνη.....	32
Εικ. 1.14	Μέθοδος TAPCHAN.....	33
Εικ. 1.15	Ο πεπιεσμένος αέρας θέτει σε κίνηση την τουρμπίνα.....	34

<b>Εικ. 1.16</b>	Αρχή λειτουργίας διάταξης που εκμεταλλεύεται την ενέργεια των ρευμάτων...	34
<b>Εικ. 1.17</b>	Το νερό των παλιρροιών διέρχεται μέσα από το φράκτη και εισέρχεται στη δεξαμενή θέτοντας τις τουρμπίνες σε λειτουργία.....	35
<b>Εικ. 1.18</b>	Μέση ετήσια κατανομή σημαντικού ύψους κύματος στο Αιγαίο Πέλαγος, όπως προκύπτει από το μοντέλο WAM-Cycle 4 για την περίοδο 1999-2001.....	35
<b>Εικ. 1.19</b>	Ο πλωτός σταθμός Wave Dragon στη Δανία (πάνω αριστερά), το σύστημα Relamis στη Πορτογαλία (κάτω) και ο σταθμός Seaflow στην Μ. Βρετανία (δεξιά).....	36
<b>Εικ. 1.20</b>	Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ε.Ε.σε GW 2000-2012.....	41
<b>Εικ. 1.21</b>	Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ε.Ε. 2000-2012.....	42
<b>Εικ. 1.22</b>	Διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε και τα κράτη μέλη της.....	42
<b>Εικ. 1.23</b>	Μερίδιο της αγοράς αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε. σε σύνολο εγκατεστημένης ισχύος.....	43
<b>Εικ. 1.24</b>	Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996-2012.....	44
<b>Εικ. 1.25</b>	Παγκόσμια ετήσια νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996-2012.....	44
<b>Εικ. 1.26</b>	Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά ήπειρο.....	44
<b>Εικ. 1.27</b>	(α) Δέκα χώρες με την μεγαλύτερη νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύ το 2012 (β) Δέκα χώρες την μεγαλύτερη συνολική εγκατεστημένη ισχύ το 2012.....	45
<b>Εικ. 1.28</b>	Συνολική και ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα 2006-2012...	46
<b>Εικ. 1.29</b>	Η εξέλιξη των αιολικών και φ/β στην Ελλάδα, σε σχέση με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης και τους θεσμοθετημένους στόχους 2014 και 2020.....	47
<b>Εικ. 1.30</b>	Πρόβλεψη διείσδυσης Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο 2010-2020.....	47
<b>Εικ. 1.31</b>	Όρια εγκατεστημένης ισχύος (MW) ανά τεχνολογία Α.Π.Ε. και κατηγορία παραγωγού.....	48

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

<b>Εικ. 2.1</b>	Παρέκκλιση της σχετικής κατεύθυνσης των ανέμων.....	53
<b>Εικ. 2.2</b>	Απλοποιημένη αναπαράσταση της παγκόσμιας κατανομής των ανέμων.....	53
<b>Εικ. 2.3</b>	Τρισδιάστατη αναπαράσταση της κυκλοφορίας των ανέμων.....	54
<b>Εικ. 2.4</b>	Η ενεργός βαρύτητα $g$ είναι το διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής δύναμης βαρύτητας $g^*$ της φυγόκεντρος δυνάμεως, $\Omega^2 R$ . Στο σχήμα το $g$ πρέπει να είναι τη θέση του $g^*$ και αντίθετα.....	55
<b>Εικ. 2.5</b>	Ισορροπία αδρανειακού όγκου ελέγχου.....	56
<b>Εικ. 2.6</b>	Μεταβολή της δύναμης Coriolis ( $ms^{-1}$ ) με το γεωγραφικό πλάτος.....	57
<b>Εικ. 2.7</b>	Δίκτυο ισοβαρών καμπυλών.....	58
<b>Εικ. 2.8</b>	Η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος δημιουργεί μία διατμητική τάση.....	59
<b>Εικ. 2.9</b>	Κατεύθυνση γεωστροφικών ανέμων. Η ταχύτητα του γεωστροφικού ανέμου είναι παράλληλη στις ισοβαρείς έχοντας τις χαμηλές πιέσεις αριστερά.....	60
<b>Εικ. 2.10</b>	Δυνάμεις οριζοντίου βαθμίδας, φυγόκεντρος και coriolis σε ισορροπία στο βόρειο ημισφαίριο. Ο άνεμος στην περίπτωση αυτή ονομάζεται άνεμος βαθμίδας.....	61
<b>Εικ. 2.11</b>	(α) Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο του τύπου που εφευρέθηκε από τον John Thomas Romney Robinson το 1846 (β) σύγχρονο κυπελλοφόρο ανεμόμετρο.....	63
<b>Εικ. 2.12</b>	Ανεμολόγιο.....	63
<b>Εικ. 2.13</b>	Ανεμολόγιο με 16 διευθύνσεις ανέμων.....	64
<b>Εικ. 2.14</b>	Μονάδες μέτρησης της έντασης του ανέμου.....	64
<b>Εικ. 2.15</b>	Τυπική ανεμομετρική κλίμακα Beaufort.....	65
<b>Εικ. 2.16</b>	Παράδειγμα ανεμολογίου συχνότητας (wind frequency rose).....	66
<b>Εικ. 2.17</b>	Ανεμολόγιο συχνότητας και έντασης του αεροδρομίου LaGuardia, Ν. Υόρκης (LGA).....	67
<b>Εικ. 2.18</b>	Δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών της EMY.....	68
<b>Εικ. 2.19</b>	Οι μέσες ταχύτητες ανέμου (m/sec), μαζί με τις κύριες διευθύνσεις του.....	70
<b>Εικ. 2.20</b>	Παράδειγμα κατανομών Weibull για διάφορες τιμές $k$ και $c$ .....	71

<b>Εικ. 2.21</b>	Παράδειγμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull για δεδομένες τιμές ταχύτητας ανέμου.....	<b>72</b>
<b>Εικ. 2.22</b>	Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου σε διαφορετικό τύπο εδάφους.....	<b>73</b>
<b>Εικ. 2.23</b>	Μεταβολή της πυκνότητας $\rho$ με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας.....	<b>74</b>
<b>Εικ. 2.24</b>	Χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας επιφάνειας $z_0$ συναρτήσει του τύπου εδάφους.....	<b>75</b>
<b>Εικ. 2.25</b>	Διαστρωμάτωση της κατώτερης ατμόσφαιρας.....	<b>77</b>
<b>Εικ. 2.26</b>	Στρώματα της κατώτερης ατμόσφαιρας που αναπτύσσονται μέσα στο αστικό οριακό στρώμα.....	<b>78</b>
<b>Εικ. 2.27</b>	Κατανομή του ανέμου στο επιφανειακό επίπεδο, επάνω και κάτω από το μέσο ύψος κτηρίων.....	<b>79</b>
<b>Εικ. 2.28</b>	Αύξηση θερμοκρασίας πάνω από αστική περιοχή λόγω του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας.....	<b>80</b>
<b>Εικ. 2.29</b>	Πεδίο ροής ανέμου γύρω από κτίρια σε αεροσήραγγα.....	<b>81</b>
<b>Εικ. 2.30</b>	Οι τρεις περιπτώσεις ροής αέρα μέσα σε αστική χαράδρα για κάθετη πρόσπτωση του ανέμου στον κύριο άξονα της.....	<b>83</b>
<b>Εικ. 2.31</b>	Οριακές γραμμές μεταξύ των τριών περιπτώσεων ροών του ανέμου μέσα σε αστικό περιβάλλον.....	<b>83</b>
<b>Εικ. 2.32</b>	Γραμμές ροής για διάφορους λόγους $Y/\Pi$ .....	<b>84</b>

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

<b>Εικ. 3.1</b>	(α) Αναπαράσταση περσικού τύπου ανεμόμυλου [Πηγή: «The Traditional Crafts of Persia, Their Development, Technology, and Influence on Eastern and Western Civilization», H. E. Wulff, 1966] (β) ανεμόμυλος στο χωριό Nashtifan του Ιράν, κατασκευασμένος με τον παραδοσιακό σχεδιασμό.....	<b>87</b>
<b>Εικ. 3.2</b>	Η αρχαιότερη γνωστή απεικόνιση οριζοντίου άξονα ανεμόμυλου, σε Αγγλικό χειρόγραφο του 1270.....	<b>88</b>
<b>Εικ. 3.3</b>	(α) Τομή Ολλανδικού ανεμόμυλου (β) Ανεμόμυλος του 1895 στο Sønderho, Fanø, της Δανίας.....	<b>88</b>
<b>Εικ. 3.4</b>	Ανεμόμυλος με ατσάλινα πτερύγια για άντληση νερού στα μεσοδυτικά των Η.Π.Α.....	<b>89</b>
<b>Εικ. 3.5</b>	Ο ανεμόμυλος του Brush στο Κλήβελαντ του Οχάιο, 1888. Η πρώτη χρήση ανεμόμυλου για παραγωγή ηλεκτρισμού.....	<b>90</b>
<b>Εικ. 3.6</b>	Η πρωτοποριακή πειραματική ανεμογεννήτρια των Smith-Putnam – Η πρώτη αιολική εγκατάσταση ισχύος MW.....	<b>91</b>
<b>Εικ. 3.7</b>	Η ύψους 34 μέτρων ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus που αναπτύχθηκε από το Sandia National Laboratory στο New Mexico.....	<b>92</b>
<b>Εικ. 3.8</b>	Ανεμογεννήτρια GROWIAN.....	<b>93</b>
<b>Εικ. 3.9</b>	Αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών τύπου ZOND Z-40 συνολικής ισχύος 600 kW στο Τέξας των Η.Π.Α. ....	<b>95</b>
<b>Εικ. 3.10</b>	Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας.....	<b>96</b>
<b>Εικ. 3.11</b>	Αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ.....	<b>97</b>
<b>Εικ. 3.12</b>	(α) Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας (β) οι δυνάμεις της αντίστασης και της άνωσης.....	<b>98</b>
<b>Εικ. 3.13</b>	Τυπικά μεγέθη σύγχρονων εμπορικών ανεμογεννητριών.....	<b>99</b>
<b>Εικ. 3.14</b>	Μέσος όρος διαμέτρου ρότορα και ύψους ανεμογεννήτριας.....	<b>100</b>
<b>Εικ. 3.15</b>	Ισχύς ανεμογεννητριών για διάφορες διαμέτρους δρομέων.....	<b>101</b>
<b>Εικ. 3.16</b>	Βασικά υποσυστήματα.....	<b>102</b>
<b>Εικ. 3.17</b>	Διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ.....	<b>103</b>
<b>Εικ. 3.18</b>	Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου Α.....	<b>104</b>
<b>Εικ. 3.19</b>	Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου Β.....	<b>105</b>
<b>Εικ. 3.20</b>	Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου C.....	<b>105</b>

<b>Εικ. 3.21</b>	Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου D.....	<b>106</b>
<b>Εικ. 3.22</b>	Καμπύλη ισχύος ανεμοκινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας.....	<b>108</b>
<b>Εικ. 3.23</b>	Διάγραμμα μεταβολής της απόδοσης Α/Γ συναρτήσει του λόγου $U_d/U_u$ .....	<b>112</b>
<b>Εικ. 3.24</b>	Προσανατολισμός δρομέα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (ανάντη/κατάντη).....	<b>113</b>
<b>Εικ. 3.25</b>	Κύρια στοιχεία ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.....	<b>113</b>
<b>Εικ. 3.26</b>	Διάφορα σχέδια ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.....	<b>114</b>
<b>Εικ. 3.27</b>	Σχηματική αναπαράσταση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.....	<b>115</b>
<b>Εικ. 3.28</b>	Τμήματα κιβωτίου ταχυτήτων ανεμογεννήτριας.....	<b>116</b>
<b>Εικ. 3.29</b>	(α) Σκυροδέτηση θεμελίου πύργου Α/Γ (β) αστοχία πύργου Α/Γ λόγω ισχυρής καταγίδας.....	<b>118</b>
<b>Εικ. 3.30</b>	Τομή και διαστρωμάτωση πτερυγίου ανεμογεννήτριας της κατασκευαστικής εταιρίας Gruit.....	<b>119</b>
<b>Εικ. 3.31</b>	Υλικά κατασκευής πτερυγίων και χαρακτηριστικά.....	<b>120</b>
<b>Εικ. 3.32</b>	Τα μηχανικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα Bosch Rexroth... ..	<b>122</b>
<b>Εικ. 3.33</b>	Βασικές διαμορφώσεις ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (a) Full Darrius, (b) “H”, (c) “V”,(d) “Δ”, (e) “Diamond” και (f) “Giromill.....	<b>123</b>
<b>Εικ. 3.34</b>	Διαμορφώσεις ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα.....	<b>124</b>
<b>Εικ. 3.35</b>	Διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών καθέτου άξονα (a) Darrius, (b) Savonius, (c) Solarwind™, (d) Helical (e) Noguchi, (f) Maglev, (g) Cochrane.....	<b>125</b>
<b>Εικ. 3.36</b>	Εφαρμογή ανεμογεννήτριας τύπου Savonius σε οροφή κατοικίας.....	<b>127</b>
<b>Εικ. 3.37</b>	(α) Σύστημα με πολλαπλές ανεμογεννήτριες τύπου Savonius (β) Σχήμα υπολογισμού των δυνάμεων που δρουν σε μια Α/Γ τύπου Savonius.....	<b>128</b>
<b>Εικ. 3.38</b>	Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας τύπου Darrius.....	<b>129</b>
<b>Εικ. 3.39</b>	(α) Εφαρμογή ανεμογεννήτριας τύπου Darrius (β) συνδυασμός Darrius / Savonius.....	<b>130</b>
<b>Εικ. 3.40</b>	Ανεμογεννήτριες τύπου Giromill.....	<b>132</b>
<b>Εικ. 3.41</b>	Ανεμογεννήτρια τύπου tornado.....	<b>132</b>
<b>Εικ. 3.42</b>	(α) Ελικοειδής Α/Γ Quiet Revolution (β) Α/Γ Helix.....	<b>133</b>
<b>Εικ. 3.43</b>	(α) Ανεμογεννήτρια Turby (β) Ανεμογεννήτρια Windspire.....	<b>133</b>
<b>Εικ. 3.44</b>	Μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή $C_p$ συναρτήσει του λογού ταχυτήτων ακροπτερυγίου $\lambda$ για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων.....	<b>134</b>
<b>Εικ. 3.45</b>	Καμπύλη ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτριας.....	<b>136</b>
<b>Εικ. 3.46</b>	Παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου.....	<b>136</b>
<b>Εικ. 3.47</b>	Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα αποδόσεων κι απωλειών του μηχανικού και ηλεκτρικού μέρους μίας Α/Γ.....	<b>138</b>
<b>Εικ. 3.48</b>	(α) Τυπική μορφή του συντελεστή απόδοσης πτέρυγας $C_p$ για δίπτερες Α/Γ (β) γραφική παράσταση του $C_p$ σε διάφορες περιπτώσεις πτερυγίων (Δίπτερη, τρίπτερη, πολύπτερη, κατακόρυφου άξονα και πτερυγίων ανεμόμυλου). Η περιοχή γύρω από το μέγιστο διαφέρει σε κάθε περίπτωση. ....	<b>139</b>
<b>Εικ. 3.49</b>	Ενεργειακές απώλειες στην καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου.....	<b>140</b>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

<b>Εικ. 4.1</b>	Κατηγοριοποίηση μικρών Α/Γ κατά το πρότυπο IEC 61400-2.....	<b>147</b>
<b>Εικ. 4.2</b>	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς μικρών Α/Γ σε 7 χώρες μέλη του International Energy Agency, IEA.....	<b>147</b>
<b>Εικ. 4.3</b>	Προσομοίωση ανέμου που συναντά κτίριο : όπως φαίνεται από την αριστερή κλίμακα, οι μεγαλύτερες και πιο σταθερές κατεύθυνσης τιμές ταχύτητας εμφανίζονται στο κέντρο της οροφής και σε κάποιο ύψος από αυτήν.....	<b>150</b>

<b>Εικ. 4.4</b>	Αλληλεπίδραση του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και του περιβάλλοντος.....	<b>151</b>
<b>Εικ. 4.5</b>	Κάποιοι απαιτούμενοι έλεγχοι για την πιστοποίηση των μικρών ανεμογεωωητριών.....	<b>153</b>
<b>Εικ. 4.6</b>	Έλεγχος της αντοχής του πύργου : διάγραμμα της επιτάχυνσης του πύργου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ aeroSmart5.....	<b>154</b>
<b>Εικ. 4.7</b>	Δοκιμή της εκτροπής των πτερυγίων για μεγάλα δυναμικά φορτία σε υψηλούς ανέμους.....	<b>155</b>
<b>Εικ. 4.8</b>	Ακουστικός θόρυβος (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-11) .....	<b>157</b>
<b>Εικ. 4.9</b>	Κλίμακα τυπικών θορύβων.....	<b>157</b>
<b>Εικ. 4.10</b>	Διάγραμμα που αναπαριστά τα επίπεδα θορύβου μίας Α/Γ σε συνάρτηση με την απόσταση από το δρομέα της.....	<b>158</b>
<b>Εικ. 4.11</b>	Σύνδεση σε AC ζυγό.....	<b>162</b>
<b>Εικ. 4.12</b>	Δομή της AC σύνδεσης.....	<b>163</b>
<b>Εικ. 4.13</b>	Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και η βέλτιστη καμπύλη ελέγχου.....	<b>163</b>
<b>Εικ. 4.14</b>	Σύνδεση σε ζυγό DC.....	<b>164</b>
<b>Εικ. 4.15</b>	Σύστημα ανεμογεννήτριας σε DC σύνδεση με δυνατότητα MPPT.....	<b>165</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

<b>Εικ. 5.1</b>	Βασική δομή του μοντέλου Envi-met .....	<b>169</b>
<b>Εικ. 5.2</b>	Τα βασικά δεδομένα του .CF (Configuration File).....	<b>170</b>
<b>Εικ. 5.3</b>	Το Area Input File για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας.....	<b>171</b>
<b>Εικ. 5.4</b>	Μεταβλητές του κύριου παραγόμενου φακέλου που αφορούν ανεμολογικά δεδομένα.....	<b>172</b>
<b>Εικ. 5.5</b>	Παραδείγματα παραγόμενων γραφημάτων από την εφαρμογή WindRose Pro.....	<b>179</b>

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

<b>Εικ. 6.1</b>	Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της περιοχής μελέτης όπου απεικονίζεται το ύψος δόμησης και σχετικά αραιή φυτοκάλυψη.....	<b>181</b>
<b>Εικ. 6.2</b>	Άλλες απόψεις της περιοχής μελέτης.....	<b>182</b>
<b>Εικ. 6.3</b>	Δορυφορική άποψη της περιοχής μελέτης .....	<b>182</b>
<b>Εικ. 6.4</b>	Κοντινότερη άποψη της περιοχής.....	<b>183</b>
<b>Εικ. 6.5</b>	Ροδογράμματα της περιοχής μελέτης για τα πραγματικά (πάνω) και τα νέα (κάτω) ανεμολογικά δεδομένα .....	<b>184</b>
<b>Εικ. 6.6</b>	Κατανομή των ταχυτήτων της περιοχής μελέτης για τα πραγματικά (πάνω) και τα νέα (κάτω) ανεμολογικά δεδομένα .....	<b>185</b>
<b>Εικ. 6.7</b>	Κατανομή Weibull για τα νέα ανεμολογικά δεδομένα.....	<b>185</b>
<b>Εικ. 6.8</b>	Θέσεις μελέτης ανεμογεννητριών.....	<b>188</b>
<b>Εικ. 6.9</b>	Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας QR5.....	<b>189</b>
<b>Εικ. 6.10</b>	Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Windside12.....	<b>190</b>
<b>Εικ. 6.11</b>	Βασικά στοιχεία διαμόρφωσης του μοντέλου στο αρχείο .IN.....	<b>191</b>
<b>Εικ. 6.12</b>	Άποψη μοντέλου κτιρίων και φυτών στην διασταύρωση των οδών Δαρδανελλίων και Ανδριανουπόλεως (αριστερά), το μοντέλο υλικών των επιφανειών της ίδιας περιοχής (δεξιά).....	<b>192</b>
<b>Εικ. 6.13</b>	Τελική άποψη του αρχείου εισαγωγής περιοχής .IN (Area Input File).....	<b>192</b>
<b>Εικ. 6.14</b>	Κύριο αρχείο διαμόρφωσης για την προσομοίωση ταχύτητας 16 m/s.....	<b>193</b>

<b>Εικ. 6.15</b>	Χαρακτηριστική τρισδιάστατη άποψη της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι υπό μελέτη θέσεις τοποθέτησης των Α/Γ.....	<b>194</b>
<b>Εικ. 6.16</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 25 μέτρων (οροφή κτιρίου).....	<b>195</b>
<b>Εικ. 6.17</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 25 μέτρων (οροφή κτιρίου).....	<b>195</b>
<b>Εικ. 6.18</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) .....	<b>196</b>
<b>Εικ. 6.19</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας).....	<b>196</b>
<b>Εικ. 6.20</b>	(α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα x στην εξεταζόμενη θέση .....	<b>197</b>
<b>Εικ. 6.21</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.16 (β) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση...	<b>198</b>
<b>Εικ. 6.22</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.16 (γ) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση..	<b>198</b>
<b>Εικ. 6.23</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 18 μέτρων (οροφή κτιρίου).....	<b>199</b>
<b>Εικ. 6.24</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 18 μέτρων (οροφή κτιρίου).....	<b>199</b>
<b>Εικ. 6.25</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας).....	<b>200</b>
<b>Εικ. 6.26</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 23 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) .....	<b>200</b>
<b>Εικ. 6.27</b>	(α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα x στην εξεταζόμενη θέση .....	<b>201</b>
<b>Εικ. 6.28</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.24 (β) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση...	<b>202</b>
<b>Εικ. 6.29</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.24 (γ) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση..	<b>202</b>
<b>Εικ. 6.30</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 7 μέτρων (οροφή κτιρίου) .....	<b>203</b>
<b>Εικ. 6.31</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 7 μέτρων (οροφή κτιρίου).....	<b>203</b>
<b>Εικ. 6.32</b>	Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 12 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) .....	<b>204</b>
<b>Εικ. 6.33</b>	Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 12 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) .....	<b>204</b>
<b>Εικ. 6.34</b>	(α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και ροή της τύρβης σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα x στην εξεταζόμενη θέση .....	<b>205</b>
<b>Εικ. 6.35</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.34 (β) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση...	<b>206</b>
<b>Εικ. 6.36</b>	Λεπτομέρεια εικόνας 6.34 (γ) Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση...	<b>206</b>
<b>Εικ. 6.37</b>	Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 1 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s.....	<b>207</b>
<b>Εικ. 6.38</b>	Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 2 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s.....	<b>208</b>
<b>Εικ. 6.39</b>	Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 3 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s.....	<b>209</b>
<b>Εικ. 6.40</b>	Μεταβολή της ταχύτητας στις θέσεις μελέτης 1, 2 και 3 σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα προσομοίωσης.....	<b>210</b>
<b>Εικ. 6.41</b>	Καμπύλες ισχύος (power curve) ανεμογεννητριών Qr5 και Ws12.....	<b>211</b>
<b>Εικ. 6.42</b>	Κατανομή Weibull θέσης 1.....	<b>211</b>

<b>Εικ. 6.43</b>	Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας ανεμογεννητριών Qr5και Ws12 στη θέση 1.....	<b>212</b>
<b>Εικ. 6.44</b>	Κατανομές Weibull για τις θέσεις 1 και 2.....	<b>213</b>
<b>Εικ. 6.45</b>	Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας ανεμογεννητριών Qr5και Ws12 στη θέση 2.....	<b>214</b>
<b>Εικ. 6.46</b>	Κατανομές Weibull για τις θέσεις 1,2 και 3.....	<b>215</b>
<b>Εικ. 6.47</b>	Καμπύλη ισχύος (power curve) ανεμογεννήτριας Ws12.....	<b>215</b>
<b>Εικ. 6.48</b>	Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας ανεμογεννήτριας Ws12στη θέση 3.....	<b>216</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

---

A/Γ	: Ανεμογεννήτρια/ες
Φ/Β	: Φωτοβολταϊκά
H/Z	: Ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος
A.Ε.Π.	: Αναμενόμενη Ενεργειακή Παραγωγή
A.Ο.Σ	: Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα
A.Π.Ε.	: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΔΜΗΕ	: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
AWEA	: American Wind Energy Association
ΔΕΗ	: Δημόσια Εταιρία Ηλεκτρισμού
ΔΕΠΑ	: Δημόσια Επιχείρηση Αερίου
ΔΕΣΜΗΕ	: Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
DWIA	: Danish Wind Industry Association
E.K.E.T.A.	: Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης
ΕΛΕΤΑΕΝ	: Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας
ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.	: Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών
E.M.Y.	: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία
EEA	: European Environment Agency
HWEA	: Hellenic Wind Energy Association
I.Γ.Μ.Ε.	: Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών
ΙΤΕΣΚ	: Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων
IEA	: International Energy Agency
ΚΑΠΕ	: Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
ΛΑΓΗΕ	: Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
NREL	: National Renewable Energy Laboratory
NOAA	: National Oceanic and Atmospheric Administration
ΟΟΣΑ	: Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
ΡΑΕ	: Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
T.E.E.	: Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας
TOTEE	: Τεχνικές Οδηγίες Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας
UWT/s	: Urban Wind Turbine/s
SWT/s	: Small Wind Turbine/s
HAWT/s	: Horizontal Axis Wind Turbine/s
VAWT/s	: Vertical Axis Wind Turbine/s
C.F.D	: Computational fluid dynamics (Πρόγραμμα Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής)



---

# 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

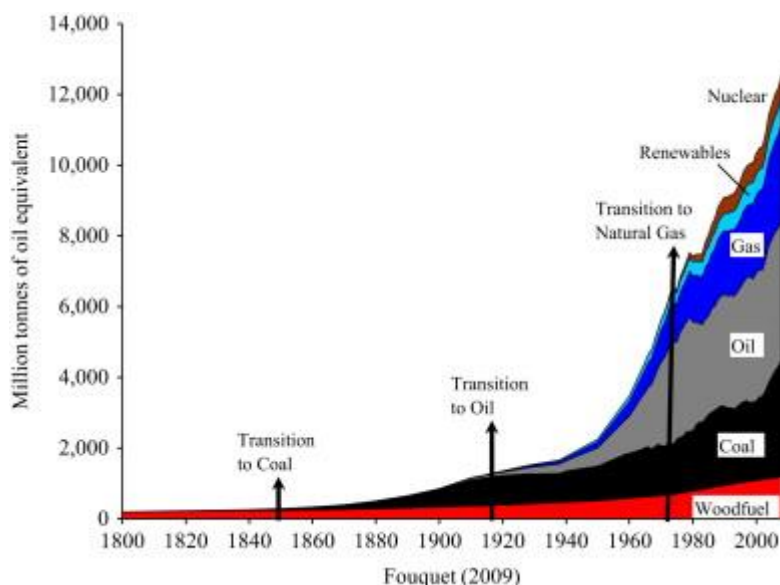
### 1.1 ΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΖΗΤΗΜΑ ΣΗΜΕΡΑ

---

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Οποιαδήποτε μορφή δράσης από τα παιδικά παιχνίδια μέχρι τη λειτουργία των μηχανών και από το μαγείρεμα τροφών μέχρι τη γραμμική παραγωγή στο εργοστάσιο προϋποθέτει κατανάλωση ενέργειας. Οι πράγματι πολυποίκιλες μορφές ενέργειας βρίσκονται πίσω από την ασύλληπτη ποικιλία των φυσικών φαινομένων. Έτσι, από την αρχαιότητα ακόμα, ο άνθρωπος χρησιμοποίησε όλα τα στοιχεία της φύσης (αέρας, νερό, κ.ά.) για την παραγωγή ενέργειας και κατ' επέκταση τη διευκόλυνση της ίδιας της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Μιλώντας σήμερα για το ενεργειακό ζήτημα πρέπει να προσεγγίσουμε μία σειρά παραμέτρων που βρίσκονται στην βάση του. Τα στοιχεία που έχουμε σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας της ανθρώπινης κοινωνίας, από την Νεολιθική εποχή μέχρι σήμερα είναι εντυπωσιακά. Στις τροφοσυλεκτικές κοινωνίες (γύρω στο 10.000 π.Χ.) λίγο πριν την νεολιθική εποχή, πριν δηλαδή ο άνθρωπος εγκαθιδρύσει το γεωργικό σύστημα το οποίο όλοι γνωρίζουμε, ο μέσος κυνηγός τροφοσυλέκτης (ο μέσος εργαζόμενος της εποχής) κατανάλωνε όχι παραπάνω από 2.500 θερμίδες την ημέρα για το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεών του, είτε ήταν τροφή, είτε ήταν θέρμανση, είτε άλλες ενεργειακές απαιτήσεις. Σήμερα καταναλώνουμε κατά μέσο όρο παγκοσμίως πάνω από 31.000 θερμίδες ο καθένας μας, 12 φορές παραπάνω από τον παλαιολιθικό άνθρωπο. Στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης ή στα πλαίσια των 24 πλέον ανεπτυγμένων χωρών του πλανήτη, των χωρών του ΟΟΣΑ, η κατανάλωση είναι γύρω στις 4 με 5 φορές παραπάνω από αυτό το 31.000. Δηλαδή καταναλώνουμε γύρω στις 120 με 150.000 θερμίδες την ημέρα, ανάλογα με την οικονομική μας δυνατότητα, το σπάταλο μοντέλο ζωής το οποίο ο καθένας από εμάς διάγει και φυσικά την χώρα στην οποία διαβεί [1].

Ειδικά μετά τη βιομηχανική επανάσταση η ζήτηση για παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας πολλαπλασιάστηκε. Κι αν πριν από λίγα χρόνια τα ενεργειακά αποθέματα φάνταζαν πολλά και η απεριόριστη χρήση και σπατάλη τους, απασχολούσε ελάχιστους επιστήμονες, η σημερινή κατάσταση δείχνει ότι η οπτική μας σε αυτό το ζήτημα πρέπει να αλλάξει ριζικά. Στην εποχή της πληροφορικής και της βιοτεχνολογίας η ενεργειακή ζήτηση είναι πολλαπλάσια απ' ό τι πριν μερικά χρόνια. Ενδεικτικό της κατάστασης είναι ότι η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 μέχρι σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950 [2] (Εικ.1.1). Παρόλα αυτά η παραγωγή και κατανάλωση ορυκτών καυσίμων ολοένα αυξάνεται στο βωμό της καπιταλιστικής ανάπτυξης και του λεγόμενου δυτικού τρόπου ζωής που σαν αποτέλεσμα έχει και μια ολοένα και αυξανόμενη, σχεδόν ακόρεστη, ζήτηση για ενέργεια.

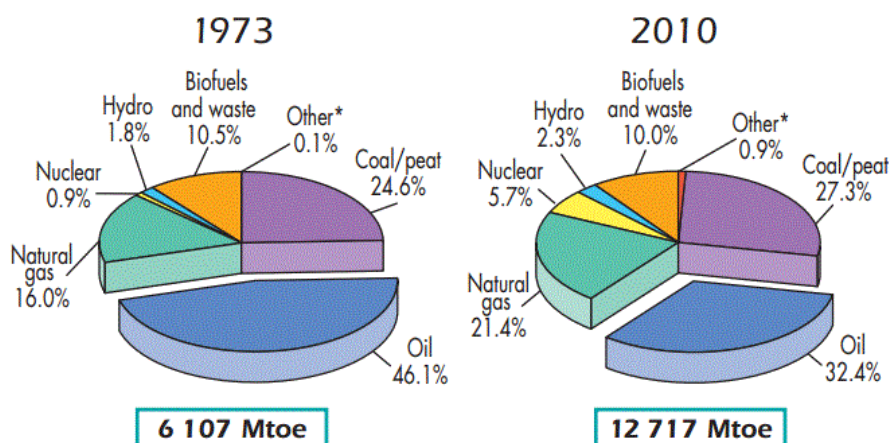


**Εικ. 1.1** Παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση, 1800-2010

[Πηγή: «Past and prospective energy transitions: Insights from history», R. Fouquet, 2012]

Στα παραπάνω τον καθοριστικό ρόλο παίζουν οι χώρες του λεγόμενου δυτικού κόσμου και ιδιαίτερα οι πιο πλούσιες από αυτές με πρωταθλήτριες στην κατανάλωση τις ΗΠΑ. Η παρούσα ενεργειακή κατάσταση του πλανήτη έχει ως εξής: τα 2/3 της συνολικής παραγόμενης ενέργειας καταναλώνονται από το 1/5 του πληθυσμού του πλανήτη (ανεπτυγμένες χώρες) [3].

### 1973 and 2010 fuel shares of TPES



**Εικ. 1.2** Παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση του πλανήτη τα έτη 1973 και 2010

[Πηγή: Key World Energy Statistics, IEA, 2012]

Σε αυτό το εφιαλτικό σενάριο έρχονται να προστεθούν και οι δύο αναπτυσσόμενοι πληθυσμιακοί γίγαντες, η Κίνα και η Ινδία, οι οποίες έχουν εισέλθει δυναμικά στη παγκόσμια βιομηχανική παραγωγή με πολύ υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης. Οι χώρες αυτές φαντάζουν ενεργειακά αδηφάγες και δεν δείχνουν ασφαλώς πρόθυμες να περιορίσουν τους ρυθμούς

ανάπτυξης τους για χάρη της εξοικονόμησης ενέργειας. Προσπαθούν να αναπτυχθούν με βάση το μοντέλο με το οποίο άνθησαν οι βιομηχανικές οικονομίες της Δύσης παλαιότερα. Σύμφωνα με αυτά τα δεδομένα οι επιστήμονες δεν μπορούν να κάνουν μια ακριβή πρόβλεψη σχετικά με τις παγκόσμιες ενεργειακές απαιτήσεις, αλλά το μόνο στο οποίο συμφωνούν είναι πως αργά ή γρήγορα τα διαθέσιμα κοιτάσματα ορυκτών καυσίμων θα αρχίσουν να λιγοστεύουν επικίνδυνα.

Προφανώς δεν πρέπει να παραγνωρίσουμε ότι αυτή η ραγδαία ανάπτυξη συνέβαλε στη βελτίωση του επιπέδου ζωής πολλών εκατομμυρίων ανθρώπων, καθώς έλυσε προβλήματα μετακίνησης με την χρησιμοποίηση των αυτοκινήτων ή με τις πολλές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές καθώς και εγκαταστάσεις θέρμανσης και κλιματισμού. Από την άλλη θα πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι η βελτίωση αυτή αφορά ένα μερικό ποσοστό του ανθρώπινου πληθυσμού καθώς ακόμα και σήμερα 3 δις άνθρωποι περίπου ζουν κάτω από τα όρια της φτώχειας.

## 1.2 ΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 1.2.1 Εισαγωγή στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι τελευταίοι δύο αιώνες της παγκόσμιας ιστορίας χαρακτηρίστηκαν από πρωτοφανή ανάπτυξη σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας και συνακόλουθη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων του πλανήτη. Κυρίαρχο χαρακτηριστικό του μοντέλου ανάπτυξης της περιόδου αυτής ήταν, και παραμένει, η συνεχώς αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη της βιομηχανικής και οικιακής κατανάλωσης. Η ανάγκη για ολοένα και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας, εξυπηρετήθηκε από την εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, η χρήση των οποίων, ήδη από τις αρχές του 19ου αιώνα όταν ο James Watt διατύπωσε τις αρχές για την κατασκευή της ατμομηχανής, επέτρεψε την αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική παραγωγή ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα.

Στην Ελλάδα, η περίοδος 1970 – 2007, εμφανίζει σημαντική αύξηση της ζήτησης ενέργειας, παρά τις δύο ενεργειακές κρίσεις, του 1973 και του 1990, που μεσολαβούν. Η αυξανόμενη ζήτηση ικανοποιείται κυρίως από ηλεκτρισμό που παράγεται από την καύση λιγνίτη, ενός καυσίμου το οποίο είναι φτωχό ενεργειακά και σημαντικά ρυπογόνο για το περιβάλλον, πλην όμως φθηνό και εγχώριο. Η πολιτική αυτή ανταποκρίθηκε στις απαιτήσεις των καιρών, εξασφαλίζοντας χαμηλό κόστος ενέργειας καθώς και την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας, προστατεύοντάς παράλληλα την οικονομία από τις έντονες διακυμάνσεις της τιμής των εισαγόμενων καυσίμων.

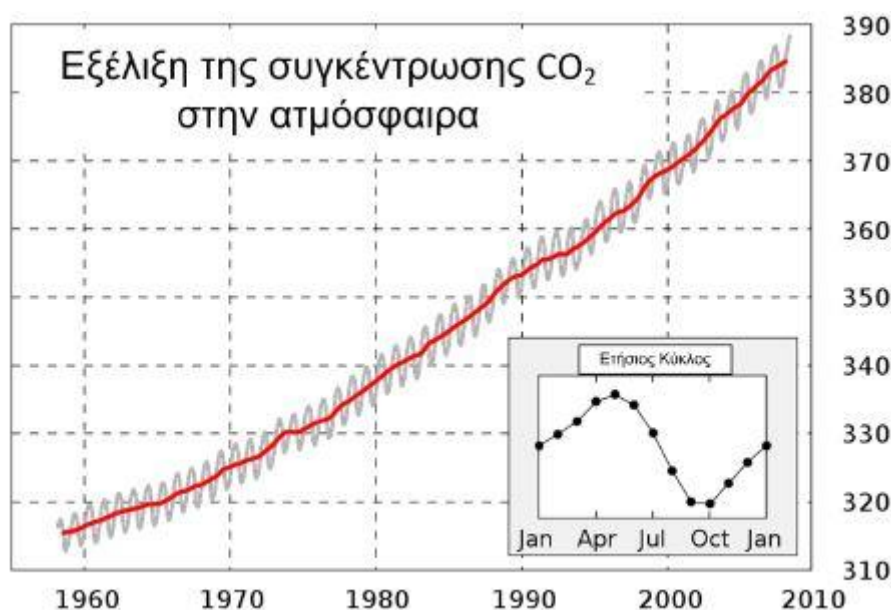
Σήμερα όμως αυτό το μοντέλο ανάπτυξης αμφισβητείται ολοένα και περισσότερο λόγω της διαφαινόμενης αδυναμίας του να εγγυηθεί μια αειφόρο ανάπτυξη. Οι βασικότεροι πυλώνες στους οποίους εδράζεται η άποψη όσων απαιτούν άμεσο και ολοκληρωτικό μετασχηματισμό αυτού του προτύπου ενεργειακής παραγωγής, είναι η σημαντική ρύπανση που προκαλεί καθώς και οι αβεβαιότητες που περιέχει σχετικά με την ενεργειακή ασφάλεια των οικονομιών του πλανήτη.

Η αλόγιστη χρήση των ορυκτών καυσίμων οδηγεί, σύμφωνα με μελέτες, στην υπερθέρμανση του πλανήτη λόγω της έξαρσης του φαινομένου του θερμοκηπίου. Έντεκα από τις δώδεκα θερμότερες χρονιές που καταγράφηκαν ποτέ ήταν μεταξύ 1995 και 2006 [4]. Η υπερθέρμανση εκφράζεται με σημαντική αύξηση των επεισοδίων ξηρασίας, με ακραίους τυφώνες όπως ο Κατρίνα ή με καύσωνες όπως αυτός του 2003 που προκάλεσε τον θάνατο 70.000 ανθρώπων στην Ευρώπη [5]. Ο κατάλογος των συνεπειών της υπερθέρμανσης είναι μακρύς: άνοδος της στάθμης της θάλασσας, εξαφάνιση ειδών χλωρίδας και πανίδας,

αυξημένη ερημοποίηση και έλλειψη αποθεμάτων νερού σε συνδυασμό με την απειλή της τήξης των παγετώνων και ένα νέο κύκλο οδυνηρότερων καταστροφών.

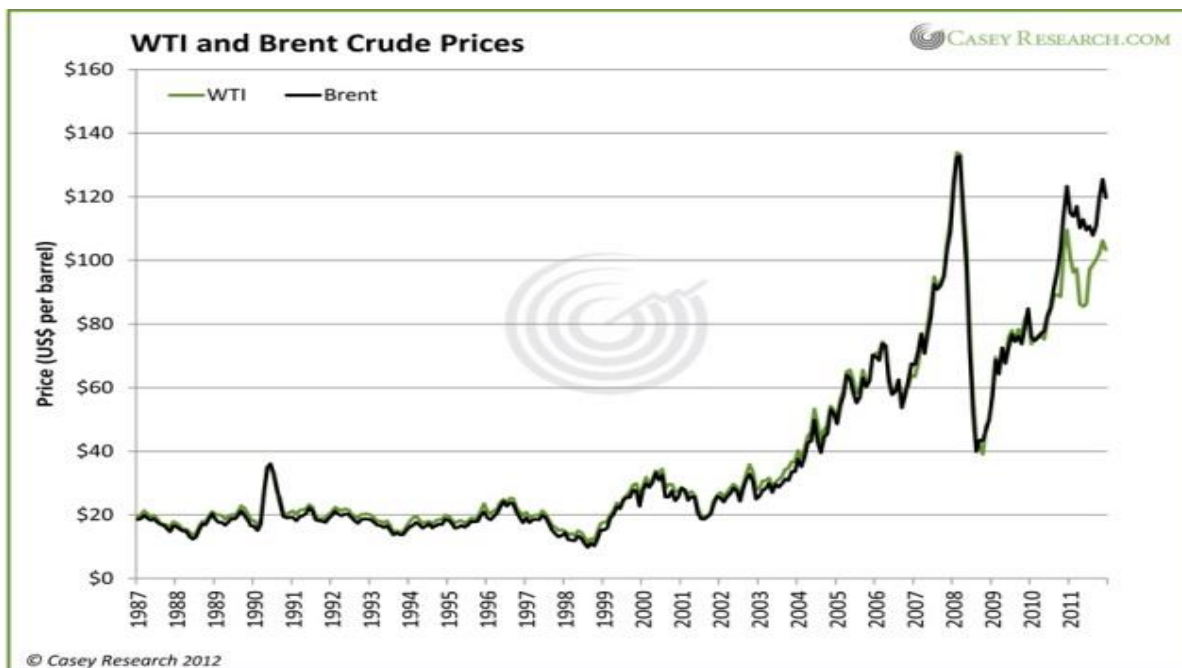
Οι επιπτώσεις της κλιματικής υπερθέρμανσης μελετήθηκαν αναλυτικά στην έκθεση Stern [6], που συντάχθηκε κατά παραγγελία της βρετανικής κυβέρνησης, από την ομάδα διακυβερνητικών εμπειρογνομόνων για την εξέλιξη του κλίματος. Στην έκθεση αυτή διαπιστώνεται ότι η χρήση ορυκτών καυσίμων και η αποδάσωση αύξησαν την συγκέντρωση CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα από 280 ppm, στην αρχή της βιομηχανικής εποχής, σε 338 ppm σήμερα. Από το 1850, η θερμοκρασία κατά μέσο όρο αυξήθηκε κατά 0,8 βαθμούς Κελσίου. Ακόμη και αν κανείς σταματούσε εντελώς σήμερα την εκπομπή CO<sub>2</sub>, η θερμοκρασία θα συνέχιζε να αυξάνεται κατά 0,5°, γιατί η υπερθέρμανση των ωκεανών συντελείται με καθυστέρηση.

Η προβολή των τάσεων του παρελθόντος στα μελλοντικά έτη δείχνει ότι η συγκέντρωση CO<sub>2</sub> θα αυξάνονταν από 338 ppm σε 560 ppm στα τέλη του 21ου αιώνα. Ο διπλασιασμός του CO<sub>2</sub>, σε σχέση με την τιμή στην αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, θεωρείται ακραίο όριο του αποδεκτού κινδύνου. Πέρα από το όριο αυτό, κάθε απορρύθμιση είναι πιθανή. Η πιθανότερη εξέλιξη όμως θα ήταν πολύ πιο ραγδαία από αυτή που προκύπτει από την απλή προέκταση των τάσεων. Η είσοδος της Κίνας και της Ινδίας στον βιομηχανικό κόσμο συνιστά βέβαιο ότι θα φτάσουμε το κρίσιμο όριο των 560 ppm το 2050 και όχι στα τέλη του 21ου αιώνα. Ταυτόχρονα, ένα επιπλέον περίπλοκο πλήθος παραγόντων θα προστεθούν στις νέες εκπομπές CO<sub>2</sub>. Το λιώσιμο των πάγων και η υπερθέρμανση των ωκεανών θα απελευθέρωνε επίσης σημαντικές ποσότητες μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα που είναι εγκλωβισμένα στις θάλασσες. Παράλληλα, η τήξη των παγετώνων μειώνει την αντανάκλαση του ήλιου και συμβάλλει άμεσα στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Τέλος, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της Βρετανικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, εάν συνεχιστούν οι σημερινές εκπομπές CO<sub>2</sub>, ενδέχεται να οδηγήσουν σε αύξηση έως και 4 °C της παγκόσμιας θερμοκρασίας, έως το 2050 [7], με απρόβλεπτες κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες, που μπορεί να οδηγήσουν ακόμη και στην πολιτική αποσταθεροποίηση μεγάλων περιοχών. Συμπερασματικά, αν δεν αλλάξουμε τις συνήθειες μας έως το 2050 η ζήτηση για ενέργεια καθώς και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα έχουν διπλασιαστεί, ενώ η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια θα τριπλασιαστεί και τα 2/3 αυτής θα παράγονται από ορυκτά καύσιμα.



**Εικ. 1.3** Εξέλιξη της συγκέντρωσης CO<sub>2</sub> στην ατμόσφαιρα τα τελευταία 50 έτη  
[Πηγή: NOAA-Earth System Research Laboratory-Global Monitoring Division-Full Mauna  
Loa CO<sub>2</sub> record ]

Αναφορικά με την δεύτερη σημαντική παράμετρο, η οποία υπονομεύει την διατήρηση του ισχύοντος μοντέλου ενεργειακής παραγωγής ως έχει, σημειώνεται ότι η σημερινή παγκοσμιοποιημένη αγορά ενέργειας, χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα και αβεβαιότητα στις τιμές του πετρελαίου, του φυσικού αερίου και υπόλοιπων ορυκτών καυσίμων. Τα χαρακτηριστικά αυτά οφείλονται κυρίως στον περιορισμένο αριθμό των κρατών που έχουν άμεση πρόσβαση σε αυτόν ορυκτό πλούτο, σε συνδυασμό με τα φαινόμενα πολιτικής αστάθειας που εμφανίζονται συχνά στις περιοχές των χωρών αυτών, όπως για παράδειγμα στην Μέση Ανατολή. Συνεπώς είναι επιτακτική η ανάγκη κατάλληλης διαχείρισης του ρίσκου με τεχνικές που θα εξασφαλίζουν την πρόοδο και την ευημερία των κοινωνιών, εγγυώμενες, στο μέτρο του δυνατού, την στρατηγική ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού.



*Εικ. 1.4 Εξέλιξη της τιμής του πετρελαίου [Πηγή: caseyresearch.com]*

Την λύση σε αυτά τα μείζονος σημασίας προβλήματα μπορεί να δώσει η αυξημένη συμμετοχή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα. Όμως, ο περιορισμός των αρνητικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, η απαίτηση για ενεργειακή ασφάλεια, η επιδίωξη ανταγωνιστικών τιμών ενέργειας μακροπρόθεσμα, καθώς και η ανάγκη παροχής υψηλής ποιότητας ενεργειακών υπηρεσιών στους καταναλωτές, δεν επιτυγχάνονται με ημίμετρα. Απαιτούν πολιτικές τομές, μεγάλες μακροπρόθεσμες και βιώσιμες επενδύσεις, και πάνω απ' όλα αλλαγή κουλτούρας αναφορικά με τον τρόπο διαχείρισης της ενέργειας.

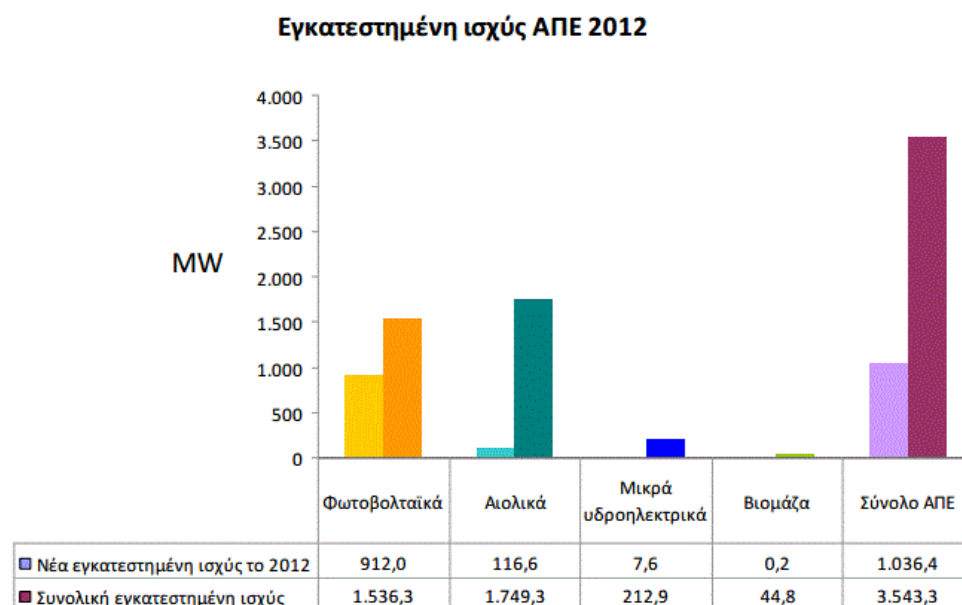
Οι ΑΠΕ, αν αποτελέσουν βασικό συστατικό ενός νέου ενεργειακού δόγματος, μπορούν να καλύψουν σημαντικό μέρος της ενεργειακής ζήτησης των αναπτυσσόμενων χωρών σε σύντομο σχετικά χρονικό διάστημα, με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Το πρόβλημα δεν είναι 'τεχνικό'. Το ουσιώδες ζήτημα είναι η υιοθέτηση του στρατηγικού στόχου, η διαμόρφωση αποτελεσματικών πολιτικών και η διάθεση των αναγκαίων πόρων. Η διαμόρφωση ενός μακροπρόθεσμου σχεδίου δράσης, με γνώμονα την βιωσιμότητα, είναι επιτακτική τόσο σε παγκόσμια όσο και εγχώρια κλίμακα, ώστε να αντιμετωπιστούν έγκαιρα και αποτελεσματικά οι περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις. Ιδιαίτερα σε εθνικό επίπεδο, οι παρεμβάσεις και οι αλλαγές στο ενεργειακό μοντέλο φαντάζουν επιβεβλημένες στην προσπάθεια να επιτευχθεί η έξοδος της χώρας από την σημερινή οικονομική κρίση, μέσω σημαντικών επενδύσεων στον τομέα της ενέργειας τα επόμενα χρόνια [8].

Παράλληλα η προώθηση των ΑΠΕ συνάδει και με την εκπλήρωση των δεσμεύσεων που έχει αναλάβει η χώρα μας, ως κράτος μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Με την οδηγία του Απριλίου 2009, για πρώτη φορά, η Ευρωπαϊκή Ένωση θεσπίζει δεσμευτικό στόχο για τις ΑΠΕ. Σύμφωνα με την οδηγία αυτή, η Ελλάδα πρέπει να πετύχει έως το τέλος του 2020, το 18% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ [9]. Πρόσφατα, η ελληνική πολιτεία προχώρησε σε αύξηση της συμβατικής δέσμευσης της χώρας κατά 2%. Είναι σαφές, ότι η επίτευξη του στόχου αυτού βασίζεται κυρίως στις αλλαγές που θα γίνουν στον κλάδο της ηλεκτροπαραγωγής, μεταφράζοντας το ποσοστό του 20% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας, σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Τα αποτελέσματα της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στον τομέα των ΑΠΕ, ακόμη και με τις παλαιότερες μη δεσμευτικές οδηγίες, είναι ήδη ορατά. Χαρακτηριστικό στοιχείο είναι ότι με βάση τα στοιχεία της τελευταίας δεκαετίας, η νέα εγκατεστημένη ισχύς στην ΕΕ είχε την ακόλουθη κατανομή [10]:

- Φυσικό Αέριο 50%
- ΑΠΕ 38%
- Υπόλοιπες Συμβατικές Πηγές 12%

Όμως, το πλέον εντυπωσιακό στοιχείο είναι ότι κατά το έτος 2009 το μεγαλύτερο ποσοστό νέας εγκατεστημένης ισχύος προήλθε από ΑΠΕ, ενώ ταυτόχρονα μειώθηκε σημαντικά η εγκατεστημένη ισχύς των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής. Η αιολική ενέργεια απολαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό νέας εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, συμβατικές ή μη (Εικ. 1.5).



*Εικ. 1.5 Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. 2012 [Πηγή: ΑΕΓΗΕ 2012]*

Η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής της χώρας, μπορεί να αποδώσει πολλαπλά οφέλη, καθώς πρόκειται για τεχνολογίες με ουσιαστικά ανεξάντλητους πόρους (αέρας, ήλιος κλπ). Παράλληλα, προσφέρουν γνωστό και προβλέψιμο κόστος παραγωγής ενέργειας, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με μεγάλη ακρίβεια για τα επόμενα 20-25 χρόνια, όσος είναι και ο κύκλος ζωής επενδύσεων, περιορίζοντας τις αρνητικές επιπτώσεις από τις διακυμάνσεις του κόστους καυσίμων. Το κόστος όλων των τεχνολογιών ΑΠΕ μειώνεται σημαντικά σε αναλογία με την εκτεταμένη χρήση τους και την μαζική παραγωγή τους, ακολουθώντας τυπικό μοντέλο οικονομίας κλίμακας.

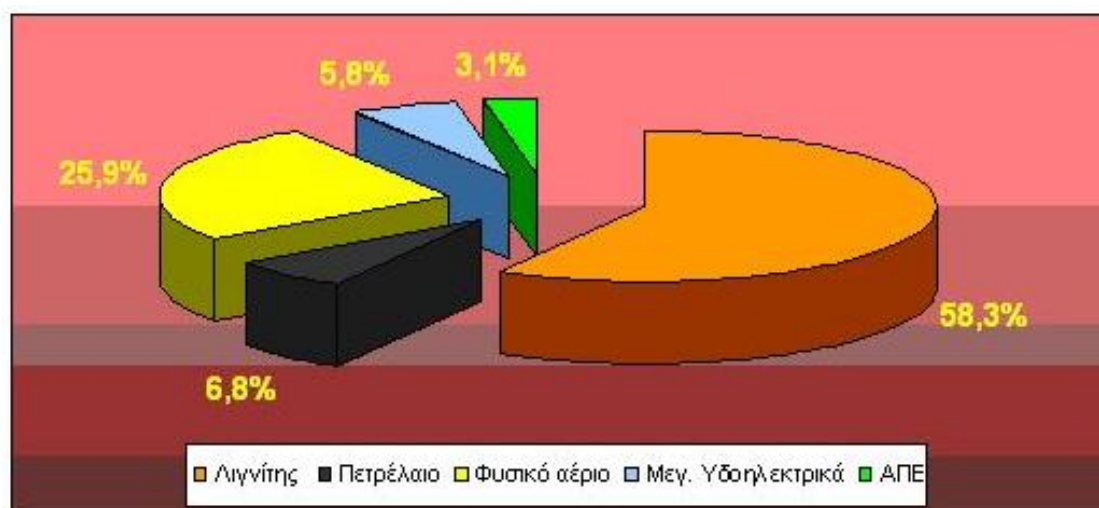
Παράλληλα, πρέπει να επισημανθούν η σημαντική συμβολή των ΑΠΕ στην δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, μέσω εισροής μεγάλων κεφαλαίων για την υλοποίηση επενδύσεων, και μεσοπρόθεσμη μείωση των τιμών της ενέργειας που προκαλούν προς όφελος των καταναλωτών, εκτοπίζοντας ποσοστό των ακριβών, με οικονομικούς και περιβαλλοντικούς όρους(1), συμβατικών μονάδων.

Η ενσωμάτωση του περιβαλλοντικού κόστους στην διαδικασία λήψης των αποφάσεων στον τομέα της ενέργειας, οδηγεί στην αναθεώρηση της μέχρι πρότινος επικρατούσας άποψης, που κατέτασσε τις τεχνολογίες ΑΠΕ ως τις πλέον ακριβές. Στο νέο σύστημα αξιών που διαμορφώνεται, οι περισσότερες από τις τεχνολογίες αυτές εμφανίζονται ήδη ανταγωνιστικές και ώριμες να αναλάβουν ένα σημαντικό μερίδιο της ηλεκτροπαραγωγής, συμπεριλαμβάνοντας ταυτόχρονα την συμμετοχή του φυσικού αερίου και των στερεών καυσίμων, οδηγώντας τελικά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα δομικό μετασχηματισμό.

Η επιταχυνόμενη διείσδυση των ΑΠΕ, και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που τις συνοδεύουν, απαιτούν την άμεση αναθεώρηση των κανόνων λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος και ανάπτυξη νέων τεχνικών υποδομών, οι οποίες θα εξασφαλίσουν την αξιόπιστη και απρόσκοπτη εξυπηρέτηση των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτελεσματική διαχείριση του κόστους.

Η εγγενής στοχαστικότητα των ΑΠΕ, επιβάλλει τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη επικουρικών υπηρεσιών για την εξισορρόπηση του ηλεκτρικού συστήματος, όπως τα έργα αντλησιοταμίευσης, καθώς και επενδύσεις σε έργα υποδομής του δικτύου μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, η αυτοματοποιημένη διαχείριση των δικτύων και των μετρήσεων θα συμβάλει στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και στην διαμόρφωση καλύτερης τιμολογιακής πολιτικής προς όφελος των καταναλωτών [7].

Τέλος, σημαντικός παράγοντας για την επίτευξη της μεγάλης διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της χώρας είναι και η διασύνδεση των νησιών, ώστε να περιοριστεί ή να ακόμη και να εξλειφθεί η χρήση των τοπικών συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, με ταυτόχρονη αξιοποίηση, στο μέγιστο βαθμό, του πλούσιου δυναμικού (αιολικό, ηλιακό) που εμφανίζεται στις περιοχές αυτές [11]



**Εικ. 1.6** Εγχώρια παραγωγή Η.Ε. ανα μορφή καυσίμου – Διασυνδεδεμένο σύστημα  
[Πηγή: ΔΕΣΜΗΕ 2008]

Το 2005, ο καθηγητής γεωγραφίας και φυσιολογίας του πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, Jared Diamond, στο βιβλίο του με τίτλο Κατάρρευση [12], ανέλυσε τον τρόπο με τον οποίο

διάφοροι πολιτισμοί υπέκυψαν στις οικολογικές καταστροφές που είχαν προκαλέσει. Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, οι καταστροφές είναι αποτέλεσμα τεσσάρων ειδών σφαλμάτων: της αδυναμίας πρόβλεψης των προβλημάτων που προκαλούνται, του ορθού εντοπισμού τους όταν εκδηλώνονται, της έκφρασης βούλησης να λυθούν όταν εντοπίζονται, και της επιτυχούς επίλυσης τους, όταν έχει εκφραστεί η βούληση να συμβεί αυτό. Έχουμε ήδη περάσει στην τρίτη φάση. Τα προβλήματα δεν προβλέφθηκαν, έχουν όμως πια εντοπιστεί. Απομένει να εκφραστεί η συλλογική βούληση να τα αντιμετωπίσουμε, και να ελπίζουμε ότι αυτή η βούληση να οδηγήει στα μέσα επίλυσης τους.

*(1) Από το 2013 καταργείται η δωρεάν διανομή ρύπων στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ΔΕΗ θα καλείται να καταβάλει περίπου 1,4 δις €/έτος για την αγορά δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων που εκπέμπονται από την λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.*

## 1.2.2 Μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Σύμφωνα με το νόμο 3468/2006 του Ελληνικού συντάγματος, ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται οι μη ορυκτές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η ενέργεια κυμάτων, η παλιρροϊκή ενέργεια, η βιομάζα, τα αέρια που εκλύονται από χώρους υγειονομικής ταφής και από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού, τα βιοαέρια, η γεωθερμική ενέργεια, η υδραυλική ενέργεια που αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς. Πρόκειται για οι ενεργειακές πηγές, οι οποίες υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Είναι οι πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, σχεδόν αποκλειστικά, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, οπότε και στράφηκε στην εντατική χρήση του άνθρακα και των υδρογονανθράκων.

Χρησιμοποιούνται είτε άμεσα (κυρίως για θέρμανση) είτε μετατρέπομενες σε άλλες μορφές ενέργειας (κυρίως ηλεκτρισμό ή μηχανική ενέργεια). Υπολογίζεται ότι το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό απ' τις ΑΠΕ είναι πολλαπλάσιο της παγκόσμιας συνολικής κατανάλωσης ενέργειας. Η υψηλή όμως μέχρι πρόσφατα τιμή των νέων ενεργειακών εφαρμογών, τα τεχνικά προβλήματα εφαρμογής καθώς και πολιτικές και οικονομικές σκοπιμότητες που έχουν να κάνουν με τη διατήρηση του παρόντος στάτους κβο στον ενεργειακό τομέα εμπόδισαν την εκμετάλλευση έστω και μέρους αυτού του δυναμικού. Ειδικά στην Ελλάδα, που έχει μορφολογία και κλίμα κατάλληλο για νέες ενεργειακές εφαρμογές, η εκμετάλλευση αυτού του ενεργειακού δυναμικού θα βοηθούσε σημαντικά στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

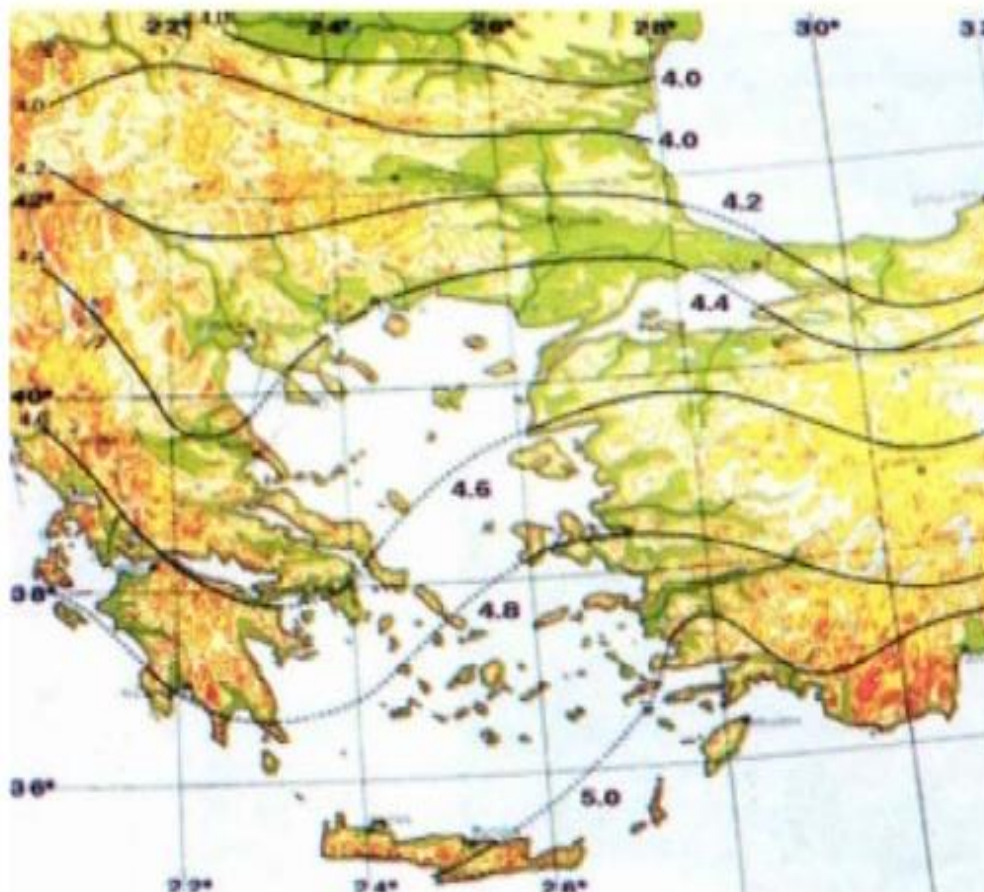
Οι Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν τις εξής μορφές:

### Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας που προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου. Η ηλιακή ενέργεια είναι πρωτογενής, ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας πρακτικά ανεξάντλητη και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευση της. Στο παρελθόν αποτελούσε την κύρια πηγή κάλυψης των θερμικών αναγκών του ανθρώπου αλλά πλέον συμβάλει στην προσπάθεια για διεύδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, δεδομένης και της ανάγκης για μείωση των ρύπων που εκλύονται από την καύση των συμβατικών καυσίμων. Αυτό πραγματοποιείται με την εκμετάλλευση του φωτοβολταϊκού φαινομένου και την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έχει ανακαλυφθεί από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα και από τότε τα φωτοβολταϊκά συνεχώς αναπτύσσονται σαν τεχνολογία. Πλέον επιτυγχάνουν απόδοση που ξεπερνάει το 20% και σε συνδιασμό με τη συνεχή μείωση του κόστους κατασκευής έχουν καταφέρει να εδραιωθούν στο χώρο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και είναι γεγονός ότι δεν μπορούν να



αποτελέσουν την κύρια πηγή ηλεκτροπαραγωγής μιας περιοχής, κυρίως λόγω των μεγάλων εκτάσεων γης που θα απαιτούνταν, εντούτοις μπορούν να αντικαταστήσουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό τις συμβατικές μορφές. Παρόλα αυτά, η εφαρμογή τους ενδείκνυται σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του έτους αφού δίνει τη δυνατότητα ενεργειακής αυτονομίας σε μη διασυνδεδεμένες περιοχές και κρίνεται οικονομικά συμφέρουσα λόγω κυρίως της ισχύουσας νομοθεσίας η οποία και ενθαρρύνει τη χρήση τους. Το μέλλον κρίνεται ευοίωνο για τα συστήματα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας, αφού υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για τη βελτίωση της λειτουργίας τους και γενικότερα για την μεγαλύτερη συνειρφορά τους στην ενεργειακή παραγωγή της χώρας [13].



*Εικ. 1.7 Μέση ημερησια ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας στην Ελλάδα ( $W/m^2$ )  
[Πηγή: [www.xlogik.gr](http://www.xlogik.gr)]*

### Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειάς της γης προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας έτσι τους ανέμους. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται «ήπια μορφή ενέργειας» και περιλαμβάνεται στις «καθαρές» πηγές όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν εκπέμπουν ή δεν προκαλούν ρύπους.

Την αιολική ενέργεια την εκμεταλλεύεται ο άνθρωπος από την αρχαιότητα, αρχικά με τη χρήση ιστίων στα πλοία και στη συνέχεια με την κατασκευή ανεμόμυλων. Σήμερα εκμετάλλευση το αιολικού δυναμικού, γίνεται με τη χρήση ανεμογεννητριών που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου, σε ηλεκτρισμό.

Η σημερινή τεχνολογία βασίζεται σε ανεμογεννήτριες ποικίλων ειδών που θα εξετάσουμε ενδελεχώς παρακάτω, με ισχύ που κυμαίνεται από μερικά Watt έως μερικές δεκάδες MWatt . Όπως θα δούμε στη συνέχεια όταν εντοπιστεί μια περιοχή με ικανό αιολικό δυναμικό–και εφόσον βέβαια έχουν προηγηθεί οι απαραίτητες μετρήσεις και μελέτες–για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες , οι οποίες απαρτίζουν ένα «αιολικό πάρκο» ή ακόμη μπορούν να τοποθετηθούν μεμονωμένες σε κατάλληλα σημεία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



(α)

(β)



(γ)

**Εικ. 1.8**

(α) Ανεμόμυλοι στην Ολλανδία, (β) Αιολικό πάρκο στη Γερμανία,  
(γ) Α/Γ συνδυασμένου τύπου Darrieus και Savonius στην Ταϊβάν  
[Πηγή: el.wikipedia.org]

Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας 5,1m/sec, σε ύψος 10 μέτρα πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με μεγαλύτερη ταχύτητα, τότε το αιολικό δυναμικό της περιοχής μπορεί να εκμεταλλευτεί και να δημιουργηθούν οικονομικά βιώσιμες εγκαταστάσεις [14]. Αν υπήρχε δυνατότητα

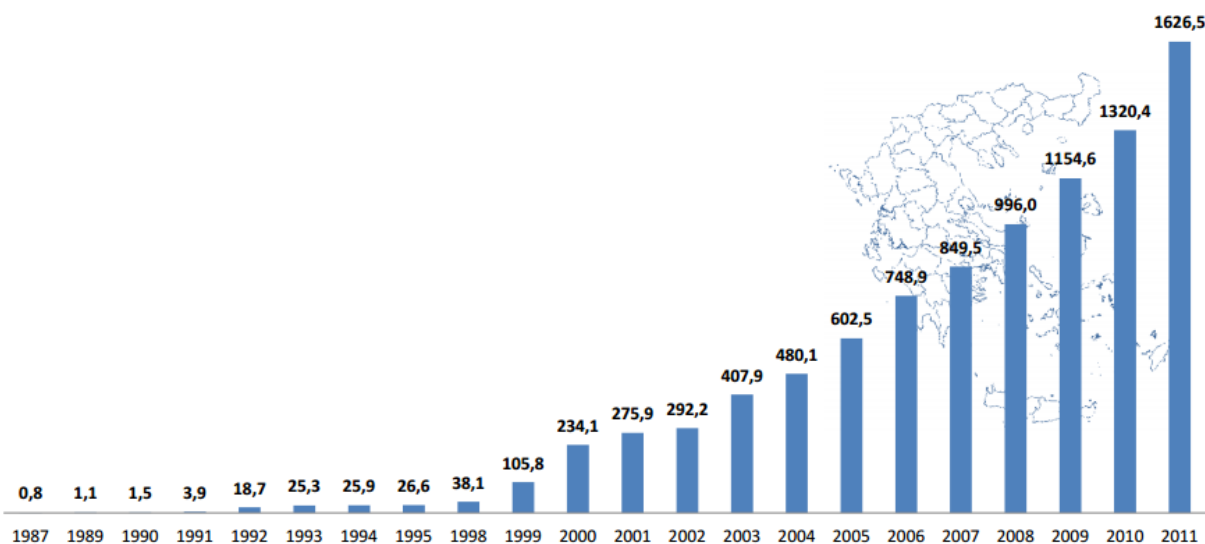
εκμετάλλευσης του συνόλου του αιολικού δυναμικού του πλανήτη, εκτιμάται ότι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από αυτή που θα χρειαζόταν.

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών είναι από τις πλέον ώριμες και μάλιστα στην Ελλάδα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ξεπερνά τα 1749,3 MW [15].

Η ισχύς αυτή κατανέμεται ως εξής:

- Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά : 287,9 MW
- Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα: 1461,4 MW

Άλλωστε, η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας [16]. Το 1982, η ΔΕΗ εγκατέστησε το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο και μετά ακολούθησαν αιολικά πάρκα στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Σάμο, στη Χίο, Λέσβο, Λήμνο και στην Κρήτη. Εκτός από τα αιολικά πάρκα όπου είναι εγκατεστημένες μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος 80kW-3MW και τροφοδοτούν απευθείας το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης, εγκαθίστανται και οι μικρές Α/Γ για εφαρμογές μικρής κλίμακας, κυρίως την ικανοποίηση οικιακών καταναλώσεων.



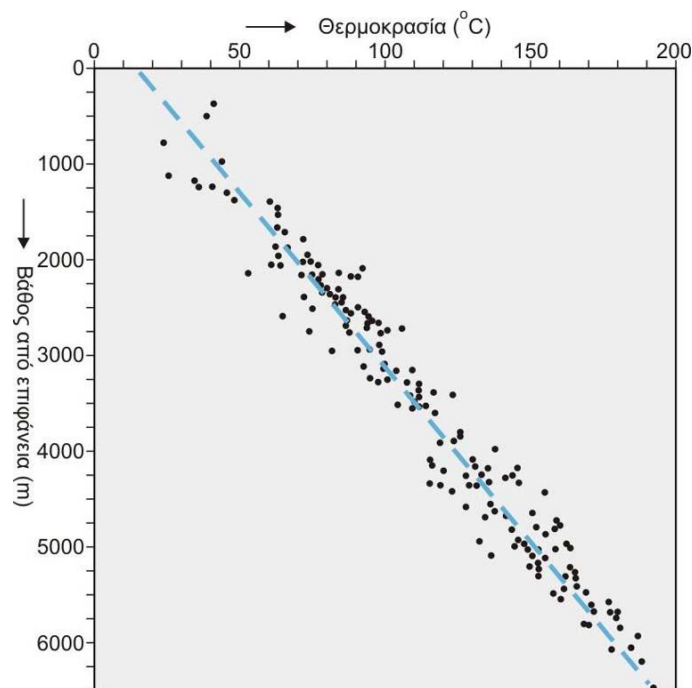
**Εικ. 1.9** Εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας (MW) στην Ελλάδα 1997-2011  
[Πηγή: «HWEA Wind Statistics 2011»]

### Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμική ενέργεια ή γεωθερμία ονομάζουμε τη φυσική ενέργεια της γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό
- Με ρεύματα μεταφοράς που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα σύνορα των λιθосφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Κοντά στην επιφάνεια της γης η γεωθερμική βαθμίδα έχει μέση τιμή περίπου 300 °C/ K m, ωστόσο υπάρχουν περιοχές που ονομάζονται γεωθερμικά πεδία όπου η γεωθερμική βαθμίδα ξεπερνά κατά πολύ τον μέσο όρο [17].



**Εικ. 1.10** Θερμοκρασία της γης σε σχέση με το βάθος  
[Πηγή: Pouchan P., 1995, - [www.geo.auth.gr](http://www.geo.auth.gr)]

Τέτοιες περιοχές στην Ελλάδα είναι τα ηφαιστειακά νησιά του Αιγαίου και περιοχές στη Μακεδονία. Μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο έχει η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την κάλυψη αναγκών του, καθώς είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις:

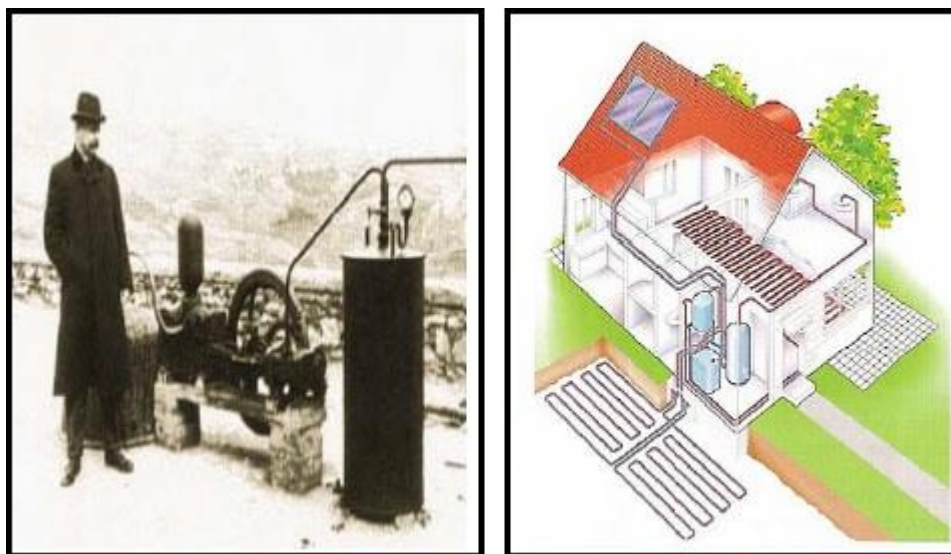
- Η Υψηλής Ενθαλπίας (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Η Μέσης Ενθαλπίας (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Η Χαμηλής Ενθαλπίας (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

Η γεωθερμική ενέργεια αξιοποιείται από γεωθερμικά συστήματα. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από τρία κύρια μέρη. Τον εναλλάκτη θερμότητας νερού (γεωεναλλάκτης - κλειστό ή ανοιχτό κύκλωμα), την αντλία θερμότητας και το εσωτερικό σύστημα διανομής της θερμότητας στο κτίριο (αεραγωγοί ή ενδοδαπέδια ή fan coil).

Η πρώτη βιομηχανική εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έγινε στο Lardarello της Ιταλίας, όπου από τα μέσα του περασμένου αιώνα χρησιμοποιήθηκε ο φυσικός ατμός για να εξατμίσει τα νερά που περιείχαν βορικό οξύ αλλά και να θερμάνει διάφορα κτίρια. Το 1904 έγινε στο ίδιο μέρος η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τη γεωθερμία (σήμερα παράγονται εκεί 2,5 δισ. kWh/έτος). Σπουδαία είναι η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας από την Ισλανδία, όπου καλύπτεται ένα πολύ μεγάλο μέρος των αναγκών της για ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση [18].

Λόγω κατάλληλων γεωλογικών συνθηκών, ο Ελλαδικός χώρος διαθέτει σημαντικές γεωθερμικές πηγές και των τριών κατηγοριών (υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας) σε οικονομικά βάθη (100-1500μ). Σε μερικές περιπτώσεις τα βάθη των γεωθερμικών ταμιευτήρων είναι πολύ μικρά, κάνοντας ιδιαίτερα ελκυστική, από οικονομική άποψη, τη γεωθερμική εκμετάλλευση. Ιδιαίτερα τα γεωθερμικά πεδία χαμηλής ενθαλπίας είναι

διάσπαρτα στη νησιωτική και ηπειρωτική Ελλάδα κι έτσι η συμβολή τους στο ενεργειακό ισοζύγιο μπορεί να γίνει σημαντική.



(α)

(β)



(γ)

**Εικ. 1.11**

- (α) Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε στο Larderello το 1904 κατά την πρώτη πειραματική απόπειρα παραγωγής Η.Ε. από γεωθερμικό ατμό [Πηγή: [www.boudouri.gr](http://www.boudouri.gr)],  
 (β) Οικία με εγκατεστημένο οριζόντιο σύστημα γεωθερμικής αντλίας [Πηγή: Greenpeace]  
 (γ) Εκτίμηση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα [Πηγή: Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών – Διεύθυνση Γεωθερμίας και Θερμομεταλλικών Υδάτων]

## **Βιομάζα**

Μια χρυσή τομή στον χώρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας είναι η εκμετάλλευση της βιομάζας. Εναλλακτικά, όλα τα οργανικά και αγροτικά υπολείμματα από τις καλλιέργειες, αλλά και από τις αστικές καταναλωτικές συνήθειες θα τροφοδοτούν με

ενέργεια, τα μέσα μεταφοράς και τους χώρους εργασίας και διαμονής μας. Η βιομάζα λαμβάνει δύο κύριες μορφές [19]:

- Τις υπολειμματικές μορφές
- Τις ενεργειακές καλλιέργειες

Στις υπολειμματικές μορφές περιλαμβάνονται:

- Αγροτικά υπολείμματα (άχυρα, κλαδέματα)
- Δασικά υπολείμματα (υλοτομία, καθαρισμοί)
- Υπολείμματα γεωργικών και δασικών βιομηχανιών (πηρυνόζυλο, πριονίδια, απόβλητα τυροκομείου)
- Απόβλητα κτηνοτροφίας (κοπριές, απόβλητα σφαγείων)
- Αστικά απόβλητα
- Οργανικό κλάσμα απορριμμάτων

Στις ενεργειακές καλλιέργειες, η πρώτη ύλη, η οποία καλλιεργείται δεν είναι κάποια συνηθισμένη μορφή, αλλά χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας ή βιοκαυσίμων. Στις ενεργειακές καλλιέργειες περιλαμβάνονται:

- Καλλιέργειες, με μη εμπορική διάθεση, όπως σόργο, ελαιοκράμβη, κενάφ.
- Καλλιέργειες και με εμπορική διάθεση, όπως σιτάρι, τεύτλα, ηλιάνθος, ευκάλυπτος.

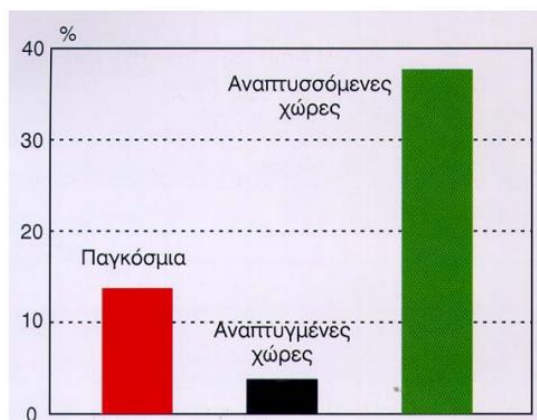
Αξίζει να αναφερθεί πως η ενέργεια που περιλαμβάνεται στο φυτικό κόσμο, προέρχεται από τον ήλιο. Τα φυτά μετατρέπουν, μέσω της φωτοσύνθεσης, την ηλιακή ενέργεια σε χημική – βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν την ενέργεια μέσα από την τροφή. Για την πρόσληψη της ενέργειας από αυτή την ύλη με οργανική προέλευση απαιτείται η κατάλληλη καύση. Η οργανική ύλη, αφού υποστεί πρωταρχικά μια σχετικά μηχανική κατεργασία – τροποποίηση (θρυμματισμός, παραγωγή συσσωματωμάτων, ή, pellets), υφίσταται καύση, από την οποία παράγεται το βιοκαύσιμο (στερεή, αέρια, υγρή μορφή), όπου καταλαμβάνει μικρότερη φαινόμενη πυκνότητα και μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα.

Για τις ανάγκες της θέρμανσης, χρησιμοποιούνται σόμπες και μικροί λέβητες, αυτόματης, ή, μη τροφοδοσίας, ενώ για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται μεγάλοι λέβητες. Από απόβλητα υψηλής υγρασίας και από το οργανικό μέρος απορριμμάτων, μέσω αναερόβιας χώνευσης παράγεται το βιοαέριο. Τέτοιες διεργασίες πραγματοποιούνται στους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (Χ.Υ.Τ.Α.). Το βιοαέριο διοχετεύεται απευθείας στους αγωγούς του φυσικού αερίου.

Παράλληλα, από τη βιομάζα προέρχεται και μια επανάσταση στο χώρο των καυσίμων που είναι η χρήση του βιοντίζελ και της βιοαιθανόλης. Το βιοντίζελ είναι ένας μεθυλεστέρας που προέρχεται από φυτικά έλαια, κατόπιν μετεστεροποίησης. Είτε μόνο του, είτε ως μείγμα χρησιμοποιείται σε πετρελαιοκινητήρες ντίζελ, εμφανίζοντας καλύτερη απόδοση και εκμηδενίζοντας της εκπομπές σε αέρια του θερμοκηπίου. Οι ίδιες συνθήκες ισχύουν και για τη βιοαιθανόλη. Με πρώτη ύλη τα σακχαρούχα, κυτταρινούχα και αμυλούχα φυτά (σιτάρι, σόργο, τεύτλα) και μέσω της χημικής διεργασίας της ζύμωσης και της απόσταξης, παράγεται η βιοαιθανόλη, η οποία επρόκειτο να υποκαταστήσει την βενζίνη

Η βιομάζα που παράγεται κάθε χρόνο στον πλανήτη μας υπολογίζεται ότι ανέρχεται σε 172 δις τόνους ξηρού υλικού, με ενεργειακό περιεχόμενο δεκαπλάσιο της ενέργειας που καταναλίσκεται παγκοσμίως στο ίδιο διάστημα. Το τεράστιο αυτό ενεργειακό δυναμικό παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος του ανεκμετάλλευτο, καθώς, σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις, μόνο το 1/7 της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας καλύπτεται από τη βιομάζα και αφορά κυρίως τις παραδοσιακές χρήσεις της (καυσόξυλα κλπ.) [20].

Στην Ελλάδα, τα κατ' έτος διαθέσιμα γεωργικά και δασικά υπολείμματα ισοδυναμούν ενεργειακά με 3 - 4 εκατ. τόνους πετρελαίου, ενώ το δυναμικό των ενεργειακών καλλιεργειών μπορεί, με τα σημερινά δεδομένα, να ξεπεράσει άνετα εκείνο των γεωργικών και δασικών υπολειμμάτων. Το ποσό αυτό αντιστοιχεί ενεργειακά στο 30 - 40% της ποσότητας του πετρελαίου που καταναλώνεται ετησίως στη χώρα μας. Σημειώνεται ότι 1 τόνος βιομάζας ισοδυναμεί με περίπου 0,4 τόνους πετρελαίου. Εντούτοις, με τα σημερινά δεδομένα, καλύπτεται μόλις το 3% περίπου των ενεργειακών αναγκών της με τη χρήση της διαθέσιμης βιομάζας [21].



**Εικ. 1.12** Η συμμετοχή της βιομάζας στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας  
[Πηγή: <http://www.cres.gr/energy-saving/images/pdf/biomassguide.pdf>]

Η βιομάζα στη χώρα μας χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή, κατά τον παραδοσιακό τρόπο, θερμότητας στον οικιακό τομέα (μαγειρική, θέρμανση), για τη θέρμανση θερμοκηπίων, σε ελαιουργεία, καθώς και, με τη χρήση πιο εξελιγμένων τεχνολογιών, στη βιομηχανία (εκκοκκιστήρια βαμβακιού, παραγωγή προϊόντων ξυλείας, ασβεστοκάμινοι κ.ά.), σε περιορισμένη, όμως, κλίμακα. Παρ' όλα αυτά, οι προοπτικές αξιοποίησης της βιομάζας στη χώρα μας είναι εξαιρετικά ευοίωνες, καθώς υπάρχει σημαντικό δυναμικό, μεγάλο μέρος του οποίου είναι άμεσα διαθέσιμο. Παράλληλα, η ενέργεια που μπορεί να παραχθεί είναι, σε πολλές περιπτώσεις, οικονομικά ανταγωνιστική αυτής που παράγεται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας.

### **Υδραυλική ενέργεια – Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα**

Η υδραυλική ενέργεια, η ενέργεια του νερού, είναι μια ανανεώσιμη, και αποκεντρωμένη πηγή ενέργειας που υπηρέτησε και υπηρετεί πιστά τον άνθρωπο στο δρόμο της ανάπτυξης. Πολυάριθμοι υδραυλικοί τροχοί, νερόμυλοι, υδροτριβεία, πριονιστήρια, κλωστοϋφαντουργεία και άλλοι μηχανισμοί υδροκίνησης συνεχίζουν ακόμη και σήμερα να χρησιμοποιούν τη δύναμη του νερού, συμβάλλοντας σημαντικά στην πρόοδο της τοπικής οικονομίας πολλών περιοχών, με απόλυτα φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο.

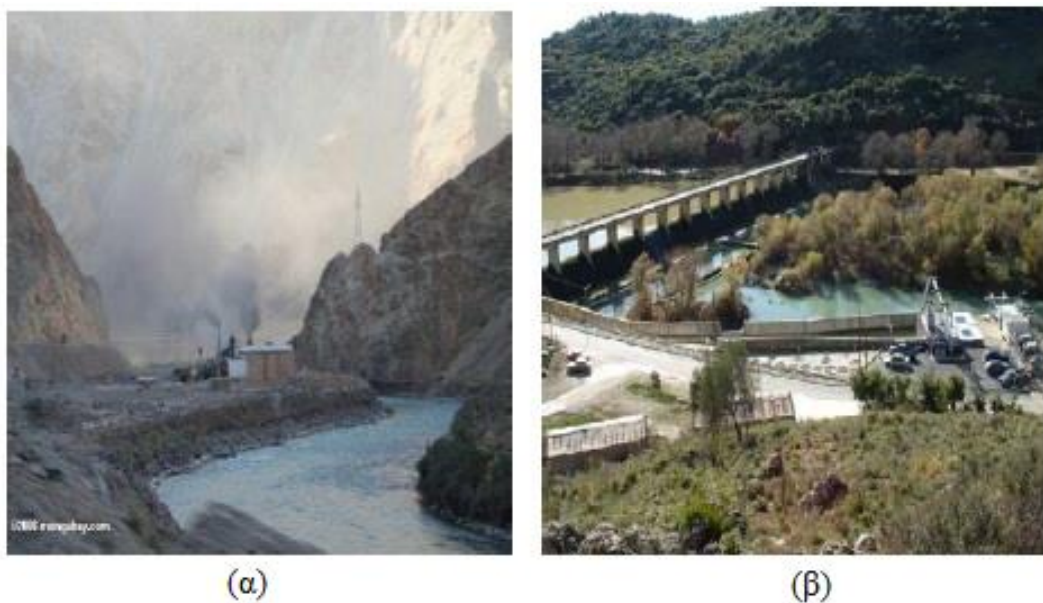
Σε πολλά σημεία του ελληνικού χώρου κάποιες παραδοσιακές, αλλά και σύγχρονες εγκαταστάσεις Μικρών Υδροηλεκτρικών Έργων εξακολουθούν να αξιοποιούν την ενέργεια του νερού για την παραγωγή μηχανικού έργου αλλά κυρίως πλέον για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Η αξιοποίηση του μικρού υδροδυναμικού των χιλιάδων μικρών ή μεγαλύτερων υδατορρευμάτων και πηγών της ορεινής Ελλάδος περνά από την υλοποίηση αποκεντρωμένων, αναπτυξιακών μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών πολλαπλής σκοπιμότητας, που μπορούν δηλαδή να λειτουργούν και για την ταυτόχρονη κάλυψη υδρευτικών, αρδευτικών και άλλων τοπικών αναγκών.

Οι πολύ υψηλοί βαθμοί απόδοσης των υδροστροβίλων, που μερικές φορές υπερβαίνουν και το 90%, και η πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής των υδροηλεκτρικών έργων, που μπορεί να υπερβαίνει και τα 100 έτη, αποτελούν δύο χαρακτηριστικούς δείκτες για την ενεργειακή αποτελεσματικότητα και την τεχνολογική ωριμότητα των μικρών υδροηλεκτρικών σταθμών.

Τα μικρά υδροηλεκτρικά έργα παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως είναι η δυνατότητα άμεσης σύνδεσης - απόζευξης στο δίκτυο, ή η αυτόνομη λειτουργία τους, η αξιοπιστία τους, η παραγωγή ενέργειας αρίστης ποιότητας χωρίς διακυμάνσεις, η άριστη διαχρονική συμπεριφορά τους, η μεγάλη διάρκεια ζωής, ο προβλέψιμος χρόνος απόσβεσης των αναγκαίων επενδύσεων που οφείλεται στο πολύ χαμηλό κόστος συντήρησης και λειτουργίας και στην ανυπαρξία κόστους πρώτης ύλης, η φιλικότητα προς το περιβάλλον με τις μηδενικές εκπομπές ρύπων και τις περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η ταυτόχρονη ικανοποίηση και άλλων αναγκών χρήσης νερού (ύδρευσης, άρδευσης κλπ.), η δυνατότητα παρεμβολής τους σε υπάρχουσες υδραυλικές εγκαταστάσεις κ.α.

Ένας μικρός υδροηλεκτρικός σταθμός μπορεί να αποτελέσει ένα έργο απόλυτα συμβατό με το περιβάλλον, που μπορεί να συμβάλει ακόμη και στη δημιουργία νέων υδροβιοτόπων μικρής κλίμακας στα ανάντη των μικρών ταμιευτήρων. Το σύνολο των επί μέρους συνιστωσών του έργου μπορεί να ενταχθεί αισθητικά και λειτουργικά στα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας τα τοπικά υλικά με παραδοσιακό τρόπο και αναβαθμίζοντας το γύρω χώρο [22].



**Εικ. 1.13**

(α) Μικρό υδροηλεκτρικό έργο στην Κίνα [Πηγή: [www.mongabay.com](http://www.mongabay.com)]

(β) Μικρό υδροηλεκτρικό έργο στην Γιτάνη [Πηγή: [www.pprcr.gr](http://www.pprcr.gr)]

### **Θερμική ενέργεια των ωκεανών**

Σε αυτή μορφή Α.Π.Ε, η οποία ίσως είναι η λιγότερο διαδεδομένη και αναπτυγμένη, γίνεται εκμετάλλευση της θερμικής ενέργειας από τη θερμοκρασιακή διάφορα (πάνω από 20 °C), που υπάρχει μεταξύ διαφοράς στάθμης στους ωκεανούς (όπως των 1000 m), με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες συνθήκες υπάρχουν, στις Τροπικές ζώνες, Καραϊβική, στο Μεξικό κλπ. Μετά από πολλά - πάνω από 40 - χρόνια ερευνών, ακόμα η τεχνολογία δεν επιτρέπει την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων πέρα από την ισχύ των 40 MW.



### Κυματική- παλιρροιακή ενέργεια

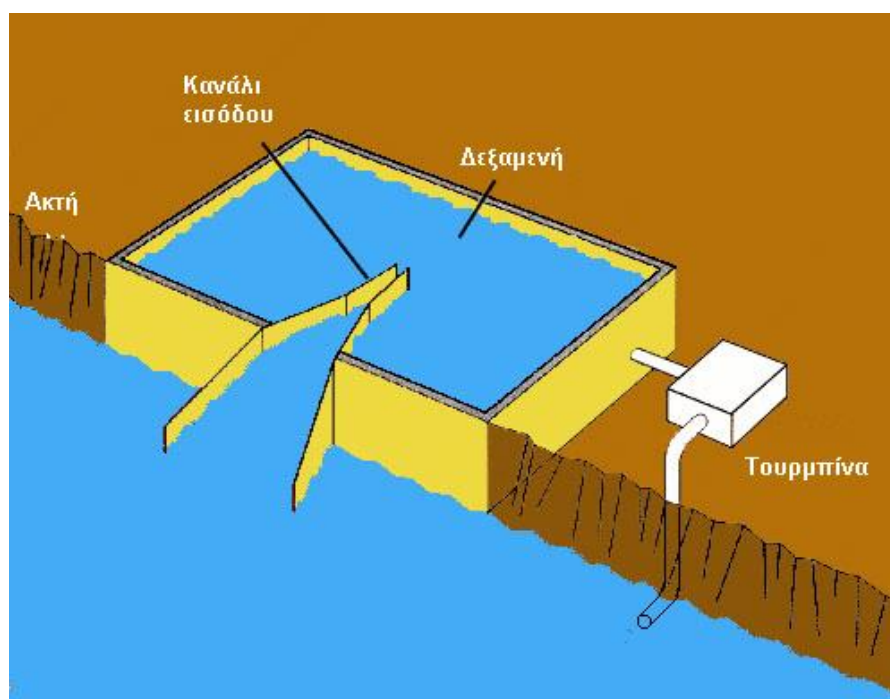
Μια εναλλακτική μορφή ενέργειας, με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, συγκριτικά με τον ήλιο και τον άνεμο είναι η εκμετάλλευση της δύναμης των κυμάτων και των παλιρροιών. Οι επιδράσεις των ανέμων, του ήλιου, των διαφόρων βαρομετρικών συστημάτων, αλλά και των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ της γης, της σελήνης και ήλιου προκαλούν κυματισμούς στην επιφάνεια της θάλασσας και γενικά μετατοπίζουν μέσω ρευμάτων τεράστιες ποσότητες ύδατος. Επομένως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις παλίρροιες και τα κύματα χαράζουν ευοίωνα προοπτικές στον τομέα της αναπλήρωσης του ενεργειακού ισοζυγίου, από τις συμβατικές και ρυπογόνες μορφές παραγωγής ενέργειας.

Ηλεκτρική ενέργεια από τα νερά των ωκεανών δύναται να παραχθεί με τρεις τρόπους:

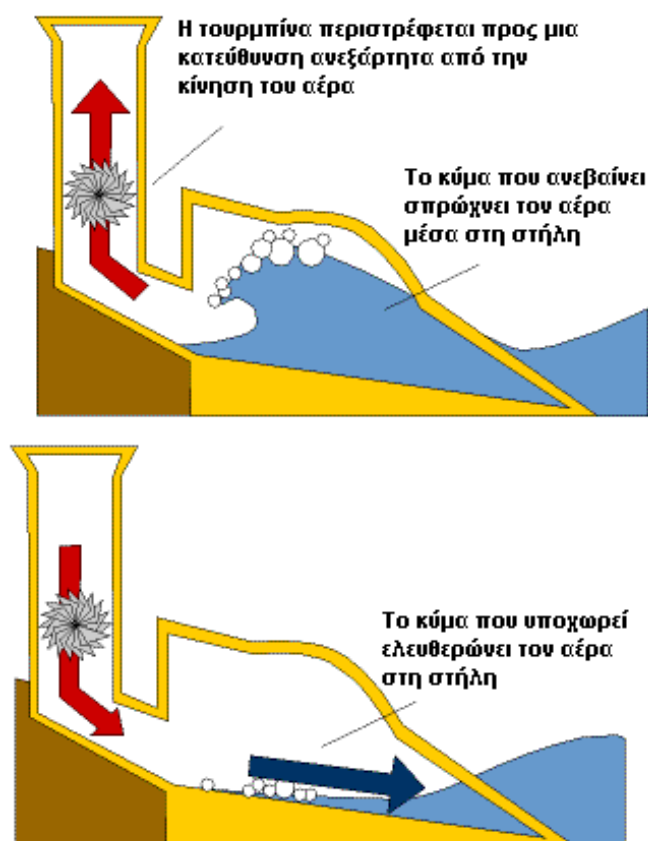
- Από τη δύναμη των κυμάτων
- Από τις παλίρροιες
- Από τις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ διαφορών ρευμάτων του νερού (αναφέρθηκε παραπάνω)

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την κινητική ενέργεια των κυμάτων έχουν αναπτυχθεί τρεις διαφορετικές τεχνολογίες. Αυτές είναι:

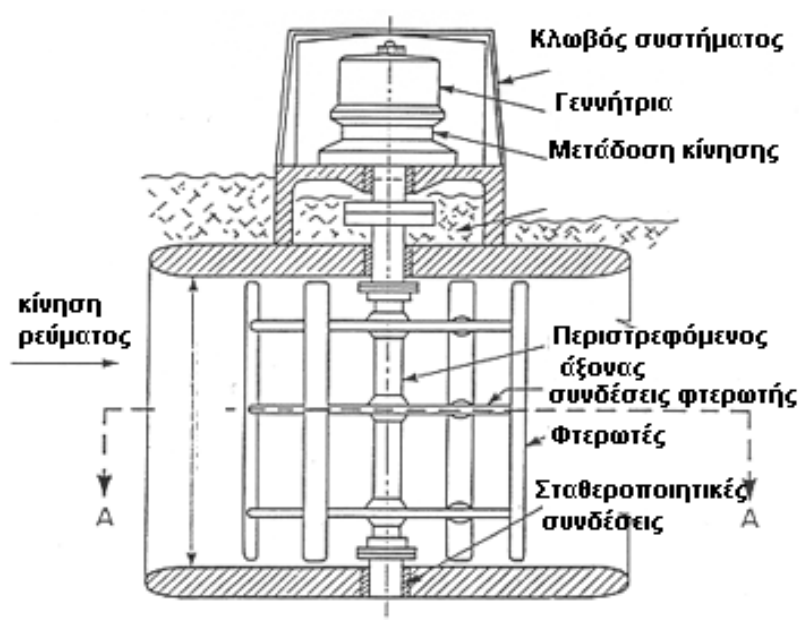
- Τα νερά των κυμάτων, κατευθύνονται μέσω ενός καναλιού σε μια δεξαμενή. Εφόσον στη δεξαμενή έχει συγκεντρωθεί μεγάλη ποσότητα ύδατος, το όλο έργο λειτουργεί πλέον ως μια μικρή υδροηλεκτρική εγκατάσταση. Η συγκεκριμένη μέθοδος ονομάζεται TAPCHAN (tapered channel) και απαιτεί ακτές με αρκετό βάθος και μικρή παλίρροια (Εικόνα 1.14).
- Σε μια κατακόρυφη στήλη τοποθετείται μια τουρμπίνα. Καθώς τα νερά των κυμάτων εισέρχονται σε αυτή τη στήλη, ο αέρας που προηγείται των κυμάτων πέζεται και όταν κύμα αποχωρεί αποσυμπιέζεται εγείροντας την περιστροφή της τουρμπίνας (Εικόνα 1.15).
- Κατακόρυφες τουρμπίνες εκμεταλλεύονται την κίνηση των ωκεάνιων ρευμάτων (Εικόνα 1.16).



**Εικ. 1.14** Μέθοδος TAPCHAN [Πηγή: kpe-kastor.kas.sch.gr]



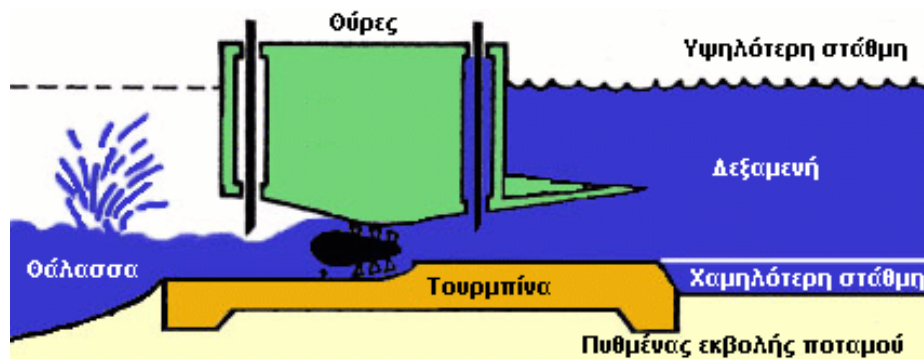
Εικ. 1.15 Ο πεπιεσμένος αέρας θέτει σε κίνηση την τουρμπίνα [Πηγή: kpe-kastor.kas.sch.gr]



Εικ. 1.16 Αρχή λειτουργίας διάταξης που εκμεταλλεύεται την ενέργεια των ρευμάτων [Πηγή: kpe-kastor.kas.sch.gr]

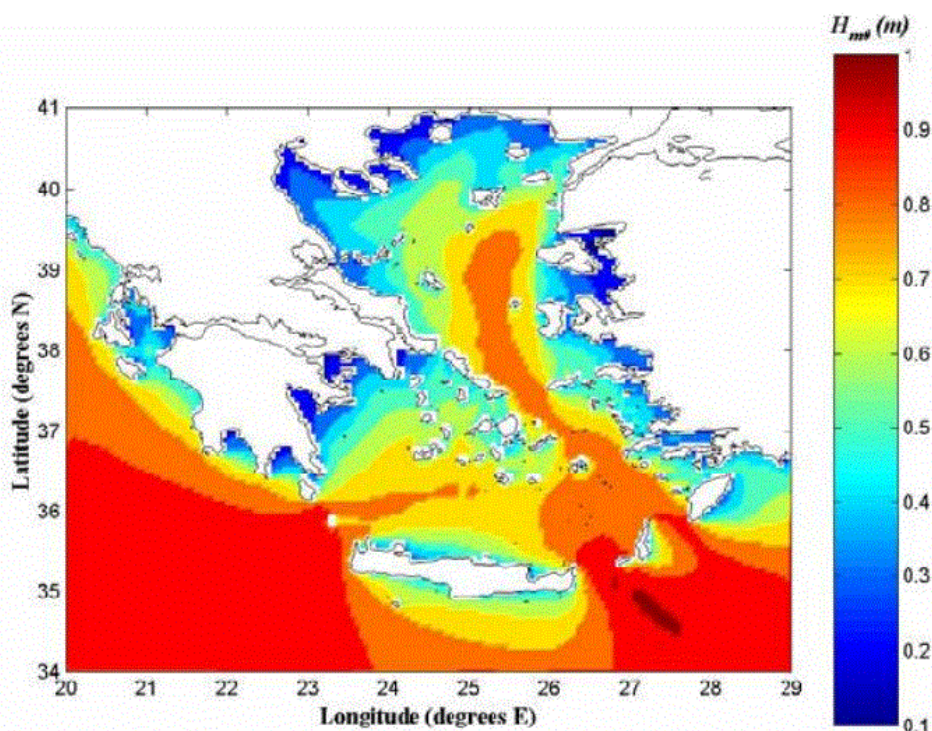
Η ενέργεια των παλιρροιών εξαιτίας των βαρυτικών αλληλεπιδράσεων του ήλιου, της γης και της σελήνης δύναται να αποφέρει σημαντικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Η εκμετάλλευση των παλιρροιών λαμβάνει χώρα κυρίως στις εκβολές ποταμών. Εκεί κατασκευάζεται ένα

φράγμα, καθώς και μια δεξαμενή, πίσω ακριβώς από το φράγμα. Καθώς το θαλασσινό νερό διέρχεται από μέσα από το φράγμα κατά την άνοδο της παλίρροιας (άμπωτη) κινεί της τουρμπίνες που παράγουν ηλεκτρισμό.



**Εικ. 1.17** Το νερό των παλίρροιών διέρχεται μέσα από το φράκτη και εισέρχεται στη δεξαμενή θέτοντας τις τουρμπίνες σε λειτουργία [Πηγή: kre-kastor.kas.sch.gr]

Σε ένα εναλλακτικό σχεδιασμό χρησιμοποιούνται υπερμεγέθης φράκτες, οι οποίοι φράζουν το νερό και το αναγκάζουν να διέρχεται μέσα από κάποιες περιστρεφόμενες πόρτες. Επιπρόσθετα μια καινούργια τεχνολογία εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των παλίρροιών με τη χρήση τουρμπίνων, οι οποίες παρουσιάζουν ομοιότητες με τις ανεμογεννήτριες .



**Εικ. 1.18** Μέση ετήσια κατανομή σημαντικού ύψους κύματος στο Αιγαίο Πέλαγος, όπως προκύπτει από το μοντέλο WAM-Cycle 4 για την περίοδο 1999-2001 [Πηγή: Soukissian T.H. et al., 2006]

Η κυματική και η παλίρροιακή ενέργεια πληρούν όλα τα εχέγγυα για να εφαρμοστούν και στον Ελληνικό χώρο. Η παρουσία ισχυρών ρευμάτων, καθώς και το μεγάλο μήκος των ακτογραμμών (13.700 km – το μεγαλύτερο μήκος σε όλη την Ευρώπη) επιτρέπει τη χρήση

τέτοιων μηχανισμών. Σε διεθνές, αλλά και Ευρωπαϊκό επίπεδο, η κυματική ενέργεια είναι παραγκωνισμένη. Προσπάθειες για τεχνολογική πρόοδο και χωροθέτηση τέτοιων εγκαταστάσεων καταβλήθηκαν ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας πετρελαϊκής κρίσης το 1970. Έκτοτε και ανεξάρτητα από την αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα και επάρκεια που παρουσιάζουν τα κύματα και οι παλίρροιες, οι τεχνοτροπίες εκμετάλλευσης τους τέθηκαν στο περιθώριο, καθώς παρουσιάζουν σοβαρά μειονεκτήματα, όπως είναι το αυξημένο κόστος παραγωγής (8 – 10 ευρώ kWh), το κόστος εγκατάστασης, αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν (αύξηση – κατακράτηση των ιζημάτων / επιπτώσεις στο τοπικό θαλάσσιο οικοσύστημα / επιπτώσεις στον τουρισμό).

Στην Ευρώπη έχουν εγκατασταθεί, στα πλαίσια πιλοτικών προγραμμάτων, αρκετοί σταθμοί. Ενδεικτικά αναφέρονται ο σταθμός Kobold στη Μεσσίνα της Ιταλίας (80 kW), ο σταθμός Seafloow στη Μεγάλη Βρετανία (300 kW), το σύστημα Pelamis στη Πορτογαλία (750 kW x 31), ο πλωτός σταθμός Wave Dragon στη Δανία (Εικ. 1.19). Στην Ελλάδα δεν έχουν κατασκευαστεί κάποιες αξιόλογες εγκαταστάσεις με εξαίρεση τη δημιουργία ενός πλωτήρα εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας από την ελληνική εταιρεία Κυματική Ενέργεια Α.Ε.



**Εικ. 1.19** Ο πλωτός σταθμός Wave Dragon στη Δανία (πάνω αριστερά), το σύστημα Pelamis στη Πορτογαλία (κάτω) και ο σταθμός Seafloow στην Μ. Βρετανία( δεξιά)  
[Πηγή: <http://en.wikipedia.org>]

## Υδρογόνο

Ο μακροπρόθεσμος και ίσως παγκόσμιος ενεργειακός φορέας παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και θερμότητας κρύβεται πίσω από το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα χημικών στοιχείων και είναι το υδρογόνο. Το υδρογόνο είναι ένα αέριο άχρωμο και άοσμο, το οποίο παρουσιάζει 10 φορές μικρότερη πυκνότητα από αυτή του αέρα (0,0899 kg / m<sup>3</sup>) και είναι σε θέση να διαφύγει από τη βαρυτική έλξη της γης. Βρίσκεται σε μικρές ποσότητες στην ατμόσφαιρα και παρουσιάζει χαμηλό σημείο βρασμού (20° K) και πήξεως (14° K). Το υδρογόνο, κάτω από εξαιρετικά μεγάλες πιέσεις και θερμοκρασίες δύναται να στερεοποιηθεί, ή, να υγροποιηθεί.

Η παρασκευή, αποθήκευση και διανομή του υδρογόνου στηρίχθηκε πάνω στην ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας, της οποίας η κλίμακα μελέτης αφορά το 1/80000 του μεγέθους μιας ανθρώπινης τρίχας, ή, αλλιώς το μήκος 10 ατόμων υδρογόνου στη σειρά. Οι μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις:

- Στις θερμοχημικές
- Στις ηλεκτρολυτικές
- Στις φωτολυτικές

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσεται η επεξεργασία του φυσικού αερίου. Η παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο υπερνικά ένα βασικό μειονέκτημα που είναι το κόστος επεξεργασίας (25% - 30%). Αναλυτικά το φυσικό αέριο δεν είναι τίποτε άλλο παρά μεθάνιο. Από το μεθάνιο παράγεται με κατάλληλη επεξεργασία CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>. Οι συγκεντρώσεις του CO<sub>2</sub> δεν είναι σε θέση να επιβαρύνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Υδρογόνο παράγεται και μέσα από την πυρόλυση και αεριοποίηση της βιομάζας. Με θέρμανση της οργανικής ύλης απουσία οξυγόνου (πυρόλυση) παράγεται μια μη αντιστρεπτή χημική μεταβολή, η οποία με τη σειρά της παράγει μια πληθώρα αερίων, υγρών και στερεών προϊόντων. Τα υγρής μορφής προϊόντα διαχωρίζονται εκ νέου και αποδίδεται το υδρογόνο. Παράλληλα, με αεριοποίηση της βιομάζας (θέρμανση με μικρές ποσότητες οξυγόνου) παράγεται απευθείας CO και H<sub>2</sub> (αέριο συνθέσεως).

Το νερό, κατόπιν ηλεκτρολύσεως, παράγει H<sub>2</sub> και O<sub>2</sub>. Η ηλεκτρόλυση αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο παραγωγής υδρογόνου, αλλά και καθαρού οξυγόνου, που χρησιμοποιείται για βιομηχανικές χρήσεις, από τη δεκαετία του '50. Την τελευταία περίοδο παρατηρείται μια ανάπτυξη της τεχνολογίας με παράλληλη χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική ενέργεια) για την παραγωγή υδρογόνου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του υδρογόνου είναι:

- Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο (120,7 kJ / gr)
- Κάνει καθαρή καύση (παράγει μόνο νερό και θερμότητα)
- Φιλικό προς το περιβάλλον
- Λιγότερο επικίνδυνο συγκριτικά με τα άλλα συμβατικά καύσιμα (diesel, βενζίνη)
- Αποκεντροποίηση συστημάτων παραγωγής ενέργειας, καθώς δύναται να παραχθεί με πολλές μεθόδους [24].

Τα μειονεκτήματα του υδρογόνου συνοψίζονται στα εξής:

- Δυσκολία και υψηλό κόστος αποθήκευσης
- Έλλειψη οργανωμένου δικτύου διανομής του
- Υψηλή τιμή διάθεσης
- Αυξημένη τιμή των κυψέλων καυσίμου [24]

Το υδρογόνο θεωρείται πως θα αποτελέσει το ενεργειακό υποκατάστατο του μέλλοντος. Ήδη πάρα πολλές χώρες, όπως είναι η Ισλανδία και οι Η.Π.Α. προσανατολίζουν τους ερευνητικούς ορίζοντες στην εξεύρεση μεθόδων γρήγορης και φθηνής παραγωγής υδρογόνου, με στόχο την πραγμάτωση μιας αειφορικής ανάπτυξης στον τομέα της ενέργειας και των μεταφορών. Στρατηγικός στόχος του υπουργείου ενέργειας των Η.Π.Α. είναι η αντικατάσταση της ενεργειακής κατανάλωσης, κατά 10% από το υδρογόνο.

Στην Ελλάδα, μια σειρά ερευνών σε διάφορα πανεπιστημιακά ιδρύματα και ερευνητικούς φορείς λαμβάνει χώρα προκειμένου να προωθηθούν και να ανελιχθούν οι τεχνολογίες του υδρογόνου. Το Ε.Μ.Π., το Πανεπιστήμιο Πατρών, ο Δημόκριτος, το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, το Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, το Κ.Α.Π.Ε. και ορισμένα νομικά πρόσωπα ιδιωτικού δικαίου όπως είναι η εταιρεία ΡΟΚΑΣ ΑΕΒΕ, Air Liquide, η Γερμανός ΑΕ, η ΔΕΠΑ και η Tropical απασχολούνται με την ενεργειακή προοπτική του υδρογόνου.

Ολοκληρώνοντας αναφέρονται μερικές από τις υφιστάμενες χρήσεις του υδρογόνου.

- Παρασκευή αμμωνίας, μεθανίου ή μεθανόλης (εκρηκτικά, λιπάσματα, αντιψυκτικά).
- Παρασκευή υδρογονανθράκων (βιομηχανία τροφίμων).
- Μελέτη στοιχειωδών σωματιδίων.
- Μελέτη της υπεραγωγιμότητας (σε υγρή μορφή).

### 1.2.3 Πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα Α.Π.Ε.

#### Πλεονεκτήματα Α.Π.Ε.

Οι Α.Π.Ε μπορεί να έχουν σημαντική συμβολή στην προσπάθεια μείωσης εκπομπών των αέριων του θερμοκηπίου, καθώς είναι οι μονές πηγές ενέργειας που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με εκπομπές CO<sub>2</sub>. Πέρα όμως από τα στενά πλαίσια αντιμετώπισης του φαινομένου του θερμοκηπίου, τα χαρακτηριστικά των Α.Π.Ε τις καθιστούν συστατικό στοιχείο μιας νέας αναπτυξιακής πολιτικής και μοναδική μακροπρόθεσμη απάντηση στην πορεία προς την βιώσιμη και αειφόρο ανάπτυξη. Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση των Α.Π.Ε δεν είναι μόνο περιβαλλοντικής φύσης. Η αξιοποίηση αυτών των ενδογενών ενεργειακών πόρων μπορεί να επιφέρει επίσης σημαντικές θετικές κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις στην περιφερειακή τοπική ανάπτυξη. Παρά το γεγονός ότι απαιτείται ένα σημαντικό κεφάλαιο για την αρχική τους εγκατάσταση και τον εξοπλισμοί λειτουργικό τους κόστος και τα αποτελέσματα τους ιδιαίτερα σημαντικά.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των Α.Π.Ε είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσου συμβατικούς ενεργειακούς πόρους.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, δίνοντας τη δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας ορθολογικότερη χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ διατίθενται σε μικρά μεγέθη και έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας, με επαναλαμβανόμενα συστήματα σε πολλές περιπτώσεις.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. θερμοσκοπικές καλλιέργειες με γεωθερμική ενέργεια).
- Η παροχή τους είναι δεδομένη και δεν μπορεί να ελεγχθεί από πολιτικά και οικονομικά συμφέροντα
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

#### Μειονεκτήματα Α.Π.Ε.

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλες τιμές ισχύος απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.

- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων είναι ακόμη υψηλό
- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια γης. Γι' αυτό το λόγο μέχρι τώρα χρησιμοποιούνται σαν συμπληρωματικές πηγές ενέργειας. Για τον παραπάνω λόγο προς το παρόν δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Η παροχή και απόδοση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω απ' το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.

Εδώ μπορούμε να προσθέσουμε ορισμένα προβλήματα που αποτελούν τροχοπέδη στη γρήγορη προώθηση των ΑΠΕ στη χώρα μας και είναι κυρίως τα ακόλουθα:

- Η έλλειψη συνολικού και ολοκληρωμένου ενεργειακού σχεδιασμού και μιας στρατηγικής για τις ΑΠΕ.
- Η έλλειψη συνδυασμένων δράσεων (έρευνας και ανάπτυξης, εφαρμογής, αξιολόγησης, διάδοσης).
- Το θεωρούμενο από πολλούς ως υψηλό, κόστος της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.
- Το γεγονός ότι οι συμβατικές μορφές ενέργειας, (πετρέλαιο και φυσικό αέριο) θεωρείται πως έχουν χαμηλό κόστος, λόγω των παραδοσιακών τεχνολογιών οι οποίες θεωρούνται εσφαλμένα ως αξιόπιστες.
- Η επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια, δεν είναι γνωστή στο ευρύ κοινό, λόγω μικρής προβολής της από τα ΜΜΕ.
- Τα διαδικαστικά και χρονοβόρα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι επενδυτές ΑΠΕ, από την έκδοση άδειας εγκατάστασης μέχρι την έκδοση άδειας λειτουργίας.
- Η έλλειψη «ενεργειακής συνείδησης» σε όλα τα επίπεδα.

## 1.3 Η ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για την αιολική ενέργεια

Στις ανανεώσιμες και παράλληλα ήπιες μορφές παραγωγής ενέργειας εντάσσεται και ο άνεμος. Το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής έχει αποβεί ως αντικείμενο εκμετάλλευσης εδώ και εκατοντάδες χρόνια. Μια πληθώρα δραστηριοτήτων εκτελείται με τη βοήθεια του ανέμου. Το άλεσμα και η άντληση νερού αποτελούν τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις εργασιών. Η εικόνα ενός μύλου σε κάποια επαρχιακή κοινότητα της Ελλάδος, ή, το τοπίο των ανεμόμυλων στην Ολλανδία χαρακτηρίζουν τις αποδείξεις πως ο άνθρωπος στηρίχθηκε στη δύναμη του άχρωμου και άοσμου αέρα. Είναι γεγονός πως η Ολλανδία, μιας και βρίσκεται σε χαμηλότερη στάθμη, από αυτή της θάλασσας, στηρίζεται στην άντληση του νερού, με τη χρήση των ανεμόμυλων για να μην πλημμυρήσει, τουλάχιστον στο παρελθόν, μιας και τώρα τα ύδατα συγκρατώνται από φράγματα και αναχώματα.

Ταξιδεύοντας στα βάθη των αιώνων ανιχνεύουμε δεκάδες λαούς που χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια. Οι πολιτισμοί της Κίνας, του Θιβέτ, της Ινδίας, του Αφγανιστάν, της Περσίας χρησιμοποίησαν τον άνεμο, για φτάσουμε στη Μεγάλη Βρετανία, τον 11ο – 12ο αιώνα. Μέχρι και τον 18ο αιώνα, ο άνεμος δέσποζε στην επιτέλεση δραστηριοτήτων από τον άνθρωπο. Όμως η ανακάλυψη της ατμομηχανής, η παραγωγή ενέργειας με την καύση άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου και ο σχεδιασμός μηχανών εσωτερικής καύσης και αεροστροβίλων οδήγησε στο περιθώριο την εκμετάλλευση του ανέμου. Τα προφανή πλεονεκτήματα της σταθερότητας στην παραγωγή ενέργειας και της ανεξαρτησίας του χώρου εγκατάστασης ώθησε ολοένα και περισσότερες βιομηχανίες να χρησιμοποιούν την ενέργεια των ορυκτών καυσίμων έναντι αυτής του ανέμου.

Κάτω από την επιβολή των συμβατικών καυσίμων, οι ανεμογεννήτριες συνέχιζαν, έστω και αμυδρά, να ακμάζουν και αποζυμούν τα οφέλη της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της αεροδυναμικής. Μηχανικοί, όπως ο Γάλλος F.M. Darrieus, ο Φιλανδός Savonius σχεδίασαν νέους τύπους ανεμογεννητριών, για φτάσουμε στις ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus που εγκαταστάθηκαν στην Καλιφόρνια (1980) και στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες με συνθετικά υλικά και με αυτοματοποιημένους μηχανισμούς ελέγχου.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια θεαματική άνοδος της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτριες στη χώρα μας (Κρήτη, Εύβοια, νησιωτική χώρα). Ο μεγάλος ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας συνοδεύτηκε, όπως ήταν επόμενο, από την ανησυχία των τοπικών κοινωνιών σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι φόβοι που εκφράστηκαν ακούγονται μάλλον υπερβολικοί και, κάποιες φορές, εξωπραγματικοί. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, οι ενστάσεις που υπάρχουν στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων έχουν κάποια βάση και χρειάζονται επιπλέον διερεύνηση. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η αποδοχή ή μη της αιολικής ενέργειας από τις τοπικές κοινωνίες προϋποθέτει την αντικειμενική τους πληροφόρηση για τα οφέλη και τις επιπτώσεις που αυτή θα μπορούσε να έχει ως μία ακόμη επέμβαση του ανθρώπου στη φύση.

Αλλά ας δούμε πρώτα που ακριβώς οφείλεται η ραγδαία αυτή ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο κόσμο. Σήμερα είναι κοινά αποδεκτό ότι η παγκόσμια αλλαγή του κλίματος αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες απειλές για το μέλλον της ανθρωπότητας. Η αλλαγή αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις εκπομπές των λεγομένων «αερίων του θερμοκηπίου» που συνοδεύουν αναπόφευκτα την παραγωγή ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Θεωρείται, λοιπόν, δεδομένο ότι η ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ιδιαίτερα της αιολικής είναι η μοναδική –μη πυρηνική– μεσοπρόθεσμη λύση για την αντιμετώπιση του φαινομένου των κλιματικών αλλαγών. Τα γενικότερα οφέλη που προκύπτουν από τη χρήση της αιολικής ενέργειας είναι:

- Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία μάλιστα παρέχεται δωρεάν.
- Η Αιολική ενέργεια είναι μια τεχνολογικά ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική και φιλική προς το περιβάλλον ενεργειακή επιλογή.
- Προστατεύει τη Γη καθώς κάθε μία κιλοβατώρα που παράγεται από τον άνεμο αντικαθιστά μία κιλοβατώρα που παράγεται από συμβατικούς σταθμούς και ρυπαίνει την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου.
- Δεν επιβαρύνει το τοπικό περιβάλλον με επικίνδυνους αέριους ρύπους, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α., όπως γίνεται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για τη χώρα μας και την Ευρώπη γενικότερα.
- Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.



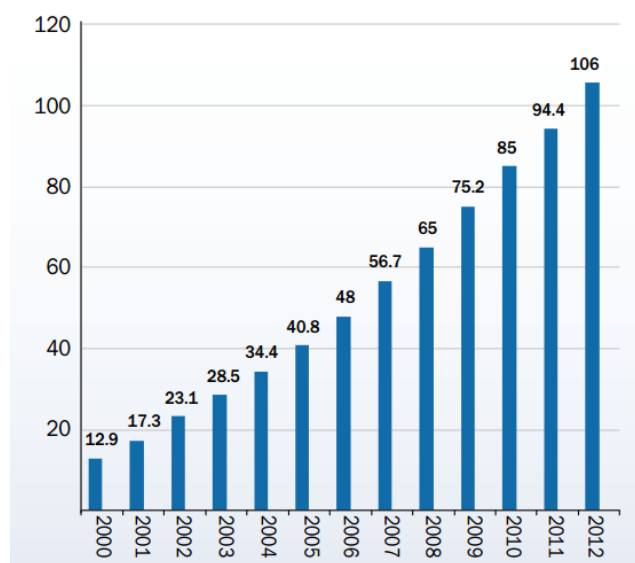
### 1.3.2 Οι τάσεις παγκοσμίως

Η ιστορία της αιολικής ενέργειας ξεκινά στην Δανία την δεκαετία του 1970, όταν η πετρελαϊκή κρίση της περιόδου εκείνης καθιστά αναγκαία την διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος της χώρας και την στροφή σε τεχνολογίες που βασίζονται σε εγχώριους ενεργειακούς πόρους. Στις αρχές τις δεκαετίας του 1990, η κλίμακα των ανεμογεννητριών μεγέθους 300 με 500 KW άρχισε να εισάγεται με επιτυχία και σε άλλες χώρες, σηματοδοτώντας παράλληλα την έκρηξη της αιολικής ενέργειας σε όλη την Ευρώπη. Πέρα από την Δανία, η οποία συνεχίζει να διατηρεί κυρίαρχη θέση στον τομέα αυτό, σημαντική επιτυχία καταγράφουν η Γερμανία, η Ισπανία και η Πορτογαλία [8].

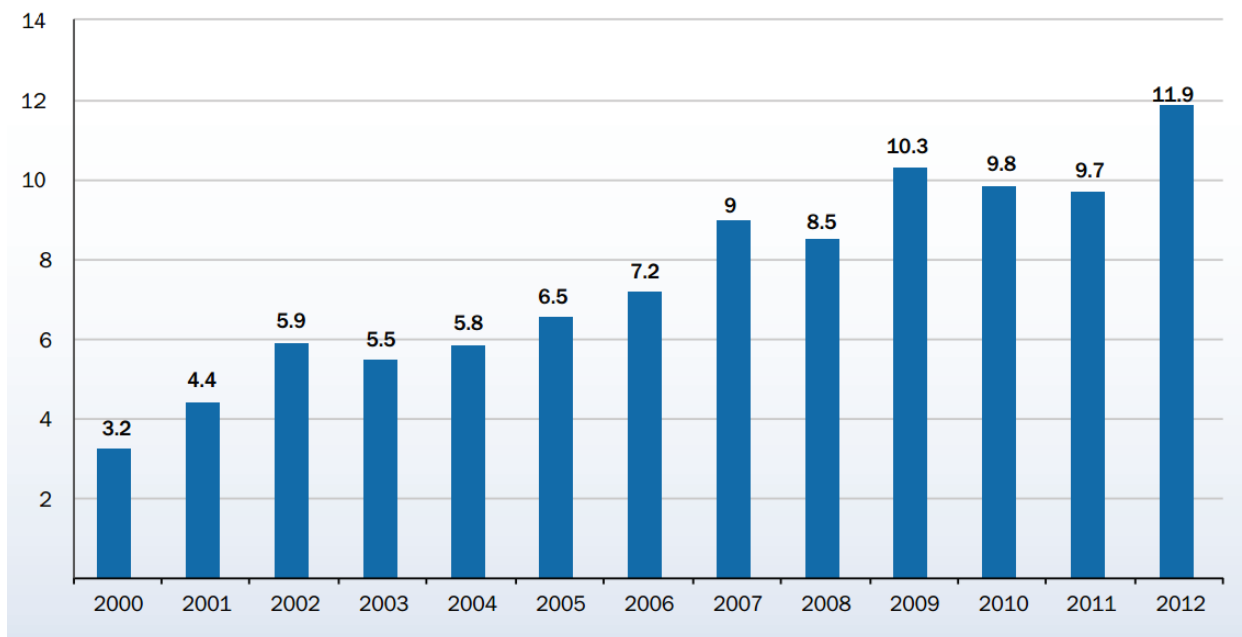
Η πορεία ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια υπήρξε ραγδαία. Όπως φαίνεται και στα επόμενα διαγράμματα, μέχρι το τέλος του 2012 λειτουργούσαν σε παγκόσμιο επίπεδο 283,00 GW αιολικής ενέργειας, εκ των οποίων τα 106 GW στην Ευρώπη (Εικ. 1.20 & 1.24). Επίσης από το 2001, παρατηρείται μια σταθερή ανοδική πορεία της νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, με πολύ υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο. Συγκεκριμένα σήμερα τη δυναμική του κλάδου της αιολικής ενέργειας αντικατοπτρίζουν τα επιπλέον 11,6 GW αιολικής ενέργειας, τα οποία εγκαταστάθηκαν στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2012 ανεβάζοντας τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ στα 105,6 GW (Εικ. 1.20 & 1.21) [25]

Σύμφωνα με τα στοιχεία της ετήσιας στατιστικής από την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA), το 2011 είχαν εγκατασταθεί 9,4 GW. Η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευσε το 26% της νέας ενεργειακής ισχύος της ΕΕ για το 2012. Αυτή τη στιγμή, καλύπτει το 7% των ενεργειακών αναγκών της Ευρώπης ενώ το 2011 κάλυπτε μόνο το 6,3% [26]. Τη μέγιστη διείσδυση αιολικής ενέργειας παρουσιάζει η Δανία με 27% και ακολουθούν η Πορτογαλία με 17%, η Ισπανία με 16% και η Ιρλανδία με 13% (Εικ 1.22).

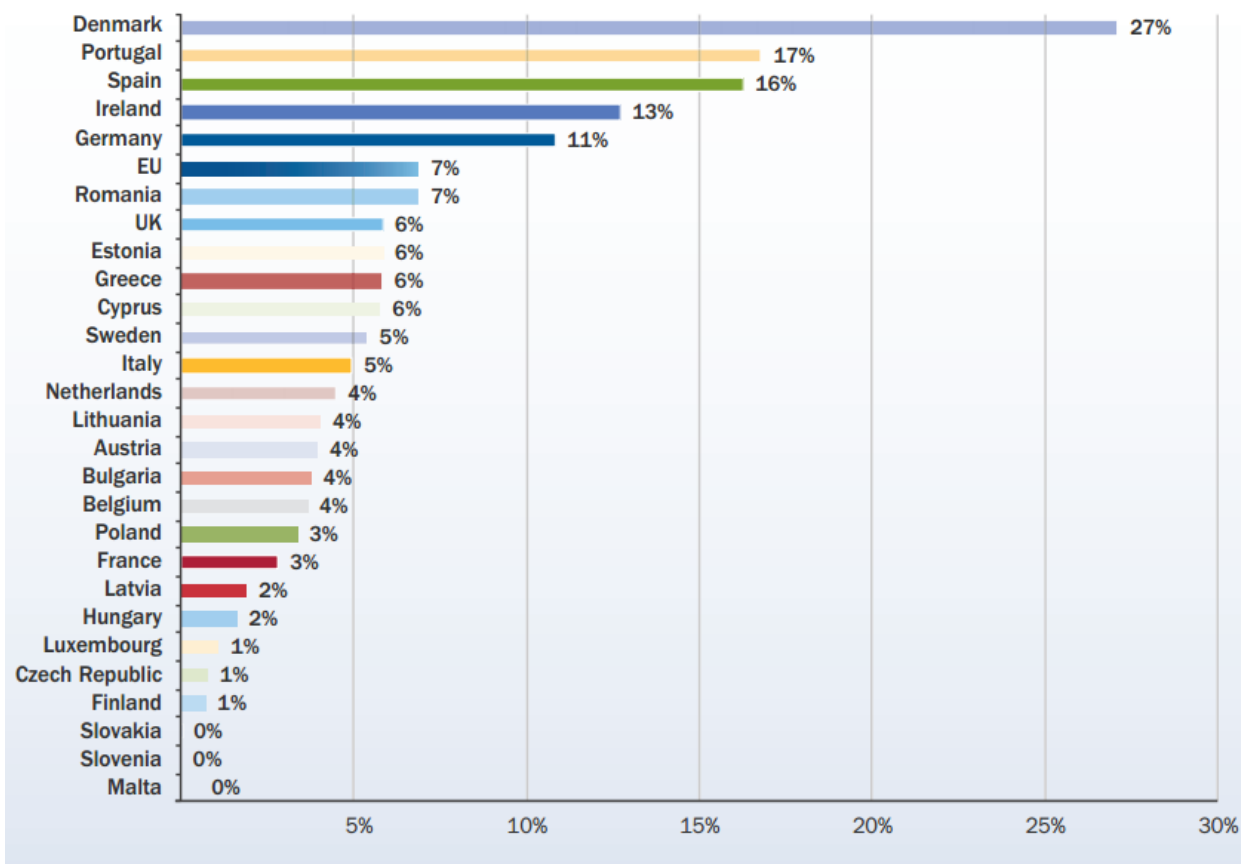
Συνολικά στην ΕΕ των 27, οι επενδύσεις του κλάδου υπολογίζονται στα 15 δισ. ευρώ. Στη συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύ της ΕΕ, η Γερμανία είναι αναμφισβήτητα ο ηγέτης με 31,3 GW (30%), με την Ισπανία να ακολουθεί με 22,8 GW (22%), το Ηνωμένο Βασίλειο με 8,4 GW (8%), η Ιταλία με 8,1 GW (8%) και η Γαλλία με 7,2 GW (7%) (Εικ. 1.23). Η εξάπλωση της αιολικής ενέργειας σε όλη την Ευρώπη διαφαίνεται από το γεγονός ότι η Δανία, η Γερμανία και η Ισπανία - οι οποίες το 2000 αντιπροσώπευαν το 85% των ετήσιων εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας - αντιπροσώπευαν το 2012 το 33% αυτών [25].



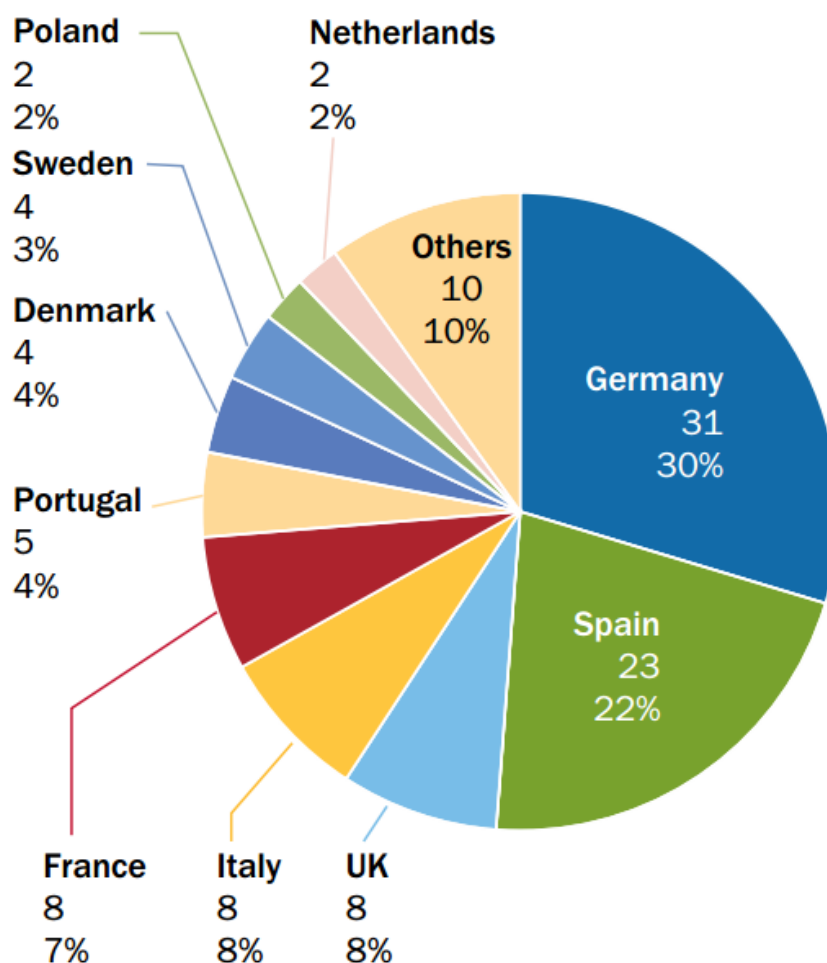
**Εικ. 1.20** Συνολική εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ε.Ε.σε GW 2000-2012  
[Πηγή: «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2013]



**Εικ. 1.21** Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ε.Ε. 2000-2012  
 [Πηγή: «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2013]



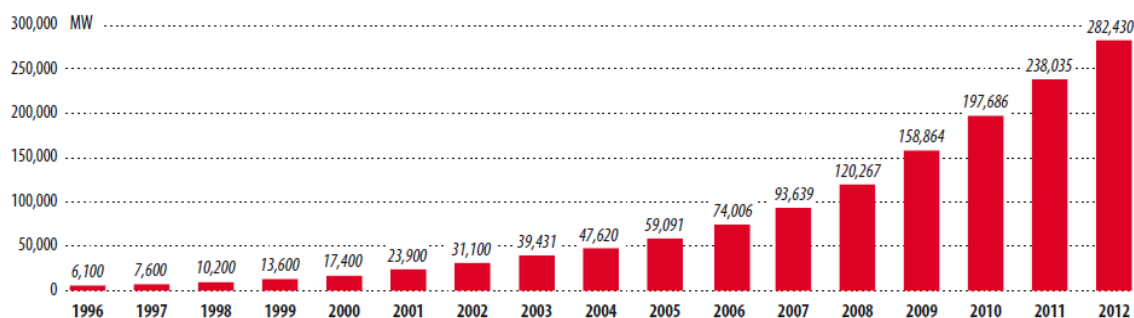
**Εικ. 1.22** Διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε και τα κράτη μέλη της  
 [Πηγή: «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2013]



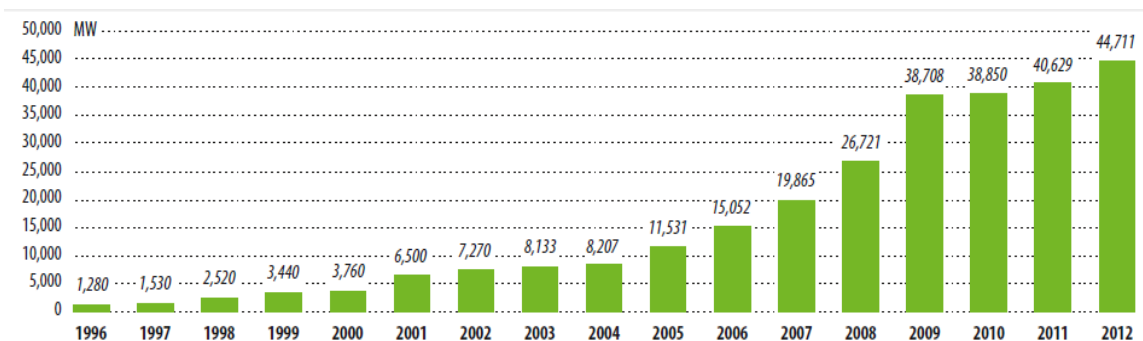
**Εικ. 1.23** Μερίδιο της αγοράς αιολικής ενέργειας στην Ε.Ε. σε σύνολο εγκατεστημένης ισχύος 106 GW [Πηγή: «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2013]

Όμως, οι ισχυροί ρυθμοί ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας δεν περιορίζονται μόνο στην περιοχή της Ευρώπης. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της ετήσιας αιολικής ισχύος που εγκαθίσταται στην Βόρεια Αμερική και την Ασία, ενώ οι χώρες της Λατινικής Αμερικής, της Αφρικής και η Αυστραλία προς το παρόν εμφανίζουν μικρά ποσοστά διείσδυσης της αιολικής ενέργειας. Ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο είναι ότι κατά το 2010 και 2011, οι νέες ετήσιες αιολικές εγκαταστάσεις στην Ασία ξεπέρασαν τα 21 και 20 GW αντίστοιχα, ξεπερνώντας χασοκά την Ευρώπη και την Βόρεια Αμερική, κάτι που άλλαξε τη φετινή χρόνια με αιολικές εγκαταστάσεις της τάξης των 16 GW, 15 GW και 12 GW αντίστοιχα (Εικ. 1.26) [27]. Επισημαίνεται ότι η σημαντική άνοδος της αιολικής ενέργειας στην Ασία, οφείλεται κυρίως στις εγκαταστάσεις της Κίνας, η οποία κατά το 2010-11 υπερδιπλασίασε την συνολική αιολική ισχύ της.

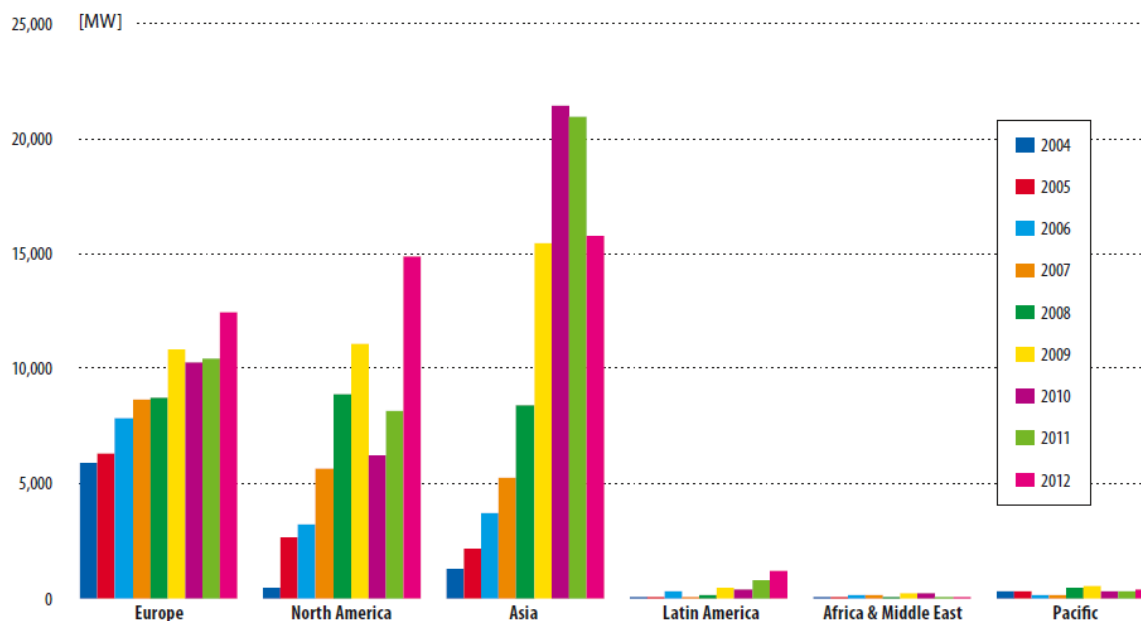
Τέλος, στα διαγράμματα της εικόνας 1.27 παρουσιάζονται οι δέκα χώρες με την μεγαλύτερη νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύ το 2012 και την μεγαλύτερη συνολική εγκατεστημένη ισχύ μέχρι το ίδιο έτος. Επιβεβαιώνεται η δυναμική της αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, αφού παρότι οι χώρες της Ευρώπης καταλαμβάνουν αθροιστικά το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης αιολικής ενέργειας, αναδεικνύονται ταυτόχρονα οι αγορές των ΗΠΑ και της Κίνας, οι οποίες συγκεντρώνουν και τα μεγαλύτερα ποσοστά νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος για το 2012. Αξιοσημείωτο είναι ότι πλέον η Κίνα είναι η χώρα με τη μεγαλύτερη συνολικά εγκατεστημένη ισχύ αφού ξεπέρασε και τις ΗΠΑ [27].



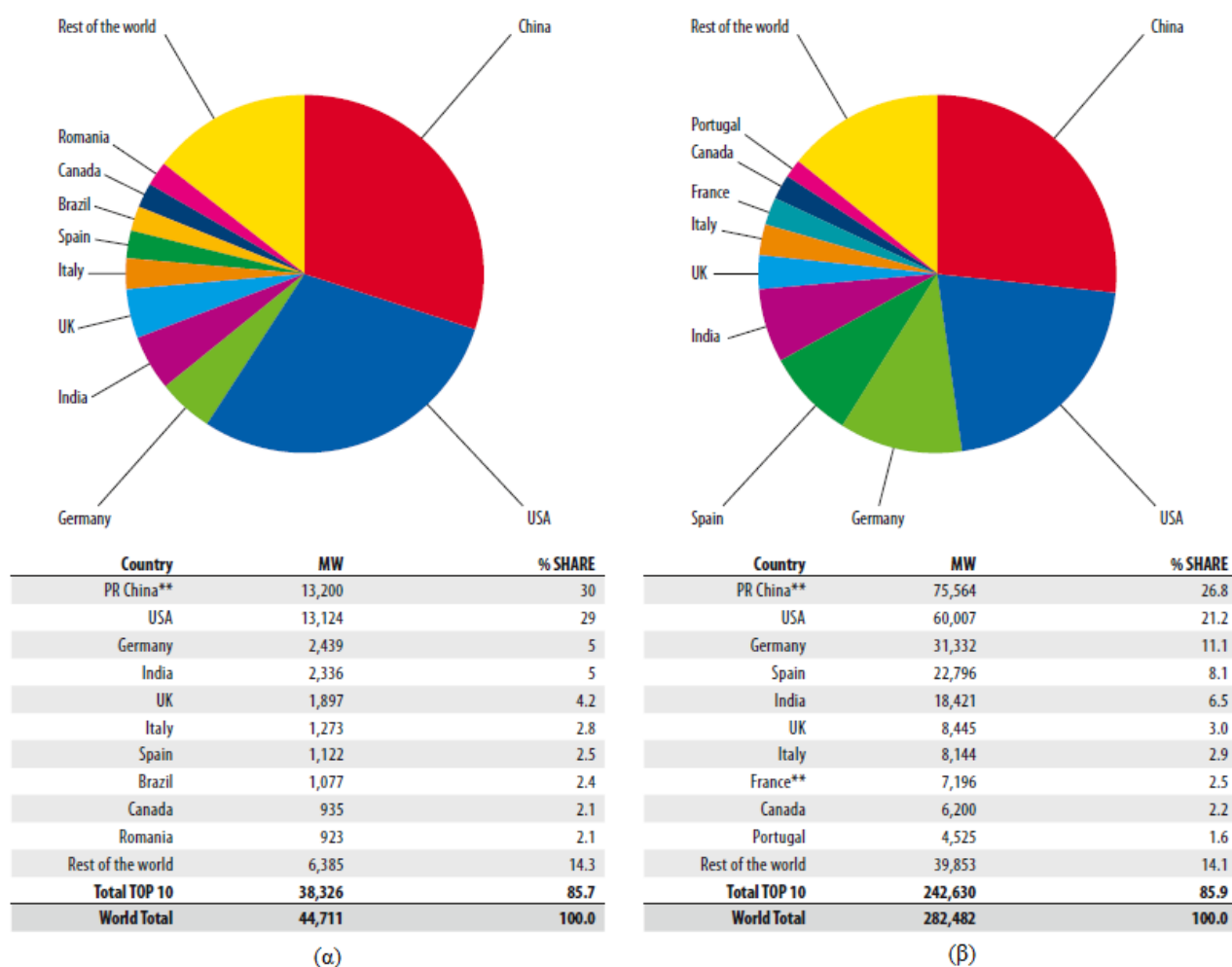
**Εικ. 1.24** Συνολική παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996-2012  
 [Πηγή: «Global Wind Statistics – 2012», GWEC, 2013]



**Εικ. 1.25** Παγκόσμια ετήσια νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύς 1996-2012  
 [Πηγή: «Global Wind Statistics – 2012», GWEC, 2013]



**Εικ. 1.26** Ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς κατά ήπειρο  
 [Πηγή: «Global Wind Statistics – 2012», GWEC, 2013]



Εικ. 1.27

(α) Δέκα χώρες με την μεγαλύτερη νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύ το 2012

(β) Δέκα χώρες την μεγαλύτερη συνολική εγκατεστημένη ισχύ το 2012

[Πηγή: «Global Wind Statistics – 2012», GWEC, 2013]

### 1.3.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και φυσικά στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές θα συναντήσουμε και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από συστοιχίες ανεμογεννητριών σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Η εκμετάλλευση του υψηλού αιολικού δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών που ενσωματώνονται στις σύγχρονες αποδοτικές ανεμογεννήτριες, έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Η αιολική βιομηχανία στην Ελλάδα για αρκετά χρόνια ήταν αρκετά πίσω λόγω αρκετών προβλημάτων. Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς είναι πολύ μικρή σε σχέση με το αιολικό

δυναμικό της. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζεται η ανάπτυξη της χώρας μας στον τομέα της αιολικής ενεργείας τα τελευταία χρόνια.

	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	
	Συνολική Εγκατεστημένη ισχύς [MW]	Ετήσια Εγκατεστημένη ισχύς [MW/έτος]
2006	748	146
2007	849	101
2008	995	146
2009	1.154	159
2010	1.320	166
2011	1.635	315
Οκτ. 2012	1.740	105

**Εικ. 1.28** Συνολική και ετήσια εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα 2006-2012  
[Πηγή: «Το αναπτυξιακό πακέτο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στην Αιολική Ενέργεια», ΕΛΕΤΑΕΝ, 2012]

### Ο Εθνικός στόχος

Σύμφωνα με τον υπ' αριθμόν 3851/2010 νόμο «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής», ορίζονται αναλυτικώς τα ακόλουθα [28]:

« Άρθρο 1 Εθνικός στόχος Α.Π.Ε.

Στο άρθρο 1 του ν.3468/2006 (ΦΕΚ 129 Α') η υπάρχουσα διάταξη αριθμείται σε παρ. 1 και προστίθενται παράγραφοι 2 και 3 ως εξής:

§2. Η προστασία του κλίματος, μέσω της προώθησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε., αποτελεί περιβαλλοντική και ενεργειακή προτεραιότητα υψίστης σημασίας για τη χώρα.

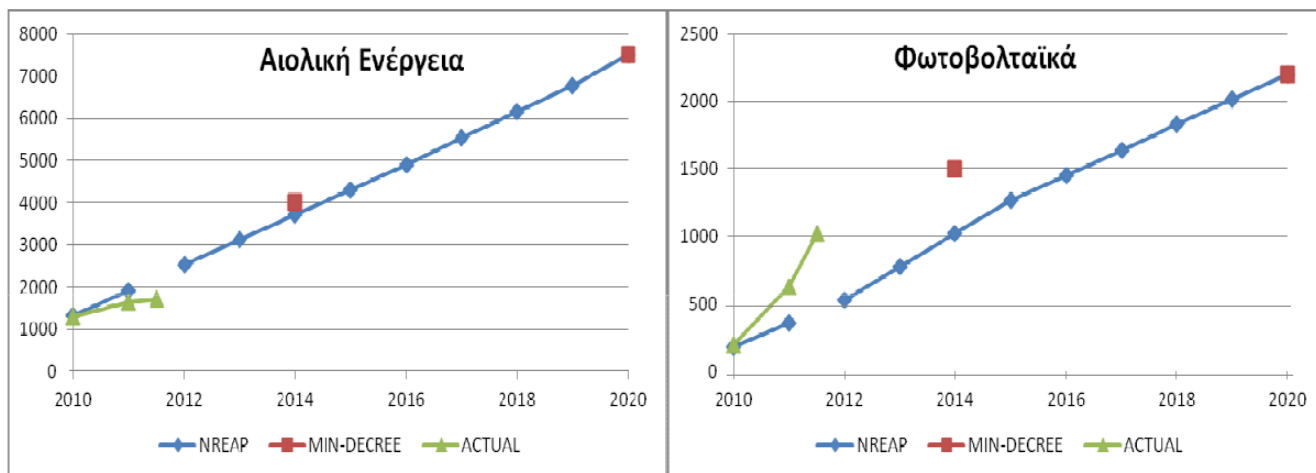
§3. Οι εθνικοί στόχοι για τις Α.Π.Ε., με βάση την Οδηγία 2009/28/ΕΚ (EEL, 140/2009), καθορίζονται μέχρι το έτος 2020 ως εξής:

α) Συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20%.

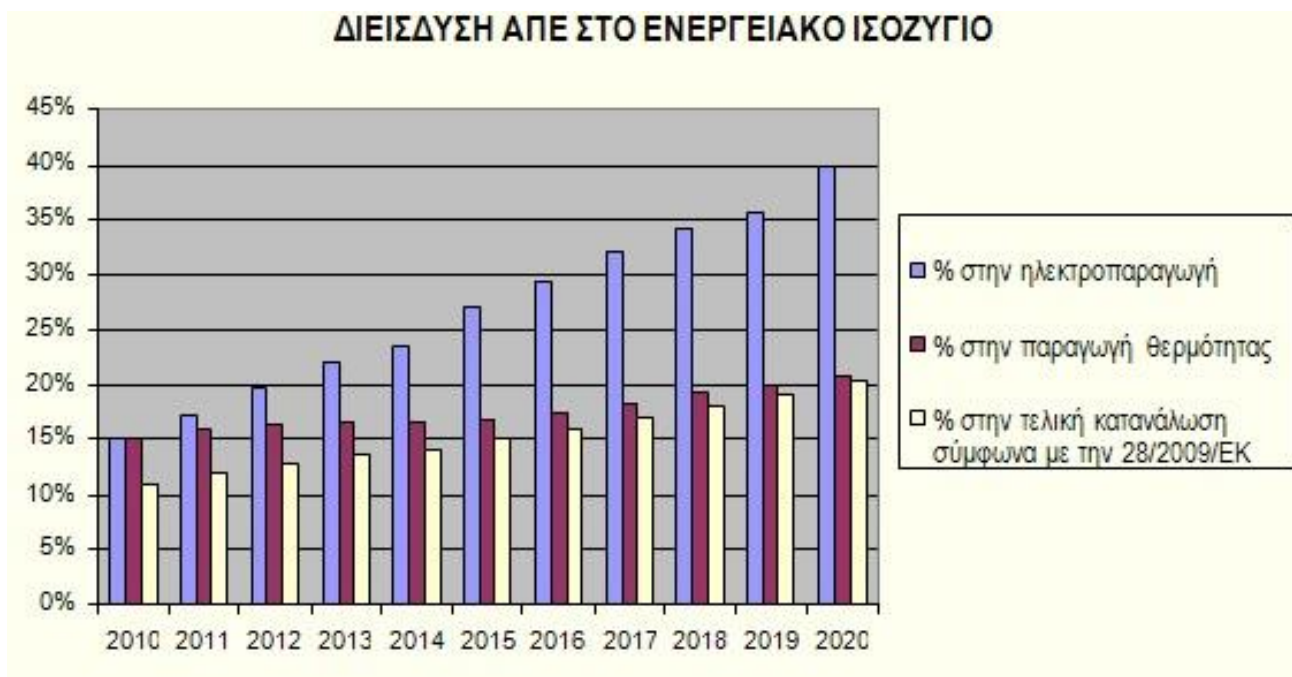
β) Συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 40%. Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής που εκδίδεται μέσα σε τρεις (3) μήνες από τη δημοσίευση του παρόντος, καθορίζεται η επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και η κατανομή της στο χρόνο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών Α.Π.Ε.. Η απόφαση αυτή αναθεωρείται ανά διετία ή και νωρίτερα, εάν συντρέχουν σημαντικοί λόγοι που σχετίζονται με την επίτευξη των στόχων της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ.

γ) Συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση και ψύξη σε ποσοστό τουλάχιστον 20%.

δ) Συμμετοχή της ενέργειας που παράγεται από Α.Π.Ε. στην τελική κατανάλωση ενέργειας στις μεταφορές σε ποσοστό τουλάχιστον 10%.»



**Εικ. 1.29** Η εξέλιξη των αιολικών και φ/β στην Ελλάδα, σε σχέση με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης και τους θεσμοθετημένους στόχους 2014 και 2020  
 [Πηγή: «Το Αναπτυξιακό Πακέτο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στην Αιολική Ενέργεια», ΕΛΕΤΑΕΝ, 2012]



**Εικ. 1.30** Πρόβλεψη διείσδυσης Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο 2010-2020  
 [Πηγή: [www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr)]

Η αναγκαία Ισχύς ΑΠΕ για διείσδυση 40% στην ηλεκτροπαραγωγή κατά το 2020 σύμφωνα με τον εθνικό στόχο που ορίζει ο νόμος 3851 εκτιμάται σύμφωνα με τον ΔΕΣΜΗΕ σε συνολική εγκατεστημένη ισχύ, στον ηπειρωτικό και νησιωτικό χώρο, περίπου σε 10-12.000MW, εκ των οποίων 8-9.000MW από αιολικά πάρκα [29].

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει την επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) και κατηγορία παραγωγού και η κατανομή της στο χρόνο καθορίζονται στον ακόλουθο πίνακα, με χρονικό ορίζοντα τα έτη 2014 και 2020:

	2014	2020
<b>Υδροηλεκτρικά</b>	<b>3700</b>	<b>4650</b>
<i>Μικρά (0-15MW)</i>	300	350
<i>Μεγάλα (&gt;15MW)</i>	3400	4300
<b>Φωτοβολταϊκά</b>	<b>1500</b>	<b>2200</b>
<i>Εγκαταστάσεις από επαγγελματίες αγρότες της περίπτωσης (β) της παρ.6 του άρθ.15 του ν.3851/2010</i>	500	750
<i>Λοιπές Εγκαταστάσεις</i>	1000	1450
<b>Ηλιοθερμικά</b>	<b>120</b>	<b>250</b>
<b>Αιολικά (περιλαμβανομένων θαλασσιών)</b>	<b>4000</b>	<b>7500</b>
<b>Βιομάζα</b>	<b>200</b>	<b>350</b>

*Εικ. 1.31 Όρια εγκατεστημένης ισχύος (MW) ανά τεχνολογία Α.Π.Ε. και κατηγορία παραγωγού [Πηγή: www.ypeka.gr]*

#### 1.4 ΜΙΚΡΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Όταν μιλάμε για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μικρής κλίμακας εφαρμογές μιλάμε για μια συνθήκη χρήσης παρά για μια αντικειμενική πραγματικότητα καθώς αυτόν που στην ουσία διαχωρίζει τις προσπάθειες για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι από τη μία η ευκολία και η σχετικά ανέξοδη διαδικασία παραγωγής και από την άλλη η δυνατότητα αυτονομίας της διαχείρισης σε επίπεδο μικρών κοινοτήτων και η δυνατότητα κατασκευής, ελέγχου, επισκευής των εν λόγω εγκαταστάσεων μικρής κλίμακας από ανθρώπους χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις μηχανικής, μαθηματικών, μηχανολογίας κλπ. Κατ' αυτό τον τρόπο οι εγκαταστάσεις μικρής κλίμακας εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ή μικρότερη ενεργειακή αυτονομία ενώ ταυτόχρονα είναι σχετικά απλό για τον οποιοδήποτε να ασχοληθεί μαζί τους τόσο σε επίπεδο κατανόησης των αρχών λειτουργίας όσο και στην ολοκληρωμένη διαχείριση τους, σε επίπεδο καθαρά τεχνικό αλλά και από πολιτική – κοινωνική σκοπιά. Η συλλογική εργασία που απαιτούν τα έργα αυτά, δημιουργούν σχέσεις μεταξύ των ατόμων που απαρτίζουν την ομάδα, εξασφαλίζουν την οριζόντια διάχυση της γνώσης στο κοινωνικό πεδίο και διασφαλίζουν μια συνθήκη που εν ολίγοις καταλήγει στο ότι : “Κατασκευάζουμε, δημιουργούμε αυτόνομα εμείς για εμάς...με τρόπο απλό και κατανοητό σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο κομμάτι κόσμου, με μικρό κόστος και με συλλογική εργασία”.

Όταν αναφέρουμε κατασκευές και έργα μικρής κλίμακας, ειδικά όταν αναφερόμαστε σε ανεμογεννήτριες και μικρά αιολικά πάρκα, εννοούμε κατασκευές με ονομαστική ισχύ κάτω από 70kW ενώ ανεμογεννήτριες κάτω από 10kW χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα μικρές. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών είναι η καμπύλη ισχύος η οποία και αξιοποιείται για να υπολογιστεί η ενέργεια που παράγουν σε διάστημα ενός έτους και ονομάζεται ενεργειακή απόδοση. Με τη σειρά του το μέγεθος αυτό εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου και είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την ανάλυση μας να γνωρίζουμε ότι έργα με τα μεγέθη που αναφέρουμε συνήθως πραγματοποιούνται σε περιοχές με σχετικά χαμηλό άνεμο.

Όσον αφορά στη σύνδεση και την εκμετάλλευση των εν λόγω ανεμογεννητριών αυτές μπορούν είτε να συνδεθούν με αυτόνομο τρόπο είτε στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Είναι κάτι παραπάνω από προφανή τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δυνατότητας, εκτός από την απλή εξοικονόμηση ποσοστού ενέργειας, ειδικά για δυσπρόσιτες και απομακρυσμένες περιοχές καθώς και για μικρές κοινότητες που επιζητούν ενεργειακή αυτονομία.



---

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ**


---

- [1] «Ενεργειακό Πρότυπο και Διεθνείς Πρακτικές», Μ. Μοδινός
- [2] «Past and prospective energy transitions: Insights from history», R. Fouquet, 2012
- [3] «Ηλιακή Ενέργεια», Γ. Τρυπαναγνωστόπουλος Λέκτορα Φυσικής
- [4] National Oceanic and Atmospheric Administration Data Center  
<http://www.ncdc.noaa.gov/>
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/2003\\_European\\_heat\\_wave](http://en.wikipedia.org/wiki/2003_European_heat_wave)
- [6] «Stern Review on the economics of climate change», N. Stern 2007
- [7] «Dangerous Climate Change Assessment Project – Final Report», Met Office, 2011
- [8] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Α. Ζερβός
- [9] Επίσημη Εφημερίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης - Οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, 2009
- [10] «Key World Energy Statistics», IEA, 2012
- [11] «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005
- [12] «Collapse», Jared Diamond, 2005
- [13] «Θερμικά – Ηλιακά συστήματα, Εκδόσεις Ε.Μ.Π», Κ. Αντωνόπουλος, 2004
- [14] «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας», Ι. Καλδέλης,
- [15] «HWEA Wind Statistics - Στατιστική HWD2012», ΕΛΕΤΑΕΝ, 2012
- [16] [http://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική\\_ενέργεια](http://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια)
- [17] «Ανανεώσιμες πηγές Ενέργειας", Δρ. Γ. Τσιλιγκιρίδης, Α.Π.Θ., 2007.
- [18] «Γεωθερμία και Τυποποίηση», Μ. Φυτίκας, ΤΕΕ, 2008  
<http://el.wikipedia.org/wiki/Γεωθερμία>
- [19] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας – Ενέργεια και Πολίτης-Βιομάζα: [http://www.cres.gr/kape/energeia\\_politis/energeia\\_politis\\_biomass.htm](http://www.cres.gr/kape/energeia_politis/energeia_politis_biomass.htm)
- [20] «Το ενεργειακό δυναμικό της βιομάζας γεωργικών και δασικών υποπροϊόντων», Κ. Αποστολάκης, Σ. Κυρίτσης, Χ. Σούτερ, ΕΛΚΕΠΑ-ΙΤΕ, 1987
- [21] «Μελέτη διερεύνησης δυνατοτήτων για την αξιοποίηση της βιομάζας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΔΕΗ», Τομέας Βιομάζας, ΚΑΠΕ, 1997
- [22] Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης -Υδραυλική Ενέργεια  
<http://www.allaboutenergy.gr/index.html>
- [23] «Κυματική Ενέργεια», Πτυχιακή Εργασία Ι. Μαυρομάτης, 2010
- [24] Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – Ινστιτούτο Τεχνολογίας & Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων–Υδρογόνο <http://www.allaboutenergy.gr/index.html>
- [25] «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2013
- [26] «Wind in Power - 2012 European Statistics», EWEA, 2012
- [27] «Global Wind Statistics – 2012», GWEC, 2013
- [28] Εφημερίς της Κυβερνήσεως, Αρ. Φύλου 85, 4 Ιουνίου 2010
- [29] Αιτιολογική Έκθεση στο σχέδιο νόμου «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και άλλες διατάξεις σε θέματα αρμοδιότητας του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής», 2010
- [30] «Past and prospective energy transitions: Insights from history», R. Fouquet, 2012
- [31] «Key World Energy Statistics», IEA, 2012
- [32] NOAA-Earth System Research Laboratory-Global Monitoring Division-Full Mauna Loa CO<sub>2</sub> record
- [33] «Το αναπτυξιακό πακέτο για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας με έμφαση στην Αιολική Ενέργεια», ΕΛΕΤΑΕΝ, 2012
- [34] «EU Energy in figures – Statistical pocketbook 2012», European Commission, 2013

# 2

## ΑΝΕΜΟΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 2.1 Ο ΑΝΕΜΟΣ ΩΣ ΦΥΣΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

#### 2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία μικρομετεωρολογίας

Η μικρομετεωρολογία αποτελεί ένα κομμάτι της μετεωρολογίας που ασχολείται με τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και τις διεργασίες, στο χαμηλότερο άκρο του φάσματος των ατμοσφαιρικών κλιμάκων, που ονομάζονται μικροκλίμακες (microscales). Οι διεργασίες αυτές, χαρακτηρίζονται ως διεργασίες μικρής ή τοπικής κλίμακας (small scale ή local scale processes). Το εύρος της μικρομετεωρολογίας περιορίζεται μονάχα σε εκείνα τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο κατώτερο στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα συνήθως στα πρώτα 500 έως 1500 m που ονομάζεται ατμοσφαιρικό ή πλανητικό οριακό στρώμα (atmospheric ή planetary boundary layer) [1]. Η κυριότερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την διαίρεση της ατμόσφαιρας καθ' ύψος, είναι εκείνη η οποία υπολογίζει και χρησιμοποιεί τις κατακόρυφες διαφορές της θερμοκρασίας που μετρώνται με ραδιοκύματα ή γυροστατικούς δορυφόρους.

Βάσει της παραπάνω μεθόδου προκύπτει η ακόλουθη καθ' ύψος διαίρεση της ατμόσφαιρας:

- α) Τροπόσφαιρα
- β) Στρατόσφαιρα
- γ) Μεσόσφαιρα
- δ) Θεرمόσφαιρα
- ε) Εξώσφαιρα

Στην τροπόσφαιρα, η οποία περιέχει το 75% της γήινης ατμόσφαιρας καθώς επίσης και σχεδόν όλους τους υδρατμούς ( $H_2O(g)$ ), λαμβάνουν χώρα και εξελίσσονται όλα τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας και μάζας που απασχολούν τους μετεωρολόγους.

Το κύριο γνώρισμα της τροπόσφαιρας είναι η ελάττωση της θερμοκρασίας με το υψόμετρο που κατά μέσο όρο είναι  $0.65^{\circ}C$  ανά 100 m και τη διαφορά αυτή την ονομάζουμε κατακόρυφη θερμοβαθμίδα [1]:  $gradT|_{x=ct} \wedge y=ct$

Η τροπόσφαιρα διαιρείται στις παρακάτω ζώνες [1]:

Κατώτερη τροπόσφαιρα: από έδαφος μέχρι ύψους 1 – 1.5 km

Μεσαία τροπόσφαιρα: 1.5 – 5 km

Ανώτερη τροπόσφαιρα: 6 – 8.5 km

Στο ανώτατο σημείο της τροπόσφαιρας, υπάρχει μια επιφάνεια αναστροφής ποικιλόμορφου πάχους 9 – 12 km, που ονομάζεται τροπόπαυση.

Η τροπόπαυση βρίσκεται σε γεωγραφικό ύψος:

17 – 18 km	Ισημερινή ζώνη
11 – 12 km	Εύκρατη ζώνη
7 – 8 km	Πολική ζώνη

Άνεμοι ή ρεύματα αέρα, λέγονται οι αέριες μάζες της ατμόσφαιρας που βρίσκονται σε κίνηση. Πιο συγκεκριμένα, όταν οι μάζες αυτές κινούνται παράλληλα προς την επιφάνεια της γης λέγονται άνεμοι, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση λέγονται ρεύματα αέρα. Η διάκριση αυτή, από τη σκοπιά της Μετεωρολογίας, είναι καθαρά τεχνητή, γιατί οι ίδιες αέριες μάζες, μπορούν να είναι, ανάλογα με την κίνησή τους, είτε άνεμοι είτε ρεύματα αέρα. Στο εξής, με τη λέξη άνεμος, εννοούμε και τις δύο περιπτώσεις.

Οι άνεμοι, σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία, την πίεση, την υγρασία και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία της ατμόσφαιρας, αποτελούν τα μετεωρολογικά στοιχεία, των οποίων οι μέσες τιμές καθορίζουν το κλίμα μιας περιοχής. Αντίθετα, οι στιγμιαίες τιμές των στοιχείων αυτών, καθορίζουν τον καιρό μιας περιοχής [2].

Οι μεταβολές των τιμών των μετεωρολογικών στοιχείων, οφείλονται στην ακτινοβολία του ήλιου, στη σχετική κίνηση της γης και του ήλιου, στην ατμόσφαιρα της γης και τέλος στην ανομοιομορφία της σύστασης του εδάφους (θάλασσες, ήπειροι, βουνά, πεδιάδες κτλ).

Οι άνεμοι σε παγκόσμια κλίμακα είναι κινήσεις μεγάλων ποσοτήτων αερίων μαζών στην ατμόσφαιρα που οφείλονται κυρίως στις θερμοκρασιακές διαφορές της ατμόσφαιρας λόγω των τοπικών διαφορών στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Οφείλονται όμως ακόμη και στις αδρανειακές δυνάμεις, (φυγόκεντρες και Coriolis), που αναπτύσσονται λόγω της περιστροφής της γης.

Στο κατώτερο μέρος της ατμόσφαιρας οι κινήσεις του ανέμου επηρεάζονται από την τραχύτητα της επιφάνειας του εδάφους και τα εμπόδια που συναντούν στην επιφάνεια της γης (ανθρώπινες κατασκευές).

Οι κατακόρυφες κινήσεις του ανέμου συμβαίνουν λόγω στροβιλισμών που οφείλονται σε μηχανικά ή θερμικά αίτια.

### 2.1.2 Δημιουργία των ρευμάτων του αέρα

Εξετάζοντας το πρόβλημα της δημιουργίας των ρευμάτων του αέρα, από τη σκοπιά της Ρευστοδυναμικής, μπορούμε αρχικά να κάνουμε την απλούστερη παραδοχή ότι η γη είναι ακίνητη.

Από τη θερμική ακτινοβολία που η γη λαμβάνει από τον ήλιο, το 40% επιστρέφει προς το διάστημα, ενώ το υπόλοιπο, απορροφάται από την επιφάνειά της και την ατμόσφαιρα, και πιο συγκεκριμένα από το κατώτερο τμήμα της, την τροπόσφαιρα (ή οποία είναι και η περιοχή μελέτης των κλιματικών μεταβολών) [3]. Η ακτινοβολία που απορροφάται από τη γη, μετατρέπεται σε θερμότητα και έπειτα εκπέμπεται προς την ατμόσφαιρα όπου απορροφάται στα μεν χαμηλότερα στρώματα από τους υδρατμούς, στα δε ψηλότερα από το όζον.

Αν όμως δεχτούμε ότι η μέση θερμοκρασία της γης μένει εν γένει σταθερή, σε μια μεγάλη χρονική κλίμακα, τότε η ενέργεια που ακτινοβολείται από τη γη, ισοσταθμίζεται από την ενέργεια που απορροφάται.

Κατά συνέπεια η ατμόσφαιρα, ενώ εκπέμπει θερμότητα και προς τη γη και προς το διάστημα, (στο τελευταίο μόνο με τη μορφή ακτινοβολίας), απορροφά από το έδαφος συγκριτικά μικρή ποσότητα ενέργειας, μέρος της οποίας επιστρέφει και πάλι στη γη. Αυτό σημαίνει ότι η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας είναι χαμηλότερη από εκείνη της επιφάνειας του εδάφους. Εξάλλου η διαφορετική θερμοκρασία της επιφάνειας στα διάφορα γεωγραφικά πλάτη, προκαλεί διαφορετική αύξηση της θερμοκρασίας της τροπόσφαιρας.

Εδώ οφείλουμε να επισημάνουμε ότι, αντίθετα προς την πυκνότητα των υγρών, η πυκνότητα των αερίων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βαρομετρική πίεση και τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα για τα τέλεια αέρια η εξάρτηση αυτή δίνεται από την καταστατική εξίσωση:

$$P = \rho R^* T$$

όπου:

$P$  : η βαρομετρική πίεση,

$\rho$  : η πυκνότητα,

$T$  : η απόλυτη θερμοκρασία,

$R^*$ : η ειδική σταθερά του αερίου

Όπως αποδεικνύεται, ειδικά στα τέλεια αέρια το μέτρο συμπιεστότητας είναι αριθμητικά και διαστατικά ίσο με το αντίστροφο της πίεσης και ο συντελεστής κυβικής διαστολής (ή διαστολικό ιξώδες) είναι αριθμητικά και διαστατικά ίσος με το αντίστροφο της θερμοκρασίας. Ο ατμοσφαιρικός αέρας αν θεωρηθεί ως καθαρό ρευστό, ακολουθεί ικανοποιητικά την καταστατική εξίσωση των τέλειων αερίων όταν βρίσκεται σε χαμηλές πιέσεις και υψηλές θερμοκρασίες. Σε συνθήκες όπου δεν ισχύει το μοντέλο των τέλειων αερίων για τον υπολογισμό της πυκνότητας των αερίων ισχύει η γνωστή καταστατική εξίσωση [4]:

$$P = z \cdot \rho \cdot R^* \cdot T$$

όπου η παράμετρος  $z$  δίνεται από νομογράφημα.

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει:

$$\frac{P}{\rho \cdot T} = z \cdot R^* = c \cdot t$$

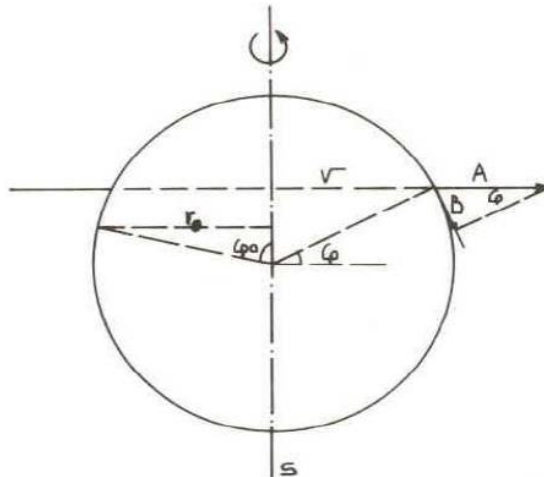
Η τελευταία σχέση φανερώνει ότι σε κάθε θερμοδυναμική μεταβολή και γενικότερα σε κάθε θερμοφυσική και χημική διεργασία, πλην των πυρηνικών διεργασιών προφανώς, το πηλίκο:

$\frac{P}{\rho \cdot T}$  οφείλει να έχει σταθερή τιμή.

Με την αύξηση λοιπόν της θερμοκρασίας, ο αέρας όχι μόνο διαστέλλεται, αλλά γίνεται και ελαφρύτερος, γι' αυτό το λόγο κινείται προς τα πάνω. Λόγω του φαινομένου αυτού δημιουργείται ένα κλειστό κύκλωμα κυκλοφορίας των αερίων μαζών της ατμόσφαιρας μέσα στο οποίο οι μάζες αυτές ανέρχονται στην περιοχή του ισημερινού προς τα πάνω και μέχρι τη στρατόσφαιρα, όπου εκεί συγκλίνουν παράλληλα προς τη γη με κατεύθυνση προς τους πόλους. Στους πόλους, στρέφονται προς τα κάτω μέχρι την επιφάνεια και πνέουν παράλληλα προς αυτή με κατεύθυνση προς τον ισημερινό.

Οι παραπάνω άνεμοι οι οποίοι όπως αναφέραμε, αναπτύσσονται και κινούνται παράλληλα και κοντά στην επιφάνεια της γης με κατεύθυνση από τους πόλους προς τον ισημερινό, λέγονται αληγεείς. Αντίθετα, οι άνεμοι που κινούνται στο χώρο της στρατόσφαιρας με κατεύθυνση από τον ισημερινό προς τους πόλους, λέγονται ανταληγεείς [5].

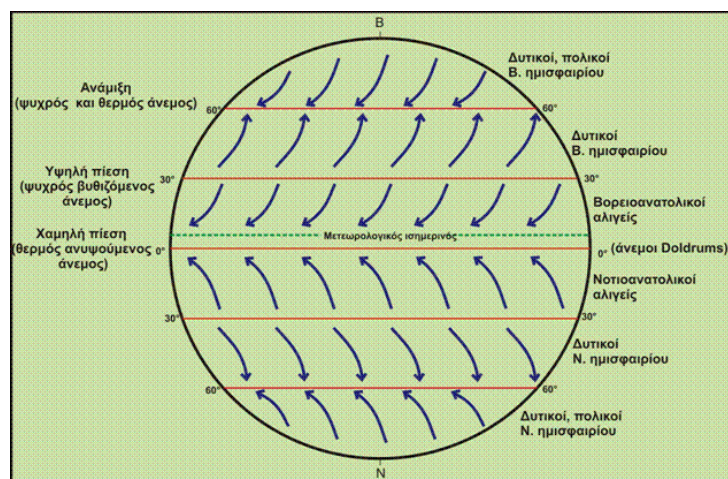
Σε όσα αναφέραμε παραπάνω, κάναμε την αρχική παραδοχή ότι η γη είναι ακίνητη. Αν τώρα συνυπολογίσουμε και την περιστροφή της, παρατηρούμε πως η διεύθυνση των παραπάνω ανέμων μεταβάλλεται. Στο βόρειο ημισφαίριο και σε γεωγραφικά πλάτη  $0 - 30^\circ$ , γίνονται βορειοανατολικοί, ενώ στο νότιο ημισφαίριο και σε γεωγραφικά πλάτη  $30 - 60^\circ$ , γίνονται νοτιοδυτικοί. Αν τώρα λάβουμε υπόψη ότι η γραμμική ταχύτητα περιστροφής της γης στον ισημερινό είναι  $460 \text{ m / sec}$  και σε γεωγραφικό πλάτος  $60^\circ$ , είναι  $230 \text{ m / sec}$ , τότε η σχετική κατεύθυνση των ανέμων παρεκκλίνει όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.1 [5].



**Εικ. 2.1** Παρέκκλιση της σχετικής κατεύθυνσης των ανέμων

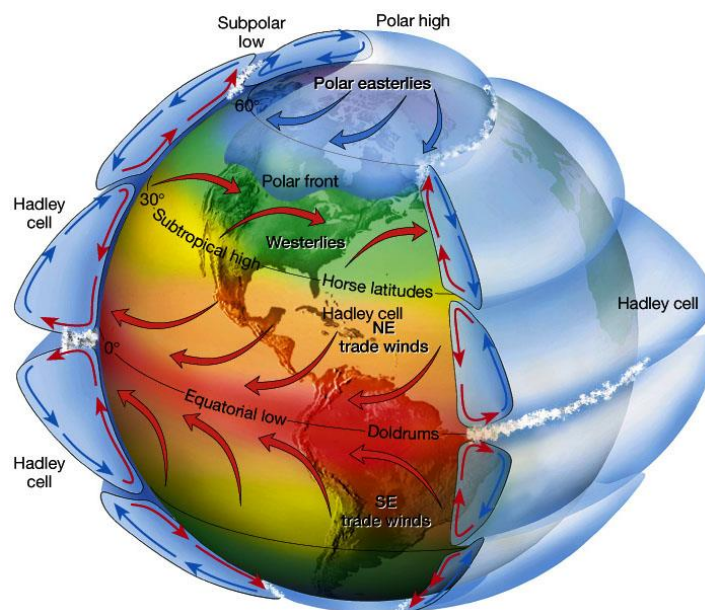
[Πηγή: «Εισαγωγή στη Δυναμική Μετεωρολογία», Δ. Μεταξάς, Α. Μπαρτζώκας, 1993]

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι θα πρέπει ορισμένα σημεία και μάλιστα σε γεωγραφικό πλάτος  $30^\circ$  να παρουσιάζουν υψηλές πιέσεις γύρω από τις οποίες αναπτύσσονται οι ονομαζόμενοι αντικυκλώνες, ενώ άλλα σημεία στην περιφέρεια του πολικού κύκλου σε γεωγραφικό πλάτος  $60^\circ$  παρουσιάζουν χαμηλές πιέσεις γύρω από τις οποίες αναπτύσσονται αντικυκλώνες. Εδώ βέβαια θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι τιμές των παραπάνω γεωγραφικών πλατών δεν είναι ακριβείς λόγω του ότι στην επιφάνεια της γήινης σφαίρας, γεωγραφική κατανομή των θαλασσών και των ηπείρων είναι ανομοιομορφή. Παράλληλα, λόγω της συνεχούς ανάμιξης του νερού των θαλασσών, οι υγρές επιφάνειες απορροφούν μεγαλύτερες ποσότητες θερμότητας και λόγω της μεγάλης τους ειδικής θερμοχωρητικότητας, διατηρούν τη θερμοκρασία σε σταθερότερα επίπεδα σε σχέση με τις χερσαίες επιφάνειες. Μια απολοποιημένη αναπαράσταση της κυκλοφορίας των ανέμων δίνεται στις Εικόνες 2.2 και 2.3.



**Εικ. 2.2** Απολοποιημένη αναπαράσταση της παγκόσμιας κατανομής των ανέμων

[Πηγή: <http://www.geo.auth.gr> – Ωκεάνια Κυκλοφορία – Θαλάσσια Ρεύματα]



**Εικ. 2.3** Τριδιάστατη αναπαράσταση της κυκλοφορίας των ανέμων  
[Πηγή: <http://serc.carleton.edu/earthlabs/climate>]

### 2.1.3 Μέτωπα των ρευμάτων του αέρα

Μέτωπο ενός ρεύματος αέρα, ονομάζεται γενικά η συνοριακή επιφάνεια μεταξύ των μαζών του αέρα διαφορετικής θερμοκρασίας. Συνήθως θεωρείται ως μέτωπο το σημείο ασυνέχειας της πυκνότητας των μαζών του αέρα, το οποίο ταυτίζεται με το σημείο ασυνέχειας της θερμοκρασίας, γιατί αμελούνται οι διαφορές της πυκνότητας που οφείλονται στην περιεκτικότητα του αέρα σε υδατμούς. Επομένως η πυκνότητα είναι συνάρτηση **μόνο** της θερμοκρασίας. Η διαμόρφωση των μετώπων και η μελέτη τους, αποτελούν σημαντικά στοιχεία της μετεωρολογίας. Για τη δημιουργία ενός μετώπου, θα πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες δύο συνθήκες [5]:

- Οι μάζες των δύο ρευμάτων θα πρέπει να έχουν διαφορετικές πυκνότητες.
- Οι επικρατούντες άνεμοι θα πρέπει να οδηγήσουν τις μάζες των δύο ρευμάτων σε απέναντι θέσεις.

Η μαθηματική έκφραση της δημιουργίας ενός μετώπου δίνεται από την ακόλουθη ανυσματική εξίσωση [5]:

$$\vec{f} = - \left| \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \right| \cdot \left| \frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{n}} \right|$$

όπου  $f = f(T, \vec{V})$ , είναι η συνάρτηση δημιουργίας ενός μετώπου.

Το μοναδιαίο άνυσμα  $\vec{n}$  είναι κάθετο στις ισοθερμικές καμπύλες του εκάστοτε μετεωρολογικού χάρτη. Επομένως, για να υπάρχει μέτωπο, πρέπει το ρεύμα του αέρα να έχει μια συνιστώσα κάθετη προς τις ισοθερμικές καμπύλες, η οποία να ελαττώνεται κατά μήκος της διεύθυνσής του, προς τα κατάντι της ροής. Εδώ όμως θα πρέπει να σημειώσουμε ότι στα κινούμενα στρώματα του αέρα, εμφανίζονται διάφορα φαινόμενα γνωστά από τη Ρευστοδυναμική, όπως ανάπτυξη διαφορετικών ταχυτήτων σε παράλληλα στρώματα του αέρα λόγω των ιξωδών διατμητικών τάσεων, ανάπτυξη δινών και άλλων φαινομένων τυρβώδους ροής. Η θεωρητική έρευνα των προβλημάτων αυτών είναι γενικά δύσκολη, γιατί

οι ροές των ρευμάτων είναι τρισδιάστατες και δεν μπορούν να αναχθούν σε επίπεδο διατομής, όπως συμβαίνει λόγω χάριν στα συνήθη προβλήματα υδραυλικής. Εάν ένα μέτωπο περιέχει μια συνιστώσα του ρεύματος αέρα κάθετη σε αυτό, κινείται με τη διεύθυνση και την ταχύτητα της συνιστώσας αυτής. Τα μέτωπα, στα κινούμενα ρεύματα του αέρα, λειτουργούν ως διαχωριστικοί τοίχοι, διαμέσου των οποίων δεν διεισδύουν τα μόρια του αέρα, αλλά κινούνται κάθετα προς την επιφάνειά τους. Όταν ένα μέτωπο κινείται έτσι, ώστε ο ψυχρός αέρας να καταλαμβάνει μια περιοχή που προηγουμένως υπήρχε θερμός, λέγεται ψυχρό μέτωπο, ενώ αν συμβαίνει το αντίθετο, λέγεται θερμό μέτωπο [5].

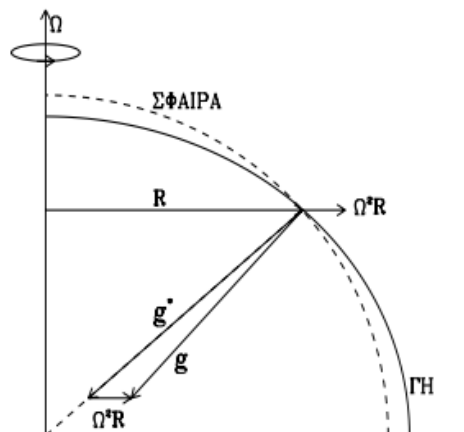
## 2.2 ΟΙ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΠΟΥ ΕΝΕΡΓΟΥΝ ΣΕ ΜΙΑ ΜΑΖΑ ΣΤΗΝ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΑ

Οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέριας μάζας στην ατμόσφαιρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: **δυνάμεις όγκου** και **δυνάμεις επιφάνειας** [6]. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις δυνάμεις που ενεργούν σε μια αέρια μάζα (ή όγκο) ανεξάρτητα από την ύπαρξη άλλων αερίων μαζών σε γειτνίαση με τη μάζα. Στις δυνάμεις αυτές περιλαμβάνονται η δύναμη της βαρύτητας και οι δυνάμεις αδράνειας (στην προκείμενη περίπτωση, η δύναμη coriolis και η φυγόκεντρος). Οι δυνάμεις επιφάνειας οφείλονται στην αλληλεπίδραση μιας ορισμένης αέριας μάζας με το περιβάλλον της και ενεργούν στην επιφάνεια που περιβάλλει την εν λόγω αέρια μάζα. Σ' αυτές τις δυνάμεις ανήκουν η δύναμη βαροβαθμίδας και οι δυνάμεις τριβής. Θα εξετάσουμε σύντομα τη φύση των ατμοσφαιρικών δυνάμεων. Στα επόμενα οι δυνάμεις αναφέρονται σαν δυνάμεις ανά μονάδα μάζας, δηλαδή σαν επιταχύνσεις.

### 2.2.1 Δύναμη βαρύτητας

Για ένα παρατηρητή στην επιφάνεια της γης, ένα σώμα που ηρεμεί υφίσταται εκτός από τη δύναμη της βαρύτητας,  $m\mathbf{g}^* = -m\left(\frac{GM}{r^2}\right)\vec{r}$ , και μια φυγόκεντρο δύναμη,  $m\Omega^2\mathbf{r}$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Η φυγόκεντρος δύναμη εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος (είναι μηδέν στους πόλους και μέγιστη στον ισημερινό) και είναι πολύ μικρή ( $\leq 0.3\%$ ) σε σύγκριση με τη δύναμη της βαρύτητας στην επιφάνεια της γης και στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας [6]. Στους υπολογισμούς συνδυάζουμε τις δύο αυτές δυνάμεις ως επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης. Η ενεργός βαρύτητα είναι:

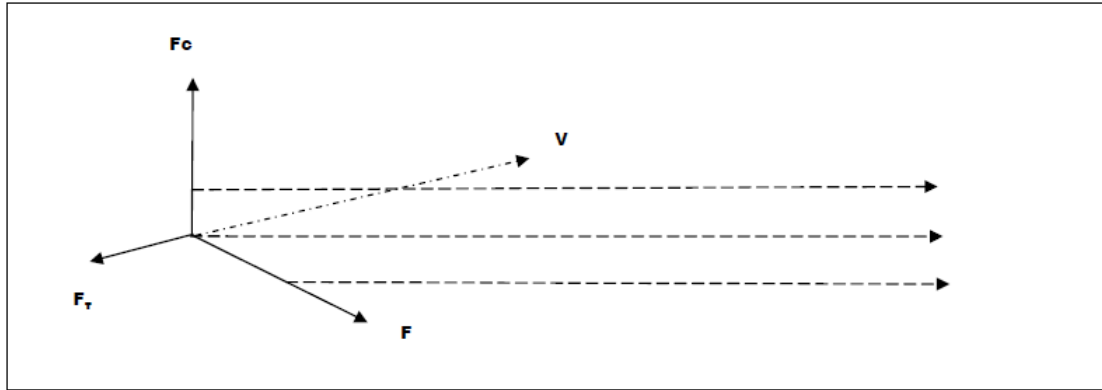
$$\mathbf{g} \equiv \mathbf{g}^* - \Omega^2\mathbf{r}$$



**Εικ. 2.4** Η ενεργός βαρύτητα  $\mathbf{g}$  είναι το διανυσματικό άθροισμα της πραγματικής δύναμης βαρύτητας  $\mathbf{g}^*$  της φυγόκεντρος δύναμews,  $\Omega^2\mathbf{R}$ . Στο σχήμα το  $\mathbf{g}$  πρέπει να είναι τη θέσης του  $\mathbf{g}^*$  και αντίθετα. [Πηγή: «Εισαγωγικά Στοιχεία Ατμοσφαιρικής Φυσικής», Χ. Χαλδούπης, 2000]

### 2.2.2 Δύναμη coriolis

Όταν ένας στοιχειώδης αδρανειακός όγκος ελέγχου του αέριου μίγματος που χαρακτηρίζουμε με τον όρο ατμόσφαιρα, είναι ακίνητος κοντά στην επιφάνεια της γης, τότε θα περιστρέφεται μαζί της ενώ η προς τους πόλους συνιστώσα της γήινης έλξης, θα ισορροπείται από τη συνιστώσα της φυγόκεντρης, (αδρανειακής), δύναμης που διευθύνεται προς τον ισημερινό όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Εικ. 2.5** Ισορροπία αδρανειακού όγκου ελέγχου  
[Πηγή: «Σημειώσεις Θερμοδυναμικής της ατμόσφαιρας», ΓΕΑ, 1990]

Αν τώρα υποθέσουμε, χωρίς βλάβη της γενικότητας, ότι ο εν λόγω όγκος ελέγχου βρίσκεται στο βόρειο γεωγραφικό πλάτος  $\varphi^0$  και εκτελεί σχετική κυκλική κίνηση ως προς τη γη με γραμμική ταχύτητα  $\vec{V}$  από δύση προς ανατολή, τότε η ταχύτητα αυτή δίνεται από τη σχέση [7]:

$$\vec{V} = r \cdot \vec{\Omega}$$

Όπου  $\vec{\Omega}$  το άνυσμα γωνιακής περιστροφής της γης, μέτρου  $|\vec{\Omega}| = 0.729 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$

Η δύναμη λόγω περιστροφής της γης, δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{F}' = 2 \frac{|\vec{V}|^2}{r} \cdot \sin \varphi = |\vec{V}| \cdot 2 \cdot |\vec{\Omega}| \cdot \sin \varphi$$

όπου ο όρος  $2 \cdot |\vec{\Omega}| \cdot \sin \varphi$  ονομάζεται παράμετρος Coriolis και συχνά συμβολίζεται με το γράμμα  $f$ . Είναι μια συνάρτηση που μεταβάλλεται αργά με το γεωγραφικό πλάτος με τιμές που είναι μηδέν στον ισημερινό και  $\pm 1.46 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$  στους πόλους. Σε μέσα γεωγραφικά πλάτη ισχύει:  $f = \pm 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ . Η τιμή της εν λόγω παραμέτρου είναι θετική στο βόρειο ημισφαίριο και αρνητική στο νότιο [7].

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, οι άνεμοι οφείλονται στην ανισότητα της βαρομετρικής πίεσης πλησίον της γήινης επιφάνειας και τείνουν να πνέουν από περιοχές υψηλότερης πίεσης σε περιοχές χαμηλότερης, κατά την κατεύθυνση της ισχυρότερης αρνητικής κλίσης του βαρομετρικού πεδίου, δηλαδή κάθετα στις ισοβαρείς καμπύλες. Η κατεύθυνσή τους όμως επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες εκ των οποίων ένας πολύ σημαντικός είναι η **κοριόλεια επιτάχυνση** λόγω της περιστροφής της γης. Από τη σκοπιά της Ρευστοδυναμικής, η πρόβλεψη της έντασης και της κατεύθυνσης του ανέμου είναι ένα εξαιρετικά δυσχερές πρόβλημα δυναμικής συμπιεστού ρευστού, με μεικτές συνοριακές συνθήκες και πολύπλοκες θερμοδυναμικές μεταβολές. Χαρακτηριστική είναι η ανομοιότητα των βαρομετρικών



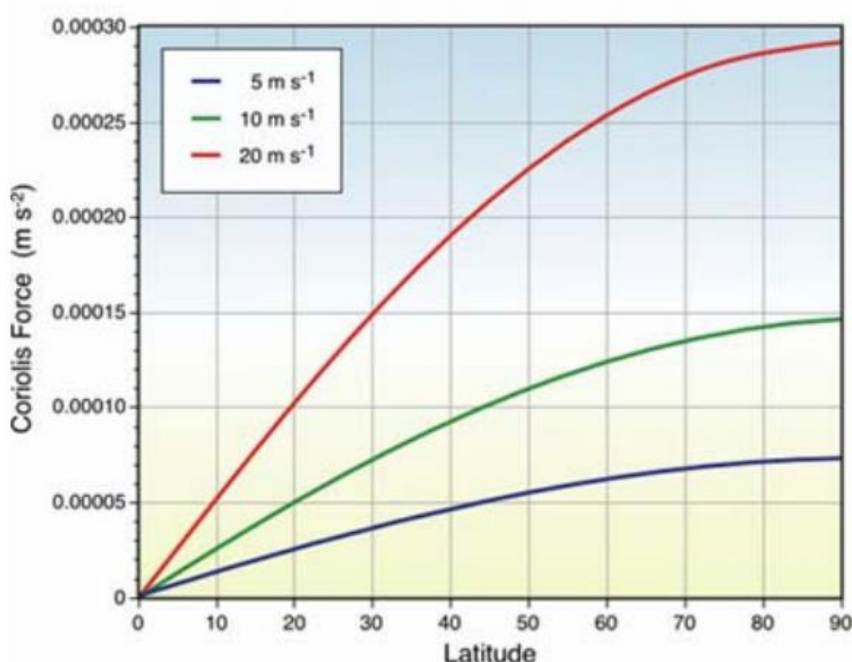
κατανομών σε διάφορα υψόμετρα π.χ. η οριζόντια μετάθεση του κέντρου μιας βαρομετρικής ύψωσης σε υψόμετρο μερικών χιλιομέτρων από την επιφάνεια της γης.

Η δύναμη Coriolis προκύπτει όταν η κίνηση εξετάζεται σε ένα σύστημα αναφοράς που περιστρέφεται όταν το σώμα κινείται στο σύστημα αυτό με ταχύτητα  $V$ . Η δύναμη coriolis για ένα παρατηρητή πάνω στη γη, είναι αποτρεπτική γιατί ενεργεί κάθετα στην ταχύτητα  $V$

Το άνυσμα της δύναμης Coriolis με το ίδιο σημείο εφαρμογής, προκύπτει όπως αναφέραμε, από την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{F}_c = |\vec{V}| \cdot 2 \cdot |\vec{\Omega}| \cdot \sin \varphi$$

Προφανώς η δύναμη  $\vec{F}_c$  είναι κάθετη στο επίπεδο των ανυσμάτων  $\vec{\Omega}$  και  $\vec{V}$ . Για τις συνηθισμένες ταχύτητες ανέμου, η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης Coriolis είναι μικρότερη από το 1/100 της επιτάχυνσης της βαρύτητας της γης και μπορεί να παραλειφθεί.



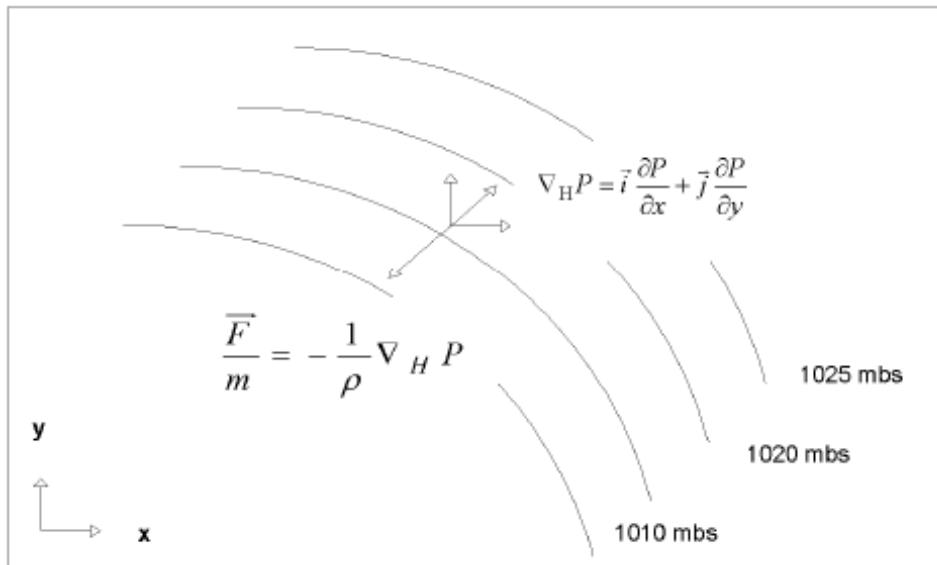
**Εικ. 2.6** Μεταβολή της δύναμης Coriolis ( $ms^{-1}$ ) με το γεωγραφικό πλάτος

[Πηγή: «Αρχές Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας», Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, 2010]

### 2.2.3 Δύναμη βαροβαθμίδας

Από τη στατιστική φυσική γνωρίζουμε ότι η πίεση στην επιφάνεια μιας στοιχειώδους αέριας μάζας είναι η κάθετη συνιστώσα των δυνάμεων που προέρχεται από κρούσεις των μορίων του περιβάλλοντος αέρα ανά μονάδα επιφάνειας.

Η δύναμη αυτή κατευθύνεται πάντα προς το εσωτερικό της αέριας μάζας και, για χωρικά ομοιόμορφες πιέσεις, έχει συνισταμένη ίση με μηδέν. Η αέρια μάζα δέχεται δύναμη διαφορετική του μηδενός, μόνο όταν η πίεση μεταβάλλεται στο χώρο. Η δύναμη που οφείλεται στη μεταβολή της πίεσης στο χώρο ονομάζεται δύναμη βαροβαθμίδας. Η μεταβολή της πίεσης, χαρακτηρίζεται από την κλίση της πιεζομετρικής γραμμής, η οποία προκύπτει από την απόσταση των ισοβαρών καμπύλων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [6]:



**Εικ. 2.7** Δίκτυο ισοβαρών καμπυλών

[Πηγή: «Σημειώσεις Θερμοδυναμικής της ατμόσφαιρας», ΓΕΑ, 1990]

Η δύναμη  $\vec{F}$  λόγω μεταβολής της πίεσης, (δύναμη βαροβαθμίδας), έχει τις ακόλουθες συνιστώσες σε καρτεσιανές συντεταγμένες [7]:

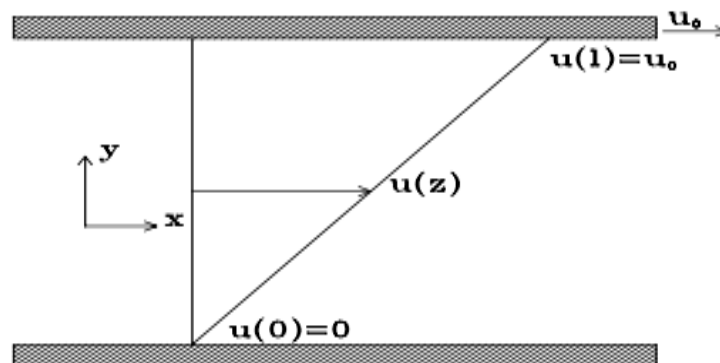
$$F_x = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \qquad F_y = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι δύναμη βαροβαθμίδας κατευθύνεται από περιοχές υψηλών σε περιοχές χαμηλών πιέσεων

### 2.2.4 Δύναμη τριβής

Όταν μία αέρια μάζα κινείται ως προς το περιβάλλον της, λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων, υπάρχει μια συνεχής ανταλλαγή μορίων, και συνεπώς ορμής, μεταξύ της εν λόγω μάζας και του περιβάλλοντός της. Η δύναμη τριβής είναι το μακροσκοπικό αποτέλεσμα αυτής της ανταλλαγής ορμής στο μοριακό επίπεδο. Προκύπτει ότι σ' όλη την ατμόσφαιρα οι δυνάμεις τριβής είναι σχετικά μικρές και σε πρώτη προσέγγιση μπορεί να αγνοηθούν, εκτός από ένα στρώμα πάχους  $\sim 1$  km αμέσως πάνω από την επιφάνεια της γης, το οποίο ονομάζεται πλανητικό οριακό στρώμα [6]. Στο στρώμα αυτό η ροή του αέρα πάνω από την (σχετικά) ακίνητη και ακανόνιστη επιφάνεια του πλανήτη οδηγεί στην ανάπτυξη μιας ανασχετικής δύναμης τριβής, της οποίας το μέγεθος είναι συγκρίσιμο με τις άλλες δυνάμεις που υπεισέρχονται στην εξίσωση κίνησης του ατμοσφαιρικού αέρα.

Παρόλο που μία αυστηρή ανάλυση της φύσεως της δύναμης της τριβής είναι δύσκολη, η βασική φυσική ιδέα μπορεί να δοθεί αρκετά απλά. Ας θεωρήσουμε ένα στρώμα ασυμπίεστου ρευστού που περιορίζεται μεταξύ δύο οριζοντίων πλακών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8. Η κάτω πλάκα (που μπορεί να σχετιστεί με το έδαφος) παραμένει σταθερή ενώ η άνω κινείται προς την κατεύθυνση x με σταθερή ταχύτητα  $u_0$  (π.χ. αντιστοιχεί σ' ένα στρώμα αέρα που κινείται οριζόντια). Τα μόρια του ρευστού σε επαφή με την κινούμενη πλάκα, θα κινούνται με την ταχύτητα της πλάκας. Δηλαδή στο ύψος  $z = l$  το ρευστό κινείται με ταχύτητα  $u(l) = u_0$ , ενώ στο ύψος  $z = 0$ ,  $u(0) = 0$ .



**Εικ. 2.8** Η μεταβολή της ταχύτητας με το ύψος δημιουργεί μία διατμητική τάση  
 [Πηγή: «Αρχές Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας», Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, 2010]

Προκύπτει ότι η δύναμη που ενεργεί στην πάνω πλάκα, και που χρειάζεται να διατηρήσει την ομαλή κίνησή της, εξουδετερώνοντας τη δύναμη τριβής, είναι ανάλογη της επιφάνειας της πλάκας  $A$ , της ταχύτητας  $u_0$  και αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης  $l$  που διαχωρίζει τις πλάκες [6]:

$$F = \eta A u_0 / l$$

όπου  $\eta$  είναι ο συντελεστής ιξώδους του ρευστού, ο οποίος εξαρτάται από τη φύση του ρευστού και τις ενδομοριακές δυνάμεις.

Η δύναμη αυτή ασκείται από την κινούμενη πλάκα στο στρώμα του ρευστού που βρίσκεται σ' επαφή μ' αυτή. Όταν η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών τείνει στο μηδέν, ορίζουμε τη δύναμη τριβής ανά μονάδα επιφάνειας μέσω της σχέσης [6]:

$$\tau_{zx} = \eta \frac{\partial u}{\partial z}$$

όπου με  $\tau_{zx}$ : η διατμητική τάση στην κατεύθυνση  $x$  λόγω της μεταβολής της ταχύτητας στην κατεύθυνση  $z$ .

Αυτή η δύναμη οφείλεται στην μεταφορά ορμής, λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα. Επειδή η ταχύτητα αυξάνεται με το ύψος, τα μόρια, σ' ένα ορισμένο επίπεδο, που περνούν προς τα κάτω σε μία χρονική στιγμή μεταφέρουν περισσότερη ορμή απ' αυτά που περνούν προς τα πάνω από το ίδιο επίπεδο. Το αποτέλεσμα είναι μία καθαρή μεταφορά ορμής προς τα κάτω. Αυτή η μεταφορά ορμής ανά μονάδα επιφάνειας και μονάδα χρόνου είναι η διατμητική τάση. Επειδή η μεταβολή της ορμής οφείλεται στη διαφορά των συνιστωσών των μοριακών ταχυτήτων κατά μήκος της διεύθυνσης  $x$ , η διατμητική τάση κατευθύνεται προς την ίδια διεύθυνση και είναι αντίθετη της κίνησης. Για τους σκοπούς του κεφαλαίου, αρκεί να πάρουμε την ανασχετική δύναμη τριβής (την διατμητική τάση) στην πιο απλή της μορφή:

$$F_{\tau} = -\alpha V$$

όπου  $V$  είναι η ταχύτητα της αέριας μάζας, και  $\alpha$  ένας συντελεστής (θετικός αριθμός) που εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η ταχύτητα του ανέμου, η τραχύτητα του εδάφους, και η ατμοσφαιρική στατική ευστάθεια [6].

### 2.2.5 Φυγοκεντρική δύναμη του ανέμου.

Κατά την περιδίνηση του ανέμου που οφείλεται στις δυνάμεις λόγω μεταβολής των πιέσεων και στις δυνάμεις λόγω περιστροφής της γης, αναπτύσσεται στα μόρια του αέρα κεντρομόλος δύναμη, η μελέτη της οποίας, από τη σκοπιά της Μετεωρολογίας, μπορεί να γίνει μέσω της φυγοκεντρικής (αδρανειακής δύναμης). Ο συνδυασμός των δυνάμεων πίεσης, των δυνάμεων λόγω περιστροφής της γης και των φυγοκεντρικών δυνάμεων, καθορίζουν την κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα.

## 2.3 ΤΥΠΟΙ ΑΝΕΜΟΥ

### 2.3.1 Γεωστροφικοί άνεμοι

Οι άνεμοι οι οποίοι «δημιουργούνται» από την ανυσματική διαφορά των δυνάμεων πίεσης και των αδρανειακών δυνάμεων, (φυγόκεντρων δυνάμεων), ονομάζονται γεωστροφικοί άνεμοι. Οι γεωστροφικοί άνεμοι είναι προφανώς ισχυρότεροι, στα σημεία εκείνα που οι ισοβαρείς καμπύλες είναι πιο πυκνές.

Το άνυσμα της ταχύτητας των γεωστροφικών ανέμων σε καρτεσιανές συντεταγμένες, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [7]:

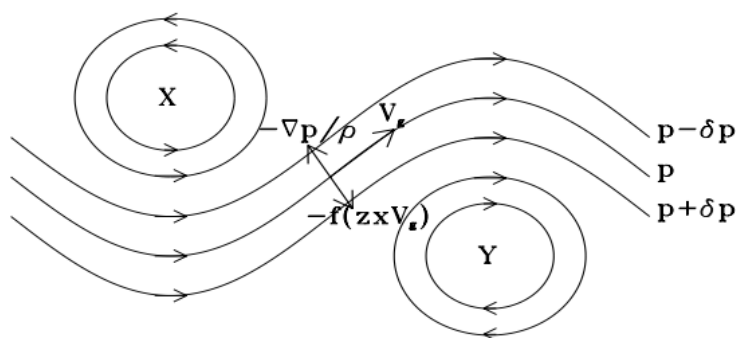
$$\vec{V} = \frac{1}{\rho \cdot (2 \cdot |\vec{\Omega}|) \cdot \sin \varphi} \cdot \vec{g}_k \times \text{grad}P$$

Όπου  $\vec{g}_k$  είναι η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας.

Επίσης σε ισοβαρικές συντεταγμένες, το άνυσμα της ταχύτητας των γεωστροφικών ανέμων υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση [7]:

$$\vec{V} = \frac{1}{(2 \cdot |\vec{\Omega}|) \cdot \sin \varphi} \cdot \vec{g}_k \times \text{grad}z$$

Από τις δύο τελευταίες σχέσεις προκύπτει ότι εφ' όσον το άνυσμα της ταχύτητας του ανέμου σε καρτεσιανές συντεταγμένες εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα η οποία προφανώς μεταβάλλεται με το ύψος, δεν εξαρτάται από την πυκνότητα των ισοβαρών για δεδομένο γεωγραφικό πλάτος.



**Εικ. 2.9** Κατεύθυνση γεωστροφικών ανέμων. Η ταχύτητα του γεωστροφικού ανέμου είναι παράλληλη στις ισοβαρείς έχοντας τις χαμηλές πιέσεις αριστερά. [Πηγή: «Αρχές Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας», Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, 2010]

### 2.3.2 Άνεμος βαθμίδας ή βαροβαθμίδας (Gradient wind)

Αν η καμπυλότητα των γραμμών ροής του γεωστροφικού ανέμου είναι αρκετά μεγάλη, τότε αντί της ισορροπίας μεταξύ των δυνάμεων βαροβαθμίδας και coriolis υπεισέρχεται και η φυγόκεντρος δύναμη, η οποία, για μικρή ακτίνα καμπυλότητας, είναι σημαντική. Η ισορροπία μεταξύ των τριών αυτών δυνάμεων φαίνεται στην Εικόνα 2.10, για κυκλωνική και αντικυκλωνική κίνηση. Ως γνωστόν η φυγόκεντρος δύναμη ισούται με [6]:

$$V^2/R_T$$

Όπου:

$V$  : η ταχύτητα του ανέμου και

$R_T$ : η τοπική ακτίνα καμπυλότητας.

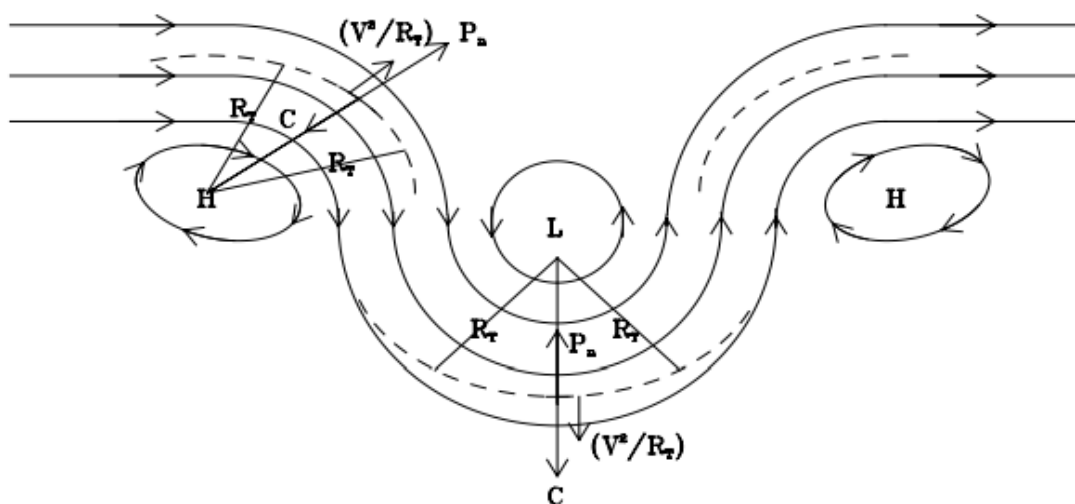
Στην περίπτωση κυκλωνικών συστημάτων στο βόρειο ημισφαίριο, η φυγόκεντρος είναι στην ίδια κατεύθυνση με τη δύναμη Coriolis γεγονός που σημαίνει ότι ο αέρας κινείται βραδύτερα απ' ότι στην περίπτωση που η Coriolis θα εξισορροπούσε μόνη της τη δύναμη βαροβαθμίδας. Στην περίπτωση αυτή η κίνηση ονομάζεται υπογεωστροφική. Το αντίθετο συμβαίνει στην αντικυκλωνική κίνηση όπου η κίνηση είναι υπεργεωστροφική. Η εξίσωση που ισχύει και για τις δύο αυτές περιπτώσεις είναι [6]:

$$\frac{1}{\rho} |\nabla p| = fV \pm \frac{V^2}{R_T}$$

όπου το (+) σημείο ισχύει για την κυκλωνική και το (-) για την αντικυκλωνική, στο βόρειο ημισφαίριο. Αν συμβεί η coriolis να είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη φυγόκεντρο, τότε ισχύει [6]:

$$\frac{V^2}{R_T} = \frac{1}{\rho} |\nabla p|$$

οπότε μιλάμε για κυκλοστροφική ισορροπία, όπως συχνά συμβαίνει κοντά στο κέντρο των τυφώνων, και κυκλοστροφικό άνεμο.



**Εικ. 2.10** Δυνάμεις οριζοντίου βαθμίδας, φυγόκεντρος και coriolis σε ισορροπία στο βόρειο ημισφαίριο. Ο άνεμος στην περίπτωση αυτή ονομάζεται άνεμος βαθμίδας. [Πηγή: «Αρχές Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας», Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, 2010]

### 2.3.3 Άνεμος Τριβής (Επιφανείας)

Είναι γενικά παραδεκτό ότι τα επιφανειακά βαρομετρικά συστήματα, τα οποία είναι, ως επί το πλείστον, στροβιλοειδείς κινήσεις, μεγάλης κλίμακας, η δύναμη της τριβής δεν μπορεί να θεωρείται σαν αμελητέος παράγοντας. Η δύναμη της τριβής αντιτίθεται πάντοτε στην κίνηση και τείνει να ελαττώσει την ταχύτητα του ανέμου έτσι ώστε ο άνεμος τριβής σε σύγκριση με τον άνεμο βαροβαθμίδας να είναι σημαντικά μικρότερης έντασης. Επίσης η δύναμη της τριβής στρέφει την διεύθυνση του ανέμου αντίθετα προς τους δείκτες του ρολογιού σε σύγκριση με τη διεύθυνση του ανέμου βαροβαθμίδας. Για ομαλές επιφάνειες ξηράς ή άνω από τις θάλασσες και τους ωκεανούς η γωνιά στροφής είναι μικρότερη των  $15^\circ$ , ενώ για εξαιρετικά ανώμαλες επιφάνειες ξηράς η γωνιά αυτή φθάνει τις  $45^\circ$  [8].

### 2.3.4 Ημερίσιοι άνεμοι

#### Θαλάσσια αύρα

Θαλάσσια αύρα είναι ο άνεμος που πνέει από τη θάλασσα προς τη ξηρά κατά τη διάρκεια της ημέρας με αίθριο συνήθως καιρό, σαν αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θαλάσσιου νερού και της παρακείμενης ξηράς. (Ταχύτερη θέρμανση της ξηράς από τη θάλασσα)

#### Απόγειος αύρα

Απόγειος αύρα είναι ο άνεμος που πνέει από τη ξηρά προς τη θάλασσα κατά τη διάρκεια της νύκτας, σαν αποτέλεσμα της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ ξηράς και θάλασσας. (Ταχύτερη ψύξη της ξηράς από τη θάλασσα).

#### Καταβατικός άνεμος (Αύρα των βουνών)

Καταβατικός άνεμος είναι ο άνεμος που πνέει κατά μήκος της πλαγιάς από την κορυφή προς τους πρόποδες του βουνού, που προκαλείται από τη μεγαλύτερη πυκνότητα του αέρα κατά μήκος της πλαγιάς σε σχέση με αυτήν σε κάποια απόσταση, οριζόντια, από αυτόν, λόγω της επιφανειακής ψύξης της πλαγιάς.

#### Αναβατικός άνεμος (Αύρα των κοιλάδων)

Αναβατικός άνεμος είναι ο άνεμος που πνέει κατά μήκος της πλαγιάς από τους πρόποδες προς την κορυφή του βουνού, που προκαλείται από την μικρότερη πυκνότητα του αέρα κατά μήκος της πλαγιάς σε σχέση με αυτήν σε κάποια απόσταση, οριζόντια, από αυτόν λόγω επιφανειακής θέρμανσης της πλαγιάς.

## 2.4 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΑΝΕΜΩΝ

---

Οι χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου είναι [12]:

- η κατεύθυνσή του (διεύθυνση και φορά)
- η ένταση του
- η ταχύτητα του
- η κατανομή του
- η ισχύς του
- η τύρβη

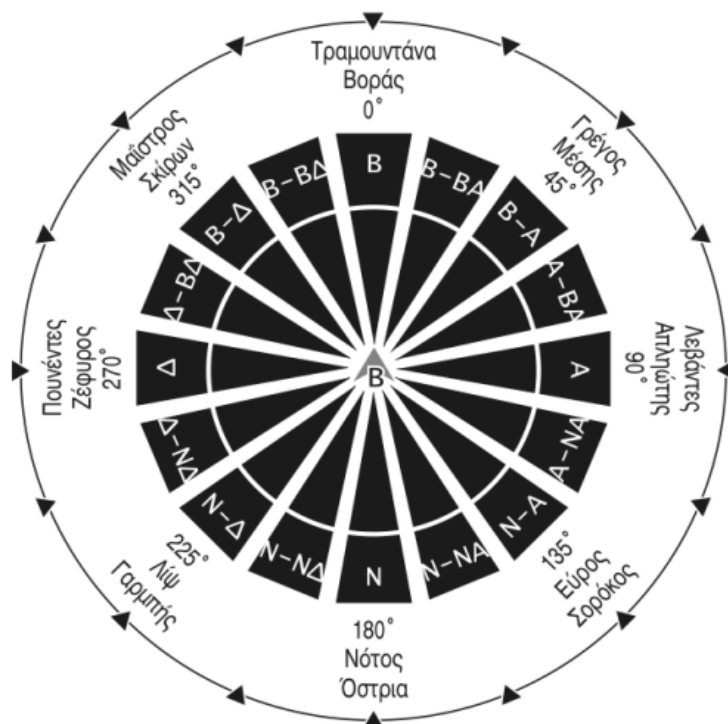
Η διεύθυνση του ανέμου μετράται με όργανα που λέγονται ανεμοδείκτες, ενώ η ένταση μετράται με βάση τις ανεμομετρικές κλίμακες, στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω. Η μέση ταχύτητα, μετράται με όργανα που λέγονται ανεμόμετρα ή ανεμογράφοι (Εικ. 2.11).



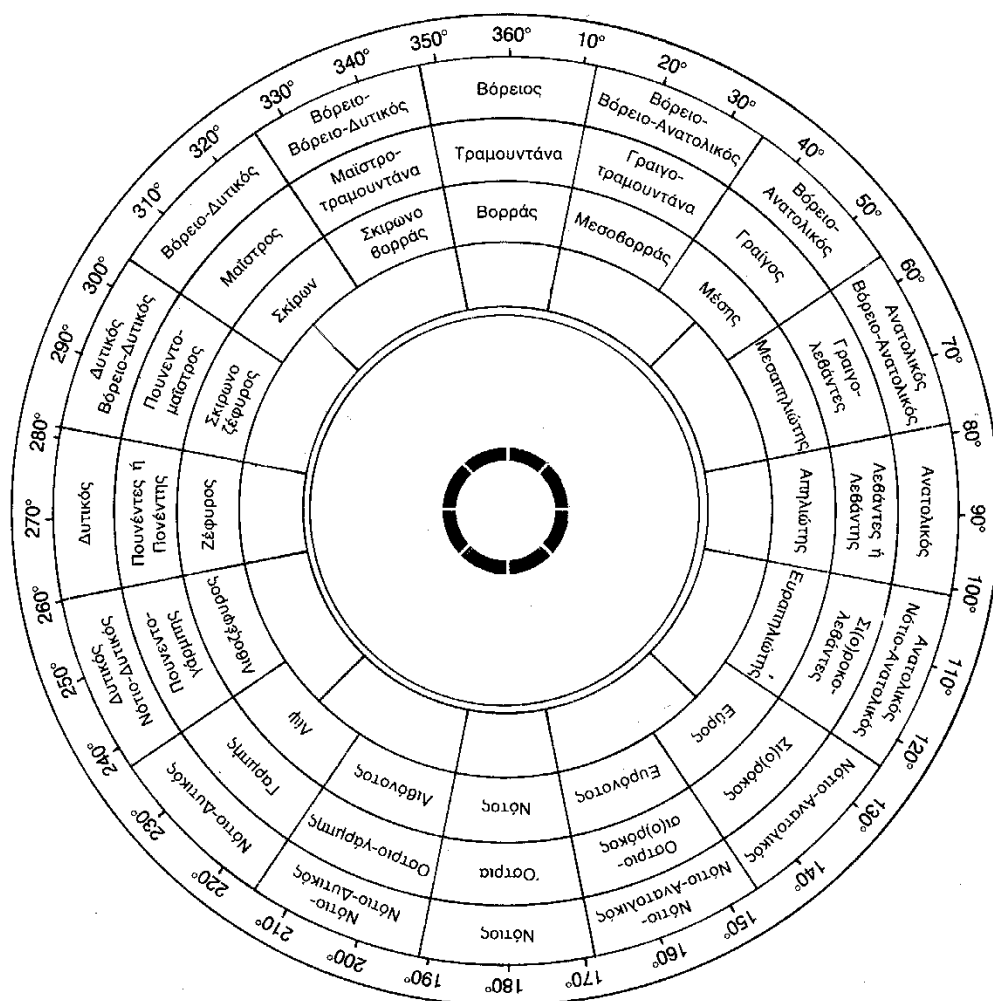
**Εικ. 2.11** (α) Κυπελλοφόρο ανεμόμετρο του τύπου που εφευρέθηκε από τον John Thomas Romney Robinson το 1846 (β) σύγχρονο κυπελλοφόρο ανεμόμετρο  
[Πηγή: <http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>]

### 2.4.1 Κατεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση ορίζεται από τη μέση τροχιά της κίνησης των μαζών του αέρα, από τον τομέα του οριζοντα που προέρχονται και όχι από εκείνον που κατευθύνονται. Στη μετεωρολογία, ο καθορισμός της διεύθυνσης του ανέμου, δίνεται από τη γωνία που σχηματίζει με το γεωγραφικό βορρά. Η ονοματολογία των διευθύνσεων του ανέμου, αποτυπωμένη σε χάρτη, αποτελεί το **ανεμολόγιο** από το οποίο καθορίζεται στην πράξη η διεύθυνση του ανέμου. Μετριέται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, σε τιμές που αντιστοιχούν σε ολόκληρο κυκλικό τομέα, 8, 16 ή 32 τιμές ανάλογα με την εκάστοτε επιθυμητή ακρίβεια (Εικ. 2.12) Στην Ελλάδα, χρησιμοποιείται το ανεμολόγιο με 16 διευθύνσεις ανέμων, στο οποίο αναγράφονται και οι ονομασίες τους (Εικ. 2.13).



**Εικ. 2.12** Ανεμολόγιο  
[Πηγή: <http://www.paragliding.gr/ανεμολόγιο/>]



**Εικ. 2.13** Ανεμολόγιο με 16 διευθύνσεις ανέμων  
 [Πηγή: <http://averoph.wordpress.com/2012/05/27/519/>]

**2.4.2 Ένταση του ανέμου**

Ένταση, είναι το μέτρο της ταχύτητας του ανέμου και προφανώς είναι μονόμετρο μέγεθος. Οι μονάδες μέτρησης της έντασης είναι οι ακόλουθες και οι σχέσεις μεταξύ τους φαίνονται στην Εικόνα 2.14.

- α) Κόμβος (Knot) ή ναυτικό μίλι ανά ώρα
- β) m/sec
- γ) km/h
- δ) mile/h
- ε) ft/sec

Κόμβος (Knot)	m/sec	km/h	mile/h	ft/sec
1	0.515	1.152	1.853	1.689
1.943	1	2.237	3.600	3.281
0.868	0.447	1	1.609	1.467
0.540	0.278	0.621	1	0.911
0.592	0.305	0.682	1.097	1

**Εικ. 2.14** Μονάδες μέτρησης της έντασης του ανέμου  
 [Πηγή: «Σημειώσεις Θερμοδυναμικής της ατμόσφαιρας», ΓΕΑ, 1990]



Η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από τη διαφορά πιέσεων των υπό μελέτη περιοχών και από την απόστασή τους. Οι πιέσεις αυτές αποτυπώνονται στους μετεωρολογικούς χάρτες με τις ισοβαρείς καμπύλες. Η διαφορά των πιέσεων μεταξύ δύο ισοβαρών καμπύλων, διαιρούμενη με την απόστασή τους, λέγεται βαρομετρική κλίση ή βαρομετρική βαθμίδα. Ως μονάδα μέτρησης της κλίσης αυτής, λαμβάνεται η πτώση ενός mm στήλης υδραργύρου (mmHg), ανά μονάδα μήκους. (Θυμίζουμε ότι  $1\text{mmHg} = 1.3332 \cdot 10^2 \text{Pa}$ ). Ως μονάδα μήκους λαμβάνεται το μήκος μιας μοίρας τόξου μεσημβρινού. Σύμφωνα με το ελλειψοειδές του Clarke, το μήκος μιας μοίρας μεσημβρινού σε γεωγραφικό μήκος  $45^\circ$ , είναι 111,131 km [9]. Για βαρομετρική κλίση μικρότερη του 1, πνέουν ασθενείς άνεμοι, ενώ για βαρομετρική κλίση μεγαλύτερη του 4 δημιουργούνται θύελλες.

### 2.4.3 Οι ανεμομετρικές κλίμακες

Οι ανεμομετρικές κλίμακες, είναι πίνακες εκτίμησης της έντασης των ανέμων. Μέχρι το 1926, χρησιμοποιούνταν πολλές ανεμομετρικές κλίμακες, έκτοτε όμως η Διεθνής Επιτροπή της Ναυτικής Μετεωρολογίας έκανε δεκτή την ανεμομετρική κλίμακα Beaufort. Η συγκεκριμένη κλίμακα δημιουργήθηκε από το ναύαρχο και αρχηγό της Υδρογραφικής Υπηρεσίας της Αγγλίας Francis Beaufort το 1905 [10]. Η κλίμακα αυτή, είχε αρχικά 13 βαθμίδες από το 0 έως το 12 όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Το 1947, η Διεθνής Μετεωρολογική Οργάνωση συμπλήρωσε την κλίμακα Beaufort, προσθέτοντας ακόμα 4 βαθμίδες και έτσι η ανώτερη κλίμακα είναι η 17η .

Beaufort	Χαρακτηρισμός	Κόμβοι (knots)	m/sec	Km/h	Miles/h	Αποτελέσματα ανέμου στην ξηρά
0	Άπνοια	<1	0-0,2	<1	<1	Ο καπνός υψώνεται κατακόρυφα.
1	Υποπνέων άνεμος	1-3	0,3-1,5	1-5	1-3	Η διεύθυνση του ανέμου φαίνεται από την φορά του καπνού. Ο ανεμοδείκτης ακίνητος.
2	Ασθενής άνεμος	4-6	1,6-3,3	6-11	4-7	Άνεμος αισθητός στο πρόσωπο. Τα φύλλα των δέντρων κινούνται. Κοινός ανεμοδείκτης τίθεται σε κίνηση.
3	Λεπτός άνεμος	7-10	3,4-5,4	12-19	8-12	Φύλλα και κλαδιά των δέντρων σε συνεχή κίνηση. Σημαία κυματίζει ελαφρά.
4	Μέτριος άνεμος	11-16	5,5-7,9	20-28	13-18	Ο άνεμος σηκώνει σκόνη και ελεύθερα τεμάχια χαρτιού. Κινούνται οι μικροί κλάδοι των δέντρων.
5	Λαμπρός άνεμος	17-21	8,0-10,7	29-38	19-24	Μικρά δένδρα κουνιούνται. Στην επιφάνεια χερσαίων υδάτων σχηματίζονται μικρά κύματα με κορυφή.
6	Ισχυρός Άνεμος	22-27	10,8-13,8	39-49	25-31	Τα μεγάλα κλαδιά των δέντρων κινούνται. Οι ομπρέλες χρησιμοποιούνται μετά δυσκολίας.
7	Σφοδρός Άνεμος	28-33	13,9-17,1	50-61	32-38	Ο άνεμος κουνάει τα δέντρα εξ ολοκλήρου. Το βάδισμα αντίθετα προς τον άνεμο καθίσταται δύσκολο.
8	Θυελλώδης άνεμος	34-40	17,2-20,7	62-74	39-46	Ο άνεμος θραύει κλώνους και παρεμποδίζει το βάδισμα.
9	Θύελλα	41-47	20,8-24,4	75-88	47-54	Ελαφρές ζημιές στις οικοδομές.
10	Ισχυρά θύελλα	48-55	24,5-28,4	89-102	55-63	Εκριζώνονται δέντρα. Σημαντικές ζημιές στις οικοδομές.
11	Σφοδρά θύελλα	56-63	28,5-32,6	103-117	64-72	Απαντάται σπανιότατα. Συνοδεύεται από ζημιές σε μεγάλο βαθμό.
12	Τυφώνας	64-71	32,7-36,9	118-133	73-82	Καταστροφές εξαιρετικά σοβαρές
13		72-80	37,0-41,4	134-149	83-92	
14		81-89	41,5-46,1	150-166	93-92	
15		90-99	46,2-50,9	167-183	104-114	
16		100-108	51,0-56,0	184-201	115-125	
17		109-118	56,1-61,2	202-220	120-136	

Εικ. 2.15 Τοπική ανεμομετρική κλίμακα Beaufort  
[Πηγή: [http://el.wikipedia.org/wiki/Κλίμακα\\_Μποφόρ](http://el.wikipedia.org/wiki/Κλίμακα_Μποφόρ)]

Όταν ο άνεμος κυμαίνεται από 0 μέχρι 12 βαθμούς της κλίμακας Beaufort, η μέση ταχύτητά του, σύμφωνα με την Αγγλική Μετεωρολογική Υπηρεσία, δίνεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση [11]:

$$\bar{V} = 1.87\sqrt{B^3}$$

Όπου:

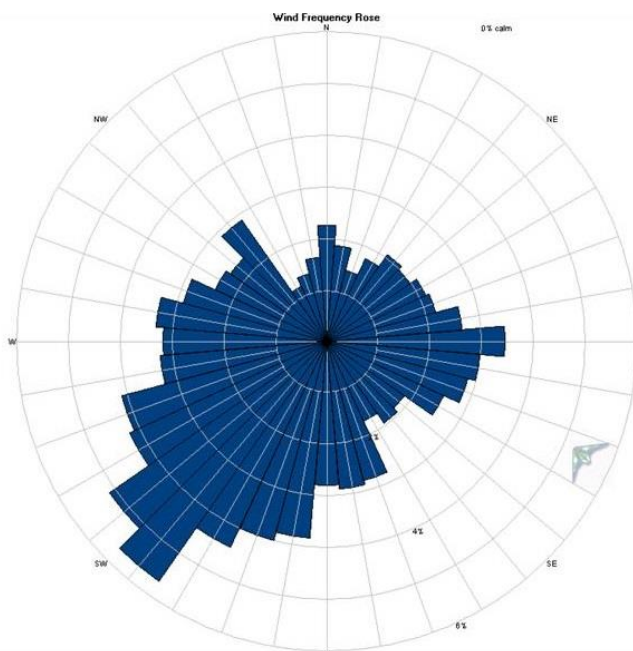
$\bar{V}$ : η μέση ταχύτητα του ανέμου σε μίλια ξηράς ανά ώρα (ml/h)

B: η βαθμίδα της κλίμακας Beaufort.

#### 2.4.4 Απεικόνιση των ανέμων - Ανεμολόγια συχνότητας

Απεικόνιση των ανέμων λέγεται η αποτύπωση, με κατάλληλη κλίμακα, σε ανεμολόγιο των τιμών των χαρακτηριστικών εκείνων στοιχείων που προσδιορίζουν τους ανέμους, οι οποίοι προσβάλλουν από διάφορες διευθύνσεις την υπό μελέτη περιοχή, είτε μόνιμα είτε περιοδικά. Τα στοιχεία αυτά γενικά είναι η διεύθυνση, η συχνότητα και η ένταση του ανέμου. Η απεικόνιση μπορεί να αναφέρεται, είτε σε στιγμιαίες καταγραφές των στοιχείων είτε σε καταγραφές μιας ορισμένης χρονικής περιόδου. Βάσει των στιγμιαίων καταγραφών, συντάσσονται στιγμιαία μετεωρολογικά διαγράμματα και χάρτες. Η σαφέστερη εικόνα όμως των ανεμολογικών δεδομένων μιας περιοχής, γίνεται με την αποτύπωση των μέσων τιμών των στοιχείων για μια ικανοποιητικά μεγάλη χρονική περίοδο. Αν η αποτύπωση αφορά την καταγραφή των διευθύνσεων και το σύνολο των συχνοτήτων των ανέμων διάφορων διευθύνσεων, τότε η απεικόνιση που προκύπτει λέγεται **ανεμολόγιο συχνότητας (wind frequency rose)** και το αντίστοιχο διάγραμμα, **διάγραμμα επικρατούντων ανέμων** της περιοχής.

Το μήκος του κάθε 'ρόδου' γύρω από τον κύκλο σχετίζεται με τη συχνότητα που φυσάει ο άνεμος από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση ανά μονάδα χρόνου. Κάθε ομόκεντρος κύκλος αντιπροσωπεύει μια διαφορετική συχνότητα, που προέρχονται από το μηδέν στο κέντρο και καθώς η ακτίνα των κύκλων αυξάνεται, αυξάνεται και η συχνότητα. Το πολικό διάγραμμα ανέμου συνήθως χρησιμοποιεί 16 βασικές κατευθύνσεις, όπως η βόρεια (N), BBA, BA, κ.λπ. Μπορεί να υποδιαιρεθεί μέχρι 32 κατευθύνσεις. Όσον αφορά την μέτρηση γωνίας σε μοίρες, στα Βόρεια αντιστοιχεί σε 0° / 360°, η Ανατολή έως 90°, τα Νότια έως 180° και η Δύση έως 270°.



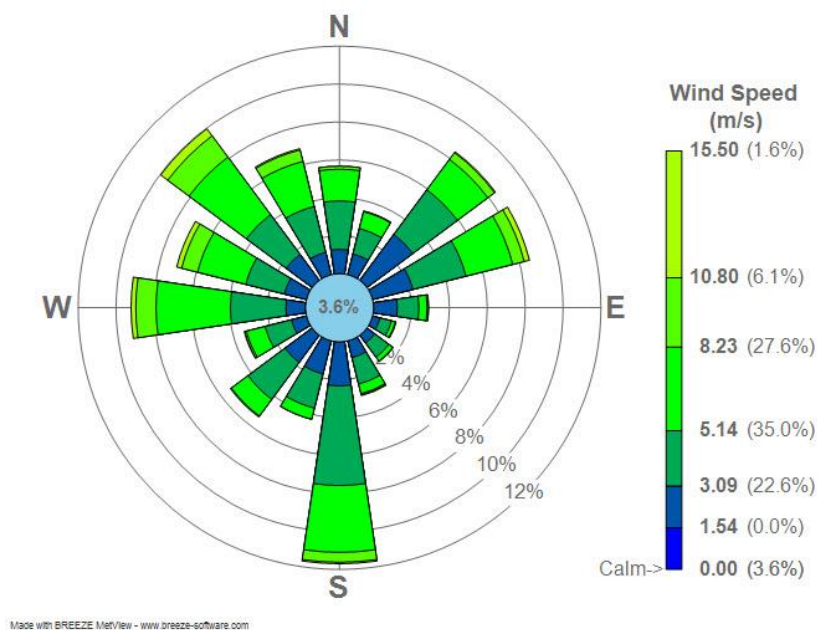
**Εικ. 2.16** Παράδειγμα ανεμολογίου συχνότητας (wind frequency rose)

[Πηγή: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore\\_wind\\_rose\\_sample.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Offshore_wind_rose_sample.JPG)]

Για τη σύνταξη ενός ανεμολογίου συχνότητας, π.χ. για μια 5ετία, πρέπει να είναι διαθέσιμες σε αριθμό επαναλήψεων οι καταγραφές των διευθύνσεων όλων των ανέμων που πλήττουν τη συγκεκριμένη περιοχή.

Οι επικρατούντες άνεμοι μιας περιοχής δεν είναι απαραίτητα και οι ισχυρότεροι, οι οποίοι μπορεί να έχουν πολύ μεγαλύτερη περίοδο επαναφοράς. Οι ισχυρότεροι άνεμοι που πνέουν σε μια περιοχή ονομάζονται δεσπόζοντες άνεμοι.

Αν στο ανεμολόγιο συχνότητας, αποτυπωθεί και η ένταση των ανέμων όλων των διευθύνσεων, τότε ονομάζεται ανεμολόγιο συχνότητας και έντασης.



**Εικ. 2.17** Ανεμολόγιο συχνότητας και έντασης του αεροδρομίου LaGuardia, Ν. Υόρκης (LGA)  
[Πηγή: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_rose](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_rose)]

Τα αποτελέσματα που προέρχονται από τη στατιστική επεξεργασία των ανεμολογικών παραμέτρων, παρουσιάζονται εν γένει με τη μορφή χαρτών χωρικής κατανομής, για τα δεδομένα που προέρχονται από αριθμητική προσομοίωση και με τη μορφή δυσδιάστατων ιστογραμμάτων συχνότητας εμφάνισης, για τα δεδομένα που προέρχονται τόσο από αριθμητική προσομοίωση, όσο από σημειακές μετρήσεις.

Οι ισοσταθμικές καμπύλες των μέσων ταχυτήτων ανέμου είναι προφανώς ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της ατμόσφαιρας, η οποία απεικονίζεται σε καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων γεωγραφικού μήκους και πλάτους, όπου η εποχιακή μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι σταθερή.

Επίσης στους χάρτες κατευθυντικότητα ανέμου, (charts of wind directionability), με 24 εξεταζόμενες διευθύνσεις, τα βέλη δείχνουν την κατεύθυνση από την οποία πνέει ένας άνεμος. Το μήκος τους αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης ανέμων σε ποσοστό %, που πνέουν από την αντίστοιχη κατεύθυνση. Εν γένει λαμβάνονται υπόψη ταχύτητες ανέμου πάνω από 6 m/sec.

Στους χάρτες τιμών σχεδιασμού ταχύτητας ανέμου, (charts of design values of wind speed), η εξεταζόμενη παράμετρος είναι εν γένει η ταχύτητα ανέμου στα 10 m από το έδαφος. Οι ισοσταθμικές καμπύλες των τιμών σχεδιασμού ταχύτητας ανέμου είναι προφανώς ο

γεωμετρικός τόπος των σημείων της ατμόσφαιρας, η οποία απεικονίζεται σε καρτεσιανό επίπεδο συντεταγμένων γεωγραφικού μήκους και πλάτους, όπου η τιμή σχεδιασμού ταχύτητας ανέμου είναι σταθερή.

Παράλληλα στα ιστογράμματα ταχύτητας – κατεύθυνσης ανέμου από προσομοίωση, (Hindcast wind speed – wind direction histograms), οι εξεταζόμενες παράμετροι είναι εν γένει η ταχύτητα και η κατεύθυνση ανέμου στα 10 m από το έδαφος. Κάθε στοιχείο ενός δυσδιάστατου ιστογράμματος δηλώνει τον αριθμό των παρατηρήσεων ανηγμένο ως προς 1000 στο αντίστοιχο κελί ταχύτητας – κατεύθυνσης ανέμου.

Γίνεται φανερό από τα παραπάνω ότι κατά την εκπόνησή μιας μελέτης για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είτε σε αστικό είτε σε άλλο περιβάλλον, είναι απαραίτητη η γνώση των ανεμολογικών δεδομένων της εν λόγω περιοχής καθώς βάσει αυτών θα γίνουν οι πρώτες εκτιμήσεις της απόδοσης της επένδυσης και της βιωσιμότητας αυτής.

Παραθέτουμε στον παρακάτω πίνακα το δίκτυο των μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ που μετρούν τον άνεμο.

Δίκτυο Μετεωρολογικών Σταθμών Επιφανείας της ΕΜΥ							
α/α	WMO	Θέση	Ετη	α/α	WMO	Θέση	Ετη
1	600	Ορεστιάδα	75-82	30	647	Καρδίτσα	88-91
2	606	Σέρρες	71-	31	648	Λάρισα	55-
3	607	Δράμα	75-	32	650	Λήμνος	74-
4	608	Καβάλα (πόλη)	86-	33	651	Λήμνος (Μυρινα)	56-73
5	609	Ξάνθη	75-	34	654	Άρτα(Φιλοθέη)	76-
6	610	Κομοτινή	55-83	35	655	Άστρος	74-
7	611	Σουφλί	73-	36	656	Άρτα (πόλη)	61-95
8	613	Φλώρινα	61-	37	657	Δομοκός	75-02
9	614	Καστοριά	80-	38	659	Φάρσαλα	75-92
10	616	Πτολεμαίδα	75-97	39	660	Σκιάθος	86-
11	618	Εδεσσα	75-00	40	661	Βόλος	56-88
12	619	Τρίκ. Ημαθείας	80-	41	662	Σκόπελος	56-
13	620	Σεδες	55-72	42	665	Αγχίαλος	56-
14	622	Μακεδονία(Μικρα)	59-	43	666	Αράχωβα	76-
15	624	Χρυσούπολη	84-	44	667	Μυτιλήνη	55-
16	625	Καβάλα(Αμ/νας)	56-84	45	669	Λευκάδα(νησι)	75-97
17	626	Θάσσος	75-99	46	670	Σικυώνα	81-87
18	627	Αλεξανδρούπολη	51-	47	671	Βέλο(Κορ/θιας)	87-
19	628	Κόνιτσα	75-	48	672	Αγρίνιο	56-
20	632	Κοζάνη	55-	49	673	Ναύπακτος	77-
21	637	Πολύγυρος	79-92	50	674	Αλίαρτος	67-01
22	638	Ποτίδαια	77-	51	675	Λαμία	70-
23	640	Αυλιώτες	75-91	52	676	Λευκάδα (Φθ/δας)	74-90
24	641	Κέρκυρα	55-	53	677	Λιδωρίκι	75-95
25	642	Ιωάννινα	56-	54	678	Καρπενήσι	81-90
26	643	Ακτιο(Πρέβεζα)	71-	55	679	Ωρεοί	79-89
27	644	Καλαμπάκα	74-03	56	680	Μαραθώνας	86-03
28	645	Τρικ. Θεσσαλίας	73-	57	681	Αιδηγός	74-01
29	646	Σκοτίνα	83-03	58	682	Ανδραβίδα	59-

59	683	Κύμη	56-90	101	729	Σπέτσες	74-
60	684	Σκύρος	55-	102	730	Σύρος(πολη)	70-96
61	685	Αργοστόλι	70-	103	731	Πάρος(πολη)	75-95
62	686	Μεσολλόγγι	82-	104	732	Νάξος	55-
63	687	Άραξος	55-	105	733	Τύρινα	75-91
64	688	Διαβολίτσι	74-	106	734	Μεθώνη	56-
65	689	Πάτρα	55-03	107	735	Ραφήνα	72-83
66	690	Πλάτανος(Ναυπ/ιας)	81-84	108	736	Αίγινα	74-
67	692	Αίγιο	74-	109	737	Γύθειο	79-
68	693	Δεσφίνα	61-	110	738	Μήλος	55-
69	694	Καλάβρυτα	75-99	111	739	Αστυπάλαια	77-
70	695	Φύγια	75-86	112	740	Κως (πόλη)	61-81
71	697	Χαλκίδα	74-94	113	741	Σπάτα(Βενιζελος)	74-
72	698	Παιανία	74-83	114	742	Κως	81-
73	699	Τανάγρα	57-	115	743	Κύθηρα	55-
74	700	Ανάβρυτα	75-86	116	744	Θήρα	74-
75	701	Ν. Φιλαδέλφεια	55-	117	745	Βάμος	75-97
76	702	Αθήνα(πόλη)	56-82	118	746	Σούδα	58-
77	703	Κάρυστος	75-93	119	747	Χανιά	61-
78	7	Χίος (πόλη)	55-73	120	748	Κάρπαθος(πόλη)	71-95
79	705	Ζάκυνθος (πόλη)	56-82	121	749	Ρόδος	55-
80	706	Χίος	73-	122	750	Μύκονος	89-
81	707	Πύργος	75-	123	751	Παλαιόχωρα	74-03
82	708	Μέγαρα	75-91	124	752	Ανώγεια	75-
83	709	Βυτίνα	74-78	125	753	Γόρτυς	75-
84	710	Τρίπολη	57-	126	754	Ηράκλειο	55-
85	711	Στεφάνιο	75-	127	755	Φουρνή	74-
86	712	Κόρινθος	70-84	128	756	Ιεράπετρα	55-
87	713	Ναύπλιο	75-88	129	757	Σητεία	60-
88	714	Αστερ/πείο	76-91	130	758	Ρέθυμνο	57-
89	715	Τατόι	56-	131	759	Τυμπάκι	59-
90	716	Ελληνικό	55-	132	760	Καστέλλι	76-
91	717	Πειραιάς	56-	133	761	Ζαρός	76-
92	718	Ελευσίνα	58-	134	763	Τζερμιάδες	75-94
93	719	Ζάκυνθος	82-	135	765	Κάρπαθος(Α/Δ)	90-
94	720	Ικαρία(πόλη)	80-95	136	766	Πάρος (Α/Δ)	87-
95	721	Σάμος (πόλη)	55-78	137	768	Λέρος	86-
96	723	Σάμος	78-	138	770	Κάσος (Α/Δ)	89-
97	724	Άργος(πυργέλα)	80-	139	774	Σύρος(Α/Δ)	91-
98	725	Σπάρτη	74-	140	779	Ικαρία(Α/Δ)	95-
99	726	Καλαμάτα	56-	141	799	Ασπρόπυργος	84-89
100	727	Λεωνίδιο	81-				

**Εικ. 2.18** Δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών της ΕΜΥ[Πηγή: [http://www.hnms.gr/hnms/greek/Paroxi/paroxi\\_meteorologika11](http://www.hnms.gr/hnms/greek/Paroxi/paroxi_meteorologika11) ]

Ακόμα, στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι μέσες ταχύτητες ανέμου (m/sec), μαζί με τις κύριες διευθύνσεις του, για αντιπροσωπευτικές περιοχές του Ελλαδικού χώρου, όπως έχουν καταγραφεί στα αρχεία της ΕΜΥ, μετά από επεξεργασία από το Τ.Ε.Ε.

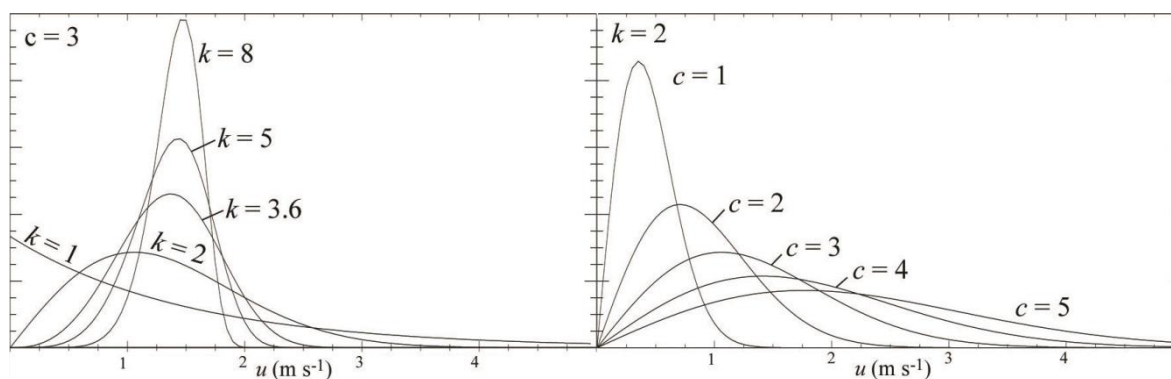
Περιοχή/μήνας	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Αθήνα (Ελληνικό)	3,9	4,0	3,8	3,3	3,1	3,3	3,9	4,0	3,6	3,7	3,4	3,8
Αθήνα (Φιλαδέλφεια)	2,9	3,1	3,1	2,7	2,6	2,8	3,4	3,4	3,0	2,9	2,4	2,5
Αγρίνιο	1,9	2,3	2,4	2,2	2,0	2,0	1,9	1,7	1,6	1,7	1,6	1,7
Αγχιάλος	2,8	2,9	2,7	2,5	2,4	2,8	2,8	2,8	2,6	2,5	2,3	2,7
Αλεξανδρούπολη	4,3	4,4	4,3	3,2	2,8	2,8	3,5	3,5	3,4	3,9	3,5	4,1
Αλιάρτος	2,2	2,5	2,5	2,5	2,3	2,4	2,5	2,3	2,2	2,0	1,7	2,0
Ανδραβίδα	2,5	2,8	2,7	2,5	2,3	2,3	2,2	2,3	2,1	2,1	2,4	2,5
Άραξος	3,2	3,3	3,4	2,7	2,3	2,2	2,2	2,3	2,3	2,8	2,7	2,8
Άργος (Πυργέλα)	2,0	2,3	2,5	2,5	2,7	2,7	2,9	2,7	2,1	1,9	1,6	1,8
Αργαστόλι	3,5	3,8	3,7	3,3	3,2	3,2	3,2	3,0	2,9	3,1	3,2	3,4
Άρτα	1,4	1,6	1,9	1,8	2,0	2,0	1,6	1,7	1,6	1,4	1,1	1,3
Δράμα	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
Έδεσσα	2,0	1,6	1,6	1,8	1,6	1,7	1,7	1,5	1,4	1,5	1,7	2,0
Ζάκυνθος	2,8	3,2	2,8	2,5	2,2	2,4	2,4	2,4	2,0	2,4	2,8	2,8
Ηράκλειο	4,8	5,1	4,7	4,1	3,2	3,5	4,6	4,6	4,0	3,8	4,2	4,8
Θεσσαλονίκη	3,0	3,0	2,8	2,8	2,6	3,1	3,3	2,9	2,8	2,5	2,6	2,8
Ιεράπετρα	4,7	4,9	4,6	4,0	3,7	4,4	6,4	6,0	5,1	4,4	3,9	4,6
Ιωάννινα	1,6	1,9	2,1	1,8	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,5	1,0	1,2
Καλαμάτα	2,9	2,9	2,7	2,5	2,5	2,9	2,9	2,9	2,6	2,5	2,4	2,8
Καρδίτσα	2,2	2,3	2,5	2,6	2,8	2,9	2,9	2,7	2,7	2,6	2,5	2,4
Καρπενήσι	4,5	4,6	4,9	4,3	3,8	6,2	4,0	4,4	3,4	3,7	3,8	4,0
Κάρυστος	6,8	7,0	6,0	5,1	4,9	4,8	5,9	6,0	5,5	5,8	6,3	6,5
Καστοριά	1,3	1,5	1,9	2,0	1,5	1,7	1,8	1,5	1,3	1,2	1,2	1,2
Κέρκυρα	2,5	2,8	2,6	2,2	1,8	1,9	1,8	1,8	1,7	2,1	2,6	2,7
Κοζάνη	2,4	2,3	2,0	2,0	1,8	2,1	2,2	2,0	1,7	1,7	1,6	2,1
Κομοτηνή	3,2	3,2	3,3	2,8	2,6	2,7	3,2	3,4	3,2	3,2	2,5	2,8
Κόνιτσα	1,6	1,8	1,7	1,6	1,3	1,4	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6
Κόρινθος (Βέλο)	2,9	2,9	2,8	2,7	2,7	2,9	2,7	2,5	2,5	2,7	2,4	2,4
Κύθηρα	7,1	6,8	6,8	5,7	5,0	4,4	4,4	4,5	5,0	6,3	5,8	6,8
Κως	5,1	5,8	5,0	4,7	4,5	4,9	6,0	5,6	5,0	4,5	4,9	5,2
Λαμία	2,7	2,8	3,0	3,2	3,2	3,4	3,2	3,0	2,7	2,5	2,4	2,6
Λάρισα	1,2	1,5	1,7	1,6	1,6	2,0	2,1	1,9	1,7	1,4	1,0	0,9
Λευκάδα	2,8	3,1	3,3	3,4	3,4	3,8	3,5	3,3	3,2	2,8	2,7	2,8
Λήμνος	5,8	6,3	5,7	4,2	3,9	3,7	4,4	4,8	4,4	5,3	5,3	5,7
Μεθώνη	5,5	5,7	5,5	5,3	4,8	5,0	5,1	4,9	4,6	4,5	5,1	5,5
Μήλος	7,9	8,0	7,1	5,7	4,4	4,1	5,7	5,9	5,9	6,3	6,3	7,4
Μυτιλήνη	5,5	5,8	5,1	4,3	3,5	3,8	4,9	4,7	4,4	4,3	4,7	5,6
Νάξος	7,9	8,1	7,6	5,9	4,9	5,0	6,6	6,9	7,0	7,4	6,7	7,5
Ξάνθη	1,4	1,3	1,0	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,9	1,4	1,3	1,4
Πάρος	7,5	7,5	6,5	5,4	4,5	4,0	5,2	4,9	4,9	5,5	6,3	6,8
Πάτρα	2,5	2,6	2,6	2,6	2,3	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	2,3	2,4
Πολύγυρος	2,6	2,6	2,5	2,3	1,7	1,5	1,6	1,6	1,3	2,1	2,6	2,9
Πύργος	2,4	2,7	2,7	2,7	2,5	2,6	2,5	2,4	2,3	2,1	2,3	2,3
Ρέθυμνο	4,6	5,0	4,6	3,9	3,1	3,0	3,5	3,2	3,4	3,7	4,2	4,6
Ρόδος	3,9	4,4	4,4	4,5	4,3	5,2	6,0	5,8	4,9	3,4	3,1	3,8
Σάμος	6,0	6,2	5,5	4,3	4,2	4,7	7,0	6,6	5,7	5,1	5,5	6,0
Σέρρες	1,0	1,4	1,6	1,9	1,9	2,2	2,0	1,7	1,6	1,1	1,0	0,8
Σητεία	4,1	4,5	4,3	3,8	3,3	3,9	5,3	5,1	4,1	3,5	3,6	4,0
Σκύρος	6,8	6,9	6,2	4,9	4,0	4,2	4,8	5,1	5,1	6,0	5,6	6,4
Σούδα	4,1	4,3	4,2	4,0	3,6	3,8	3,5	3,2	3,1	3,2	3,2	3,9
Σπάρτη	1,7	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	1,7	1,5	1,6	1,5
Σύρος	8,1	8,1	7,6	5,8	5,4	4,9	7,0	7,2	6,5	7,5	7,2	7,8
Τανάγρα	3,2	3,3	3,0	2,8	2,7	2,9	3,3	3,3	2,9	2,9	2,6	3,1
Τρίκαλα (Ημαθίας)	1,6	1,7	2,1	2,5	2,4	2,5	2,0	1,8	1,7	1,4	1,3	1,5
Τρίκαλα (Θεσσαλίας)	1,4	1,6	1,8	2,3	2,4	2,2	1,7	1,6	1,7	1,3	1,1	1,2
Τρίπολη	2,6	2,9	2,9	2,7	2,3	2,6	2,7	2,7	2,3	2,2	2,0	2,3
Τυμπάκιο	4,0	4,1	4,2	3,7	3,4	4,0	5,5	5,3	4,4	3,6	3,1	3,6
Φλώρινα	1,3	1,7	2,1	2,4	2,5	2,5	2,4	2,2	1,8	1,7	1,6	1,3
Χαλκίδα	3,3	3,4	3,0	2,6	2,3	2,3	2,5	2,7	2,1	2,5	3,0	3,3
Χανιά	3,1	3,1	3,1	2,8	2,5	2,6	2,2	2,0	2,2	2,1	2,3	2,9
Χίος	5,2	5,9	4,8	3,4	3,1	3,5	5,2	5,2	4,4	4,3	4,5	4,8
Χρυσούπολη (Καβάλα)	2,4	2,7	2,8	2,6	2,6	2,2	1,9	2,0	1,9	2,1	2,1	2,3

*Εικ. 2.19 Οι μέσες ταχύτητες ανέμου (m/sec), μαζί με τις κύριες διευθύνσεις του [Πηγή: Τεχνική Οδηγία Τ.Ε.Ε. Τ.Ο.Τ.Ε.Ε 20701-3/2010 – Κλιματικά Δεδομένα Ελληνικών Περιοχών, 2012]*

### 2.4.5 Αιολικό δυναμικό και σχετική κατανομή του ανέμου

Σημαντικό χαρακτηριστικό μιας περιοχής, είναι το αιολικό δυναμικό και η διακύμανση του ανέμου. Η γνώση μόνο της μέσης ταχύτητας ανέμου δεν αποτελεί από μόνη της κριτήριο για την εκτίμηση της παραγόμενης αιολικής ενέργειας. Απαιτούνται επιπλέον πληροφορίες για την συχνότητα της κάθε ταχύτητας ανέμου, όπως επίσης και την διεύθυνση της κατανομής του ανέμου. Η στατιστική κατανομή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου μπορεί να προκύψει από ανεμολογικά δεδομένα μετρούμενα σε ένα καθορισμένο ύψος. Κατά τη διαδικασία αυτή συνηθίζεται η χρήση μέσων τιμών δεκαλέπτων, τα οποία αξιολογούνται σε διάστημα ενός έτους, ώστε να προκύψει η ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου και η ετήσια σχετική κατανομή του. Για να προκύψουν αξιόπιστα στατιστικά αποτελέσματα, χρειάζονται δεδομένα τουλάχιστον μερικών ετών, μέχρι δέκα σύμφωνα με τη μετεωρολογική επιστήμη [14]. Η στατιστική κατανομή της συχνότητας της ταχύτητας του ανέμου συνηθίζεται να μετράται ως συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας (συνεχής κατανομή) ή της αθροιστικής πυκνότητας πιθανότητας. Γραφικά, η πρώτη δείχνει απευθείας τις ταχύτητες ανέμου που εμφανίζονται περισσότερο σε μία περιοχή, ενώ η δεύτερη δείχνει ως ποσοστό την περίοδο μέσα στο διάστημα ενός χρόνου.

Εξαιτίας των ελλিপών δεδομένων για την ταχύτητα ανέμου στις περισσότερες περιοχές, χρησιμοποιούνται διάφορες κατανομές για να χαρακτηριστεί το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής. Οι πλέον χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας για το αιολικό δυναμικό είναι η συνάρτηση Weibull και η συνάρτηση Rayleigh. Η συνάρτηση Weibull εξαρτάται από την παράμετρο κλίμακας  $c$ , η οποία καθορίζει την μέση ταχύτητα ανέμου και μετράται σε m/s, και την παράμετρο μορφής  $k$  που συνήθως παίρνει τιμές 1,5 - 2,5 [15], [16].



**Εικ. 2.20** Παράδειγμα κατανομών Weibull για διάφορες τιμές  $k$  και  $c$   
 [Πηγή: «The Characteristics of Wind Velocity that Favor the Fitting of a Weibull Distribution in Wind Speed Analysis», S. Tuller, A. Brett, 1984]

Η συνάρτηση Weibull γράφεται ως εξής [16]:

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

Όπου:

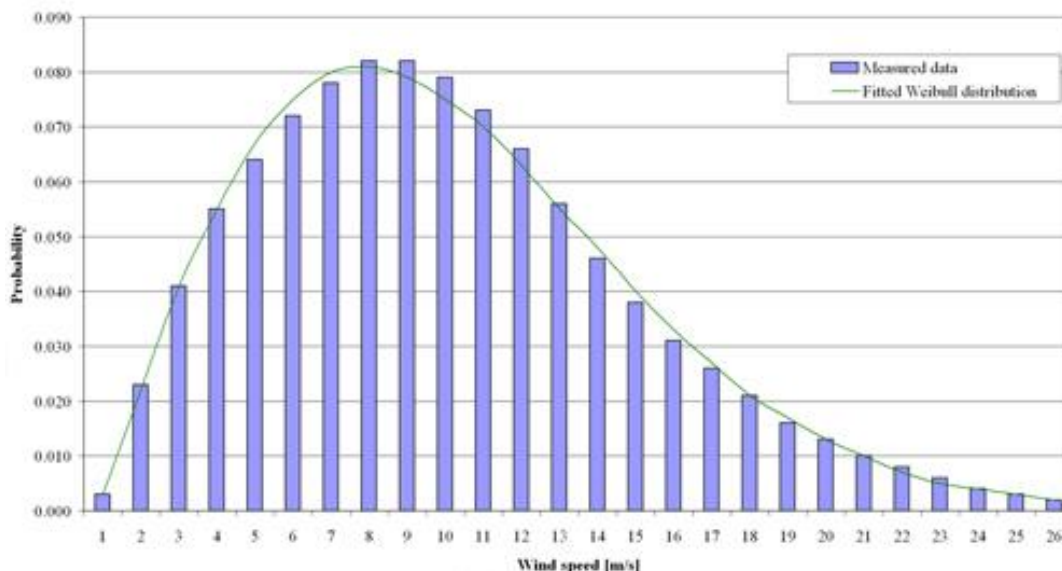
$P(V)$  : η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου  $V$

$c = \frac{2\bar{V}}{\sqrt{\pi}}$  : παράμετρος κλίμακας ή χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου

$k = \frac{\sqrt{\pi}3c^3}{2\bar{V}^3}$  : παράμετρος μορφής

Μια ειδική μορφή της συνάρτησης, αρκετά ρεαλιστική στην περιοχή του Αιγαίου [14], είναι όταν  $k=2$ . Σε αυτή την περίπτωση οδηγούμαστε στην κατανομή Rayleigh που δίνεται ως εξής [17], [18]:

$$P(V) = \frac{\pi V}{2\bar{V}^2} \cdot e^{\left[-\frac{\pi(V)}{4(\bar{V})}^2\right]}$$



**Εικ. 2.21** Παράδειγμα συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull για δεδομένες τιμές ταχύτητας ανέμου [Πηγή: <http://www.wind-energy-the-facts.org>]

#### 2.4.6 Αύξηση της ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος

Η αύξηση της ταχύτητας σε σχέση με το υψόμετρο είναι ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο και δεν πρέπει να μείνει ανεκμετάλλευτο. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από το έδαφος λόγω της ταχείας ελάττωσης των τριβών με την επιφάνεια του εδάφους. Το στρώμα που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος υφίσταται την μεγαλύτερη τριβή, λόγω των εμποδίων που συναντά (κτήρια, δένδρα, εδαφικές ανωμαλίες) [19]. Σύντομα όμως οι τριβές ελαττώνονται σημαντικά ώστε μετά από κάποιο ύψος η μεταβολή της ταχύτητας να είναι πού μικρή. Η μεταβολή αυτή ακολουθεί περίπου λογαριθμική σχέση σύμφωνα με το νόμο ελάττωσης. Έτσι, η ταχύτητα  $V_h$  σε κάποιο ύψος  $h$  από το έδαφος μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη σχέση [15]:

$$V_h = \bar{V}_{ref} \cdot \frac{\ln \frac{h}{z_0}}{\ln \frac{h_{ref}}{z_0}}$$

Όπου:

$V_h$  η ταχύτητα ανέμου (m/s) σε ύψος  $h$

$\bar{V}_{ref}$  η μέση ταχύτητα ανέμου (m/s) στο ύψος αναφοράς  $h_{ref}$  (συνήθως 10 m)

$z_0$  το μήκος τραχύτητας της περιοχής (m) (Κεφ. 2.4.9)

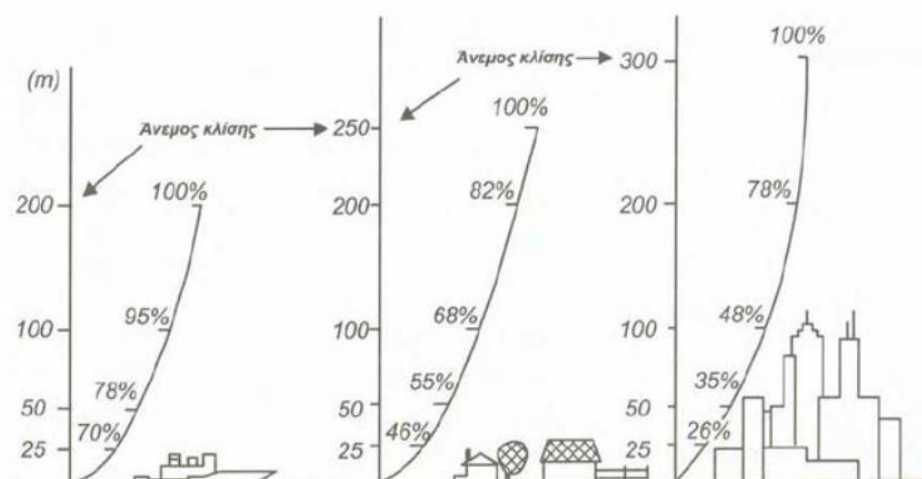
Μία άλλη μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό της ταχύτητας συναρτήσει του υψομέτρου δίνεται με τη βοήθεια του εκθέτη Hellman, για τον οποίο ισχύει [14] :



$$\alpha = \frac{1}{\ln\left(\frac{H_{ref}}{z_0}\right)}$$

Επομένως η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$V_h = \overline{V_{ref}} \cdot \left(\frac{H}{H_{ref}}\right)^\alpha$$



**Εικ. 2.22** Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου σε διαφορετικό τύπο εδάφους  
[Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]

Σαν συνέπεια της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος είναι και η μεταβολή των παραμέτρων  $k$  και  $c$ , αφού όσο αυξάνει το υψόμετρο, αυξάνεται και η πιθανότητα εμφάνισης μεγαλύτερων ταχυτήτων του ανέμου.

Για την μεταβολή της παραμέτρου  $c$  προτείνεται η σχέση [14]:

$$\frac{c}{c_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha$$

#### 2.4.7 Ενεργειακό περιεχόμενο και ισχύς ανέμου

Η ισχύς που βρίσκεται διαθέσιμη στον άνεμο εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση [16], [20]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V_w^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

Όπου:

$\rho$  : πυκνότητα ανέμου ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_w$  : ταχύτητα ανέμου ( $\text{m/s}$ )

Έτσι η τελική τιμή της ισχύος θα είναι [20]:

$$p = \frac{1}{2} \rho V_w^3 A \quad (\text{W})$$

Όπου:

$A$  : επιφάνεια που διέρχεται ο άνεμος ( $\text{m}^2$ )

### 2.4.8 Πυκνότητα του αέρα

Η πυκνότητα του αέρα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Η πυκνότητα του αέρα στην επιφάνεια της θάλασσας και για κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας (20°) και ατμοσφαιρικής πίεσης (101,6 kPa) είναι [8]:

$$\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

Η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται τόσο με τον χρόνο όσο και με το ύψος, την θερμοκρασία και την ατμοσφαιρική πίεση [8]. Σε μεγαλύτερα ύψη μειώνεται με συνέπεια την μείωση της παραγόμενης ισχύος, το ίδιο ισχύει αν η θερμοκρασία είναι υψηλή, αφού η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την πυκνότητα του αέρα. Η μεταβολή της πυκνότητας του αέρα μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού είναι της τάξης του 10% [21]. Η σχέση που εκφράζει τα πιο πάνω μεγέθη είναι:

$$p = 101325 \cdot (1 - 2.2557 \cdot 10^{-5} \cdot h)^{5.25588}$$

Όπου:

p : ατμοσφαιρική πίεση (Pa)

h : ύψος από την στάθμη της θάλασσας (m)

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

Όπου:

ρ : πυκνότητα αέρα (kg/m<sup>3</sup>)

T : θερμοκρασία (K)

P : ατμοσφαιρική πίεση (mb)

Υψόμετρο (σε πόδια) (1 πόδι = 0.3048m)	Ποσοστό (%) σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας	Υψόμετρο (σε πόδια) (1 πόδι = 0.3048m)	Ποσοστό (%) σε σχέση με την επιφάνεια της θάλασσας
500	99	6000	83
1000	97	7000	80
2000	94	8000	77
3000	91	9000	74
4000	88	10000	70
5000	86		

**Εικ. 2.23** Μεταβολή της πυκνότητας ρ με το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας  
[Πηγή: «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Αιολική Ενέργεια», Δ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο  
Αιολικής Ενέργειας Τ.Ε.Ι. Κρήτης ]

### 2.4.9 Η φύση της τύρβης

Οι μηχανισμοί δημιουργίας της τύρβης συνδέονται με την τριβή που προκαλείται σε σχέση με την επιφάνεια της γης και με θερμικά φαινόμενα που διαμορφώνουν κάθετες μετακινήσεις αέριων μαζών [22]. Ιδιότητες, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ένταση και πίεση πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν κατά την αναπαράσταση του φαινομένου της τύρβης μέσω φυσικών νόμων. Κυρίως λόγω όμως της πολυπλοκότητας μιας τέτοιας διαδικασίας αλλά και της αβεβαιότητας που υπεισέρχεται σε θέματα πρόβλεψης, εφαρμόζεται η προσέγγιση των στατιστικών ιδιοτήτων της τύρβης. Η ένταση της τύρβης εξαρτάται από την τραχύτητα της

επιφάνειας του εδάφους και από το υψόμετρο. Προφανώς, τοπικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά διαμορφώνουν την εξέλιξη του φαινομένου μέσα στο χρόνο.

Η τραχύτητα της επιφάνειας εδάφους χαρακτηρίζεται μέσω της παραμέτρου τραχύτητας επιφάνειας  $z_0$  (ή αεροδυναμικό μήκος τραχύτητας). Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου  $z_0$ .

Τύπος εδάφους	Παράμετρος τραχύτητας επιφάνειας $z_0$ (m)
Αστικές περιοχές με κτίρια πάνω των 5 ορόφων	2.5 - 10
Αστικές περιοχές με κτίρια κάτω των 5 ορόφων	1.5 - 2.5
Πυκνοκατοικημένες περιοχές	0.8 - 1.8
Ημιαστικές περιοχές, Δάση	0.7
Προάστια, περιοχές πυκνής βλάστησης	0.3
Χωριά, επαρχίες με δέντρα και θάμνους	0.1
Γεωργικές εκτάσεις, λίγα δέντρα και κτίρια	0.03
Επίπεδες πεδινές εκτάσεις με γρασίδι	0.01
Επίπεδες έρημοι, θάλασσα	0.001

**Εικ. 2.24** Χαρακτηριστικές τιμές της παραμέτρου τραχύτητας επιφάνειας  $z_0$  συναρτήσει του τύπου εδάφους [Πηγή: «Generation of electricity from the wind», D.F. Warne, P.G. Calnan, 1977]

Η τύρβη αποτελεί έναν πολύ σημαντικό παράγοντα, που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης μίας ανεμογεννήτριας, αφού επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το μηχανικό και το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για χαμηλά ύψη και μικρής ισχύος Α/Γ [14]. Πρακτικά, η τύρβη επηρεάζεται από την τραχύτητα του εδάφους, αλλά και την παρουσία "εμποδίων". Σαν εμπόδιο, μπορεί να θεωρηθεί οτιδήποτε έχει σημαντικό ύψος σε σχέση με το ύψος μέτρησης του ανέμου, άρα και της τυρβώδους συνιστώσας του. Συνήθως, δέντρα και πυκνοί θάμνοι θεωρούνται εμπόδια όταν μελετάται η εγκατάσταση στην ύπαιθρο, ενώ οικίες και ψηλοί φράκτες για περιπτώσεις εγκατάστασης σε κατοικημένες περιοχές. Ο όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει μαθηματικά την τύρβη λέγεται ένταση ή διασπορά τύρβης κι εξαρτάται από τη μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου κι από τη διασπορά αυτής, ενώ παίρνει τιμές 5-20%. Για το σχεδιασμό των Α/Γ οι συνήθεις τιμές που λαμβάνονται είναι 16-18% [26]

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

Όπου,  $\sigma$ : η διασπορά της ταχύτητας του ανέμου από τη μέση τιμή στο διάστημα που υπολογίζεται η μέση τιμή και δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma = \frac{\bar{V}}{\ln \frac{H}{z_0}} \quad \text{και συνεπώς: } I = \frac{1}{\ln \frac{H}{z_0}}$$

Όπου, H: το ύψος μέτρησης της ταχύτητας ανέμου κι επομένως γίνεται ο υπολογισμός της έντασης της τύρβης δίχως τη γνώση της μέσης τιμής της ταχύτητας. Προκύπτει έτσι ότι ο εκθέτης Hellman χαρακτηρίζει την τύρβη μίας περιοχής.

## 2.5 ΤΟ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟ ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ (Α.Ο.Σ.)

Όπως αναφέραμε, το εύρος της μικρομετεωρολογίας περιορίζεται στα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο κατώτερο στρώμα του ατμοσφαιρικού αέρα (500 – 1500 m) στο οποίο εμφανίζεται επίδραση της τριβής από την επιφάνεια του εδάφους και είναι γνωστό με το όνομα **ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα**. Γενικά ως οριακό στρώμα, (boundary layer), ενός ρευστού, υγρού ή αερίου, ορίζεται ως το στρώμα εκείνο που επηρεάζεται σημαντικά από την επαφή με μια στερεή επιφάνεια με αποτέλεσμα το προφίλ των εγκάρσιων ταχυτήτων να είναι μεταβαλλόμενο [10]. Το εύρος της περιοχής μεταβολής της ταχύτητας, δηλαδή το πάχος του οριακού στρώματος δεν διατηρείται σταθερό κατά τη διεύθυνση της ροής, αλλά αυξάνεται καθώς μεγαλύτερες ποσότητες ρευστού επιβραδύνονται υπό την επίδραση των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται εντός του. Επομένως το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ΑΟΣ) σχηματίζεται ως συνέπεια της αλληλεπίδρασης της ατμόσφαιρας με την υποκείμενη επιφάνεια (έδαφος ή νερό) για χρονικά διαστήματα που κυμαίνονται από λίγες ώρες, έως περίπου 1 μέρα. Για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα οι αλληλεπιδράσεις γης – ατμόσφαιρας, διέπουν όλο το εύρος της τροπόσφαιρας (τυπικά 10 km), αλλά ακόμα και τότε, το ΑΟΣ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σ' αυτές τις αλληλεπιδράσεις. Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, το ΑΟΣ είναι συνέχεια τυρβώδες πολύ καλά αναμειγμένο και ανταποκρίνεται σχετικά γρήγορα στις αλλαγές που συμβαίνουν στη γήινη επιφάνεια συναρτήσει του χώρου και του χρόνου.

Το κύριο χαρακτηριστικό που ξεχωρίζει το ΑΟΣ από τα άλλα στρώματα της ατμόσφαιρας, είναι η τυρβώδης κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Επομένως, οι διάφορες μετεωρολογικές παράμετροι, ταχύτητα ανέμου, θερμοκρασία, υγρασία κτλ, έχουν τυχαίες διακυμάνσεις γύρω από τη μέση τιμή τους, συναρτήσει του χώρου και του χρόνου. Οι μηχανισμοί για αυτή την τυρβώδη κατάσταση που επηρεάζονται προφανώς από τη φύση της επιφάνειας του εδάφους, είναι οι ακόλουθοι δύο [24]:

Μηχανική ανάμειξη: Οφείλεται στη δυναμική αστάθεια των μεγάλων βαθμιδών της ταχύτητας του ανέμου στη χαμηλότερη περιοχή του οριακού στρώματος καθώς ο τελευταίος πνέει πάνω από τραχιές εδαφικές επιφάνειες.

Ανάμειξη οφειλόμενη σε ανωστικές δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω διαφοράς πυκνότητας (buoyancy). Την ημέρα π.χ. η επιφάνεια του εδάφους θερμαίνεται λόγω ηλιακής ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να θερμαίνονται τα κατώτερα στρώματα του αέρα και να δημιουργούνται έτσι έντονες ανοδικές κινήσεις.

Η κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα επιβραδύνεται από την αντίσταση που παρουσιάζουν τα σώματα που καλύπτουν την επιφάνεια της γης, όρη, δέντρα, δομημένο περιβάλλον, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται ισχυρές δυνάμεις μεταξύ εδάφους και κινούμενου αέρα. Αυτή η επίδραση των επιφανειακών (διατμητικών) τάσεων, που οφείλονται στις δυνάμεις τριβής της εδαφικής επιφάνειας, γίνεται αισθητή σε όλο το πάχος του ΑΟΣ, το οποίο γι' αυτό το λόγο ονομάζεται πολλές φορές και στρώμα επίδρασης τριβής (layer of frictional influence).

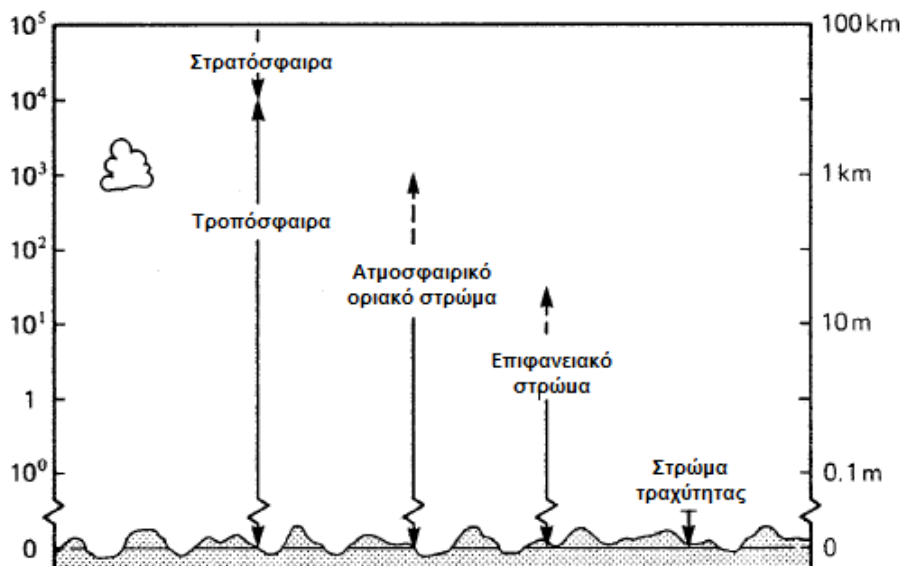
Το πάχος του ΑΟΣ, τόσο πάνω από την ξηρά όσο και πάνω από τη θάλασσα είναι μικρότερο στις περιοχές υψηλών βαρομετρικών πιέσεων από ότι στις περιοχές χαμηλών. Στις περιοχές υψηλών πιέσεων πάνω από την ξηρά, το ΑΟΣ έχει μια πολύ καλά καθορισμένη δομή που αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το πάχος του κυμαίνεται από μερικές δεκάδες μέτρα έως λίγα χιλιόμετρα και εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής θερμοκρασίας της γήινης επιφάνειας, την ένταση του ανέμου, τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, την υγρασία κτλ. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η συνεχής θέρμανση της επιφάνειας της γης από τον ήλιο και η προαναφερόμενη τυρβώδη ανάμειξη λόγω θερμότητας εντός του ΑΟΣ, έχει ως αποτέλεσμα το πάχος του τελευταίου να αυξάνεται σταδιακά, λαμβάνοντας μια μέγιστη τιμή, εύρους 0.2 – 5 km λίγο πριν τη δύση του ηλίου. Αντίθετα, τις νυχτερινές ώρες η εκπομπή

θερμότητας με τη μορφή ακτινοβολίας από τη γήινη επιφάνεια, έχουν ως αποτέλεσμα την εξασθένηση της τυρβώδους ανάμειξης και προφανώς τη συρρίκνωση του πάχους του ΑΟΣ, σε μια τυπική τιμή εύρους 200 – 500 m [25].

Πλησιάζοντας προς την επιφάνεια του εδάφους το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα χαρακτηρίζεται από έντονες τυρβώδεις κινήσεις που παράγονται λόγω της τραχύτητας του εδάφους. Το αντίστοιχο μέρος του ΑΟΣ ονομάζεται «επιφανειακό στρώμα» (surface layer). Οι τυρβώδεις ροές και οι τάσεις εκεί μεταβάλλονται λιγότερο από 10% του μέτρου τους. Κατά την διάρκεια της ημέρας εκτείνεται από 20 έως και 50 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του εδάφους [26]. Κατά την διάρκεια της νύχτας, όταν περιορίζεται η κατακόρυφη ανάπτυξη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, το ύψος του «επιφανειακού στρώματος» φτάνει μόλις λίγα μέτρα πάνω από το έδαφος. Για χρονικές περιόδους μεγαλύτερες των 10 λεπτών μπορεί να θεωρηθεί ως ομογενές και παράλληλο με την επιφάνεια του εδάφους. Στο κατώτατο μέρος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, αμέσως πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, βρίσκεται:

Το «στρώμα τραχύτητας» (roughness layer). Σε αυτό το στρώμα η ροή είναι ακανόνιστη, μια και επηρεάζεται έντονα από την φύση των διαφορετικών υποκείμενων στοιχείων τραχύτητας (κτήρια, θάμνοι, δέντρα, κτήρια). Κύριο χαρακτηριστικό της ροής σε αυτή την περιοχή της ατμόσφαιρας, όπως αναφέρθηκε, είναι οι τυρβώδεις κινήσεις και οι στρόβιλοι που αναπτύσσονται και στις τρεις διαστάσεις. Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων τραχύτητας, όπως το ύψος τους, το πλάτος τους και η απόσταση μεταξύ τους, είναι οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν την ροή του ανέμου μέσα στο στρώμα τραχύτητας [26].

Μερικά εκατοστά πάνω από το έδαφος εκτείνεται το «στρώμα στρωτής ροής» (laminar boundary layer). Σε αυτό το ατμοσφαιρικό στρώμα θεωρείται ότι δεν επικρατούν τυρβώδεις αναταράξεις και επικρατεί η στρωτή ροή του ανέμου.



Εικ. 2.25 Διαστρωμάτωση της κατώτερης ατμόσφαιρας  
[Πηγή: «Boundary Layer Climates», T. Oke, 1987

### 2.5.1 Διαστρωμάτωση του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος πάνω από πόλεις

Βάσει των μελετών των Stull, (1988) [27], Raupach κ.α. (1980) [28], Rotach, (1993) [29], Χέλμης και Παπαϊωάννου, (2005) [30], το ύψος του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος εμφανίζει ημερήσια διακύμανση, όπως και οι άνεμοι και η θερμοκρασία του αέρα.

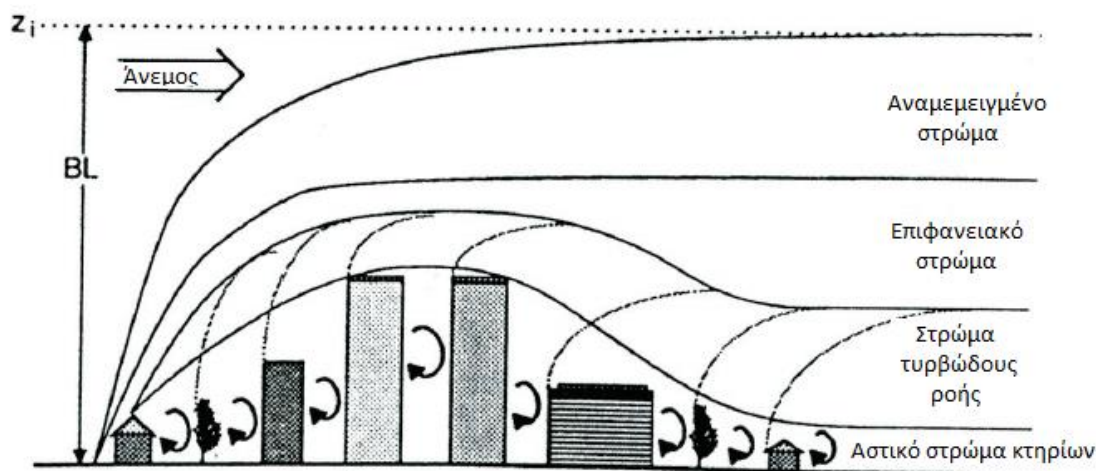
Παρουσιάζοντας την δομή του κατά την διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου, πάνω από μία αστική περιοχή, παρατηρούνται κυρίως τα ακόλουθα μέρη:

Ένα εξαιρετικά τυρβώδες αναμειγμένο στρώμα που ονομάζεται αναμειγμένο στρώμα (mixed layer) ή ΑΟΣ κατακόρυφων κινήσεων, (convective boundary layer). Η εξάπλωση της τύρβης εντός του μέρους αυτού, μπορούν να προέλθουν κατά κύριο λόγο είτε από μηχανικές διεργασίες, είτε από ανοδικές κινήσεις λόγω διαφοράς πυκνότητας.

Κάτω από το «αναμειγμένο στρώμα» του ΑΟΣ ορίζεται, όπως αναφέρθηκε, το «επιφανειακό στρώμα» (surface layer). Στο συγκεκριμένο στρώμα του ΑΟΣ η ορμή και η μετάδοση της θερμότητας δέχονται την επίδραση της αστικής περιοχής, αλλά οι «ολκοί» (wakes) που παράγονται από την κίνηση του αέρα ανάμεσα στα κτήρια δεν είναι ακόμα σημαντικοί.

Πάνω από τις κορυφές των κτηρίων η ροή χαρακτηρίζεται από τυρβώδεις κινήσεις, οπότε το αντίστοιχο τμήμα του ατμοσφαιρικού στρώματος καλείται «στρώμα τυρβώδους ροής» (turbulent wake layer).

Το «αστικό στρώμα κτηρίων» (urban canopy layer) αποτελεί το χαμηλότερο όριο του ΑΟΣ πάνω από μία αστική περιοχή. Εκτείνεται ανάμεσα στις κορυφές των κτηρίων και την επιφάνεια του εδάφους και δημιουργείται βάσει μικρής κλίμακας διαδικασιών οι οποίες λαμβάνουν χώρα στους δρόμους ανάμεσα στα κτήρια της πόλης. Το «αστικό στρώμα κτηρίων» ξεκινά από την επιφάνεια του εδάφους και φτάνει ως το μέσο ύψος των κτηρίων. Χαρακτηρίζεται από ειδικό πεδίο ροής που καθορίζεται από την τοπογραφία, την γεωμετρία της αστικής περιοχής, την κυκλοφορία των αυτοκινήτων, την παρουσία των δένδρων και άλλους τοπικούς παράγοντες.



*Εικ. 2.26 Στρώματα της κατώτερης ατμόσφαιρας που αναπτύσσονται μέσα στο αστικό οριακό στρώμα. [Πηγή: «Boundary Layer Meteorology», R. Stull, 1988]*

### 2.5.2 Χαρακτηριστικά του στρώματος αέρα ανάμεσα στα κτίρια (Urban canopy layer)

Οι άνεμοι μέσα στο «αστικό στρώμα κτηρίων» (urban canopy layer) συνήθως είναι μικρότερης ταχύτητας από αυτούς που πνέουν στις αγροτικές περιοχές στο ίδιο ύψος. Ο κανόνας αυτός δεν ισχύει στις ακόλουθες περιπτώσεις:

Όταν ο άνεμος, που κινείται με μεγάλη ταχύτητα σε μεγάλες αποστάσεις από την επιφάνεια του εδάφους συναντά στην πορεία του υψηλά κτήρια, με αποτέλεσμα να κινηθεί καθοδικά.

Επίσης, όταν συναντά σειρά κτηρίων τοποθετημένα παράλληλα με την διεύθυνση του, δημιουργείται φαινόμενο «καναλιού», δηλαδή κινείται παράλληλα σε αυτά.

Όταν οι άνεμοι που επικρατούν είναι χαμηλής ή αμελητέας ταχύτητας (π.χ. στην περίπτωση αντικυκλώνα). Σε αυτή την περίπτωση η εμφάνιση οριζόντιας βαθμίδας της θερμοκρασίας (συνεπώς και της πίεσης) κατά μήκος του αστικού – αγροτικού ορίου μπορεί να είναι ικανή ώστε να στρέψει μια αύρα από τις αγροτικές περιοχές προς το κέντρο της πόλης. Λόγω της σύγκλισης των ροών προς το κέντρο της πόλης, από όλες τις παραπλήσιες κατευθύνσεις, δημιουργούνται ανοδικά ρεύματα υπεράνω του κέντρου της πόλης και αντίστροφη ροή από την πόλη προς τις γύρω περιοχές στα υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας [31].

### 2.5.3 Κατανομή του ανέμου πάνω και κάτω από το επίπεδο που ορίζουν οι κορυφές των κτιρίων

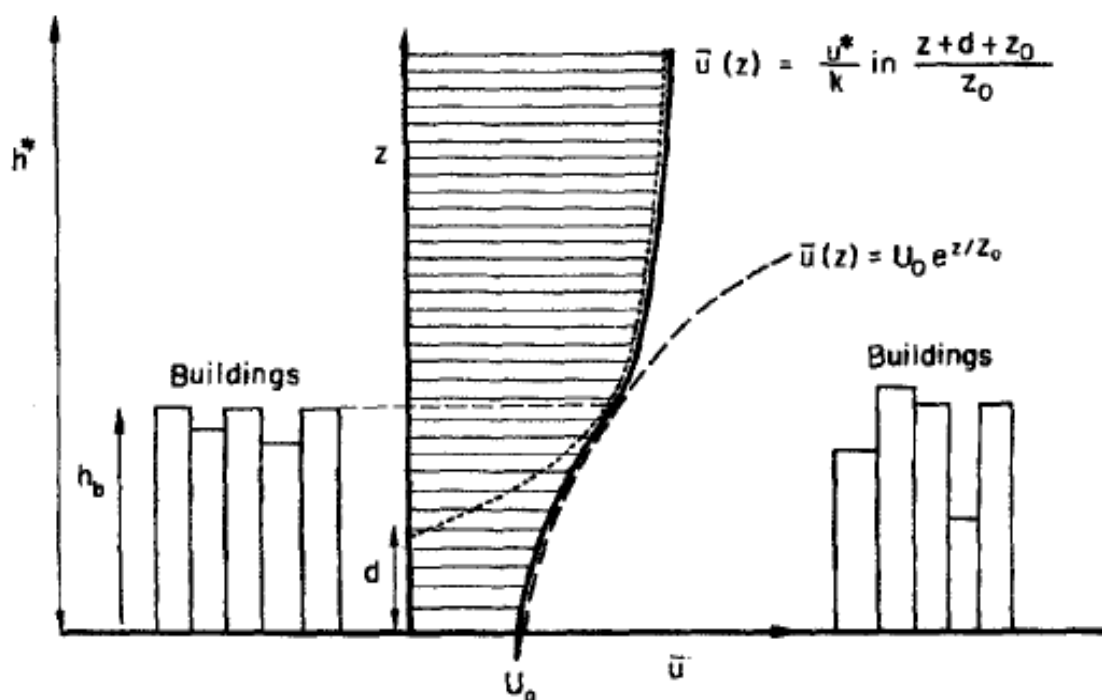
Το «στρώμα αέρα ανάμεσα στα κτήρια» (urban canopy layer) έχει το δικό του πεδίο ροής που καθοδηγείται και ορίζεται βάσει της αλληλεπίδρασης που έχει με τα τοπικά χαρακτηριστικά. Δημιουργείται από διαδικασίες μικρής κλίμακας που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα στα κτήρια. Η μεταβολή του ανέμου καθ' ύψος ( $z$ ) έως και στο επίπεδο που ορίζεται από την κορυφή των κτηρίων περιγράφεται από τον εκθετικό νόμο [32]:

$$v = V_0 \cdot e^{z/Z_0}$$

Όπου:

$V_0$ : είναι η ταχύτητα του ανέμου μέσα στο «στρώμα τραχύτητας» (roughness sub-layer) κοντά στο επίπεδο που ορίζεται από τις κορυφές των κτηρίων (urban canopy layer)

$Z_0$ : ορίζεται το μήκος τραχύτητας, μέσα στο «στρώμα τραχύτητας», σε απόσταση από το επίπεδο του εδάφους ίση με το μέσο ύψος των κτηρίων.



**Εικ. 2.27** Κατανομή του ανέμου στο επιφανειακό επίπεδο, επάνω και κάτω από το μέσο ύψος κτηρίων [Πηγή: «A pollution Model for street - level air», S. Nicholson, 1975]

## 2.6 Ο ΑΝΕΜΟΣ ΣΕ ΟΙΚΙΣΤΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ

### 2.6.1 Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας

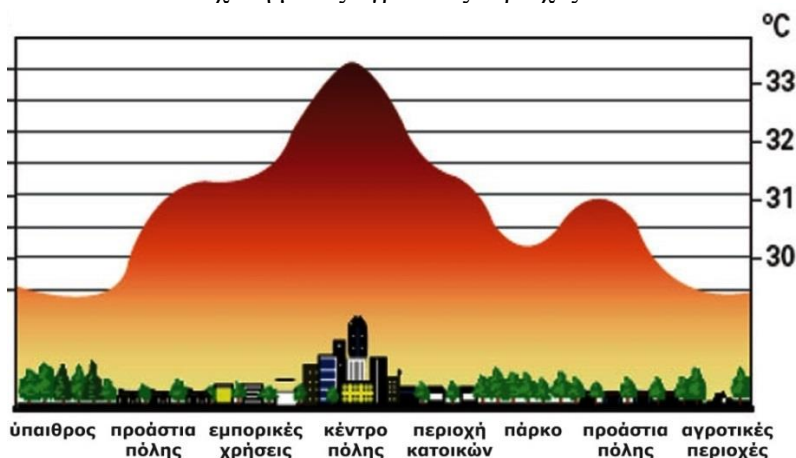
Οι περισσότερες πόλεις είναι πηγές θερμότητας και ρύπανσης με αποτέλεσμα η θερμική δομή της ατμόσφαιρας πάνω από αυτές να χαρακτηρίζεται από το **φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας (heat island effect)**. Εάν χαράξουμε τις ισόθερμες καμπύλες πάνω από μια αστική περιοχή καθώς επίσης και από την υπαίθρια περιοχή που την περιβάλλει τότε θα παρατηρήσουμε ότι δημιουργείται μια εικόνα παραπλήσια με αυτή που θα έδιναν οι ισόθερμες καμπύλες σε μικρά νησιά μέσα στον ωκεανό. Η μεγαλύτερη θερμοκρασιακή διαφορά παρατηρείται κατά τη διάρκεια της νύχτας, αφού το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας οφείλεται περισσότερο στην ψύξη παρά στην θέρμανση. Η αέρια ρύπανση επηρεάζει επίσης το κλίμα της πόλης αφού τα σωματίδια που διαχέονται στην ατμόσφαιρα ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία ή λειτουργούν ως πυρήνες συμπύκνωσης υδρατμών με αποτέλεσμα αύξηση της συχνότητας εμφάνισης ομίχλης.

Το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας εκτός από τις μεταβολές στην επιφανειακή θερμοκρασία, επιδρά και στην κατακόρυφη δομή του αστικού ΑΟΣ. Κατά τη διάρκεια της ημέρας και για περίπτωση αίθριου καιρού το αστικό ΑΟΣ αναπτύσσεται σε μεγάλο ύψος εξαρτώμενο από την επιφανειακή ροή της θερμότητας και την ευστάθεια της ατμόσφαιρας. Το ύψος του συγκρινόμενο με το αντίστοιχο του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος μιας μη αστικής περιοχής είναι κατά πολύ μεγαλύτερο.

Τη νύχτα, εξ αιτίας της καλά αναπτυγμένης θερμνησίδας, η πόλη διατηρεί ένα επιφανειακό στρώμα ανάμειξης σε αντίθεση με τα γύρω προάστια. Επομένως η συχνότητα εμφάνισης νυχτερινών θερμοκρασιακών αναστροφών σε μια πόλη είναι πολύ μικρότερη από ότι σε ένα προάστιο. Σε αυτό συντείνουν και οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Η ύπαρξη βιομηχανίας, μεταφορών και κεντρικής θέρμανσης στα κτίρια
- Η ύπαρξη υλικών μεγάλης ειδικής θερμοχωρητικότητας που απορροφούν θερμότητα την ημέρα και την απελευθερώνουν βαθμιαία τη νύχτα.
- Η ύπαρξη τοπικής κυκλοφορίας αέρα μεταξύ κέντρου και περιφέρειας που δημιουργείται σε περιπτώσεις άπνοιας.

Τα χαρακτηριστικά του αστικού ΑΟΣ οφείλονται αφενός στην επίδραση του φαινομένου της θερμικής νησίδας και αφετέρου στην επίδραση της αυξημένης τραχύτητας που εμφανίζει η αστική περιοχή. Λόγω της τελευταίας ελαττώνεται η ταχύτητα του ανέμου κοντά στο έδαφος σε ένα ποσοστό 20 – 30% σε σχέση με τις αγροτικές περιοχές.



**Εικ. 2.28** Αύξηση θερμοκρασίας πάνω από αστική περιοχή λόγω του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας [Πηγή: <http://www.zeroenergybuildings.org/2012/04/fainomeno-heat-island-effect.html>]



### 2.6.2 Βασικοί παράγοντες που επιδρούν στη ροή του αέρα σε αστικούς χώρους

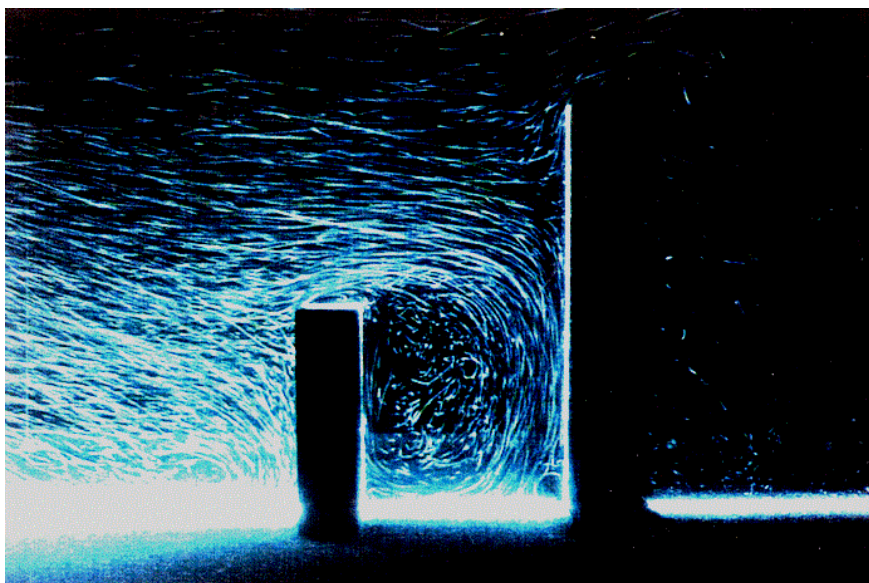
α) Το μέγεθος του χώρου: Σε μεγάλους χώρους, η ροή του αέρα αναμένεται να είναι πιο πολύπλοκη, λόγω των εντονότερων στροβιλισμών, δινών και λοιπών χαρακτηριστικών της τυρβώδους ροής. Επομένως είναι αδύνατο να μοντελοποιηθεί ως δυσδιάστατη ροή στο επίπεδο.

β) Το ύψος των περιμετρικών κτιρίων. Όσο μεγαλύτερα είναι τα γειτονικά κτίρια τόσο ευρύτερη είναι προφανώς και η κλίμακα της τύρβης.

### 2.6.3 Το φαινόμενο της αστικής χαράδρας

Ως αστική χαράδρα έχει οριστεί ο σχετικά στενός δρόμος ανάμεσα σε δύο σειρές κτηρίων τα οποία παρατάσσονται εκατέρωθεν του δρόμου και για μεγάλη απόσταση κατά μήκος αυτού [33]. Οι διαστάσεις της αστικής χαράδρας συνήθως εκφράζονται μέσω των λόγων των διαστάσεων της  $Y/M$ ,  $Y/\Pi$ ,  $M/Y$  ( $Y$  το μέσο ύψος των κτηρίων εκατέρωθεν της αστικής χαράδρας,  $\Pi$  το πλάτος μεταξύ των κτηρίων και  $M$  το μήκος του δρόμου έως τις πρώτες κάθετες διασταυρώσεις). Εάν ο λόγος  $Y/\Pi$  υπερβαίνει την τιμή 2, τότε η αστική χαράδρα χαρακτηρίζεται ως βαθιά. Εάν ο λόγος  $M/Y$  είναι περίπου ίσος με τις τιμές 3, 5 και 7, τότε η αστική χαράδρα χαρακτηρίζεται ως μικρού, μεσαίου και μεγάλου μήκους αντίστοιχα [34].

Οι αστικές χαράδρες μπορούν ακόμα να διακριθούν σε συμμετρικές εφόσον το μέσο ύψος των κτηρίων εκατέρωθεν του δρόμου είναι περίπου ίδιο ή ως μη συμμετρικές στην αντίθετη περίπτωση [34]. «Υψηλότερη στην προσήνεμη πλευρά» (step up) ονομάζεται η αστική χαράδρα που η προσήνεμη πλευρά της είναι η ψηλότερη από τις δύο, σε αντίθετη περίπτωση ονομάζεται «χαμηλότερη στην προσήνεμη πλευρά» (step down). Ένα άλλο βασικό γεωμετρικό χαρακτηριστικό των αστικών χαράδρων είναι η μορφή της οροφής των κτηρίων. Η μορφή της οροφής αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην κατανομή του ανέμου μέσα σε μια αστική χαράδρα. Από τα αποτελέσματα μελέτης σε πειράματα αεροσήραγγας παρατηρήθηκε ότι στις οροφές κτηρίων με κλίση, η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται απότομα σε σχέση με την αντίστοιχη σε κτήρια με επίπεδες οροφές [35]. Σε πειραματική μελέτη παρατηρήθηκε ότι για κτήρια με επίπεδη κορυφή, η ροή μέσα στο δρόμο είναι πιο ασθενής, σε σχέση με την αντίστοιχη που παρατηρείται εφόσον υπάρχουν κτήρια με κλίση προσήνεμα της ροής [32].



**Εικ. 2.29** Πεδίο ροής ανέμου γύρω από κτίρια σε αεροσήραγγα [Πηγή: KATO Laboratory and OOKA Laboratory - Institute of Industrial Science, University of Tokyo: [http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/kato\\_ooka.html](http://venus.iis.u-tokyo.ac.jp/kato_ooka.html)]

### 2.6.4 Κυριότεροι τύποι ροής σε αστική χαράδρα

Σε αστικές περιοχές, όταν η επικρατούσα κίνηση του αέρα εκτός αστικής χαράδρας είναι περίπου κάθετη στον κυρίως άξονα του δόμου (με απόκλιση  $\pm 15^\circ$ ), παρατηρούνται οι ακόλουθες τρεις μορφές ροής εντός της αστικής χαράδρας [31]:

#### Ροή ανάμεσα σε στοιχεία τραχύτητας (Εικ. 2.30.α)

Εάν τα κτήρια βρίσκονται σχετικά αραιά τοποθετημένα το ένα από το άλλο ( $Y/\Pi < 0.3$ ) καθένα από αυτά λειτουργεί σαν ξεχωριστό εμπόδιο στην ροή του ανέμου. Ο άνεμος διασχίζει μία αρκετά μεγάλη απόσταση, υπήνεμα του πρώτου κτηρίου, πριν συναντήσει το δεύτερο. Η ροή ανάμεσα τους έχει περιγραφεί αναλυτικά στις προηγούμενες παραγράφους.

#### Αλληλεπίδραση μεταξύ των ολκών (Εικ. 2.30.β)

Σε κοντινότερες αποστάσεις μεταξύ τους ( $0.3 < Y/\Pi < 0.7$ ) οι «ολκοί» που παράγονται λόγω της ροής του ανέμου στο πίσω μέρος του κάθε κτηρίου αναμειγνύονται με τον άνεμο που κινείται προς το επόμενο κτήριο, οδηγώντας σε πολύπλοκη ροή του ανέμου. Η προσήνεμη πλευρά του επόμενου κτηρίου επιβάλλει την προς τα κάτω ροή του στροβίλου, οπότε δημιουργούνται δευτερεύουσες κινήσεις του ανέμου μέσα στην αστική χαράδρα.

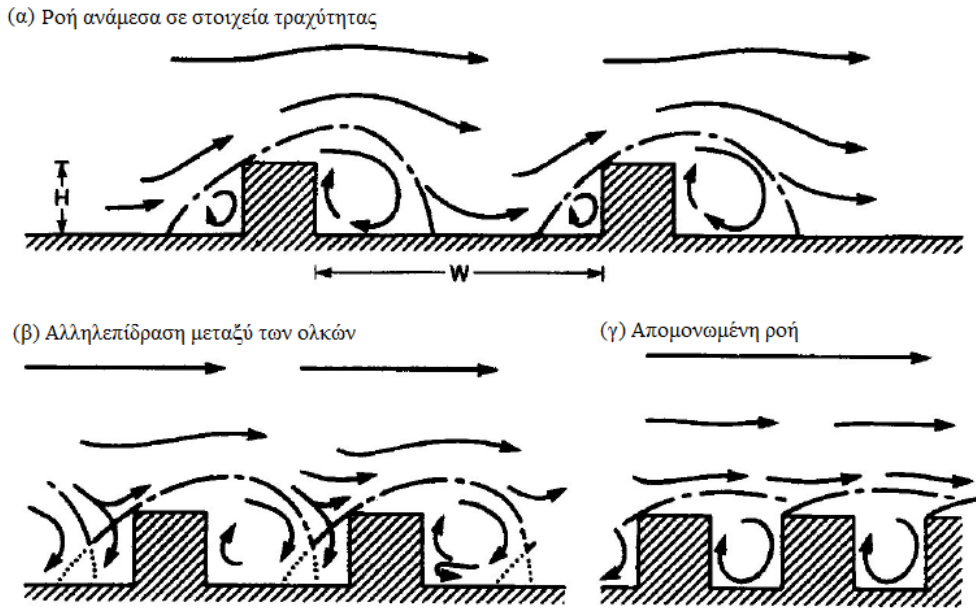
#### Απομονωμένη ροή (Εικ. 2.30.γ)

Όσο ο λόγος του μέσου ύψους των κτηρίων προς το πλάτος του δρόμου λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές, ( $Y/\Pi > 0.65$ ), ο κύριος όγκος της ροής του ανέμου περιορίζεται πάνω από το επίπεδο της οροφής τους. Η μέσης κλίμακας ροή του ανέμου περιορίζεται κυρίως πάνω από το επίπεδο της οροφής των κτηρίων και αποκόπτεται από την κίνηση του αέρα κάτω από αυτό. Μέσα στην αστική χαράδρα παρατηρείται στροβιλώδης κίνηση του αέρα. Αναλυτικά, η ανάπτυξη του στροβίλου μέσα στην αστική χαράδρα, βασίζεται στις ακόλουθες τρεις ζώνες κυκλοφορίας του ανέμου γύρω από τα κτήρια:

- Στην προσήνεμη πλευρά του κτηρίου, λόγω της πρόσπτωσης του ανέμου σε αυτή, επικρατούν καθοδικές κινήσεις του ανέμου και αναπτύσσεται στρόβιλος με κατεύθυνση προς τα κάτω.
- Στην κοιλότητα χαμηλής πίεσης που επικρατεί στον χώρο ανάμεσα στα κτήρια αναπτύσσεται υπήνεμος στρόβιλος. Η χαμηλή πίεση επικρατεί λόγω της αποκόλλησης της ροής από τις πλευρές και την κορυφή των κτηρίων.
- Η περιοχή των χαμηλών πιέσεων που εμφανίζεται στην υπήνεμη πλευρά, προκαλεί κίνηση των αερίων μαζών εγκάρσια στον κύριο άξονα του δρόμου, αντίθετης όμως κατεύθυνσης από την αντίστοιχη που εμφανιζόταν στο επίπεδο της κορυφής των κτηρίων.

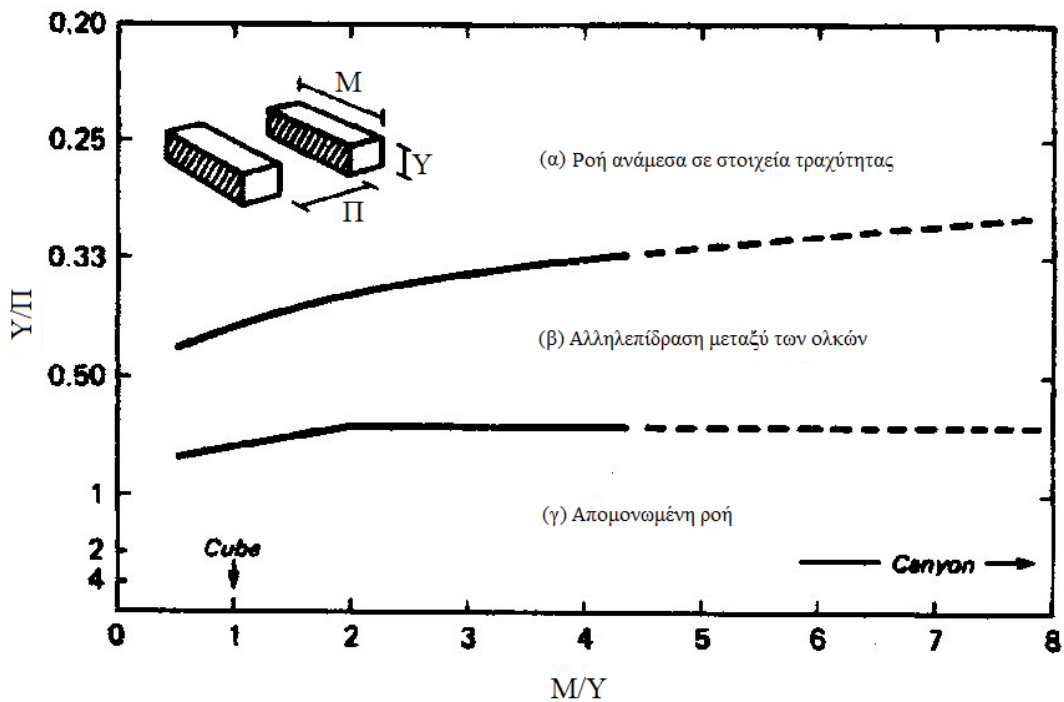
Η ροή του ανέμου στην συγκεκριμένη περίπτωση καλείται «απομονωμένη» (skimming flow). Η μεγαλύτερη ποσότητα της αέριας μάζας δεν εισέρχεται μέσα στην αστική χαράδρα και ένας σταθερός κυκλικός στρόβιλος αναμένεται να αναπτύσσεται μέσα στην αστική χαράδρα.

Από προσομοιώσεις σε αεροσήραγγες [36] διαπιστώθηκε η ύπαρξη και των τριών διαφορετικών τύπων ροής, για κάθετη πρόσπτωση του ανέμου προς τον κύριο άξονα του δρόμου, για διαφορετικό λόγο διαστάσεων.



Εικ. 2.30 Οι τρεις περιπτώσεις ροής αέρα μέσα σε αστική χαράδρα για κάθετη πρόσπτωση του ανέμου στον κύριο άξονα της [Πηγή: «Street Design and Urban Canopy Layer Climate», T. Oke, 1988]

Η διάκριση μεταξύ των τριών τύπων ροής μέσα σε αστική χαράδρα, όταν η ροή πάνω από το επίπεδο της κορυφής των κτηρίων είναι κάθετη στον κύριο άξονα της χαράδρας, παρουσιάζεται στην ανόλουθη εικόνα (Εικ. 2.31). Διακρίνονται οι οριακές γραμμές βάσει των τιμών που λαμβάνουν οι λόγοι διαστάσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της αστικής χαράδρας.



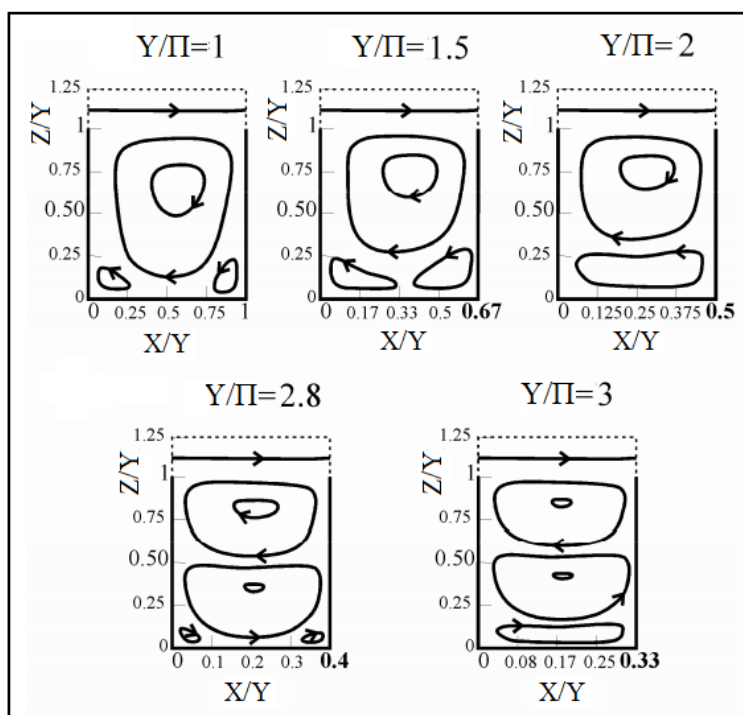
Εικ. 2.31 Οριακές γραμμές μεταξύ των τριών περιπτώσεων ροών του ανέμου μέσα σε αστικό περιβάλλον [Πηγή: «Street Design and Urban Canopy Layer Climate», T. Oke, 1988]

Για λόγους  $Y/\Pi$  μεγαλύτερους του 1,3 τα πειράματα και οι αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι το κέντρο του βρόχου ανακυκλοφορίας μεταφέρεται προς τα πάνω, ενώ κοντά στο επίπεδο του δρόμου ο αέρας είναι σχεδόν σταθερός με πολύ χαμηλές ταχύτητες, παρέχοντας καλύτερη προστασία στους ανθρώπους, αλλά οξύνοντας τα προβλήματα ρύπανσης [37].

Γενικά για βαθιές χαράδρες κοντά στο επίπεδο του δρόμου η συμπεριφορά είναι ασταθής και τα φαινόμενα είναι δύσκολα προσδιορίσιμα. Πάντως έχει επανειλημμένα παρατηρηθεί ότι για λόγους  $Y/\Pi > 2$ , μπορεί να σχηματιστεί δεύτερος ασθενής αντιπεριστρεφόμενος βρόχος στο βάθος της χαράδρας [37].

Για ακόμη πιο ψηλά κτίρια  $Y/\Pi > 3$  έχουν παρατηρηθεί τρεις βρόχοι, όπου ο τρίτος είναι ακόμη πιο μικρός, ασθενής και ασαφής από τον δεύτερο [37]. Αυτή η αλυσίδα βρόχων προκαλεί πολύ χαμηλές ταχύτητες κοντά στο επίπεδο του δρόμου, χαμηλή ένταση τύρβης και μειωμένη συναγωγή.

Στην εικόνα 2.32, που έχει βασιστεί σε αριθμητική μελέτη των Jeong and Andrews [38], φαίνονται τα διάφορα είδη ροών απόξεσης ανάλογα με τον αριθμό των βρόχων και η μετάβαση από το ένα είδος στο άλλο.



**Εικ. 2.32** Γραμμές ροής για διάφορους λόγους  $Y/\Pi$  [Πηγή: «Ροή και Διασπορά Ρύπων σε Οδικές Χαράδρες: Ανασκόπηση», Ν. Κουτσουράκης, Τεχν. Χρον. Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 1, 2010]

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] «Αρχές Μετεωρολογίας – Κλιματολογίας», Π. Κατσαφάδος, Η. Μαυροματίδης, 2010
- [2] «Principles of Physical Geography», F. Monkhouse, 1988
- [3] «Προβλήματα αποκατάστασης στη μικρή κλίμακα του αστικού χώρου», Ε. Ευαγγελινός, 2001
- [4] «Μηχανική των Ρευστών» τόμοι 1 & 2, Α. Παπαϊωάννου, 2001
- [5] «Εισαγωγή στη Δυναμική Μετεωρολογία», Δ. Μεταξάς, Α. Μπαρτζώκας, 1993.

- [6] «Εισαγωγικά Στοιχεία Ατμοσφαιρικής Φυσικής», Χ. Χαλδούπης, 2000
- [7] «Σημειώσεις Θερμοδυναμικής της ατμόσφαιρας», ΓΕΑ, 1990
- [8] «Στοιχεία Μετεωρολογίας», Μετεωρολογική Υπηρεσία, 2011
- [9] «Εισαγωγή στη Γαιωδαισία, Α.Μ. Αγάντζα – Μπαλοδήμου – Δ.Δ. Μπαλοδήμος, 2001
- [10] «Atmospheric Boundary Layer Flows» J.C. Kacmal, J.J. Finnigan, 1996
- [11] «National Meteorological Library and Archive Fact sheet 6 — The Beaufort Scale», Met Office, 2010
- [12] «Σημειώσεις εργαστηρίου ‘Σχεδιασμός και Διαχείριση Συστημάτων ΑΠΕ’», Μ. Καραπιδάκης, Δ. Κολοκόστα, 2006
- [13] «Φυσική Κλιματολογία», Χ. Σαχσαμάνογλου, Α. Μπλούτσος, 1998
- [14] «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας», Ι.Κ. Καλδέλλη, 2005
- [15] «Wind Energy Handbook», T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, B. Ervin, 2001
- [16] «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005
- [17] «Wind Energy Systems for Electric Power Generation», M. Stiebler, 2008
- [18] «Weibull Parameters distribution fitting in the surface wind layer», P.B. Caballero, E.J. Bragulat, C.H. Sala, XIth Internaitonal Congress, 3rd-8thSeptember 2006
- [19] «Πηγές Ενέργειας στο Περιβάλλον - Σημειώσεις για το μάθημα επιλογής της κατεύθυνσης Φυσικής Περιβάλλοντος του ΑΠΘ», Α. Μπάης, 2004
- [20] «Οικονομική Ανάλυση Ενεργειακών Συστημάτων», Α. Παπαδόπουλος, 2002
- [21] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Αιολική Ενέργεια», Δ. Κατσαπρακάκης, Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας Τ.Ε.Ι. Κρήτης
- [22] «Μοντελοποίηση ανεμογεννητριών για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων σε συνθήκες αυξημένης αιολικής διείδυσης», Διδ. Διατριβή, Γ. Μάργαρης, 2011
- [23] «Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics», E. Hau, 2006
- [24] «Σημειώσεις Συνοπτικής και Δυναμικής Μετεωρολογίας», Θ. Καρακώστας, 2010
- [25] «An Introduction to Boundary Layer Meteorology», R. B. Stull, 1989
- [26] «Θεωρητική και πειραματική αξιολόγηση των μικροκλιματικών χαρακτηριστικών σε βαθιές αστικές χαράδρες», Διδ. Διατριβή, Χ. Γεωργάκη, 2007
- [27] «Boundary Layer Meteorology», R. Stull, 1988
- [28] «A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surface», M. Raupach, A. Thom, I. Edwards, 1980
- [29] «Turbulence close to a rough urban surface. Part I: Reynolds stress», M. Rotach, 1993
- [30] «Σημειώσεις Φυσικής Περιβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών», Κ.Χέλμης, Γ. Παπαϊωάννου, 2005
- [31] «Boundary Layer Climates», T. Oke, 1987
- [32] «Measurements of Airflow in an Urban Environment», Διδ. Διατριβή, P. Louka, 1998
- [33] «A pollution Model for street - level air», S. Nicholson, 1975
- [34] «Modeling air quality in street canyons: a review», S.Vardoulakis et al, 2003
- [35] «Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town», S. Rafailidis. 1997
- [36] «Concentrations and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data», C. Chang, R. Meroney, 2003
- [37] «Ροή και Διασπορά Ρύπων σε Οδικές Χαράδρες: Ανασκόπηση», Ν. Κουτσουράκης, Τεχν. Χρον. Επιστ. Έκδ. ΤΕΕ, τεύχ. 1, 2010
- [38] «Application of the k-ε turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon», S. Jeong, M. Andrews, 2002
- [39] «Street Design and Urban Canopy Layer Climate», T. Oke, 1988
- [40] «Climate, microclimate, the Urban scale, Proceedings of the International symposium “Solar energy and buildings”», B. Givoni, 1993
- [41] «Σχεδιασμός Υπαίθριων Αστικών Χώρων με Βιοκλιματικά Κριτήρια», ΚΑΠΕ, 2002
- [42] <http://fmtulab.wikidot.com>
- [43] Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία: <http://www.hnms.gr>

# 3

## ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

### 3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

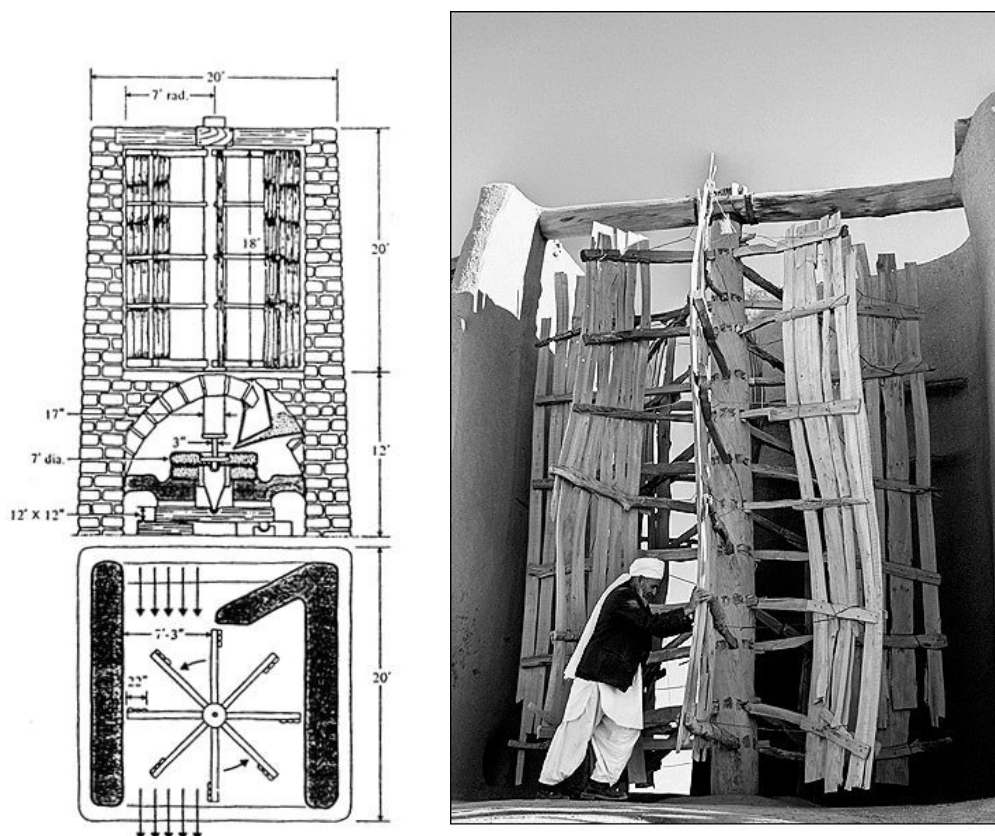
Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται από τον άνθρωπο από τότε που πρωτοχρησιμοποιήθηκαν πανιά για την εκμετάλλευση του ανέμου. Για περισσότερο από δύο χιλιετίες αιολικές μηχανές έχουν χρησιμοποιηθεί για το όργωμα του εδάφους και για την άντληση νερού. Η αιολική ενέργεια ήταν πάντα ευρέως διαθέσιμη ασχέτως υψομέτρου, κλίματος, μορφολογίας εδάφους και γενικότερα γεωγραφικού πλάτους και μήκους. Ανεμοκίνητες αντλίες αξιοποιήθηκαν για να αποστραγγίζονται τα πόλντερ των Κάτω Χωρών, καθώς και σε άγονες περιοχές όπως στα μεσοδυτικά των Η.Π.Α. ή στην εσωτερική χώρα της Αυστραλίας, ενώ εφαρμογές βρήκε και στην κτηνοτροφία για το πότισμα ζώων [1].

Με την ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας, οι αιολικές μηχανές βρήκαν νέες εφαρμογές, όπως ο φωτισμός κτιρίων μακριά από τα μεγάλα κέντρα παραγωγής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, αναπτύχθηκαν παράλληλα μικρές εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας κατάλληλες για γεωργική εκμετάλλευση ή για οικιακή χρήση, καθώς και εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας που μπορούσαν να συνδεθούν με μεγάλα κεντρικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Σήμερα αιολικές γεννήτριες λειτουργούν σε κάθε εύρος μεγέθους από μικροσκοπικό μέγεθος για την φόρτιση μπαταριών μέχρι μεγέθους γιγαβάτ υπεράκτιων αιολικών πάρκων που παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα στα εθνικά ηλεκτρικά δίκτυα.

#### 3.1.1 Σύντομη ιστορία των ανεμόμυλων

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που αναπτύχθηκαν είχαν ως σκοπό την αυτοματοποίηση των αγροτικών διεργασιών της λείανσης των κόκκων και της άντλησης νερού [1]. Αξιοσημείωτο είναι πως οι πρώτες κατασκευές, οι οποίες έχουν καταγραφεί, αναπτύχθηκαν στην Περσία γύρω στο 500-900 μ.Χ. [2], ήταν καθέτου άξονα με βασική τους λειτουργία την άντληση νερού, όμως η ακριβής αναπαράσταση και τρόπος λειτουργίας δεν είναι γνωστός καθώς δεν υπάρχουν συγκεκριμένα σχέδια ή ζωγραφιές που να έχουν διασωθεί παρά μόνο περιγραφές.

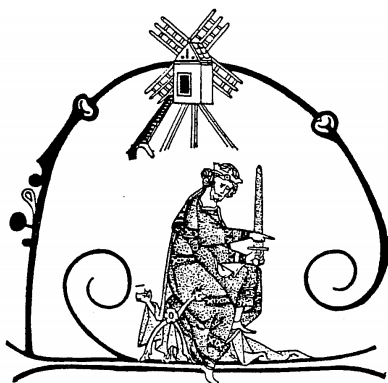
Ο πρώτος τεκμηριωμένος σχεδιασμός θέλει μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα να αποτελείται από πανιά φτιαγμένα από δέσμες καλάμιών ή ξύλων τα όποια ενσωματώνονταν στον κεντρικό κατακόρυφο άξονα μέσω οριζοντίων αντηρίδων [2]. (Στην πρώτη εικόνα είναι μια αναπαράσταση βάσει των περιγραφών, ενώ στη δεύτερη είναι ένας ανεμόμυλος στο χωριό Nashtifan του Ιράν, κατασκευασμένος με τον παραδοσιακό σχεδιασμό, από τους πολλούς που σώζονται στην περιοχή).



**Εικ. 3.1** (α) Αναπαράσταση περσικού τύπου ανεμόμυλου [Πηγή: «*The Traditional Crafts of Persia, Their Development, Technology, and Influence on Eastern and Western Civilization*», H. E. Wulff, 1966] (β) ανεμόμυλος στο χωριό Nashtifan του Ιράν, κατασκευασμένος με τον παραδοσιακό σχεδιασμό [Πηγή: Mehr News Agency, Amir Ghaderi: <http://payvand.com/blog/blog/2010/11/21/photos-centuries-old-windmills-of-nashtifan-in-iran/>]

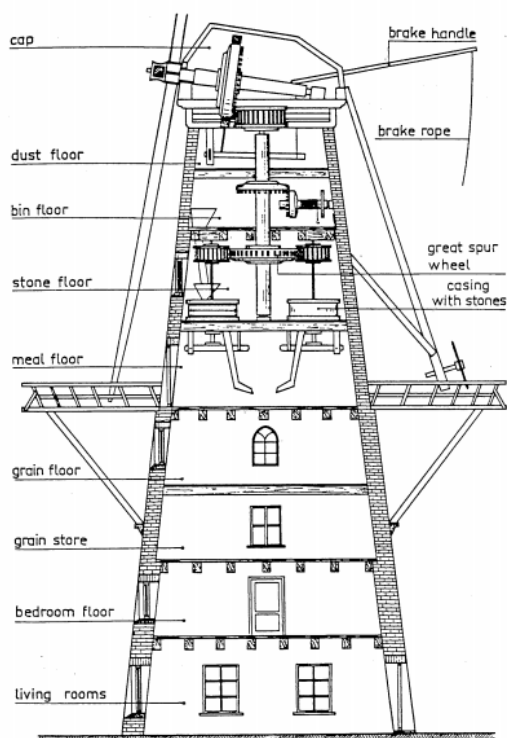
Κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνταν επίσης στην Κίνα, η οποία διεκδικεί τα πρωτεία της κατασκευής και χρήσης τους, καθώς υπάρχουν αναφορές για χρήση έως και 2000 χρόνια πριν, ωστόσο η πρώτη καταγραφή που υπάρχει είναι γύρω στο 1219 μ.Χ.[3]. Και εδώ επίσης αξιοποιούνται σε γεωργικές εργασίες. Επίσης από τις πιο γραφικές και επιτυχημένες εφαρμογές της αιολικής ενέργειας (και μια που εξακολουθεί να υπάρχει μέχρι σήμερα), είναι η εκτεταμένη χρήση των αιολικών μηχανών άντλησης νερού στο νησί της Κρήτης και γενικώς σε πολλές περιοχές της Ελλάδας. Εδώ, κυριολεκτικά εκατοντάδες συστήματα πανιών-ρότορα αξιοποιούνται στην άντληση νερού για τις καλλιέργειες και για χρήση στο ζωικό κεφάλαιο [4].

Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που εμφανίζονται στη Δυτική Ευρώπη γύρω στα 1300 μ.Χ. είναι οριζόντιου άξονα κατασκευές [2]. Ο λόγος για την ξαφνική αλλαγή από τον κατακόρυφο άξονα, την περσική σχεδιαστική προσέγγιση, είναι άγνωστος. Ένας λόγος μπορεί να ήταν η μεγαλύτερη δομική απόδοση του συγκεκριμένου τύπου μηχανών σε σχέση με την καθέτου άξονα, οι οποίες εξάλλου ήταν πολύ ευάλωτες σε ισχυρούς ανέμους. Οι πρώτες εικόνες δείχνουν ένα μοντέλο ανεμόμυλου με τέσσερα πτερύγια σε μορφή λεπίδων τοποθετημένα σε μια κεντρική θέση, κάτι που συνιστούσε τεχνολογική πρόοδο σε σχέση με τον περσικό μύλο, ο οποίος χρησιμοποιούσε ξύλινους οδοντωτούς δακτυλίους και μηχανισμούς, για να μετατρέψει την κίνηση του οριζόντιου άξονα σε κάθετη κίνηση και να κινήσει κάποιο είδος ακονιού. Ένα αρχικό στοιχείο βελτίωσης των ευρωπαϊκών μύλων ήταν η χρήση ιστίων που εκμεταλλεύονται την αεροδυναμική άνοση κάτι που παρέχει βελτιωμένη απόδοση ρότορα, επιτρέποντας αύξηση στην ταχύτητα, η οποία επέφερε μεγαλύτερη ταχύτητα άλεσης και αντλήσεων νερών.



**Εικ 3.2** Η αρχαιότερη γνωστή απεικόνιση οριζοντίου άξονα ανεμόμυλου, σε Αγγλικό χειρόγραφο του 1270 [Πηγή: «A note on Windmills – A History of Technology», R. Wailes, 1956]

Η διαδικασία της βελτίωσης των ιστίων των ανεμόμυλων στον ευρωπαϊκό χώρο διήρκησε περίπου 500 χρόνια. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας ο ανεμόμυλος είχε αποκτήσει όλα τα βασικά χαρακτηριστικά που εντοπίζονται στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες όπως π.χ. στα πτερύγια των ανεμογεννητριών, που περιλαμβάνουν: 1) την καμπυλότητα κατά μήκος της αιχμής, 2) την τοποθέτηση του δοκαριού στο 1/4 της θέσης χορδής (25% της διαδρομής πίσω από την προπορευόμενη ακμή προς την πορευόμενη ακμή), 3) το κέντρο βάρους στην ίδια θέση χορδής 1/4, και 4) της μη γραμμικής συστροφής του πτερυγίου από τη ρίζα μέχρι την άκρη [5]. Ορισμένα μοντέλα περιελάμβαναν ακόμη αεροδυναμικά φρένα, μπόιλερ και ποικίλων μορφών πτερύγια. Αυτές οι μορφές μύλων θα λέγαμε ότι αποτέλεσαν τις ηλεκτρικές ανεμογεννήτριες της προβιομηχανικής επανάστασης, οι οποίες έτυχαν ευρείας εφαρμογής σε πληθώρα εργασιών, από άλεσμα σιτηρών έως την επεξεργασία προϊόντων όπως τα μπαχαρικά, το κακάο, χρώματα και βαφές ή και καπνός [1].



**Εικ. 3.3** (α) Τομή Ολλανδικού ανεμόμυλου [Πηγή: «The Dutch Windmill», F. Stokhuyzen, 1965] (β) Ανεμόμυλος του 1895 στο Sønderho, Fanø, της Δανίας [Πηγή: <http://en.wikipedia.org/wiki/Windmill>]



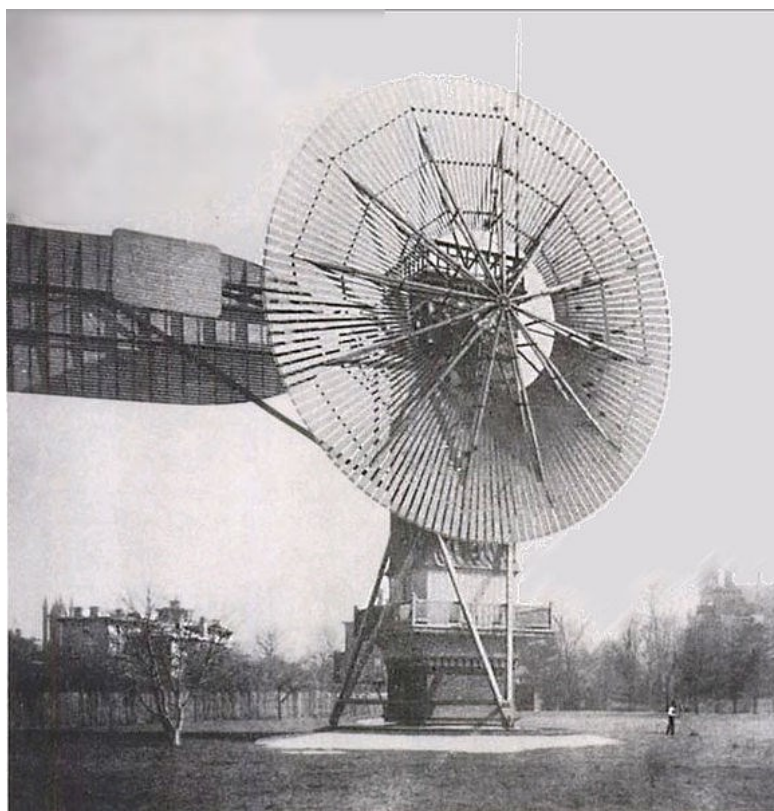
Για εκατοντάδες χρόνια, η σημαντικότερη εφαρμογή των ανεμόμυλων σε επίπεδο διαβίωσης ήταν η μηχανική άντληση νερού με σχετικά μικρά συστήματα ρότορα διαμέτρου από ένα έως μερικά μέτρα. Τα συστήματα αυτά τελειοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τη διάρκεια του 19ου αιώνα, αρχίζοντας με τον ανεμόμυλο Halladay το 1854, και συνεχίζοντας με τον Aermotor και τα σχέδια Dempster, που είναι ακόμα και σήμερα σε χρήση [7]. Οι πρώτοι μύλοι που αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α είχαν πτερύγια σε μορφή που έμοιαζε σε κουπιά τα οποία ήταν στερεωμένα μόνο στον κεντρικό οριζόντιο άξονα ενώ σε άλλες περιπτώσεις έφεραν στην περιφέρεια τους κυκλικό περίβλημα, ωστόσο η σημαντικότερη εξέλιξη που επιτεύχθηκε από τους αμερικανούς ήταν η κατασκευή και χρήση ατσάλινων πτερυγίων, των οποίων το πλεονέκτημα ήταν η μεγάλη μείωση του βάρους της κατασκευής καθώς και η δυνατότητα κατασκευής ποικιλίας σχημάτων. Χαρακτηριστικό της αναβάθμισης της λειτουργίας των μύλων ήταν πως βελτιώθηκε τόσο πολύ η απόδοση που αναγκάστηκαν να εφαρμοστούν για πρώτη φορά μέθοδοι μείωσης της ταχύτητας λειτουργίας προκειμένου να βρίσκεται στα επιθυμητά επίπεδα των χρηστών [7]. Αξιοσημείωτο αποτελεί πως στις Η.Π.Α μεταξύ του 1850 και 1970 υπήρχαν παραπάνω από 6 εκατομμύρια ανεμογεννήτριες, ως επί το πλείστον μικρού μεγέθους, οι οποίες αξιοποιούνταν για την άντληση υδάτων είτε για αγροτική είτε οικιακή χρήση ενώ μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες με διάμετρο ρότορα η οποία μπορεί να έφτανε μέχρι και τα 18 μέτρα χρησιμοποιούνταν για την άντληση υδάτων τα οποία χρησίμευαν ως καύσιμη ύλη για την κίνηση των ατμοκίνητων αμαξοστοιχιών [7]. Αυτού του είδους οι ανεμογεννήτριες μετεξελίχθησαν τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική για την παράγωγη ηλεκτρικής ενέργειας.



**Εικ. 3.4** Ανεμόμυλος με ατσάλινα πτερύγια για άντληση νερού στα μεσοδυτικά των Η.Π.Α  
[Πηγή: <http://wizardofwonders.photoshelter.com>]

### 3.1.2 Πρώιμες ανεμογεννήτριες

Ο πρώτος ανεμόμυλος που χρησιμοποιήθηκε για την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκε στην Σκωτία τον Ιούλιο του 1887 από τον καθηγητή James Blyth [8]. Η δέκα μέτρων ύψους ανεμογεννήτρια του James Blyth με πτερύγια φτιαγμένα από ύφασμα ήταν εγκατεστημένη σε αγροτική κατοικία και χρησίμευε για την φόρτιση ενός είδους συσσωρευτών από τους οποίους αντλούσε μετέπειτα την ενέργεια για φωτισμό κάνοντας έτσι την κατοικία του την πρώτη στον κόσμο που τροφοδοτούνταν ηλεκτρικό ρεύμα από μια ανεμογεννήτρια. Στην αντίπερα όχθη του ατλαντικού η πρώτη κατασκευή ανεμογεννήτριας για την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έγινε στο Κλήβελαντ του Οχάιο από τον Charles F. Brush το 1888, και ήταν ένας τεράστιος μύλος με πολλαπλά πτερύγια και διάμετρο ρότορα 17 μέτρων, με χαρακτηριστικό του την τεραστία αρθρωτή ουρά που προσανατόλιζε τον μύλο στη ροή του ανέμου. Ήταν η πρώτη ανεμογεννήτρια που είχε ενσωματωμένο κιβώτιο ταχυτήτων προκειμένου να ρυθμίζεται η ταχύτητα στην επιθυμητή επιχειρησιακή της λειτουργία [2].



**Εικ. 3.5** Ο ανεμόμυλος του Brush στο Κλήβελαντ του Οχάιο, 1888. Η πρώτη χρήση ανεμόμυλου για παραγωγή ηλεκτρισμού [Πηγή: «Wind Power Fundamentals», A. Kalmikov, K. Dykes, MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action]

Το επόμενο βήμα έγινε το 1891 στη Δανία από τον Dane Poul La Cour ο οποίος ανέπτυξε την πρώτη αιολική μηχανή για παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιώντας ταυτόχρονα όλες τις βασικές αρχές αεροδυναμικού σχεδιασμού (χαμηλή σταθερότητα καθώς και 4 πτερύγια) [9]. Οι υψηλές ταχύτητες που ανέπτυξαν αυτές οι ανεμογεννήτριες ευνοούσαν την παράγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα προς το τέλος του Α Παγκοσμίου Πολέμου να έχουν διαδοθεί ευρύτατα σε όλη την Ευρώπη, κάτι που σταμάτησε με τη διάδοση της χρήσης των φθηνότερων και αποδοτικότερων ορυκτών καυσίμων, ενώ δυσμενώς επέδρασε η διαπίστωση πως η υπάρχουσα μορφή των ανεμογεννητριών δεν προσφερόταν για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα την απαξίωσή της σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους παραγωγής [1].

Στα μέσα της δεκαετίας του 1920 γεννήτριες 1-3 kW παρήχθησαν από εταιρίες όπως οι Parris-Dunn and Jacobs Wind καθιστώντας ευρεία την χρήση του ηλεκτρισμού σε αγροτικές περιοχές των μεσοδυτικών περιοχών, όπου τα συστήματα αυτά αξιοποιήθηκαν αρχικά για το φωτισμό των αγροτικών κτημάτων καθώς και για τη φόρτιση των μπαταριών που απαιτούνταν για την λειτουργία των ραδιοφώνων [1]. Όμως η χρήση της ενέργειας επεκτάθηκε σε μια σειρά από συσκευές που χρησιμοποιούσαν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα με αποτέλεσμα η διακοπτόμενη λειτουργία τους να αποτελεί κυρίαρχο πρόβλημα. Η κατάρρευση αυτών των συστημάτων επήλθε κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1930 και 1940 εξαιτίας δυο παραγόντων: της απαίτησης των αγροτικών πληθυσμών για μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της εμφάνισης της μεγάλης οικονομικής κρίσης του 30 η οποία είχε ως αποτέλεσμα, για την αντιμετώπιση της, δημόσιες επενδύσεις για την εκτεταμένη επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου που έθεσαν στο περιθώριο τη χρήση τέτοιων τεχνολογιών. Συνέπεια των παραπάνω ήταν να καταρρεύσει η αγορά ανεμογεννητριών στις Η.Π.Α και ως εκ τούτου οι κύριες εξελίξεις να λάβουν μέρος στην Ευρώπη [7].

Σημαντικό επίτευγμα αποτελεί η δημιουργία της ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα του G.J.M. Darrieus το 1920 στη Γαλλία. Από τους διάφορους τύπους κατακόρυφου άξονα που σχεδίασε ο Darrieus σημαντικότερος ήταν αυτός που περιελάμβανε λεπτά καμπύλα πτερύγια τύπου αεροτομής τα οποία συνδέονταν στο πάνω και κάτω μέρος ενός κατακόρυφου περιστρεφόμενου άξονα [2].

Η ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας ευρείας κλίμακας πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στη Ρωσία το 1931 με την ανεμογεννήτρια ισχύος 100 kW Balaclava. Η συγκεκριμένη γεννήτρια λειτούργησε για περίπου 2 χρόνια στις ακτές της Κασπίας θάλασσας παράγοντας παραπάνω από 200.000 kWh [1]. Μεταγενέστερες έρευνες σε Η.Π.Α, Δανία, Γερμανία, Γαλλία και Μεγάλη Βρετανία κατέδειξαν πως μεγάλης κλίμακας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μηχανές μπορούσαν να καταστούν λειτουργικές ωστόσο απέτυχαν λόγω της μη κατασκευής κάποιου πρακτικού μοντέλου μεγάλου μεγέθους ηλεκτρικής ανεμογεννήτριας. Η μεγαλύτερη κατασκευή ήταν αυτή των Smith-Putnam στο Βερμόντ ισχύος 1,25 MW. Αποτελούνταν από 2 πτερύγια με διάμετρο ρότορα 54 μέτρων όμως το 1945, μετά από μόνο μερικές εκατοντάδες ώρες διακοπτόμενης λειτουργίας, μια από τις λεπίδες έσπασε κοντά στην πλήμνη, προφανώς ως αποτέλεσμα της κόπωσης μετάλλου κάτι που δεν προκαλεί έκπληξη λαμβάνοντας υπόψη τα τεράστια φορτία που είχαν αναληφθεί [2].



**Εικ. 3.6** Η πρωτοποριακή πειραματική ανεμογεννήτρια των Smith-Putnam – Η πρώτη αιολική εγκατάσταση ισχύος MW [Πηγή: Wind-works by Paul Gipe –Smith-Putnam Industrial Photos: <http://www.wind-works.org>]

### 3.1.3 Μεταγενέστερες εξελίξεις

Στον ευρωπαϊκό χώρο οι εξελίξεις δρομολογήθηκαν μετά το τέλος του Β Παγκοσμίου πολέμου και εξαιτίας της προσωρινής έλλειψης ορυκτών καύσιμων. Όπως στις Ηνωμένες Πολιτείες, η κύρια εφαρμογή για αυτά τα συστήματα ήταν η διασύνδεση με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στη Δανία η ανεμογεννήτρια ισχύος 200 kW του Gedser Mill λειτουργούσε επιτυχώς έως το 1960 έως ότου η μείωση των τιμών των ορυκτών καύσιμων κατέστησε την τεχνολογία των ανεμογεννητριών μη ανταγωνιστική [10]. Στη Γερμανία ο καθηγητής Ulrich Hutter ανέπτυξε μια σειρά από προηγμένα οριζοντίου άξονα σχέδια ανεμογεννητριών μεσαίου μεγέθους, στα όποια αξιοποιούσε την καινοτομία των αεροτομών τύπου fiberglass και πλαστικών πτερυγίων μεταβλητού βήματος για την επίτευξη μικρότερου βάρους και κατ' επέκταση υψηλότερων επιδόσεων [11]. Αυτή η σχεδιαστική προσέγγιση είχε ως σκοπό να μειώσει τις μηχανικές και δομικές αστοχίες αντοχής προσπαθώντας πιο πολύ να μειώσει το αεροδυναμικό φορτίο από το να αντέξει την καταπόνηση. Βασική καινοτομία αυτών των σχεδίων για τη μείωση των φορτίων ήταν η χρήση κατάλληλου μηχανισμού στον κόμβο σύνδεσης του ρότορα επιτρέποντας να παλινδρομείται προκειμένου να αποσβάνει τους προκαλούμενους από τις ριπές αέρα κραδασμούς. Τα πειράματα του Hutter ξεπέρασαν τις 4000 ώρες λειτουργίας πριν τερματιστούν το 1968 [10]. Αυτές οι καινοτομίες τόσο των Δανών όσο και των Γερμανών αποτέλεσαν τη βάση στην όποια στηρίχθηκαν οι μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.

Στην Αμερική η πρώτη απόπειρα μιας πιο σοβαρής και ενδεδειγμένης επιστημονικής προσέγγισης του θέματος συνέβη το 1973, υπό την πίεση της λεγόμενης Αραβικής Πετρελαϊκής Κρίσης. Ωστόσο παρόλο την ταχυστάτη ανάπτυξη τεχνολογιών η προσπάθεια παρέμεινε ημιτελής λόγω πολιτικών παρεμβάσεων προς εξυπηρέτηση μικροπολιτικών και επιχειρηματικών συμφερόντων. Συνέπεια των παραπάνω ήταν οι έρευνες από το ομοσπονδιακό επίπεδο να περάσουν σε τοπικό, όπου και οι κυβερνήσεις διαφόρων πολιτειών ενίσχυσαν και στήριξαν την περαιτέρω ανάπτυξη των συγκεκριμένων τεχνολογιών. Αποτέλεσμα αυτών των προσπαθειών ήταν η δημιουργία 13 διαφορετικών σχεδίων μικρών ανεμογεννητριών ισχύος 1 kW έως 40 kW, 5 μεγάλων 100 kW έως 3.2 MW οριζοντίου άξονα καθώς και πολλά σχέδια ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα ισχύος που κυμαινόταν από 5 έως 500 kW [1]. Άξια αναφοράς είναι η απολυτή επιτυχία του προγράμματος Darrieus που είχε ως αποτέλεσμα την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας Darrieus 34 μέτρων με δυνατότητα εφαρμογής μεταβλητής ταχύτητας [11].



**Εικ. 3.7** Η ύψους 34 μέτρων ανεμογεννήτρια τύπου Darrieus που αναπτύχθηκε από το Sandia National Laboratory στο New Mexico [Πηγή: <http://www.techniklexikon.net/d/darrieus-rotor/>]

Άλλη εφαρμογή στην καθέτου άξονα ανεμογεννήτρια ήταν αυτή των πτερυγίων μορφής αχλαδιού η οποία και ανέδειξε τα κατασκευαστικά προβλήματα ανεμογεννητριών τύπου Darrieus από fiberglass. Το συγκεκριμένο είδος απέτυχε να ανταπεξέλθει σε ισχυρές η ακόμη και μέτριας έντασης άνεμους. Επίσης ανεμογεννήτριες με κάθετα και ίσια πτερύγια π.χ. τύπου 'H' αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του 1970 στις Ηνωμένες Πολιτείες και τη Μεγάλη Βρετανία και τη δεκαετία του 1990 στη Γερμανία [1]. Ωστόσο κανένα τέτοιο είδος δεν πέτυχε εμπορικά εξαιτίας προβλημάτων που εμφανίζονταν στην ανάληψη φορτίων καθώς και δομικών προβλημάτων που προέκυπταν από την αεροδυναμική αντίσταση. Έρευνες στον τομέα των ανεμογεννητριών διεξήχθησαν και από τη NASA η οποία μετά από μια σειρά πειραματικών κατασκευών κατέληξε στην κατασκευή τεσσάρων ανεμογεννητριών διαμέτρου ρότορα 100 μέτρων οι οποίες αξιοποιήθηκαν για την συλλογή πειραματικών δεδομένων μηχανικής φύσεως [10]. Μεταξύ των ετών 1974 και 1981 υπήρξε αξιοσημείωτη πρόοδος, όμως μόνο σε ερευνητικό επίπεδο, όπου και είχαμε σχεδία 13 συστημάτων μικρών ανεμογεννητριών, αρκετών καθέτου άξονα πολλαπλών καινοτομιών, καθώς και 4 μεγάλων συστημάτων που θα μπορούσε να δώσει στις ΗΠΑ ένα τεράστιο τεχνολογικό προβάδισμα [1]. Στα επόμενα επτά χρόνια μεταξύ του 1981 και του 1988 παρά τις εκατοντάδες των εκατομμυρίων φορολογικές πιστώσεις - μόνο τέσσερα νέα σχέδια ανεμογεννήτρια αναπτύχθηκαν στις ΗΠΑ. Όλα εκτός από ένα (το Bergey 10kW, το οποίο δεν επωφελήθηκε από τις πιστώσεις) βασίστηκαν σε 'επαναφορά' της τεχνολογίας που αναπτύχθηκε από τις εταιρείες που υποστηρίζονταν από την προηγούμενη ομοσπονδιακή αναπτυξιακή προσπάθεια [1], [12].

Στην Ευρώπη αναπτυξιακά προγράμματα πολλαπλών μεγαβάτ άργησαν να ξεκινήσουν αλλά ακόμη και όταν έγινε αυτό είχαν μικρή εμπορική επιτυχία. Αποτέλεσμα μιας τέτοιας προσπάθειας ήταν η ανεμογεννήτρια GROWIAN που αναπτύχθηκε στην Γερμανία [1], [12].



**Εικ. 3.8** Ανεμογεννήτρια GROWIAN [Πηγή: «The illustrated history of wind power development», U.S. Federal Wind Energy Program: <http://www.telosnet.com/wind/>, 2006 »]

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, οι περισσότερες από τις πειραματικές μηχανές πολλών μεγαβάτ που αναπτύχθηκαν στη Γερμανία, τη Σουηδία και άλλες χώρες δεν ήταν πλέον λειτουργικές ενώ όλες οι προσπάθειες στο ευρωπαϊκό δίκτυο των ερευνητικών εργαστηρίων αιολικής ενεργείας είχε μετατοπιστεί στο θεωρητικό πεδίο της βασικής και εφαρμοσμένης έρευνας και της ανάπτυξης καινοτομιών. Όπως και στις Η.Π.Α έτσι και στην Ευρώπη υπήρχε η διαμάχη της κρατικής ανάμιξης ή μη στον τομέα της αιολικής ενεργείας καθότι και εδώ υπάρχουν υποστηρικτές της άποψης πως ιδιωτικές πρωτοβουλίες είναι αυτές που θα δώσουν την ώθηση στην περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη παραβλέποντας το γεγονός πως σε καμία χώρα δεν επιτεύχθηκε επιτυχημένο έργο χωρίς κάποιου είδους κρατικής παρέμβασης με τη μορφή οικονομικής, τεχνικής ή κανονιστικής υποστήριξης, όπως εξάλλου είχε συμβεί και εξακολουθεί να συμβαίνει στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενεργείας [1].

### 3.1.4 Πρόσφατες εξελίξεις

Κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου από το 1973 έως το 1986 παρατηρείται αλλαγή στην αγορά των ανεμογεννητριών. Οι μικρής κλίμακας παραγωγής ενεργείας αιολικές μηχανές των 1-25 kW που χρησιμοποιούνταν για αγροτικές ή οικιακές χρήσεις μετεξελίχθησαν σε διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα μεσαίας κλίμακας παραγωγής ενεργείας με αιολικές μηχανές ισχύος των 50-600 kW. Αιολικά πάρκα στην Καλιφόρνια αποτελούσαν την πλειοψηφία των εγκαταστάσεων ανεμογεννητριών όπου πάνω από 17.000 αιολικές μηχανές ισχύος 20-350 kW ήταν εγκατεστημένες μεταξύ του 1981-1990 παράγοντας συνολικά 3.000.000 MWh ικανή ποσότητα να τροφοδοτήσει μια πόλη 300.000 κατοίκων[1].

Γενικότερα τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο παρατηρείται μια έξαρση της επιχειρηματικής δραστηριότητας που σχετίζεται με την αιολική ενεργεία στην περιοχή της Καλιφόρνιας τόσο λόγω οικονομικών κινήτρων απ την πλευρά του κράτους όσο και λόγω της στροφής οικονομικών παραγόντων στην αιολική αγορά κάτι που ωστόσο αποτέλεσε τροχοπέδη στην τεχνολογική ανάπτυξη εξαιτίας της ανυπομονησίας για άμεση απόδοση των επενδύσεων.

Παρατηρώντας την ταχύτητα με την οποία παράγονταν σχέδια καινούργιων ανεμογεννητριών καταδεικνύεται η προχειρότητα που τα χαρακτήριζε καθώς και το πόσο είχε κορεστεί η αγορά από αμφιβόλου αξιοπιστίας μηχανές καθιστώντας έτσι την δανέζικη βιομηχανία κυρίαρχη στην αμερικανική αγορά, που βασίστηκε σε μια εκσυγχρονισμένη έκδοση του ανεμόμυλου του Gedser που αποτελούνταν από τρία πτερύγια κατασκευασμένα από fiberglass. Μια σειρά αποτυχημένων προσπαθειών ανάκτησης των πρωτίων στην αγορά των ανεμογεννητριών ακολουθήθηκε από την επιτυχημένη ιστορία της U.S. Windpower η οποία κατασκεύασε και λειτούργησε πάνω από 4.000 ανεμογεννήτριες ισχύος 100 kW στη βόρεια Καλιφόρνια [1].

Στην Ευρώπη και στην Ασία εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών αυξάνονταν σταδιακά από το 1980 έως και σήμερα. Το υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με την αστεϊρευτη πηγή του ανέμου δημιούργησε στη βόρεια Ευρώπη κυρίως, μια μικρή αλλά αξιόπιστη αγορά με αποτέλεσμα από το 1990 και μετά το μεγαλύτερο μέρος της δραστηριότητας της αγοράς να μετατοπίζεται στις συγκεκριμένες περιοχές. Εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών ισχύος από 50 kW έως 500 kW ή ακόμη και 1,5 MW γίνονται πραγματικότητα από συναιτερισμούς ή ιδιώτες σε Δανία, Γερμανία και Ολλανδία. Η αξιοποίηση του ευρωπαϊκού αιολικού δυναμικού με εγκαταστάσεις συνολικά πάνω από 10.000 MW [1] είναι κάτι που έχει ωφελήσει όχι μόνο ενεργειακά την Ευρώπη αλλά και αναπτυξιακά μέσω των εκατοντάδων βιομηχανιών που δραστηριοποιούνται στον τομέα της αιολικής ενεργείας, σε αντίθεση με τις Η.Π.Α που η εισαγωγή φθηνού φυσικού αερίου από τον Καναδά έχει επιβραδύνει τις εξελίξεις στο συγκεκριμένο τομέα.

Άξιο αναφοράς αποτελεί η δημιουργία καινούργιων κατασκευών στα τέλη της δεκαετίας του 90 στα νοτιοδυτικά του Τέξας όπως αυτές τύπου Zond Z-40, οι 46 μηχανές τύπου Vestas πάλι στο Τέξας ή οι εγκαταστάσεις 10 MW του Κολοράντο [1].



**Εικ. 3.9** Αιολικό πάρκο ανεμογεννητριών τύπου ZOND Z-40 συνολικής ισχύος 600 kW στο Τέξας των Η.Π.Α. [Πηγή: «The illustrated history of wind power development», U.S. Federal Wind Energy Program: <http://www.telosnet.com/wind/>, 2006 »]

Είναι μια εποχή που η βιομηχανία είναι σε κίνηση και πάλι, με πάνω από 2000 μεγαβάτ παραγωγικής ικανότητας για το 2001. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως το κόστος της ενέργειας από μεγαλύτερες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις παραγωγής που χρησιμοποιείται στα διασυνδεδεμένα αιολικά πάρκα μειώθηκε από περισσότερο από \$ 1,00 ανά κιλοβατώρα (kWh) το 1978, σε κάτω από \$ 0,05 ανά kWh το 1998, και κατακύλησε στο \$ 0,025 ανά kWh όταν οι νέες μεγάλες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας ήρθαν στη γραμμή το 2001 και το 2002 [1].

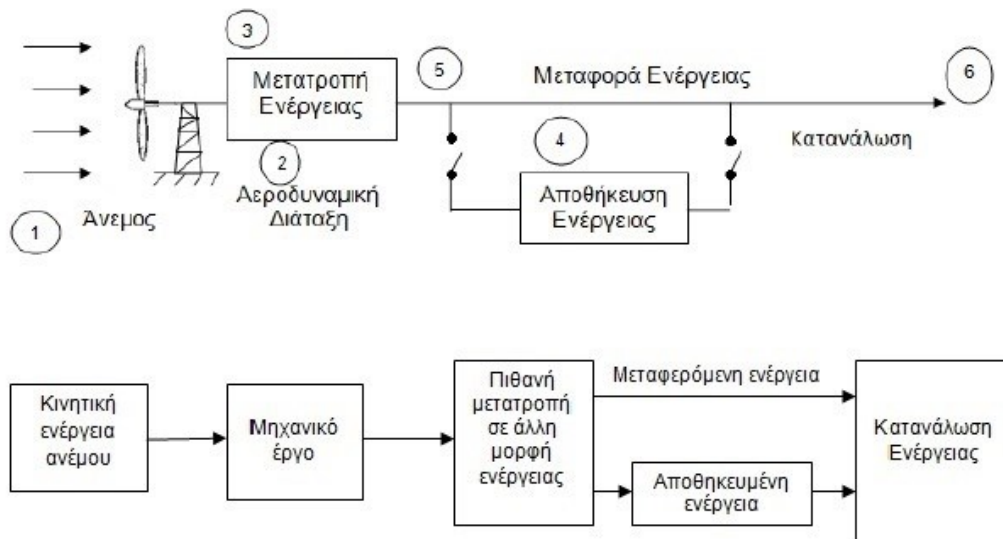
Πλέον παγκοσμίως υπάρχουν 10 με 12 κατασκευαστές εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας 200 kW - 3,0 MW αποτελούμενων από συστήματα διαφόρων διαμορφώσεων. Οι πιο προηγμένες ρυθμίσεις τουλάχιστον από αεροδυναμικής άποψης αναπτύχθηκαν στις Η.Π.Α. υπό την αιγίδα του υπουργείου ενέργειας. Ευρωπαϊκές κατασκευαστικές εταιρίες όπως οι Tacke, Micon, Vestas, Siemens και η Enercon εστίασαν σε ανεμογεννήτριες με ροτορα συμβατικού σχεδιασμού αλλά με σημαντικές καινοτομίες όπως χαμηλής ταχύτητας ανεμογεννήτριες ή συστήματα μεταβλητής ταχύτητας που ενσωματώνουν προχωρημένες ηλεκτρονικές εφαρμογές. Αποτέλεσμα των συγχωνεύσεων που παρατηρήθηκαν το 2001 ήταν ένα είδος διεθνοποίησης της βιομηχανίας των αιολικών μηχανών καθώς και την ερευνητικής κοινότητας. Το τεχνολογικό επίπεδο μεταξύ Ευρώπης και Η.Π.Α είναι στο ίδιο επίπεδο, με μοναδικό πλέον σημείο τριβής την ανεμογεννήτρια δύο ή τριών πτερυγίων[1].

### 3.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ - ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Αιολική μηχανή λέγεται κάθε σύστημα που μπορεί να εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια για να παράγει έργο. Ως ανεμογεννήτρια ονομάζεται η αιολική μηχανή που αποτελεί ανθρώπινη επινόηση και η οποία μπορεί να θεωρηθεί εξελιγμένη μορφή του παλιού ανεμόμυλου και έχει σαν σκοπό την αξιοποίηση του μεγαλύτερου δυνατού ποσοστού της κινητικής ενέργειας του ανέμου και τη μετατροπή της σε μηχανική ενέργεια με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [13]. Ως, ηλεκτρικές γεννήτριες οι ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι συνδεδεμένες σε ηλεκτρικό δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει φόρτιση συστοιχιών συσσωρευτών, συστήματα δικτύων κατοικημένων περιοχών, δίκτυα σε απομονωμένες περιοχές ή νησιά, και μεγάλα δίκτυα κοινής ωφέλειας ή μπορεί να αξιοποιούνται από ένα αυτόνομο δίκτυο μιας μεμονωμένης κατοικίας για παράδειγμα.

Οι ανεμογεννήτριες, όπως αναφέραμε, από την εποχή της εμφάνισής τους μέχρι σήμερα έχουν περάσει από πολλά στάδια εξέλιξης, τόσο ως προς τον τύπο τους (οριζοντίου ή κατακόρυφου άξονα), όσο και ως προς τα υποσυστήματά τους. Εξελίξεις έχουν επίσης σημειωθεί και στον τρόπο δέσμωσης, αξιοποίησης, αποθήκευσης ή μεταφοράς της ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται από τις ανεμογεννήτριες σε άλλη «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας [14].

Μια εικόνα των βασικών μερών που αποτελούν μια διάταξη εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, καθώς και της ροής της ενέργειας δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



**Εικ. 3.10** Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενεργείας  
[Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]

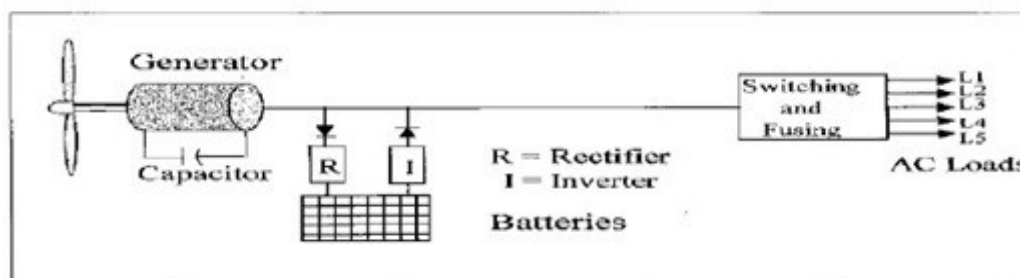
Η διάταξη αυτή είναι μια γενική περίπτωση όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης. Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο επί τόπου (π.χ. άντληση νερού) και να αποφευχθούν οι απώλειες από τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας. Στη γενικότερη όμως περίπτωση απαιτείται η μετατροπή του μηχανικού έργου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας, είτε γιατί δεν χρειαζόμαστε μόνο μηχανικό έργο είτε γιατί ο τόπος άντλησης δεν συμπίπτει με τον τόπο που είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. Σε αυτήν την περίπτωση, η πιο πρόσφορη διάταξη είναι αυτή που μπορεί να μετατρέπει το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς της στον τόπο κατανάλωσης και της ικανότητας αποθήκευσής της στις διάφορες αποθηκευτικές διατάξεις (π.χ. μπαταρίες, συστήματα αντλησιοταμίευσης). Βέβαια, τα τελευταία χρόνια οι έρευνες στρέφονται προς τη χρησιμοποίηση του μηχανικού έργου για την παραγωγή επί τόπου υδρογόνου, το οποίο μπορεί να μεταφερθεί και να καεί ως αέριο καύσιμο. Η παραπάνω λύση αποτελεί ίσως και τη βέλτιστη από πολλές απόψεις πρόταση αξιοποίησης των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, δεδομένου ότι είναι οικονομικά αποδεκτή, διότι από την καύση του υδρογόνου παράγεται μόνο νερό σε μορφή υδρατμών [14].

Η ακολουθία των συμβάντων για την παραγωγή μέχρι την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, χονδρικά, για ένα τυπικό αυτόνομο σύστημα (Εικ. 3.11) μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με το δρομέα της Α/Γ παράγεται μια ροπή.
- Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει μια γεννήτρια.



- Η γεννήτρια παράγει ρεύμα μεταβλητής συχνότητας, το οποίο μετατρέπεται σε συνεχές (DC) μέσω ενός μετατροπέα (rectifier) και φορτίζει τις μπαταρίες, που αποτελούν το πιο κλασικό μέσο αποθήκευσης. Οι μπαταρίες συμβάλλουν στη σταθερότητα του συστήματος.
- Στη συνέχεια, ένας άλλος μετατροπέας (inverter) μετατρέπει το ανορθωμένο συνεχές ρεύμα, αποφορτίζοντας τις μπαταρίες, σε ορισμένης τάσης και συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο είναι άμεσα αξιοποιήσιμο από το τοπικό σύστημα.



*Εικ. 3.11* Αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ [Πηγή: «Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση, Ι. Σπύρου, 2009»]

### 3.3 ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ

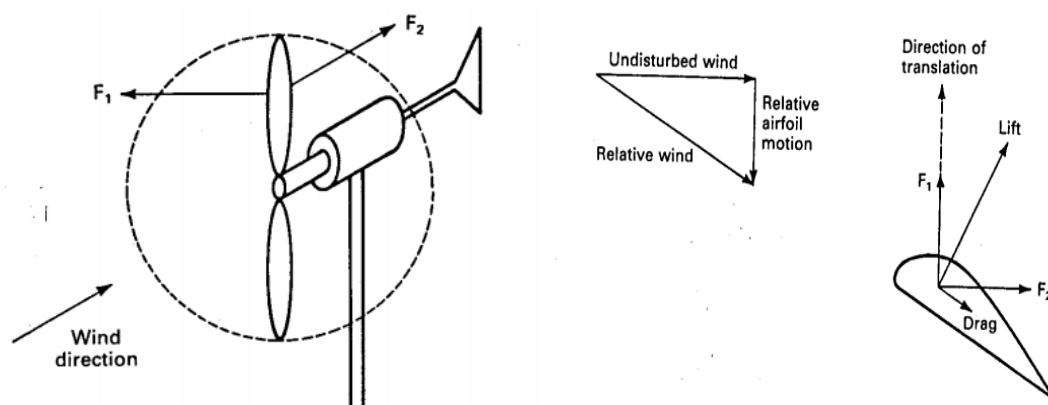
Όταν ο αέρας κινείται με τη μορφή ανέμου, τα σωματίδια που τον απαρτίζουν κινούνται γρήγορα. Κίνηση σημαίνει κινητική ενέργεια η οποία μπορεί να συλληφθεί από τα πτερύγια της Α/Γ που έχουν σχεδιαστεί με κατάλληλο τρόπο. Οι ανεμογεννήτριες κάνουν χρήση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στις αεροτομές των πτερυγίων για να πετύχουν την πολυπόθητη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από τον άνεμο. Οι δυνάμεις αυτές είναι η οπισθέλκουσα (drag) και η άντωση (lift).

Η ύπαρξη της άντωσης εξαρτάται από την ομοιόμορφη ροή γύρω από την αεροτομή, πράγμα που σημαίνει ότι ο αέρας ρέει ομαλά και από τις δύο πλευρές της. Εάν η ροή είναι τυρβώδης, τότε θα δημιουργηθεί μικρή ή και μηδενική άντωση. Ο αέρας που ρέει πάνω από την κορυφή της αεροτομής επιταχύνεται, γιατί πρέπει να διανύσει μεγαλύτερη απόσταση και αυτή η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί κάποια μικρή μείωση της πίεσης. Αυτή η διαφορά πίεσης μεταξύ των δύο πλευρών της αεροτομής προκαλεί την άντωση, δύναμη κάθετη στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου. Η κίνηση του ανέμου προκαλεί επίσης την οπισθέλκουσα δύναμη κατά την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτός είναι ένας όρος απωλειών και ελαχιστοποιείται όσο είναι δυνατόν, σε υψηλής απόδοσης Α/Γ. Και οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ανάλογες της πυκνότητας του αέρα, της επιφάνειας της αεροτομής και του τετραγώνου της ταχύτητας του ανέμου [15]. Η άντωση είναι μικρή για μηδενική γωνία πρόσπτωσης και αυξάνεται για μικρές γωνίες πρόσπτωσης οι οποίες καθορίζονται από τις αεροτομές [14].

Ας υποθέσουμε τώρα ότι επιτρέπουμε στην αεροτομή να κινηθεί κατά την κατεύθυνση της άντωσης. Αυτή η κίνηση (μετατόπιση) θα συνδυαστεί με την κίνηση του αέρα, ώστε να παραχθεί η σχετική κατεύθυνση του ανέμου (Εικ. 3.12 β). Η αεροτομή έχει επαναπροσανατολιστεί, ώστε να διατηρήσει έναν καλό λόγο άντωσης προς την οπισθέλκουσα δύναμη. Η άντωση είναι κάθετη στην σχετική κατεύθυνση του ανέμου, αλλά δεν είναι κάθετη στην κατεύθυνση της μετατόπισης. Οι δύο δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε δύο συνιστώσες, μία παράλληλη και μία κάθετη στην διεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου και αυτές οι συνιστώσες συνδυάζονται για να διαμορφώσουν την δύναμη  $F_1$  στην

κατεύθυνση της μετατόπισης και την  $F_2$  στην κατεύθυνση του αδιατάρακτου ανέμου. Η δύναμη  $F_1$  είναι διαθέσιμη για να παράγει το χρήσιμο έργο. Η δύναμη  $F_2$  πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό της στήριξης της αεροτομής, ώστε να υπάρχει δομική στιβαρότητα. Ένας πρακτικός τρόπος για να χρησιμοποιηθεί η  $F_1$ , είναι η σύνδεση των αεροτομών ή πτερυγίων σε μία κεντρική πλήμνη και να επιτρέψουμε σε αυτά να περιστραφούν γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Η δύναμη  $F_1$  προκαλεί την ροπή, η οποία οδηγεί κάποιο φορτίο συνδεδεμένο με την προπέλα. Ο πύργος πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός να αντέξει την δύναμη  $F_2$  [10], [15].

Αυτές οι δυνάμεις και η όλη απόδοση εξαρτώνται από την κατασκευή και τον προσανατολισμό των πτερυγίων. Μία σημαντική παράμετρος είναι η γωνία βήματος (κλίσης) του πτερυγίου  $\beta$  (pitch angle), η οποία είναι η γωνία μεταξύ της χορδής του πτερυγίου και του επιπέδου περιστροφής. Η χορδή είναι μία ευθεία που συνδέει το χείλος προσβολής (leading edge) με το χείλος διαφυγής (trailing edge) μίας αεροτομής. Το επίπεδο περιστροφής είναι το επίπεδο το οποίο σχηματίζουν τα ακροπτερύγια καθώς περιστρέφονται [10], [15].



**Εικ. 3.12** (α) Δυνάμεις που ασκούνται σε ένα πτερύγιο ανεμογεννήτριας (β) οι δυνάμεις της αντίστασης και της άνωσης [Πηγή: «Wind Energy Systems», G. Johnson, 2006]

Όταν ο άνεμος αρχίσει να περιστρέφει τα πτερύγια τότε η περιστροφική κίνηση μεταφέρεται σε έναν άξονα ο οποίος οδηγείται από το κέντρο του στροφείου σε μια γεννήτρια. Η γεννήτρια μετατρέπει την εναλλασσόμενη ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Ουσιαστικά η παράγωγή ενέργειας από τον άνεμο δεν είναι τίποτα άλλο από μεταφορά ενέργειας από το ένα μέσο στο άλλο. Η παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια μπορεί είτε να αποθηκευτεί σε συσσωρευτές, είτε να χρησιμοποιηθεί άμεσα. Υπάρχουν τρεις βασικοί φυσικοί νόμοι που καθορίζουν σε γενικές γραμμές το ποσό της διαθέσιμης ενέργειας από τον άνεμο και κατ'επέκταση της παραχθείσας από την ανεμογεννήτριας ηλεκτρική ενέργεια [10], [16].

- Ο πρώτος νόμος δηλώνει ότι η δύναμη που παράγεται από τη γεννήτρια είναι ανάλογη προς τον κύβο της δύναμης της ταχύτητας του ανέμου. Παραδείγματος χάριν, εάν διπλασιαστεί η ταχύτητα του ανέμου, η διαθέσιμη ισχύς οκταπλασιάζεται, ενώ εάν η ταχύτητα του ανέμου τριπλασιαστεί, είκοσι επτά φορές περισσότερη ισχύς είναι διαθέσιμη. Αντίθετα υπάρχει πολύ λίγη ενέργεια στον άνεμο όταν αυτός έχει χαμηλή ταχύτητα. Αυτός ο νόμος σημαίνει ότι το ακριβές και λεπτομερές τοπικό στοιχείο ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητο για να καθορίσει την πιθανή ενεργειακή παραγωγή από μια δεδομένη περιοχή και οι γεννήτριες πρέπει να σχεδιαστούν για εκείνη την συγκεκριμένη περιοχή. Ο μέσος όρος ταχύτητας ανέμου έχει συχνά μόνο περιορισμένη αξία.
- Ο δεύτερος νόμος δηλώνει ότι η διαθέσιμη δύναμη είναι ανάλογη προς το εμβαδόν σάρωσης των πτερυγίων. Αυτή η δύναμη είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του μήκους

των πτερυγίων. Παραδείγματος χάριν ο διπλασιασμός του μήκους των πτερυγίων θα αυξήσει την ισχύ τέσσερις φορές.

- Ο τρίτος νόμος δηλώνει ότι στις ανεμογεννήτριες υπάρχει μια μέγιστη αποδοτικότητα της τάξης του 59% (Betz limit) [51]. Στην πράξη, οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είναι πολύ λιγότερο αποδοτικές από αυτό και οι διαφορετικοί τύποι σχεδιάζονται για να έχουν τη μέγιστη αποδοτικότητα με τις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Οι καλύτερες ανεμογεννήτριες έχουν αποδοτικότητα μεταξύ του 35%-40% [37]. Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για να λειτουργήσουν μεταξύ ορισμένων ταχυτήτων ανέμου. Η χαμηλότερη ταχύτητα, αποκαλούμενη ‘ταχύτητα περικοπής’ είναι γενικά 4-5 m/sec, δεδομένου ότι υπάρχει λίγη ενεργεία στον άνεμο κάτω από αυτήν την ταχύτητα για να υπερνικήσει τις απώλειες, από τα μηχανικά κυρίως μέρη, του συστήματος. Η ‘ταχύτητα αποκοπής’ καθορίζεται από τη δυνατότητα της γεννήτριας να αντισταθεί σε υψηλούς ανέμους. Η ‘εκτιμώμενη ταχύτητα’ είναι η ταχύτητα ανέμου με την οποία η ανεμογεννήτρια επιτυγχάνει τη μέγιστη παραγωγή της. Επάνω από αυτήν την ταχύτητα μπορεί να έχει τους μηχανισμούς που διατηρούν την παράγωγη σε μια σταθερή αξία καθώς αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου.

### 3.4 ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την ονομαστική ισχύ τους σε πολύ μικρού μεγέθους, μεσαίου, μεγάλου και πολύ μεγάλου (ultra-large) μεγέθους. Μονολότι δεν υπάρχει κάποιος ακριβής ορισμός για τις ανεμογεννήτριες πολύ μικρού μεγέθους είναι αποδεκτό πως μια γεννήτρια με ονομαστική ισχύ μερικά kW ανήκει σε αυτήν την κατηγορία.

Οι ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους αναφέρονται σε γεννήτριες με ισχύ εξόδου μικρότερη από 100 kW. Οι γεννήτριες αυτού του είδους ήδη αξιοποιούνται εκτεταμένα σε κατοικίες, φάρμες (επίσης για γεωργικές εργασίες) ή και μεμονωμένες απομακρυσμένες εφαρμογές όπως σε σταθμούς αντλήσεως ύδατος, τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις και γενικώς σε αγροτικές περιοχές. Η αύξηση της παραγωγής και παροχής ενεργείας από τέτοιου είδους γεννήτριες υποκαθιστά την ανάγκη αύξησης της δυναμικότητας των γραμμών μεταφοράς [17].

Το βασικό πλεονέκτημα αυτών των ανεμογεννητριών είναι πως απαιτούν σχετικά μικρής έντασης ανέμους για την ενεργοποίηση της ταχύτητα έναρξης λειτουργίας και κατ'επέκταση την παράγωγη ισχύος, γεγονός που ευνοεί την ευρεία εγκατάσταση τους σε κάθε είδους περιοχή για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας [17].

Ισχύς ανεμογεννήτριας	500-5000 kW
Διάμετρος δρομέα	40-120 m
Αριθμός πτερυγίων	3
Ύψος ανεμογεννήτριας	50-120 m
Εύρος ταχυτήτων ανέμου	3-30 m/s
Ονομαστική ταχύτητα ανέμου	12-16 m/s
Ονομαστική ταχύτητα δρομέα	12-40 rpm
Εύρος ταχυτήτων δρομέα	8-40 rpm
Κόστος ανεμογεννήτριας	1000 €/kW

**Εικ. 3.13** Τυπικά μεγέθη σύγχρονων εμπορικών ανεμογεννητριών

[Πηγή: «Μοντελοποίηση ηλεκτρονικών μετατροπών ευρέως χρησιμοποιούμενων σε ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών», Αικ. Γκίκα, 2008]

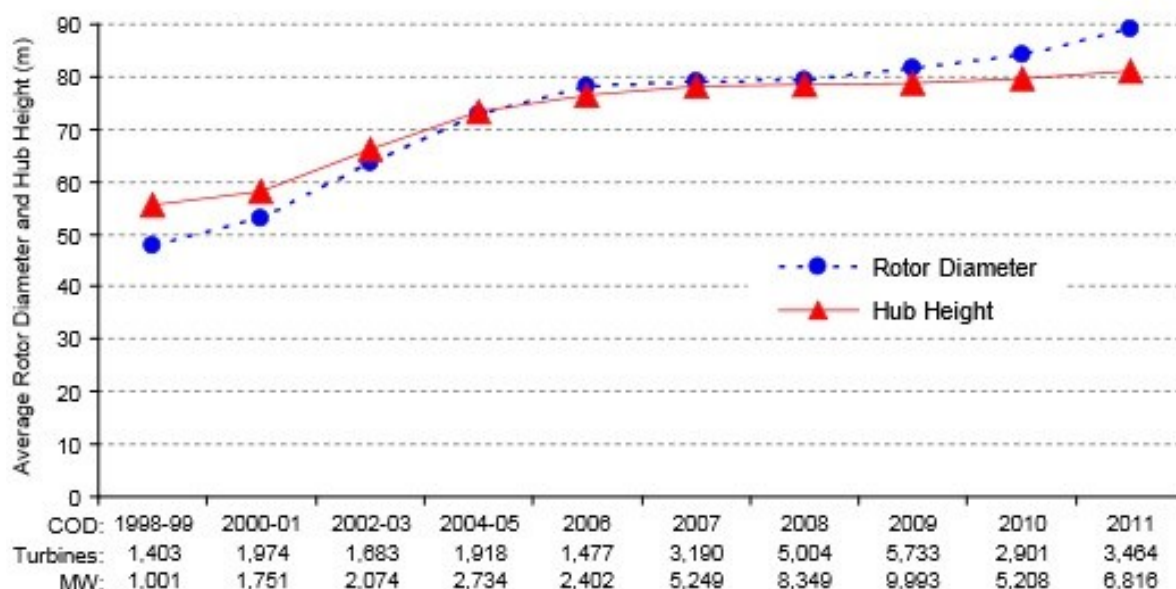
Οι πιο συνηθισμένες και διαδεδομένες ανεμογεννήτριες σήμερα είναι αυτές της κατηγορίας μεσαίου μεγέθους των οποίων η ισχύς κυμαίνεται μεταξύ των 100 kW και 1 MW. Αυτές αξιοποιούνται είτε είναι διασυνδεδεμένες με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο είτε σε αυτόνομα συστήματα για την ηλεκτροδότηση μικρών οικισμών, σε υβριδικά συστήματα, σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κ.α [17].

Ως μεγάλου μεγέθους ανεμογεννήτριες κατατάσσονται οι γεννήτριες με ισχύ εξόδου έως και 10 MW. Είναι οι ανεμογεννήτριες που έχουν κυριαρχήσει, τα τελευταία χρόνια, στη διεθνή αγορά αιολικής ενέργειας όπου και αξιοποιούνται στα περισσότερα αιολικά πάρκα καθώς και σε υπεράκτιες εφαρμογές [17].

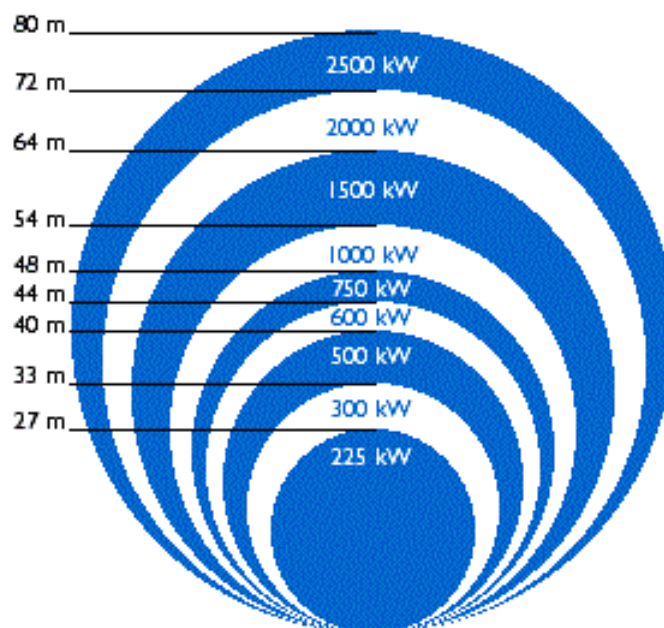
Τέλος οι πολύ μεγάλου μεγέθους (ultra-large) ανεμογεννήτριες αναφέρονται σε ισχύ άνω των 10 MW. Τέτοιου είδους ανεμογεννήτριες βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό επίπεδο [17].

Το μέγεθος των ανεμογεννητριών εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Η ισχύς εξόδου εξαρτάται από την επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Η ενέργεια που παράγει μια ανεμογεννήτρια καθορίζεται από δυο βασικούς παράγοντες: τη διάμετρο του ρότορα και την ταχύτητα του ανέμου. Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται τα συνήθη μεγέθη ανεμογεννητριών και η χρονολογική εξέλιξή τους. Όπως φαίνεται μια ανεμογεννήτρια των 500 kW έχει διάμετρο ρότορα 40 m εάν όμως διπλασιαστεί η διάμετρος τότε πενταπλασιάζεται η επιφάνεια που καλύπτει και συνεπώς η παραγόμενη ισχύς.

Επειδή η κατασκευαστές προσαρμόζουν τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με τις αιολικές συνθήκες που επικρατούν σε κάθε περιοχή, στην πράξη οι τιμές που υποδεικνύονται στα παρακάτω σχήματα μπορεί να διαφέρουν λίγο. Για παράδειγμα μια μεγάλη ανεμογεννήτρια χρειάζεται και το ανάλογο υψηλό αιολικό δυναμικό για τη σωστή λειτουργία της. Άρα, εάν σε μια περιοχή της οποίας το αιολικό δυναμικό είναι χαμηλό εγκαταστήσουμε μια μικρή ανεμογεννήτρια, τότε η μέγιστη ετήσια απόδοση θα είναι η μέγιστη σε αντίθεση με μια μεγάλη ανεμογεννήτρια για την ίδια περιοχή, καθώς η μικρή ανεμογεννήτρια θα αποδίδει καλύτερα καθώς οι ώρες λειτουργίας θα είναι περισσότερες σε αντίθεση με τη μεγάλη.



**Εικ. 3.14** Μέσος όρος διαμέτρου ρότορα και ύψους ανεμογεννήτριας [Πηγή: «2011 Wind Technologies Market Report», Ryan Wiser and Mark Bolinger, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2012]



*Εικ. 3.15 Ισχύς ανεμογεννητριών για διάφορες διαμέτρους δρομέων  
[Πηγή: Danish Wind Industry Association – How does it work – The size of turbines]*

### 3.5 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

#### 3.5.1 Βασικά υποσυστήματα

Αν και η αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (Α/Γ) είναι απλή, εντούτοις παραμένει ένα αρκετά σύνθετο σύστημα το οποίο συνδυάζει πολλούς τομείς του μηχανικού. Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των πτερυγίων απαιτεί σύνθετες γνώσεις αεροδυναμικής. Η δομή του άξονα οδήγησης καθώς και του πύργου της Α/Γ απαιτεί γνώσεις μηχανολογικές και δομικές ενώ το τμήμα των ελεγκτών και το σύστημα προστασίας γνώσεις ηλεκτρολογικές και συστημάτων αυτομάτου ελέγχου.

Οι επικρατέστεροι τύποι ανεμογεννητριών ταξινομούνται κυρίως σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου. Έτσι, οι πλέον διαδεδομένοι τύποι είναι οι Α/Γ οριζοντίου άξονα και οι Α/Γ κατακόρυφου άξονα. Παρ' όλα αυτά στα περισσότερα αιολικά πάρκα ο τύπος που χρησιμοποιείται είναι ο οριζοντίου άξονα και αυτό, γιατί παρουσιάζει καλύτερο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης σε σχέση με την μηχανή κατακόρυφου άξονα. Υπάρχει επιπλέον διαχωρισμός των ανεμογεννητριών ανά κατηγορία. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα διαχωρίζονται με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τη φορά των πτερυγίων σε σχέση με τη φορά του ανέμου κ.τ.λ.. Έτσι όσον αφορά στην πρώτη κατηγορία διακρίνονται στους μονόπτερους, δίπτερους, τρίπτερους, πολύπτερους. Όσον αφορά στον προσανατολισμό των πτερυγίων σε σχέση με τον άνεμο διακρίνονται κυρίως στους ανάντη και κατάντη [18].

Οι Α/Γ μπορούν να διακριθούν και ανάλογα με τη λειτουργία τους όσον αφορά στη ρύθμιση των στροφών. Επομένως, οι Α/Γ μπορούν να είναι [18]:

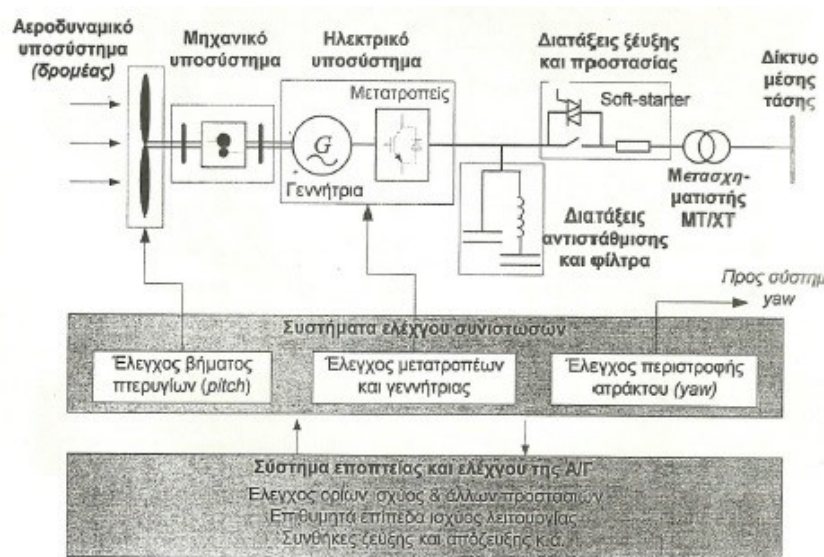
- σταθερών στροφών (fixed speed), λειτουργώντας σε ένα στενό εύρος ταχύτητας περιστροφής λίγο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα,
- μεταβλητών στροφών (variable speed), λειτουργώντας σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων πάνω και κάτω από τη σύγχρονη ταχύτητα. Στις Α/Γ μεταβλητών στροφών, η ταχύτητα

περιστροφής προσαρμόζεται με βάση την τιμή του ανέμου με στόχο την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης.

Τα τρία βασικά υποσυστήματα μιας ανεμογεννήτριας είναι το μηχανικό, το ηλεκτρικό και το σύστημα ελέγχου [18].

- Το μηχανικό σύστημα περιλαμβάνει κυρίως τον ανεμοκινητήρα, αποτελεί δηλαδή το σύστημα μετατροπής της ενέργειας του ανέμου σε μηχανική. Συνήθως μεταξύ του ανεμοκινητήρα και της γεννήτριας μεσολαβεί μία διάταξη μεταφοράς της κίνησης, η οποία περιλαμβάνει έναν πολλαπλασιαστή στροφών καθώς και συνδέσμους προς τον ανεμοκινητήρα ή και τη γεννήτρια.
- Το ηλεκτρικό σύστημα περιλαμβάνει τη γεννήτρια και ενδεχομένως ένα μετατροπέα ισχύος, που παρεμβάλλεται μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου ή του φορτίου, όπως π.χ. ένα μετατροπέα AC-DC-AC για τον έλεγχο της ροής ισχύος. Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη, οπότε η συχνότητα της παραγόμενης τάσης είναι ακριβώς ανάλογη των στροφών, ή ασύγχρονη, οπότε η συχνότητα της παραγόμενης τάσης δεν είναι μεν ακριβώς ανάλογη των στροφών αλλά αυξάνεται πολύ λίγο με το φορτίο (μέχρι 3%) ώστε και πάλι να μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σταθερή. Μία εναλλακτική επιλογή είναι η χρησιμοποίηση γεννήτριας Συνεχούς Ρεύματος με παρεμβολή αντιστροφέα.
- Το σύστημα ελέγχου της Α/Γ είναι το συνολικό σύστημα εποπτείας (supervision and management) και περιλαμβάνει και επιμέρους συστήματα ελέγχου, όπως της κλίσης των πτερυγίων (pitch control), των μετατροπέων ισχύος, της γεννήτριας και της περιστροφής της ατράκτου (yaw control). Αυτό το σύστημα προσαρμόζει τη λειτουργία της Α/Γ στις εκάστοτε συνθήκες ανέμου, επιτηρεί την ασφάλεια και μεγιστοποιεί την απόδοσή της. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου παρουσιάζει συνεχή αύξηση κατά τα τελευταία χρόνια και αποτελεί βασικό κριτήριο εξέλιξης των Α/Γ.

Για τη σύνδεση της Α/Γ στο δίκτυο μέσης τάσης υπάρχουν ακόμα διατάξεις αντιστάθμισης και φίλτρα, διατάξεις ζεύξης και προστασίας (πχ διακόπτης ισχύος, ηλεκτρονόμος προστασίας, σύστημα ομαλής εκκίνησης soft-starter, κ.ά.) καθώς και μετασχηματιστής ΧΤ/ΜΤ. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται όλα αυτά τα συστήματα, τα όποια στην συνέχεια αναλύονται διεξοδικότερα.



**Εικ. 3.16** Βασικά υποσυστήματα [Πηγή: «Επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής», Κ. Παγώνης, 2011]

Η σύνδεση των Α/Γ με το δίκτυο σε συστήματα σταθερών στροφών γίνεται απ' ευθείας χωρίς να χρειάζεται κάποια περαιτέρω μετατροπή της ισχύος. Στην περίπτωση αυτή, βέβαια, δεν υπάρχει άμεσος έλεγχος της ισχύος η οποία εγχέεται στο δίκτυο. Σε συστήματα μεταβλητών στροφών είναι απαραίτητη η απόζευξη της συχνότητας του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με αυτή του δικτύου. Για το σκοπό αυτό, κυρίως, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος [18].

Στον πίνακα που έπεται, περιγράφονται οι τυπικές διαμορφώσεις του ηλεκτρικού μέρους της ανεμογεννήτριας, ενώ στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε σχηματικά τις κυριότερες τοπολογίες σύνδεσης ανεμογεννητριών.

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗΣ		ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ		ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
Δρομέας κλωβού	Απ' ευθείας σύνδεση, σταθερών στροφών	Ηλεκτρική διέγερση	Απ' ευθείας σύνδεση, σταθερών στροφών	Απ' ευθείας σύνδεση σε δίκτυο DC
	Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών		Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών	
	Σύνδεση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών			
Δρομέας με δακτυλίους	Με έλεγχο ολισθήσεως (optislip), μεταβλητών στροφών	Μόνιμοι μαγνήτες	Σύνδεση μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών	Σύνδεση μέσω αντιστροφέα (DC\AC) σε δίκτυο AC
	Διπλή τροφοδότηση μέσω ανορθωτή και αντιστροφέα (AC\DC\AC), μεταβλητών στροφών		Σύνδεση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών	
	Διπλή τροφοδότηση μέσω κυκλομετατροπέα (AC\AC), μεταβλητών στροφών			

**Εικ. 3.17** Διαμορφώσεις ηλεκτρικού μέρους Α/Γ

[Πηγή: «Ανάπτυξη μοντέλων ανεμογεννητριών σταθερών στροφών με γεννήτρια επαγωγής και φωτοβολταϊκών γεννητριών σε συνεχή λειτουργία μεγίστης ισχύος», Α. Τσουχνίκας, 2004]

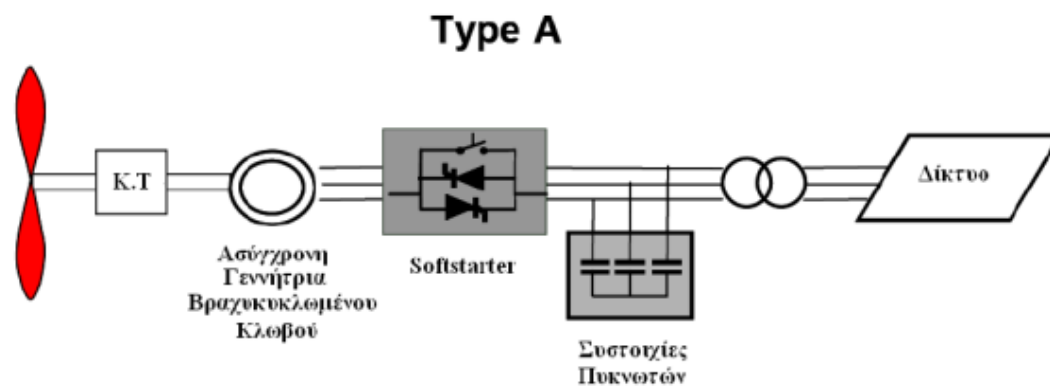
Οι συνηθέστερες χρησιμοποιούμενες διαμορφώσεις πιο συγκεκριμένα είναι οι εξής [10], [19], [20], [21] :

### Τύπος Α

Η Α/Γ σταθερών στροφών της εικ. 3.18, έχει ως βασικό πλεονέκτημα το μικρό κόστος, το μικρό βάρος και γενικά την απλότητα στην κατασκευή. Η μείωση του κόστους οφείλεται αφενός στην έλλειψη μετατροπέα και αφετέρου στην ίδια τη γεννήτρια που χρησιμοποιεί η οποία είναι μια συνηθισμένη ασύγχρονη γεννήτρια τύπου κλωβού. Η απουσία μετατροπέα δίνει αξιοπιστία στη κατασκευή ενώ παράλληλα οι ανάγκες συντήρησης είναι μειωμένες.

Βασικό μειονέκτημα των Α/Γ σταθερών στροφών είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης των στροφών ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει ως συνέπεια οποιαδήποτε μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου να μεταφράζεται σε αντίστοιχη μεταβολή της μηχανικής ροπής στον άξονα με αποτέλεσμα την εμφάνιση έντονων μηχανικών καταπονήσεων που φθείρουν το σύστημα.

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα της Α/Γ σταθερών στροφών είναι ότι λόγω της έλλειψης ηλεκτρονικών ισχύος δε μπορεί να συμβάλει στην ρύθμιση της αέργου ισχύος που ανταλλάσει με το δίκτυο με συνέπεια να είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών στην έξοδο της έτσι ώστε να γίνεται αντιστάθμιση της αέργου ισχύος που απορροφά η γεννήτρια. Αυτό έχει συνέπεια την αδυναμία λειτουργίας κάτω από τις συνθήκες που επιβάλουν νέοι κανονισμοί λειτουργίας των αιολικών πάρκων που συνδέονται στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά στην ισχύ εξόδου, παρουσιάζει έντονη διακύμανση με αποτέλεσμα την εμφάνιση flicker, γεγονός που περιορίζει την δυνατότητα εγκατεστημένης ισχύος σε ασθενή δίκτυα. Λόγω των ατελειών τους η χρήση τους τα τελευταία χρόνια τείνει να εγκαταλειφθεί με εξαίρεση ειδικές περιπτώσεις [22].

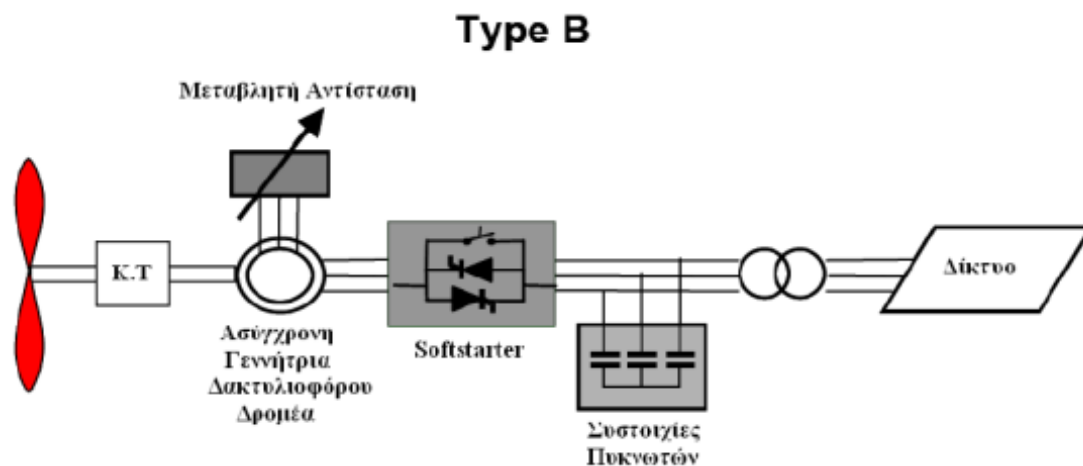


*Εικ. 3.18* Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου Α [Πηγή: «Δυναμικές επιδράσεις του αιολικού συστήματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενεργείας», Ι. Σαμαράς, Ε. Σταματόπουλος,, 2010]

### Τύπος Β

Η συνδεσμολογία ασύγχρονης γεννήτριας τυλιγμένου δρομέα, όπως φαίνεται στην εικ. 3.19, παρέχει τη δυνατότητα, μεταβάλλοντας την αντίσταση του δρομέα, να ελέγχεται η ηλεκτρική ροπή. Με τον τρόπο αυτό δίνεται η δυνατότητα αλλαγής των στροφών της γεννήτριας κατά την διάρκεια ριπών ανέμου σε ένα περιορισμένο φάσμα ταχυτήτων. Αυτό, αφενός μειώνει, σε κάποιο βαθμό, τις μηχανικές καταπονήσεις, αφετέρου βελτιώνει την ποιότητα ισχύος που αποδίδεται στην έξοδο. Μειονεκτήματά της ωστόσο αποτελεί το μεγαλύτερο κόστος σε σχέση με τις τύπου Α μηχανές και η συντήρηση που απαιτεί το σύστημα των ψηκτρών – δακτυλιδιών του δρομέα.



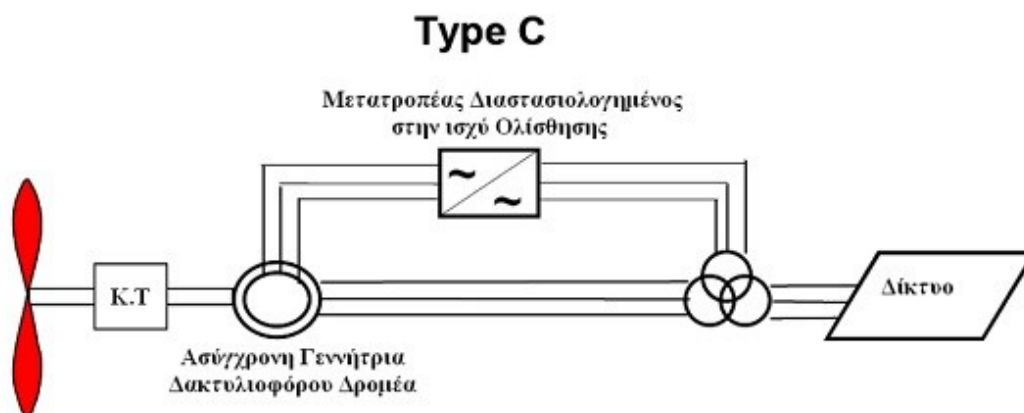


**Εικ. 3.19** Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου Β [Πηγή: «Δυναμικές επιδράσεις του αιολικού συστήματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας», Ι. Σαμαράς, Ε. Σταματόπουλος,, 2010]

### Τύπος C

Η συνηθέστερη τοπολογία Α/Γ είναι η μεταβλητών στροφών, όπως οι τοπολογίες τύπου C και D. Οι Α/Γ μεταβλητών στροφών παρουσιάζουν αυξημένη ενεργειακή απόδοση και μέγιστη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, γεγονός που οφείλεται στην μεταβολή της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

Μια συνήθης διαμόρφωση ηλεκτρικού μέρους σε συστήματα μεταβλητών στροφών είναι η ασύγχρονη γεννήτρια τυλιγμένου δρομέα διπλής τροφοδότησης με μετατροπέα συνδεδεμένο στο δρομέα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20. Στη περίπτωση της συγκεκριμένης ηλεκτρικής διαμόρφωσης, υπάρχει δυνατότητα ελέγχου των στροφών ρυθμίζοντας κατάλληλα τη συχνότητα των ρευμάτων που κυκλοφορούν στο δρομέα. Ο τύπος αυτός έχει όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών. Επιπλέον, αποτελείται από μια συνηθισμένη γεννήτρια κι ένα σχετικά μικρής ισχύος και φθινό μετατροπέα. Βασικό μειονέκτημα της διπλής τροφοδότησης είναι το γεγονός ότι ο στάτης της ασύγχρονης γεννήτριας είναι άμεσα συνδεδεμένος στο δίκτυο, έτσι σε οποιαδήποτε βύθιση τάσης είναι εκτεθειμένος στη δυναμική συμπεριφορά του δικτύου. Αυτό δεν ισχύει στη διαμόρφωση τύπου D, όπου υπάρχει απόζευξη της συχνότητας του δικτύου και των μεγεθών του στάτη μέσω του μετατροπέα ισχύος.

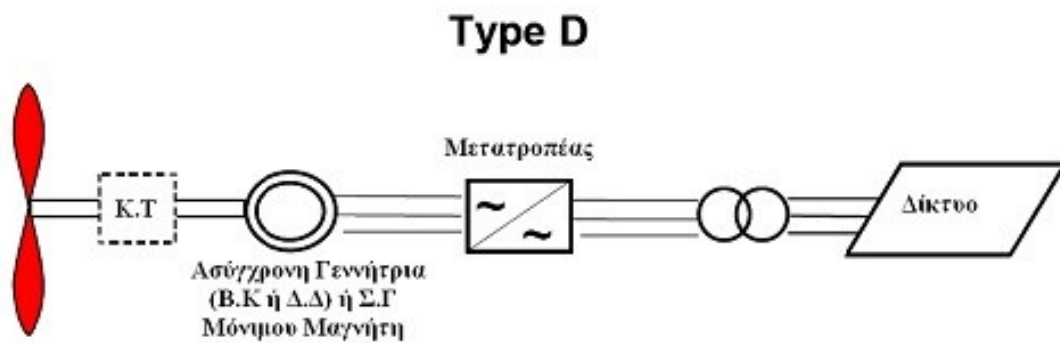


**Εικ. 3.20** Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου C [Πηγή: «Δυναμικές επιδράσεις του αιολικού συστήματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας», Ι. Σαμαράς, Ε. Σταματόπουλος,, 2010]

### Τύπος D

Στον τύπο αυτό περιλαμβάνονται οι ανεμογεννήτριες με έλεγχο ταχύτητας σε όλο το εύρος (από 0 έως 100% της σύγχρονης). Η σύνδεση επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας μεταξύ στάτη και δικτύου. Η γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη, σύγχρονη με τύλιγμα στο δρομέα και σύγχρονη μόνιμου μαγνήτη. Στην περίπτωση της Α/Γ μεταβλητών στροφών με σύγχρονη γεννήτρια και μετατροπέα, οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας περιστροφής, είτε εξαιτίας του ανέμου, είτε εξαιτίας κάποιας διαταραχής στο δίκτυο, μπορούν εύκολα να εξομαλυνθούν από το δρομέα της και τα μεγάλα ρεύματα που προκαλούνται αποσβένονται από το μαγνητικό κύκλωμα του πυρήνα, ειδικά σε σύγχρονες γεννήτριες μόνιμου μαγνήτη [21]. Επίσης, η συγκεκριμένη τοπολογία δεν περιλαμβάνει, συνήθως, κιβώτιο ταχυτήτων, επιτυγχάνοντας έτσι μείωση του κόστους και του βάρους, βελτίωση της αξιοπιστίας και ελάττωση του θορύβου.

Μειονέκτημα της διαμόρφωσης αυτής αποτελεί η σχετικά ογκώδης και βαριά γεννήτρια που χρησιμοποιεί. Επίσης, από το μετατροπέα διασύνδεσης μετάγεται το 100% της παραγόμενης ισχύος σε αντίθεση με την ασύγχρονη γεννήτρια διπλής τροφοδότησης όπου τα ηλεκτρονικά ισχύος διαστασιοποιούνται περίπου στο 1/3 της ονομαστικής ισχύος της μηχανής. Το γεγονός ότι όλη η ισχύς μεταφέρεται από το μετατροπέα περιορίζει την λειτουργία του συστήματος ιδιαίτερα σε περιπτώσεις σφαλμάτων.



**Εικ. 3.21** Ισοδύναμο κύκλωμα Α/Γ τύπου D [Πηγή: «Δυναμικές επιδράσεις του αιολικού συστήματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενεργείας», Ι. Σαμαράς, Ε. Σταματόπουλος,, 2010]

Εν κατακλείδι αναφέρουμε ότι η γεννήτρια επαγωγής με δρομέα κλωβού χρησιμοποιείται σε σχετικά μικρά μεγέθη ανεμογεννητριών, ενώ αυτή με τυλιγμένο δρομέα και δακτυλίους απαντάται σε ανεμογεννήτριες μέσου και μεγάλου μεγέθους. Η σύγχρονη γεννήτρια χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για μέσου και μεγάλου μεγέθους ανεμογεννήτριες. Τέλος, γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρή έκταση, κυρίως για μικρού μεγέθους ανεμογεννήτριες, ιδίως όταν γίνεται απευθείας χρήση συνεχούς ρεύματος.

### **3.5.2 Ανεμογεννήτριες σταθερών – μεταβλητών στροφών**

#### Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Είναι οι Α/Γ που έχουν πρακτικά σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξαρτήτως ταχύτητας ανέμου. Αποτελούν τις πρώτες Α/Γ που άρχισαν να χρησιμοποιούνται, ενώ ακόμα και σήμερα υπάρχουν σε μεγάλο ποσοστό από τις ήδη εγκατεστημένες. Συνδυάζονται είτε με σύγχρονες γεννήτριες είτε με γεννήτριες επαγωγής [23]. Η μεγάλη εξάπλωσή τους οφείλεται στο κόστος τους, αφού για τη σύνδεση τους με το δίκτυο δεν απαιτούνται και δεν παρεμβάλλονται ηλεκτρονικοί μετατροπείς κι αντιστροφείς, των οποίων το κόστος μόνο αμελητέο δεν είναι. Η απευθείας με το δίκτυο σύνδεση έχει ως αποτέλεσμα η ταχύτητα του δρομέα να είναι σταθερή και πρακτικά ίση με τη σύγχρονη [10], [21]:

$$N_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} = \text{σταθερή}$$

Όπου:

$N_s$  : η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα (rpm)

$f_s$  : η συχνότητα στο στάτη, που ισούται με τη συχνότητα του δικτύου ( $f_s=50\text{Hz}$ )

$P$  : ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας (πάντα ζυγός)

Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι Α/Γ λειτουργίας σταθερών στροφών αφορούν στην εξαιρετική τους απλότητα, αξιοπιστία και στις ελάχιστες ανάγκες συντήρησής τους.

Παράλληλα, όμως εμφανίζουν και κάποια μειονεκτήματα, τα σοβαρότερα εκ των οποίων είναι [21]:

- Αδυναμία συνεχούς λειτουργίας με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή  $c_{p,max}$
- Αυξημένη μεταβλητότητα ισχύος εξόδου
- Χαμηλός συντελεστής ισχύος εξόδου
- Μεταβατικά φαινόμενα εκκίνησης και ζεύξης – απόζευξης

Εξαιτίας αυτών των αδυναμιών, οι κατασκευάστριες εταιρείες ξεκίνησαν την παραγωγή Α/Γ μεταβλητών στροφών, οι οποίες δίνουν λύση σε μεγάλο βαθμό στα προαναφερθέντα προβλήματα.

#### Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Στη λειτουργία αυτή, για να υπάρχει η καλύτερη απόδοση της Α/Γ, απαιτείται η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα να είναι ανάλογη της ταχύτητας του ανέμου. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχουν μεγάλες μεταβολές στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων. Για την πραγματοποίηση αυτής της αναλογίας (στροφές δρομέα - ταχύτητα ανέμου) χρησιμοποιούνται συστήματα ηλεκτρονικών αντιστροφών (inverters) που ελέγχουν τις στροφές του δρομέα, αποδεσμεύοντας έτσι την Α/Γ από τη συχνότητα του δικτύου κι επιτρέποντας της να κυμαίνεται σε μεγάλα διαστήματα συχνοτήτων με αποτέλεσμα τη βέλτιστη λειτουργία, αφού σε κάθε περίπτωση μπορεί να λειτουργεί με το μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή  $C_{p,max}$ , το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου  $\lambda$  (Εικ. 3.22). Επιπροσθέτως, ο inverter επιτυγχάνει την ομαλή σύνδεση στο δίκτυο με την προσαρμογή της ισχύος εξόδου στην ονομαστική συχνότητα του δικτύου, [10], [21].

$$N_s = \frac{120 \cdot f_s}{p} = \text{μεταβαλλόμενη}$$

Όπου, η διαφορά της από την παραπάνω σχέση είναι :

ο  $f_s$  : τη συχνότητα στο στάτη που μεταβάλλεται κι ελέγχεται από τον αντιστροφέα, ο οποίος μεταβάλλει τις στροφές της Α/Γ σύμφωνα με τη σχέση:

$$N_s = \frac{60 \cdot v_w \cdot \lambda}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

Όπου:

$v_w$  : η ταχύτητα του ανέμου

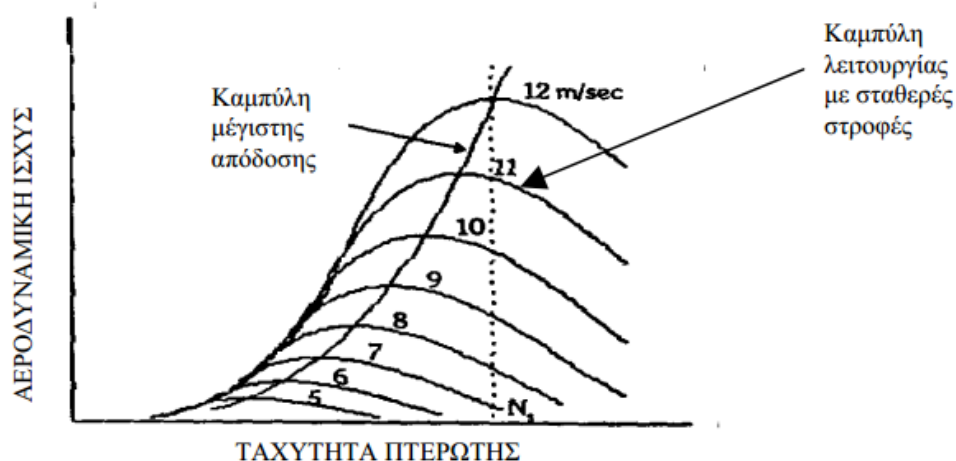
$\lambda$  : ο λόγος ταχυτήτων ακροπτερυγίου (tip speed ratio)

$R$  : η ακτίνα των πτερυγίων

Η χρήση τους γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη και προτιμούνται πλέον από των σταθερών στροφών, καθώς παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι [21] :

- Αύξηση ενεργειακής απόδοσης
- Μείωση των μηχανικών καταπονήσεων (πτερύγια, σύστημα μετάδοσης της κίνησης και δομικό σύστημα) - μεγαλύτερη διάρκεια ζωής
- Δυνατότητα απαλοιφής του κιβωτίου ταχυτήτων
- Μείωση του ακουστικού θορύβου
- Προσαρμογή της Α/Γ στις τοπικές συνθήκες ανέμου
- Καλύτερη ποιότητα ισχύος (Μείωση διακυμάνσεων ισχύος εξόδου)
- Δυνατότητα ελέγχου άεργου ισχύος
- Δυνατότητα ρύθμισης τάσης (σε ασθενή δίκτυα) και της συχνότητας (σε αυτόνομα)
- Διευκόλυνση διαδικασιών εκκίνησης

Τα μειονεκτήματα τους αφορούν κυρίως τον οικονομικό τομέα, αφού απαιτούν σύνδεση ηλεκτρονικών ισχύος που συνιστούν σημαντικό μέρος των εξόδων μίας εγκατάστασης τέτοιας Α/Γ. Επιπλέον, εμφανίζουν κι αδυναμίες που αφορούν στην αυξημένη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών μετατροπών, στην έγχυση αρμονικών στο δίκτυο και στην αύξηση των απωλειών λόγω της παραμόρφωσης των ρευμάτων της γεννήτριας [23].



**Εικ. 3.22** Καμπύλη ισχύος ανεμοκινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και βέλτιστη καμπύλη λειτουργίας [Πηγή: «Ανεμογεννήτριες και Ηλεκτρονικά Ισχύος», Μ. Μπράτισης, Ε. Τσιμπλοστεφανάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα ΗΜΤΥ Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας]

### 3.5.3 Ασύγχρονες - σύγχρονες γεννήτριες

#### Ασύγχρονες γεννήτριες

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Το αξιοσημείωτο είναι ότι η γεννήτρια αυτού του τύπου αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτροκινητήρας. Δεν κάνει λοιπόν εντύπωση ότι το 1/3 της παγκόσμιας καταναλισκόμενης ενέργειας οφείλεται στη λειτουργία των ασύγχρονων κινητήρων σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανικό έργο [24]. Τα δυο πιο βασικά κριτήρια βάσει των οποίων γίνεται συχνά η επιλογή του κινητήρα αυτού είναι το χαμηλό κόστος αγοράς αλλά και η αξιοπιστία που προσφέρει. Επίσης μερικά

ακόμα χαρακτηριστικά τα όποια είναι ωφέλιμα για την ανεμογεννήτρια είναι η αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης και η ικανότητα υπερφόρτωσης. Ο κλωβός στις ασύγχρονες γεννήτριες προσφέρει ένα σημαντικό προβάδισμα έναντι αυτών χωρίς κλωβό. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους οι οποίες ηλεκτρικά ενώνονται με αλουμινένιους δακτυλίους και έχει ως σημαντικό πλεονέκτημα το ότι ο δρομέας προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη [24].

Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα τότε και το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα καθώς επίσης δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής αλλά και αλληλεπίδρασης με τον στάτη. Στην περίπτωση που η ταχύτητα ξεπεράσει τη σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια το ηλεκτρικό ρεύμα να διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ.

Η δύναμη περιστροφής που εφαρμόζεται είναι το μέγεθος που καθορίζει την ταχύτητα της σύγχρονης ταχύτητας. Πρακτικά, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι αμελητέα, της τάξεως του 1% και η ποσοστιαία αυτή διαφορά ονομάζεται ολίσθηση. Αυτός είναι ο λόγος όπου A/Γ δυο πόλων για 1500 rpm και δίκτυο 50 Hz περιστρέφεται αργά. Η ολίσθηση μιας σύγχρονης μηχανής ορίζεται με την παρακάτω σχέση [25]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Όπου το μέγεθος  $s$  εκφράζει την ολίσθηση του δρομέα από την ασύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Στην περίπτωση όπου οι στροφές είναι μηδέν (δηλαδή δεν υπάρχει περιστροφική κίνηση  $n=0$ ) τότε και η ολίσθηση είναι 1, ενώ είναι 0 αν η ταχύτητα του δρομέα έχει την ίδια τιμή με την ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου ( $n=n_s$ ). Μια τελευταία περίπτωση είναι να ισχύει  $n > n_s$ , όπου τότε η ολίσθηση παίρνει αρνητικές τιμές και η μηχανή δουλεύει ως γεννήτρια. Οι γεννήτριες αυτές πλεονεκτούν στο γεγονός ότι οι στροφές αυξομειώνονται ανάλογα με τις μεταβολές της περιστροφικής δύναμης και αυτό συνεπάγεται με λιγότερες καταπονήσεις στο κιβώτιο ταχυτήτων [24].

Στις ασύγχρονες γεννήτριες ο στάτης μαγνητίζεται από το δίκτυο πριν λειτουργήσει ενώ για τα αυτόνομα συστήματα πρέπει να υπάρχουν ανάλογοι πυκνωτές που θα δώσουν τα απαραίτητα ρεύμα μαγνήτισης. Ο στάτης στις ασύγχρονες γεννήτριες πρέπει να μαγνητιστεί από το δίκτυο πριν τη λειτουργία του. Ο εναπομείναντας μαγνητισμός είναι πολύ σημαντικό για μια γεννήτρια, αλλιώς κάθε φορά που θα πρέπει να λειτουργήσει θα χρειάζεται μια βοηθητική μηχανή κατά την εκκίνηση του συστήματος.

Οι ασύγχρονες γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα και αυτές με κλωβό έχουν ομοιότητα ως προς τον στητή αλλά διαφέρουν ως προς το δρομέα. Ο δρομέας στις μηχανές της πρώτης περίπτωσης έχει αυλακώσεις μέσα όπου εφαρμόζεται τύλιγμα που μοιάζει με αυτό του στητή. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον με δακτυλίους και ψήκτρες. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ο έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δρομέα από τα εξωτερικά και επηρεάζεται η τάση του [24].

Στο δρομέα αυτού του τύπου γεννήτριας η συνδεσμολογία (τριφασική) γίνεται κατά αστέρα και τα τρία άκρα τους συνδέονται με δακτυλίους. Οι δακτύλιοι διαμέσου των ψηκτρών μπορούν να συνδεθούν είτε με εξωτερικό κύκλωμα είτε είναι βραχυκυκλωμένοι.

Ο βασικός σκοπός των δακτυλίων είναι να εξυπηρετήσουν τη σε σειρά τοποθέτηση της αντίστασης με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Η τοποθέτηση της αντίστασης σε σειρά παρουσιάζει διπλό όφελος. Αφενός το ρεύμα εκκίνησης μειώνεται και κατά

δεύτερον η ροπή εκκίνησης αυξάνεται. Η ολίσθηση του δρομέα μεταβάλλεται αλλάζοντας την ολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα [23].

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η μείωση των καταπονήσεων κατά τις διακυμάνσεις του ανέμου. Καθώς η ολίσθηση της γεννήτριας μεταβάλλεται, εξασφαλίζοντας την καλύτερη ολίσθηση, ταυτόχρονα επιτυγχάνονται μικρές ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και ισχύ εξόδου [23].

Τα βασικά μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι το υψηλό κόστος αλλά και η έλλειψη στιβαρότητας σε σχέση με τη γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Επίσης, το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0-10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στητή, έχει χαμηλή πραγματική και άεργο ισχύ και τέλος ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται από το ίδιο το σύστημα και συγκεκριμένα στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα [23].

### Σύγχρονες γεννήτριες

Οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν υψηλότερο κόστος καθώς και η κατασκευή τους είναι δυσκολότερη σε σχέση με τις επαγωγικές γεννήτριες. Υπερτερεί όμως σημαντικά ως προς το γεγονός ότι χρειάζεται άεργο ρεύμα μαγνήτισης.

Συνοπτικά ο τρόπος λειτουργίας περιγράφεται ως εξής [20], [23]:

Στις τριφασικού ρεύματος γεννήτριες τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι η αιτία δημιουργίας του μαγνητικού πεδίου καθώς κάθε ηλεκτρομαγνήτης είναι συνδεδεμένος και σε μια φάση.

Οι ηλεκτρομαγνήτες τοποθετούνται εναλλάξ (Βόρειος και Νότιος) και η μεταβολή τάσης σε κάθε φάση οφείλεται σε αυτή τη μεταβολή μαγνητισμού. Οι μαγνήτες τοποθετούνται ανά 120 μοίρες και αυτό γίνεται έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο να κάνει πλήρη κύκλο 360 μοιρών. Αυτή η πλήρης περιστροφή σημαίνει ότι όταν μια φάση είναι στο μέγιστο οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα στη μίση τάση και έχουν διεύθυνση αντίθετη.

Αν επιβληθεί στο δρομέα ρεύμα ώστε να τον αναγκάσει σε περιστροφική κίνηση, αντί να τον περιστρέψει το ρεύμα του δικτύου, τότε η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια. Άρα είναι απαραίτητη η παρουσία ενός δυνατού μαγνήτη ώστε να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη ασκείται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής.

Επίσης είναι δυνατόν να δημιουργηθεί τριφασικό δίκτυο το οποίο θα είναι ανεξάρτητο και αυτό μπορεί να γίνει απλά εάν αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο. Σε αυτήν την περίπτωση είναι αναγκαία η διατήρηση σταθερής περιστροφικής ταχύτητας ώστε να παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Άρα, η σύνδεση του δικτύου με αυτήν τη γεννήτρια πρέπει να γίνει έμμεσα.

Πρακτικά, σπάνια χρησιμοποιούνται γεννήτριες μονίμων μαγνητών και αυτό γιατί οι μόνιμοι μαγνήτες απομαγνητίζονται όταν δουλεύουν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία καθώς τα υλικά κατασκευής του είναι σπάνια και ακριβά.

Οι Α/Γ που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες, κατά κόρον χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνήτες με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Το δίκτυο όμως παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα και συνεπώς χρειάζονται αντιστροφές για τη μετατροπή σε συνεχές.

Οι περισσότερες Α/Γ είναι εφοδιασμένες με γεννήτριες δυο ή τριών ζευγών πόλων (υψηλής ταχύτητας) και ο λόγος χρήσης είναι κυρίως το οικονομικό μέρος.

Από το μέγεθος του δρομέα εξαρτάται και το φορτίο που αντέχει μια Α/Γ. Η μέγιστη δύναμη στην οποία μπορεί να αντέξει μια γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Οι επιλογές είναι μεταξύ αργόστροφης και συνεπώς δυνατότερης και ακριβότερης Α/Γ και εύστροφης και άρα φτηνότερης και μικρότερης Α/Γ.

### 3.6 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε δύο κατηγορίες [26]:

- Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι είτε παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου είτε παράλληλος προς την επιφάνεια της γης, αλλά κάθετος στην κατεύθυνση ροής του ανέμου.
- Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, στις οποίες ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης και κάθετος στη ροή του ανέμου.

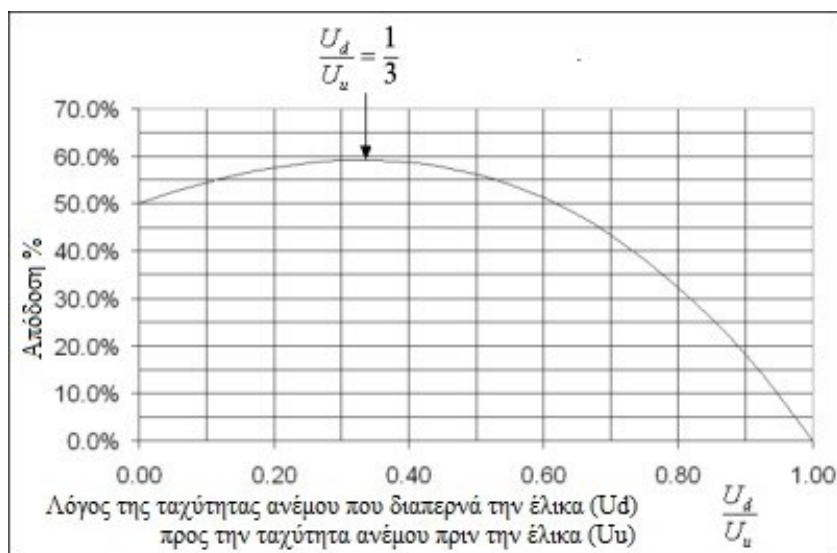
Οι ανεμογεννήτριες της πρώτης κατηγορίας είναι αυτές που έχουν σημειώσει τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία και τεχνολογική εξέλιξη. Χρησιμοποιούνται παγκοσμίως σε ποσοστό που αγγίζει το 90% [27] ωστόσο οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα δεν έχουν ακόμη αξιοποιήσει αυτήν την τεραστία τεχνολογική ανάπτυξη των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα προς ίδιο όφελος κάτι που μπορεί να τις καταστήσει δυνητικά και αυτές εμπορικά επιτυχείς.

Και τα δυο είδη αυτών των ανεμογεννητριών βασίζονται σε γενικές γραμμές στον ίδιο τρόπο λειτουργίας και αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Στην πρώτη κατηγορία ο ρότορας, το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια βρίσκονται στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας και λειτουργούν έχοντας πρόσωπο προς τη ροή του ανέμου ενώ οι ανεμογεννήτριες της δεύτερης κατηγορίας μπορούν να δέχονται τον άνεμο από οποιαδήποτε διεύθυνση ενώ όλος ο εξοπλισμός τους βρίσκεται στο επίπεδο του εδάφους κάτι που είναι πιο πρακτικό για τη συντήρηση, ιδιαίτερα σε μεγάλες μονάδες.

#### 3.6.1 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWTs)

Βασικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών τύπου έλικας είναι η μεγάλη αεροδυναμική. Παλιά τα πτερύγια των μηχανών τέτοιου τύπου ήταν πλατιά, σήμερα κατασκευάζονται μηχανές με λεπτά πτερύγια για να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας που συμβαίνουν σ' αυτά λόγω του ιξώδους του αέρα. Η γωνία που σχηματίζουν τα πτερύγια με τον άξονα περιστροφής τους, αποτελεί κατασκευαστικό χαρακτηριστικό για κάθε έλικα και καθορίζει την γωνία με την οποία ο άνεμος προσπίπτει πάνω στην έλικα [26].

Η θεωρητική απόδοση των ανεμογεννητριών τύπου έλικας, όπως επίσης και όλων των υπόλοιπων τύπων που δουλεύουν με παρόμοιο τρόπο, σύμφωνα με το κριτήριο του Betz είναι 59% [16]. Δεν μπορεί να υπάρξει μεγαλύτερη τιμή από αυτή για το λόγο ότι υπάρχει περιορισμός στην ταχύτητα του ανέμου που διαπερνά την έλικα μιας ανεμογεννήτριας επειδή σύμφωνα με το θεώρημα διατήρησης μάζας ο άνεμος διατηρεί ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας για να μπορεί να απομακρυνθεί από την ανεμογεννήτρια. Συνεπώς, δεν μπορούμε να έχουμε εκμετάλλευση της ολικής ποσότητας της αιολικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για μια ιδανική έλικα, η ταχύτητα του ανέμου που διαπερνά την έλικα θα πρέπει θεωρητικά να είναι τουλάχιστο το 1/3 της ταχύτητας του ανέμου πριν την έλικα [28] (Εικ. 3.23).



**Εικ. 3.23** Διάγραμμα μεταβολής της απόδοσης  $A/\Gamma$  συναρτήσει του λόγου  $U_d/U_u$   
 [Πηγή: «The Betz Limit - and the maximum efficiency for horizontal axis wind turbines. Can it be exceeded and does it apply to vertical axis wind turbines?», WindPower Program: <http://www.wind-power-program.com/>]

Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο δεν υπάρχει ολική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι η παράκαμψη που συμβαίνει από ένα μικρό ποσοστό της μάζας του αέρα όταν αυτή πλησιάζει τον δρομέα. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται με την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας στο σημείο πριν και μετά τον δρομέα: Ο άνεμος επιβραδύνεται καθώς πλησιάζει τον δρομέα ενώ η πίεση αυξάνεται. Εφόσον όμως η μάζα του αέρα σε οποιαδήποτε απόσταση από την έλικα θα πρέπει να παραμείνει σταθερή, συνεπάγεται ότι θα πρέπει να αυξηθεί το εμβαδόν το οποίο καταλαμβάνουν οι γραμμές ροής του αέρα, προκαλώντας έτσι την παράκαμψη του μικρού ποσοστού αέρα που αναφέρθηκε πριν. Επίσης, η χρονική καθυστέρηση στρέψης του μηχανισμού προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας στη διεύθυνση του ανέμου είναι ένας ακόμα παράγοντας που συντελεί στην μερική εκμετάλλευση της ισχύος του ανέμου [26], [29].

Το πεδίο διαφοροποίησης όσον αφορά το σχεδιασμό και την κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα συνίσταται [26], [29]:

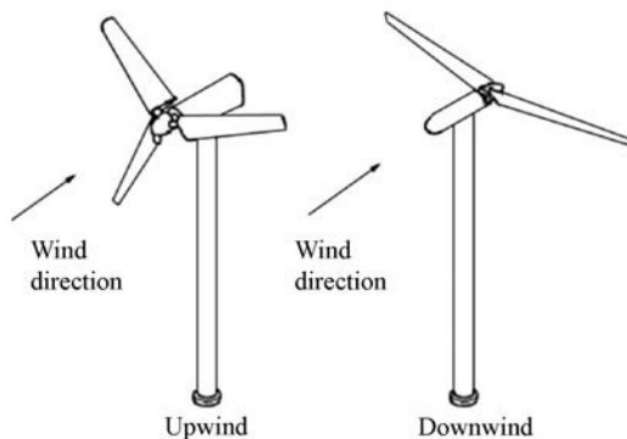
- Στον αριθμό των πτερυγίων (μονόπτερες, δίπτερες, τρίπτερες, πολύπτερες)
- Στον προσανατολισμό του δρομέα (ανάντη/κατάντη)
- Στο υλικό κατασκευής των πτερυγίων, τη μέθοδο και το σχήμα κατασκευής
- Στο σχεδιασμό του κόμβου στήριξης του δρομέα (άκαμπτος, ταλαντευόμενος, αρθρωτός)
- Στον έλεγχο ισχύος μέσω αεροδυναμικού ελέγχου (stall control) ή μεταβλητού βήματος πτερυγίων (pitch control)
- Στη χρήση ανεμογεννητριών σταθερών ή μεταβλητών στροφών
- Στο σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου (free yaw or active Yaw)
- Στη χρήση σύγχρονης ή ασύγχρονης γεννήτριας
- Στο κιβώτιο ταχυτήτων ή στην άμεση γεννήτρια κίνησης

Τα βασικά υποσυστήματα μιας τυπικής χερσαίας οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριας είναι [26], [29]:

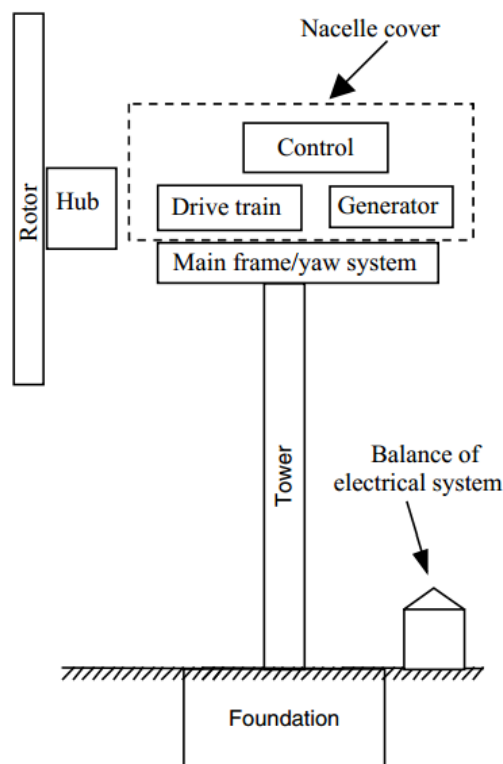
- Ο δρομέας που αποτελείται από τα πτερύγια και τον κόμβο που τα υποστηρίζει



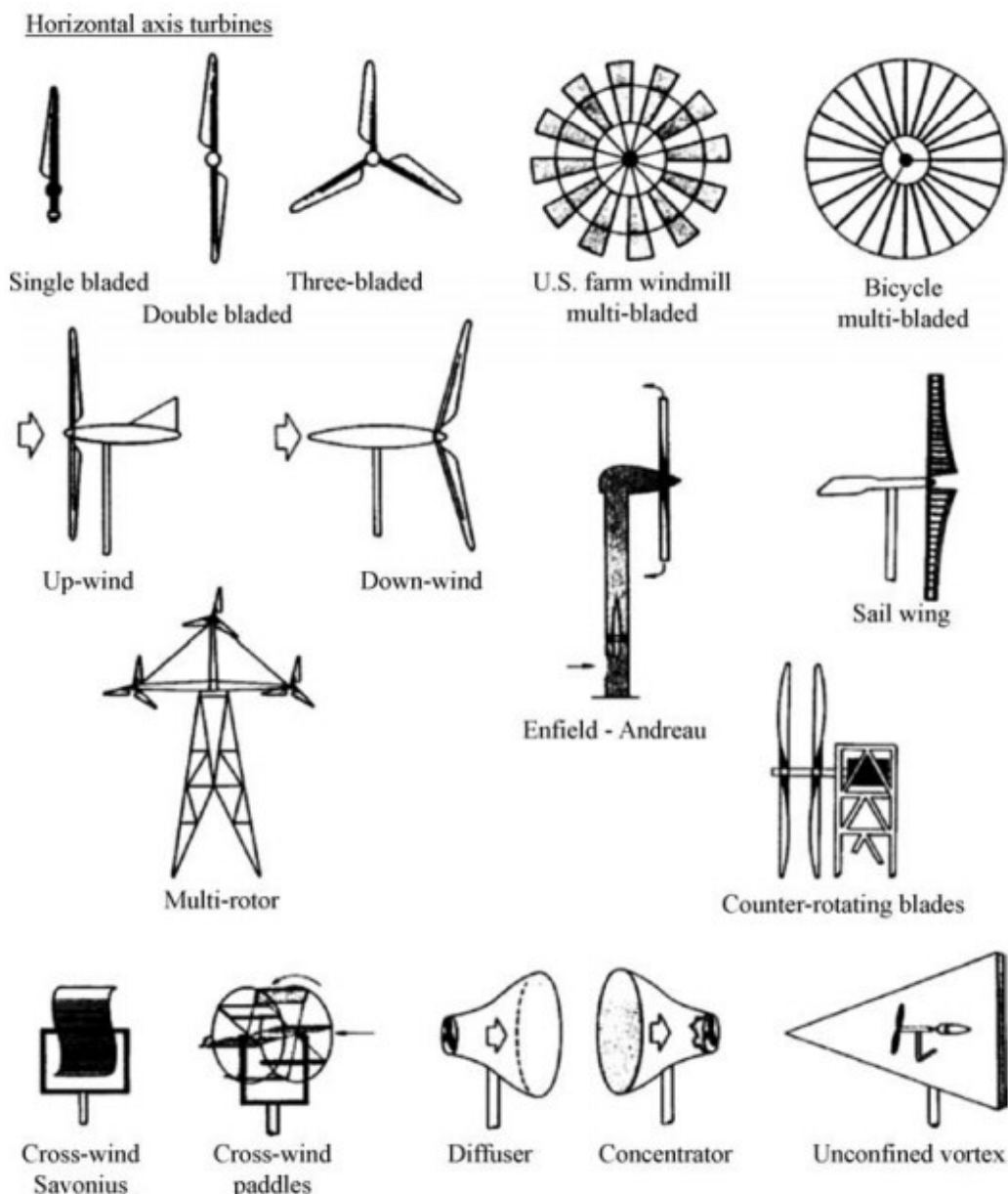
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης που περιλαμβάνει τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο ταχυτήτων (στις μεγάλες ανεμογεννήτριες), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.
- Η άτρακτος και το βασικό πλαίσιο το οποίο περιλαμβάνει το μηχανισμό της ανεμογεννήτριας με την πλακά έδρασης καθώς και το σύστημα προσανατολισμού
- Ο πύργος και η θεμελίωση
- Ο πίνακας ελέγχου που περιλαμβάνει τα ηλεκτρολογικά μέρη όπως καλώδια, διακόπτες, μετασχηματιστές και ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.



**Εικ. 3.24** Προσανατολισμός δρομέα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα (ανάντη/κατάντη)  
 [Πηγή: «Wind Energy Explained - Theory, Design and Application», J. F. Manwell and J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2009]



**Εικ. 3.25** Κύρια στοιχεία ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα [Πηγή: «Wind Energy Explained - Theory, Design and Application», J. F. Manwell and J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2009]



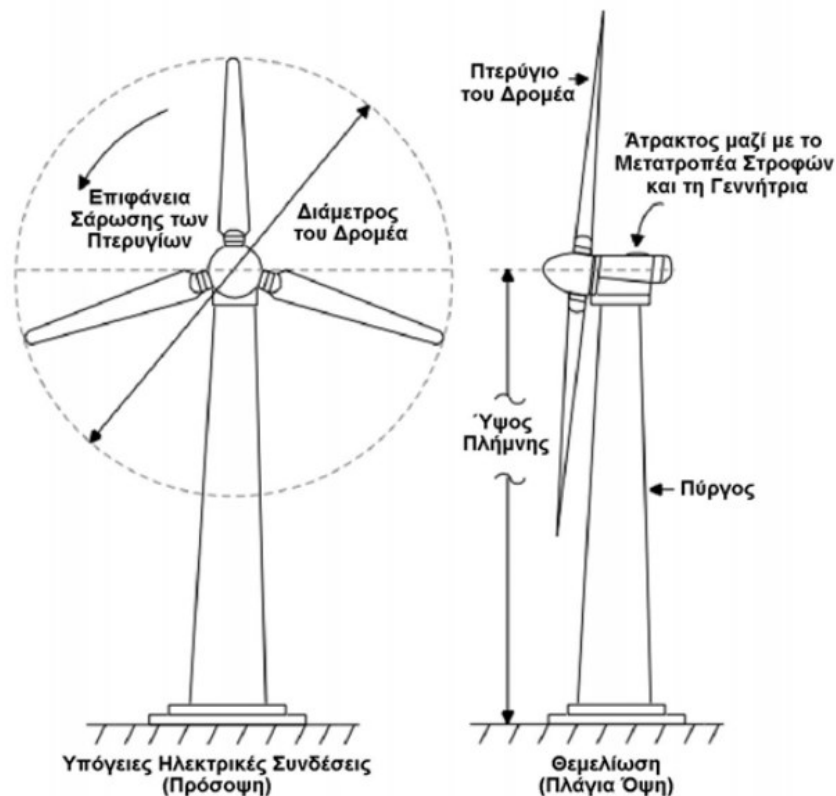
**Εικ. 3.26** Διάφορα σχέδια ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα  
[Πηγή: «Wind Machines 2nd Edition», F. R. Eldridge, 1980]

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα παραπάνω επιμέρους θέματα [17], [26], [29], [30].

### Δρομέας

Αποτελεί ίσως το σημαντικότερο μέρος για τη σχεδίαση του όλου συστήματος. Στόχος είναι να βρεθεί ένας βέλτιστος συνδυασμός των διάφορων παραμέτρων που συνθέτουν το δρομέα: ταχύτητα περιστροφής, διάμετρος δρομέα, αριθμός περυγίων, κατανομή πλάτους περυγίου, κατάλληλη αεροτομή ή αεροτομές. Το κριτήριο επιλογής για το συνδυασμό αυτό, είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία περύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα περύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα τους. Το μήκος τους εξαρτάται από την απαιτούμενη ονομαστική ισχύ της μηχανής και το αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης τους. Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής

του δρομέα επιλέγεται έτσι ώστε ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου προς την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται στην περιοχή της βέλτιστης τιμής του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$ .



**Εικ. 3.27** Σχηματική αναπαράσταση ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

[Πηγή: « Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.», ΚΑΠΕ, Ecole Des Mines de Paris, ZREU, Πρόγραμμα Leonardo da Vinci 1999]

### Σύστημα μετάδοσης της κίνησης

Απαρτίζεται από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής. Με το σύστημα μετάδοσης δίνεται η κίνηση από το δρομέα (χαμηλές στροφές) στην ηλεκτρογεννήτρια (υψηλές στροφές).

Πιο συγκεκριμένα το σύστημα μετάδοσης κίνησης περιλαμβάνει:

- **Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων**

Σκοπός του διαφορικού χαμηλών στροφών είναι να συνδέσει την κεφαλή του ρήτορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Στις ανεμογεννήτριες των 1000 KW ο ρότορας περιστρέφεται με ταχύτητα 19-20 rpm [29] (σχετικά αργά).

- **Κιβώτιο Ταχυτήτων**

Μέχρι τα τελευταία χρόνια το κιβώτιο ταχυτήτων ήταν ένα από τα βασικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Είναι τοποθετημένο μεταξύ του κυρίου άξονα και της γεννήτριας και ο σκοπός του είναι να αυξάνει τη χαμηλή περιστροφική ταχύτητα των πτερυγίων σε υψηλότερη.

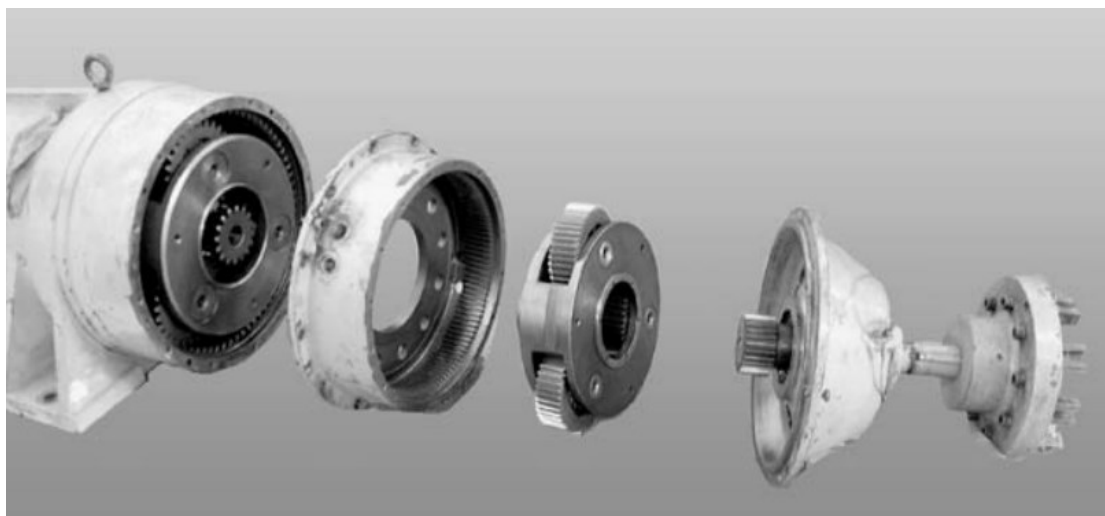
Η έλλειψη κιβωτίου ταχυτήτων (ή αλλιώς πολλαπλασιαστή στροφών) απαιτεί χρήση γεννήτριας με πολλούς πόλους και χαμηλές ταχύτητες περιστροφής (περίπου 200 πόλους για ταχύτητα 30 rpm). Η αύξηση της περιστροφικής ταχύτητας γίνεται μέχρι το επίπεδο που απαιτείται ώστε να παραχθεί ρεύμα, που συνήθως είναι 1000-15000 rpm [29].

Οι συνεχείς μελέτες και έρευνες τα τελευταία χρόνια οδήγησαν στη κατασκευή ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών που η σύνδεση του στροφέα γίνεται απευθείας χωρίς να χρειάζεται κιβώτιο ταχυτήτων. Με αυτόν τον τρόπο επιτεύχθηκε μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης και χαμηλότερος θόρυβος κατά τη λειτουργία καθώς επίσης και χαμηλότερο βάρος και κόστος.

Για τη σωστή λειτουργία και την αποφυγή ζημιών υπάρχουν ορισμένα κριτήρια όσον αφορά στην επιλογή του σωστού πολλαπλασιαστή στροφών.

Επειδή το κόστος τέτοιων εξαρτημάτων δεν είναι φθηνό και ο θόρυβος κατά τη λειτουργία, ειδικά σε κατοικημένη περιοχή, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη διάρκεια ζωής, στο βαθμό απόδοσης και στο θόρυβο κατά λειτουργία.

Επίσης η συνεχής μεταβολή ταχύτητας του ανέμου προκαλεί επανειλημμένα κρουστικά φορτία στο κιβώτιο ταχυτήτων που συνεπάγεται περιορισμένη διάρκεια ζωής λόγω της μεγαλύτερης φθοράς. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος η ονομαστική ισχύς επιλέγεται κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και η ονομαστική ροπή κατά 20% μεγαλύτερη από την ονομαστική ροπή της ανεμογεννήτριας [29].



**Εικ. 3.28** Τμήματα κιβωτίου ταχυτήτων ανεμογεννήτριας [Πηγή: «Wind Energy Explained - Theory, Design and Application», J. F. Manwell and J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2009]

- **Διαφορικό Υψηλών Ταχυτήτων**

Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 rpm και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό έχει ένα δισκόφρενο σε περίπτωση κινδύνου.

### **Κύριος άξονας**

Ο κύριος άξονας της ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από χάλυβα υψηλής αντοχής ώστε να μπορεί να μεταφέρει τις μη μόνιμες στρεπτικές και καμπτικές ροπές και η στήριξη του γίνεται πάνω σε σφαιρικά έδρανα τα όποια παραλαμβάνουν το βάρος του άξονα καθώς και τα

ασκούμενα φορτία. Ο άξονας συνδέεται με το κέντρο του δρομέα. Έτσι όταν ο δρομέας περιστρέφεται παρασέρνει μαζί του τον άξονα με αποτέλεσμα να μεταδίδεται μηχανική, περιστροφική ενέργεια σε αυτόν. Η μηχανική ενέργεια καταλήγει σε μια γεννήτρια όπου μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

### **Ηλεκτρική γεννήτρια**

Ο μηχανισμός αυτός παράγει την ηλεκτρική ενέργεια όταν υπάρχει ικανοποιητικός αέρας για να περιστρέψει τα πτερύγια. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στο επόμενο στάδιο (είτε για αποθήκευση, είτε στο σύστημα διανομής, είτε για άμεση χρήση) χρησιμοποιώντας καλωδίωση. Όπως αναλύσαμε υπάρχουν δύο δυνατές λύσεις, σύγχρονη ή ασύγχρονη γεννήτρια, η οποία συνδέεται με την έξοδο του κιβωτίου πολλαπλασιασμού των στροφών μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η θέση τοποθέτησης της είναι στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας. Ένας διαχωρισμός, έκτος όλων των άλλων, που μπορούμε να κάνουμε για τις γεννήτριες είναι ανάλογα με την εφαρμογή που χρησιμοποιούνται:

- **Αυτόνομες** (μη συνδεδεμένες με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού). Είναι ιδανικές για εξοχικές κατοικίες απομακρυσμένες από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται συσσωρευτές (μπαταρίες) για την αποθήκευση της ενέργειας καθώς και εγκατάσταση μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.
- **Συνδεδεμένες** με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρισμού. Στην εφαρμογή αυτή η παραγόμενη ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Δεν χρειάζεται η αποθήκευση της ενέργειας σε μπαταρίες, απαιτείται όμως η εγκατάσταση μετατροπέα.

### **Κατευθυντήριο σύστημα ή σύστημα προσανατολισμού**

Στις ανεμογεννήτριες στις οποίες ο δρομέας τοποθετείται ανάντη του πύργου το σύστημα προσανατολισμού (yaw control system) είναι αναγκαίο. Στις μικρές όμως ανεμογεννήτριες προσαρμόζεται ουρά (κατευθυντήριο σύστημα) της οποίας το μέγεθος και η θέση επιλέγονται έτσι ώστε κατά την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου να ασκείται ικανή ροπή προσανατολισμού του δρομέα. Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες για τον προσανατολισμό χρησιμοποιείται σερβοκινητήρας που ελέγχεται από ανεμογράφο. Οι ανεμογεννήτριες με τοποθέτηση του δρομέα κατάντη είναι πιο απλές στην κατασκευή διότι δεν απαιτείται σύστημα προσανατολισμού αλλά σε αυτήν την περίπτωση είναι πιο θορυβώδης και οι καταπονήσεις στα πτερύγια είναι μεγάλες λόγω της περιοδικότητας των φορτίσεων [29].

### **Πύργος**

Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει την έλικα και την άτρακτο, η οποία περιέχει το μηχανικό φρένο, το κιβώτιο ταχυτήτων, τη γεννήτρια και το μηχανισμό περιστροφής. Το ύψος του πύργου κατά το παρελθόν κυμαινόταν στο εύρος των 25-55m. Την τελευταία δεκαετία όμως το ύψος αυτό έχει φτάσει να ανέρχεται ακόμα και στα 115m. Για ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους μάλιστα ο πύργος είναι συνήθως ελαφρά ψηλότερος από τη διάμετρο της έλικας. Για ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους όμως ο πύργος είναι λίγες φορές μεγαλύτερος από τη διάμετρο της έλικας, για να αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος.

Οι πύργοι που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας μπορεί να είναι μεταλλικοί (δικτυωτοί ή συνηθέστερα σωληνωτοί), αλλά και από σπλισμένο σκυρόδεμα.

Το κύριο μελέτημα στην κατασκευή του πύργου είναι η δυναμική του συμπεριφορά. Βασικής σημασίας για την επιλογή του πύργου είναι ο προβλεπόμενος τρόπος μεταφοράς και εγκατάστασής του σε συνδυασμό με την όλη συναρμολόγηση και της ανεμογεννήτριας και

την επίδρασή της. Ο πύργος υπολογίζεται ως πακτωμένη δοκός, η οποία υφίσταται σύνθετη στατική και κυρίως δυναμική καταπόνηση. Ο σχεδιασμός του πύργου ώστε να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού έχει βασική σημασία.



**Εικ. 3.29** (α) Σκυροδέτηση θεμελίου πύργου Α/Γ (β) αστοχία πύργου Α/Γ λόγω ισχυρής καταιγίδας [Πηγή: Ontario Wind Resistance: <http://ontario-wind-resistance.org>]

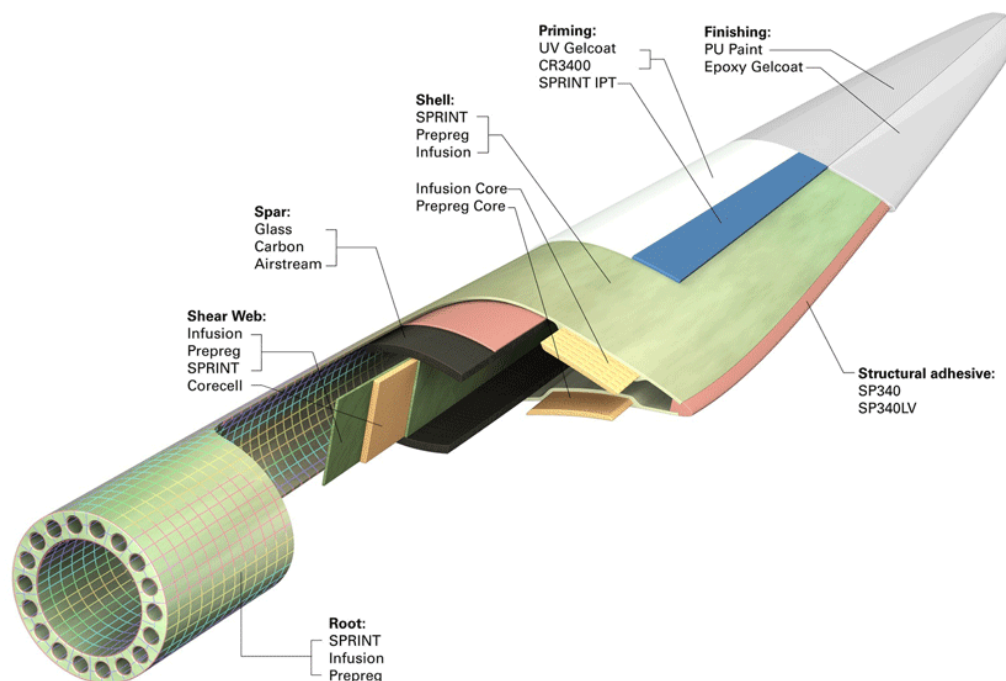
### Σύστημα προστασίας

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι συνήθως εξοπλισμένες με μηχανισμούς για να αποτρέψουν κάποια ζημιά στους υπερβολικά υψηλούς ανέμους. Οι μεγάλες μηχανές μπορούν και έχουν σύνθετες ρυθμίσεις για να διακόψουν την παράγωγή με τις ταχύτητες υψηλού ανέμου. Τα μικρότερα συστήματα αλλάζουν τον προσανατολισμό των λεπίδων έτσι ώστε να παρουσιάζουν μια μικρότερη επιφάνεια στον άνεμο και με αυτόν τον τρόπο μειώνουν την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους. Επίσης υπάρχει και η εναλλακτική δυνατότητα με τη χρησιμοποίηση κάποιου συστήματος μηχανικής πέδησης. Στην περίπτωση του μηχανικού φρένου η τοποθέτηση γίνεται στον άξονα υψηλής αλλά και χαμηλής ταχύτητας περιστροφής και συνεπώς η δύναμη πέδησης είναι σχετικά μικρή. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δισκόφρενο. Το δισκόφρενο απαρτίζεται από ένα δίσκο ενσωματωμένο στον άξονα υψηλών ή χαμηλών στροφών και από ένα αριθμό σιαγόνων τοποθετημένων στην περιφέρεια του, μέσω των οποίων ασκείται πίεση στο δίσκο. Οι επιφάνειες των σιαγόνων που έρχονται σε επαφή με το δίσκο κατά την πέδηση αντικαθίστανται κατά διαστήματα, αναλόγως της φθοράς που έχουν υποστεί. Για μεγαλύτερη ασφάλεια, όταν η φθορά φτάσει σε επικίνδυνα σημεία, ειδικοί αισθητήρες ενημερώνουν το σύστημα έλεγχου της ανεμογεννήτριας και βγαίνει έκτος λειτουργίας έως την αντικατάστασή τους. Στη μηχανική πέδη η ροπή πέδησης είναι πολύ μεγάλη με αποτέλεσμα το σύστημα να είναι βαρύ, ακριβό αλλά και μεγάλων διαστάσεων. Πλεονεκτεί όμως στο γεγονός ότι εάν η τοποθέτηση του φρένου γίνει στις χαμηλές στροφές του άξονα το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών από τα μεταβατικά φορτία της πέδησης και επιπλέον ο δρομέας προστατεύεται από επιτάχυνση σε περίπτωση βλάβης του κιβωτίου πολλαπλασιασμού των στροφών.

### Πτερύγια

Τα πτερύγια αποτελούν ίσως το σημαντικότερο κομμάτι μίας ανεμογεννήτριας, αφού οι γεννήτριες παρουσιάζουν μικρές διαφορές στην απόδοσή τους. Βάσει του μήκους τους καθορίζεται η τάξη μεγέθους της παραγόμενης ισχύος, ενώ ο αριθμός κι ο αεροδυναμικός τους σχεδιασμός καθορίζουν τον αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος και το βέλτιστο λόγο ταχυτήτων ακροπτερυγίου μίας ανεμογεννήτριας. Όπως και στις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, τα πτερύγια των μικρών ανεμογεννητριών είναι στην συντριπτική πλειοψηφία τους τρία, ενώ σύνηθες αριθμός είναι και τα δύο πτερύγια. Μεγαλύτερος αριθμός πτερυγίων συναντάται κυρίως στον κάθετο άξονα ανεμογεννήτριες. Ο σχεδιασμός τους παίζει σπουδαία σημασία στην ικανότητα δέσμευσης της αιολικής ενέργειας κι όσο πιο

αεροδυναμικά σωστός είναι τόσο μεγαλύτερο συντελεστή  $c_p$  εμφανίζουν, με μέγιστες τιμές για τις μικρές ανεμογεννήτριες το 0,45. Υπάρχουν διάφορα μοντέλα σχεδίασης και τρόποι υπολογισμού των διάφορων διαστάσεων των πτερυγίων, όπως το μαθηματικό μοντέλο που έχει αναπτύξει ο Glauert.



**Εικ. 3.30** Τομή και διαστρωμάτωση πτερυγίου ανεμογεννήτριας της κατασκευαστικής εταιρίας Gruit [Πηγή: *Windpower Engineering Development – Building a better turbine blade:* <http://www.windpowerengineering.com>]

Στα πτερύγια όμως πέραν του αριθμού και του σχεδιασμού τους παίζουν σπουδαίο ρόλο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν. Έτσι, θα πρέπει να είναι αρκετά δυνατά και ανθεκτικά ώστε να αντέχουν στις μεγάλες πιέσεις και στα δυναμικά φορτία που τους ασκούνται, δίχως την πιθανότητα να σπάσουν. Η αντοχή αυτή θα πρέπει να έχει και μεγάλη διάρκεια, αφού τα φορτία που δέχονται είναι χρονικά μεταβαλλόμενα, με την έννοια ότι η δύναμη της ώσης που τους ασκείται μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, η οποία μπορεί να παρουσιάσει μεγάλη διακύμανση με σε διάστημα λίγων δευτερολέπτων. Επίσης, θα πρέπει να είναι αρκετά δύσκαμπτα σε περιπτώσεις ακραίων φαινομένων για την αποφυγή της σύγκρουσης με τον πύργο μίας ανεμογεννήτριας. Ιδιαίτερα σκληρά κι αλύγιστα θα πρέπει να είναι και κάποια συγκεκριμένα μέρη των πτερυγίων που δέχονται τις μεγαλύτερες πιέσεις. Για τη μείωση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ισχύος θα πρέπει τα πτερύγια να είναι όσο το δυνατόν ελαφρύτερα, το οποίο βέβαια θα πρέπει να προκύπτει από τη βελτιστοποίηση μεταξύ της δομής, των διαστάσεων και της επιλογής του υλικού κατασκευής τους [31].

Συνεπώς, συνοψίζοντας τις παραπάνω ιδιότητες τα υλικά κατασκευής των πτερυγίων θα πρέπει να διαθέτουν σκληρότητα, ώστε να είναι δύσκαμπτα, μικρή πυκνότητα ώστε να είναι ελαφριά κι αντοχή στη διάρκεια του χρόνου ώστε να μη σπάνε σε μεγάλα φορτία για αρκετά χρόνια. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι φυσικά όπως το ξύλο ή τεχνητά όπως διάφορα σύνθετα υλικά.

Το ξύλο, που χρησιμοποιείται κυρίως σε ιδιοκατασκευές, παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι βρίσκεται στη φύση και δε χρειάζεται πολλά στάδια επεξεργασίας για να το αποκτήσει

κανείς. Υπάρχει δηλαδή το ακατέργαστο φυσικό ξύλο, αλλά και το εμποτισμένο με ρητίνη ξύλο που χρησιμοποιείται αρκετά [32]. Επιπλέον, είναι ένα φυσικό προϊόν το οποίο παρουσιάζει αρκετά καλή σκληρότητα, κάνοντας το πιο κατάλληλο για τις μικρές ανεμογεννήτριες ιδιαίτερα όταν τα ξύλα ενισχύονται με ίνες κυτταρίνης. Για μεγαλύτερα πτερύγια δεν παρουσιάζει τόσο μεγάλη δυσκαμψία, με αποτέλεσμα να μην αναιρούνται οι ελαστικές αποκλίσεις για πιο ογκώδη πτερύγια. Σημαντικό, όμως, χαρακτηριστικό του ξύλου είναι η χαμηλή του πυκνότητα που προσφέρει ελαφρότητα στα πτερύγια, με αποτέλεσμα την καλύτερη επιτάχυνση τους από τον άνεμο. Ακόμη, παρουσιάζει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, αφού δεν καταπονείται ακόμα και σε πολύ μεγάλες πιέσεις κι η εσωτερική του δομή το βοηθά να απορροφά τους κραδασμούς κι άρα να τους αποσβήνει. Το εσωτερικό του αποτελείται από επάλληλα στρώματα ξύλου τα οποία λειτουργούν όπως κι οι σούστες στο σύστημα αναρτήσεων των αυτοκινήτων. Βεβαίως, γίνονται έρευνες και δοκιμές για διαφορετικά είδη ξύλων ως προς τις αντοχές τους [33]. Επιπροσθέτως, η τιμή του είναι πολύ ελκυστική σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά κατασκευής πτερυγίων, ενώ σε χώρες κυρίως του αναπτυσσόμενου κόσμου φαντάζει ως μόνη λύση για την κατασκευή πτερυγίων [34]. Παρόλα αυτά επειδή αποτελεί φυσικό προϊόν είναι δύσκολη η επεξεργασία του, η υψηλή ποιότητα αεροδυναμικού του σχεδιασμού κι η συνεχής παραγωγή του, στοιχεία που απαιτούνται για μία σταθερή κι οικονομική βιομηχανική του εκμετάλλευση [35]. Τέλος, τα ξύλινα πτερύγια είναι ευαίσθητα στην υγρασία και στη βροχή, αλλά με κατάλληλη και συχνή συντήρηση, μπορούν να ανταπεξέλθουν για αρκετά χρόνια, δίχως να παρουσιάσουν ιδιαίτερα προβλήματα.

Τα κυρίαρχα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πτερυγίων και στις μεγάλες, αλλά και στις μικρότερες Α/Γ είναι τα σύνθετα υλικά που βασίζονται σε ενισχυμένα με ίνες πολυμερή. Η ενίσχυση αυτών των υλικών γίνεται με ίνες γυαλιού ή άνθρακα ή και των δύο ταυτόχρονα. Οι ίνες αυτές συνδυάζονται στην κατασκευή των διάφορων στρωμάτων του εσωτερικού των πτερυγίων με ρητίνες που διαμορφώνονται ανάλογα με τη θερμοκρασία είτε γενικότερα με πολυεστέρα και βινυλεστέρα ή εποξειδική ρητίνη. Τα προκύπτοντα υλικά είναι γνωστά ως ενισχυμένα με γυαλί πλαστικά (glass reinforced plastic - GRP) κι ενισχυμένα με άνθρακα πλαστικά (carbonfiber reinforced plastic - CFRP). Αυτά παρουσιάζουν μεγάλη ακαμψία, χαμηλή πυκνότητα, άρα και λίγο βάρος, και πολύ καλή αντοχή στα μεγάλα δυναμικά φορτία [32]. Τα πτερύγια, που κατασκευάζονται από αυτά τα πολυμερή, εμφανίζουν το πλεονέκτημα ότι διαμορφώνουν αεροδυναμικά αποδοτικά σχέδια αφού κατασκευάζονται μέσα σε προσχηματισμένα καλούπια, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερους αεροδυναμικούς συντελεστές.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται πτερύγια από αλουμίνιο, χρώμιο κι άλλα μέταλλα. Παράλληλα, ερευνάται η χρησιμοποίηση νέων βιώσιμων υλικών από βιολογικούς πόρους. Στο πνεύμα της οικολογικής ανάπτυξης, δοκιμάζονται νέα συνθετικά υλικά από φυσικές ίνες, προερχόμενες από ξύλα ή μπαμπού και κορμούς διάφορων φυτών. Κατά αυτόν τον τρόπο, δύναται να προκύψουν πτερύγια με όλες τις προαναφερθείσες ιδιότητες που θα αποτελούνται από βιολογικά πολυμερή, το οποίο φαίνεται ιδανικό για τις μελλοντικές ανάγκες των ανανεώσιμων και της ανακύκλωσης γενικότερα.

	Επιτρεπόμενη τάση (Mpa)	$\rho$	€/Kg
Χάλυβας	110	7,8	5,8 – 8
Άνθρακας (ίνες)	100	1,4	200
Fiberglass	45	2	13
Ξύλο	12	0,55	13

**Εικ. 3.31** Υλικά κατασκευής πτερυγίων και χαρακτηριστικά

[Πηγή: «Μελέτη και κατασκευή ανεμογεννήτριας», Ν. Αντωνίου, Ν. Μπάκας, 2010]



### Σύστημα ελέγχου

Βρίσκεται συνήθως τοποθετημένος στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει κι ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη λειτουργία της.

Να σημειωθεί αρχικά ότι η ταχύτητα του δρομέα πρέπει να ελέγχεται για τρεις λόγους:

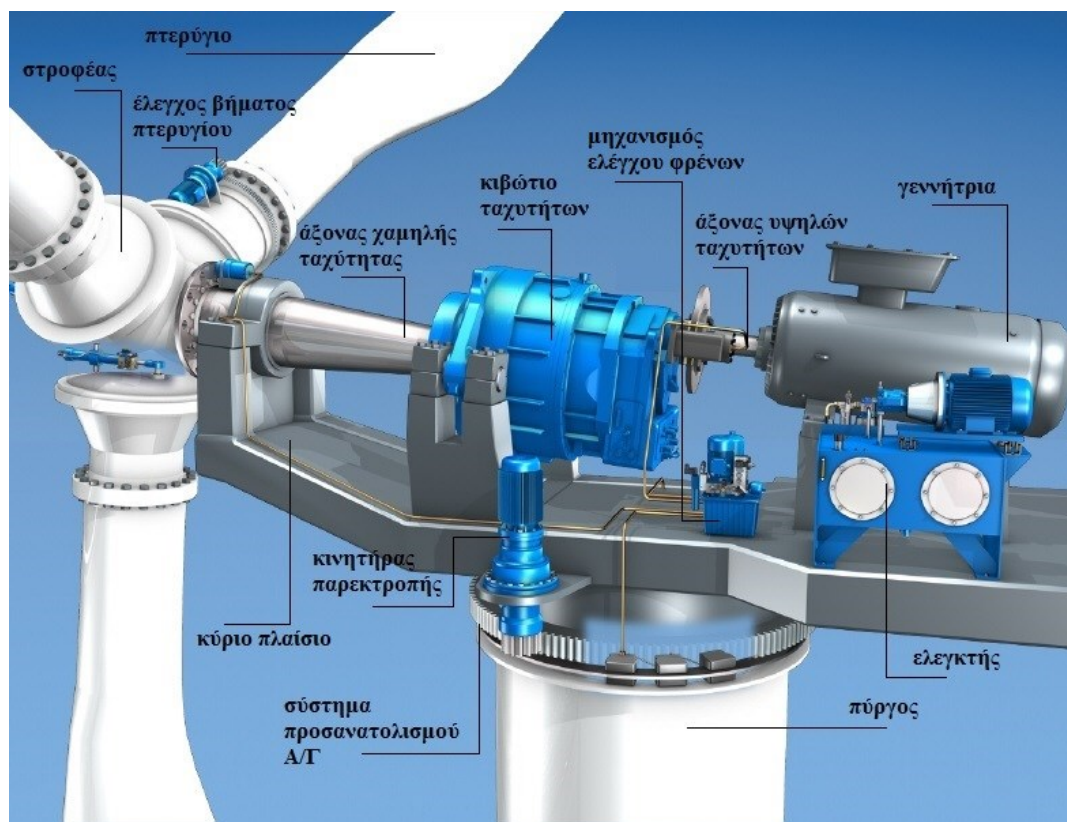
- Για μέγιστη απόληψη ισχύος από τον άνεμο.
- Για προστασία του δρομέα, της γεννήτριας και των ηλεκτρονικών ισχύος από υπερφόρτιση σε συνθήκες υψηλού ανέμου.
- Για προστασία του δρομέα από υπερταχύτητα κατά τη διάρκεια αποσύνδεσης ή άλλου φαινομένου.

Κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των ανεμογεννητριών, ο έλεγχος περιοριζόταν στο μηχανικό σύστημα και κάλυπτε τις βασικές απαιτήσεις (εκκίνηση, οριακή ισχύς, διακοπή λειτουργίας για λόγους ασφαλείας) συνήθως με μηχανικές μόνο διατάξεις. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των μετατροπέων συχνότητας με ηλεκτρονικά ισχύος δίδεται σήμερα η δυνατότητα πραγματοποίησης μεγάλου μέρους του ελέγχου της ανεμογεννήτριας μέσω του ηλεκτρικού συστήματος, οπότε ο έλεγχος της ανεμογεννήτριας γίνεται τελικά πιο ευέλικτος και αξιόπιστος.

Σήμερα οι βασικές λειτουργίες ελέγχου είναι οι ακόλουθες:

- Οι λειτουργίες που αφορούν στην εκκίνηση της ανεμογεννήτριας, όταν η ταχύτητα του ανέμου σταθεροποιηθεί πάνω από ένα όριο, και αντίστοιχα το σταμάτημά της, όταν η ταχύτητα του ανέμου μειωθεί κάτω από ένα όριο.
- Οι λειτουργίες ελέγχου που αποσκοπούν στον προσανατολισμό της ανεμογεννήτριας ώστε το επίπεδο περιστροφής της έλικας να βρίσκεται συνεχώς κάθετα προς την διεύθυνση του ανέμου. Ο έλεγχος αυτός δεν αφορά τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, οι οποίες δεν απαιτούν κανένα σύστημα προσανατολισμού, πράγμα που αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.
- Οι λειτουργίες και τα αντίστοιχα τμήματα ασφάλειας με τα οποία επιτυγχάνεται το σταμάτημα της περιστροφής (πέδηση) της ανεμογεννήτριας και η στροφή των πτερυγίων της έλικας, ώστε να παρουσιάζουν την ελάχιστη αντίσταση όταν η ταχύτητα του ανέμου φτάσει το όριο αντοχής της σε μηχανική καταπόνηση.
- Οι λειτουργίες ελέγχου στροφών της ανεμογεννήτριας, όταν πρόκειται για ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών.
- Οι λειτουργίες ελέγχου για τη μη υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας, όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί μία ορισμένη τιμή. Ο έλεγχος αυτός γίνεται συνήθως στον ανεμοκινητήρα. Έτσι προκύπτουν δύο κατηγορίες ανεμοκινητήρων:
  - Οι ανεμοκινητήρες με έλεγχο του βήματος της έλικας (pitch control). Σε αυτούς επιτυγχάνεται πλήρης σταθερότητα της παραγόμενης ισχύος (ίση με την ονομαστική) για ταχύτητες ανέμου πάνω από ένα όριο.
  - Οι ανεμοκινητήρες με έλεγχο της αεροδυναμικής ανυψώσεως ή αεροδυναμικό έλεγχο (stall control). Η σταθεροποίηση της παραγόμενης ισχύος πραγματοποιείται λόγω αεροδυναμικών φαινομένων και έτσι εμφανίζεται μείωση της παραγόμενης ισχύος για πολύ μεγάλες ταχύτητες του ανέμου. Έναντι του μειονεκτήματος αυτού, παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτούν μηχανισμό μεταβολής του βήματος της έλικας και συνεπώς είναι απλούστερες και στιβαρότερες. Όμως τα πτερύγια υφίστανται μεγαλύτερες δυναμικές καταπονήσεις.

Εκτός από τις δύο αυτές μεθόδους ελέγχου μη υπερβάσεως της ονομαστικής ισχύος, οι οποίες πραγματοποιούνται δια του μηχανικού μέρους, το αντίστοιχο μπορεί να γίνει και μέσω του ηλεκτρικού μέρους όταν εγκαθίσταται μετατροπέας, αν και ο έλεγχος αφορά κυρίως την βελτίωση των χαρακτηριστικών της λειτουργίας (ανεμογεννήτρια μεταβλητών στροφών).



**Εικ. 3.32** Τα μηχανικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα Bosch Rexroth [Πηγή: «Drive & Control Technology for Wind Turbines», Rexroth Bosh Group]

### 3.6.2 Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWTs) [14], [17], [26], [29], [36]

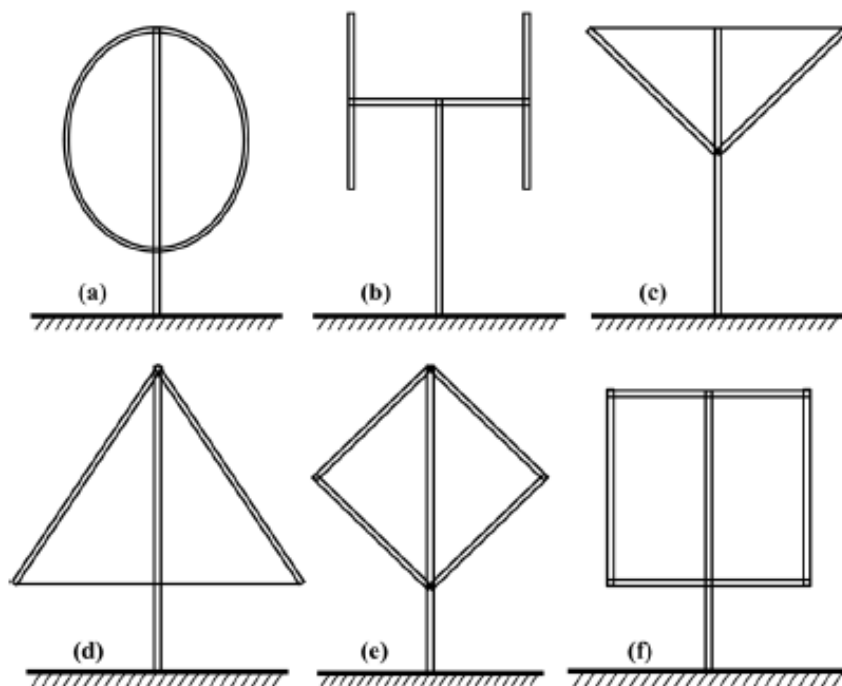
Στα μέσα του 1970, κάνει την εμφάνισή του ένας νέος τύπος ανεμογεννήτριας με δρομέα κατακόρυφου άξονα. Οι αιολικές μηχανές αυτές ονομάζονται καθέτου άξονα και ο αρχικός σχεδιασμός τους είχε ξεκινήσει από το 1931 από τον Darrieus. Οι καθέτου άξονα ανεμογεννήτριες (VAWTs) απαντώνται σε μια ευρεία και ενδιαφέρουσα ποικιλία διαμορφώσεων και περιλαμβάνει μια σειρά από πολύπλοκα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά. Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα όχι μόνο ήταν οι πρώτες ανεμογεννήτριες που κατασκευάστηκαν, αλλά έχουν επίσης αποτελέσει πρακτικές εφαρμογές στις μεγαλύτερες κλίμακας κατασκευές που δημιουργήθηκαν ποτέ. Μπορούν, πλέον, να επιτύχουν συντελεστές απόδοσης,  $C_p, max$ , που είναι συγκρίσιμοι με εκείνους για οριζόντιο άξονα ανεμογεννήτριες (HAWTs) ενώ δυνητικά έχουν και πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των HAWTs.

Στα πλεονεκτήματα αυτά περιλαμβάνεται το γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες αυτές αποτελούν συσκευές εγκάρσιας ροής με αποτέλεσμα να δέχονται ανέμους από οποιαδήποτε κατεύθυνση με συνεπακόλουθο να μην χρειάζονται μηχανισμό προσανατολισμού που να εξασφαλίζει ότι θα είναι ευθυγραμμισμένες με τον άνεμο, όπως συμβαίνει με όλες τις οριζόντιες μηχανές άξονα ενώ επίσης σε συνθήκες μεταβολής του ανέμου, μπορούν να αντεπεξέλθουν καλύτερα. Έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος και είναι σχετικά απλές κατασκευές ενώ το γεγονός ότι η γεννήτρια και οι υπόλοιποι μηχανισμοί βρίσκονται κοντά στο έδαφος διευκολύνουν τη λειτουργία και συντήρησή τους. Αυτό καταργεί την ανάγκη για

μια στιβαρή κατασκευή για να υποστηρίξει το βάρος του εξοπλισμού όπως είναι ο μηχανισμός του κιβωτίου ταχυτήτων, τη γεννήτρια κ.α. Επίσης, δεν υπάρχει ανάγκη για δαχτυλίδια επαφής ή εύκαμπτα καλώδια για τη σύνδεση της γεννήτριας προς το φορτίο, το οποίο αποτελεί σημαντικό προτέρημα για μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριες. Τα πτερύγια τους είναι καμπύλα και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης όπως και το σύστημα ελέγχου είναι παρόμοιο με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, με μονή διαφορά, για το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, ότι τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα σε κατακόρυφη θέση. Ο δρομέας στηρίζεται σε κατάλληλο έδρανο στη βάση του, το οποίο ακόμα και σε σταθερή ταχύτητα ανέμου καταπονείτε από εναλλασσόμενα φορτία. Επίσης με τη βοήθεια εντατήρων η μηχανή διατηρείται στην κατακόρυφο, οι όποιοι ενώνουν τη μηχανή με το έδαφος και συγκεκριμένα συνδέονται στην κορυφή του καθέτου άξονα της ανεμογεννήτριας.

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους που τις καθιστούν εμπορικά μη ανταγωνιστικές, είναι ότι οι περισσότερες για να ξεκινήσουν χρειάζονται συνήθως υποβοήθηση, ενώ σε περιπτώσεις δυνατού ανέμου αν δεν ελεγχθούν σωστά, υπάρχει ο κίνδυνος της καταστροφής τους. Επίσης, ο δρομέας τους βρίσκεται πιο κοντά στο έδαφος, όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι μικρότερες σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα οι οποίες είναι σε θέση να εκμεταλλεύονται μεγαλύτερες ταχύτητες του ανέμου όντας σε μεγαλύτερο ύψος. Η απόδοσή τους είναι κατά μέσο όρο μικρότερη συγκρινόμενη με εκείνη των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα αφού σε κάθε περιστροφή του δρομέα, τα πτερύγια μπορεί να συναντούν αεροδυναμικά κενές περιοχές, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης του όλου συστήματος. Ενώ οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν απόδοση που πλησιάζει το 50%, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν στην καλύτερη των περιπτώσεων απόδοση λίγο μεγαλύτερη από 30%. Από πρακτικής πλευράς, οι μηχανές αυτού του είδους χρειάζονται καλώδια για να τις υποβαστούν, γεγονός που δεν είναι πρακτικό για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε καλλιεργήσιμες περιοχές.

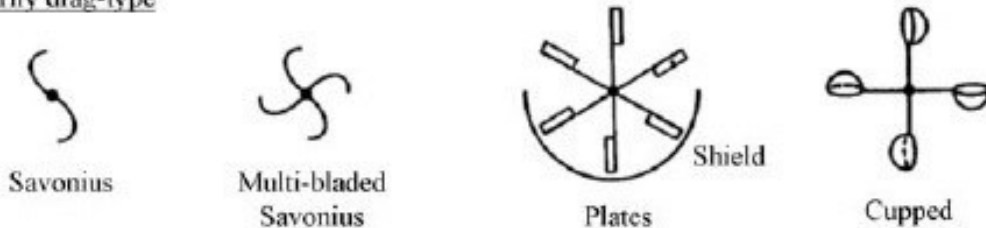
Τυπικά σχέδια περιλαμβάνουν τον πλήρη Darrieus, το "H", το "V" (ή «Y»), το "Δέλτα", το "Diamond" και το "Gyromill" διαμορφώσεις, το σύνολο των οποίων μπορεί να φανεί στο παρακάτω σχήμα.



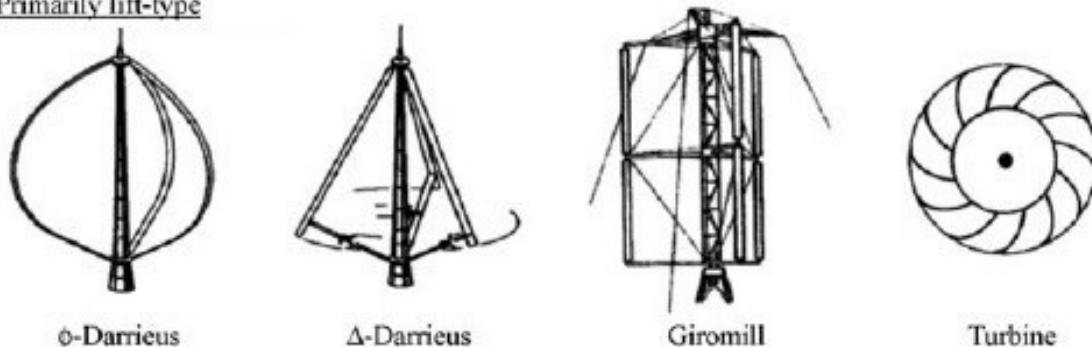
**Εικ. 3.33** Βασικές διαμορφώσεις ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (a) Full Darrieus, (b) "H", (c) "V", (d) "Δ", (e) "Diamond" και (f) "Gyromill" [Πηγή: «A Retrospective of VAWT Technology» Herbert J. Sutherland, Dale E. Berg, and Thomas D. Ashwill, 2012]

Αλλά σχέδια που χρησιμοποιούνται, και αποτελούν τα πλέον διαδεδομένα χρησιμοποιούμενα μοντέλα, ή έχουν προταθεί για μελλοντική εξέλιξη καθώς και κατηγοριοποίηση των ανεμογεννητριών αναλόγως του τρόπου λειτουργίας τους ως προς τον άνεμο φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.

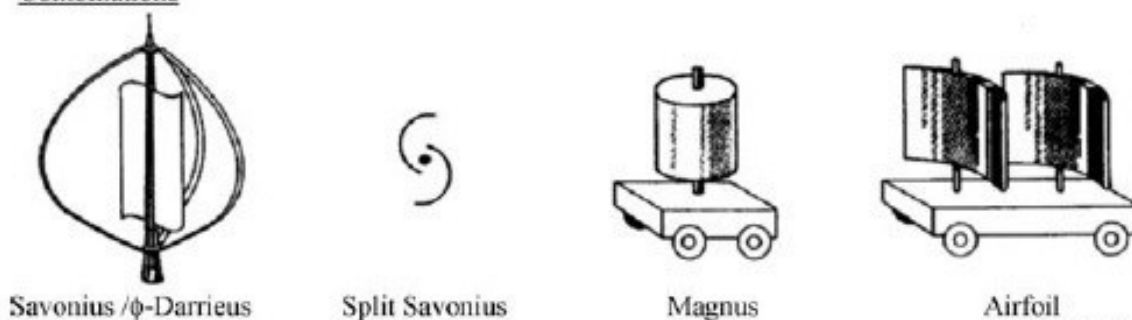
Primarily drag-type



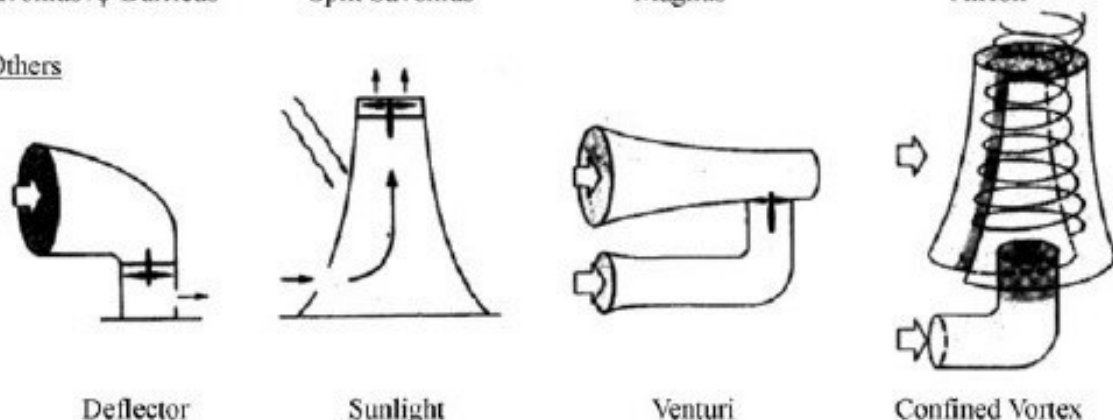
Primarily lift-type



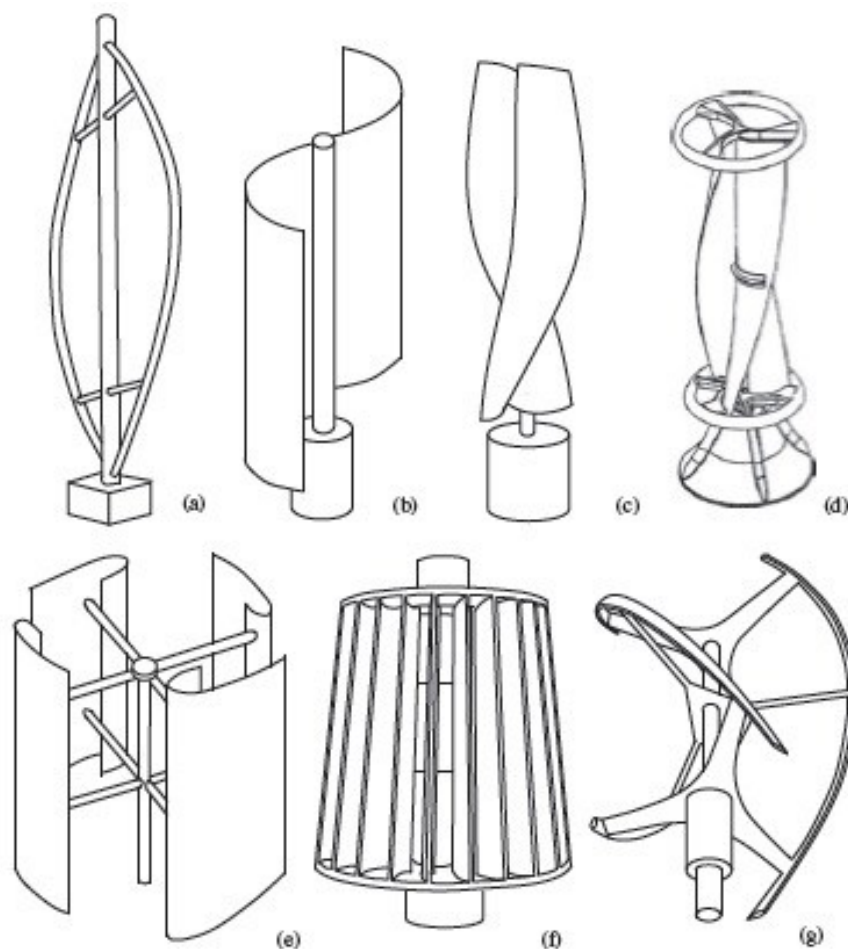
Combinations



Others



**Εικ. 3.34** Διαμορφώσεις ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα  
 [Πηγή: «Wind Machines 2nd Edition», F. R. Eldridge, 1980]



**Εικ. 3.35** Διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών καθέτου άξονα (a) Darrius, (b) Savonius, (c) Solarwind™, (d) Helical (e) Noguchi, (f) Maglev, (g) Cochrane  
[Πηγή: «Wind Power Generation and Wind Turbine Design», Wei Tong, 2010]

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ξανά πως και οι δύο τύποι των ανεμογεννητριών έχουν γενικά τα ίδια συστατικά μέρη τα όποια είναι [26]:

- Ο δρομέας που αποτελείται από τα πτερύγια και τον κόμβο που τα υποστηρίζει
- Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης που περιλαμβάνει τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο ταχυτήτων (στις μεγάλες ανεμογεννήτριες), το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στην σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας.
- Η άτρακτος και το βασικό πλαίσιο το οποίο περιλαμβάνει το μηχανισμό της ανεμογεννήτριας με την πλακά εδρασης καθώς και το σύστημα προσανατολισμού
- Ο πύργος και η θεμελίωση
- Ο πίνακας ελέγχου που περιλαμβάνει τα ηλεκτρολογικά μέρη όπως καλώδια, διακόπτες, μετασχηματιστές και ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

Το μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας μετράται ανάλογα την περιοχή σάρωσης ή την περιοχή επιφάνειας που σαρώνεται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια. Η περιοχή σάρωσης του ρότορα υπολογίζεται από την διάμετρο του ρότορα με:  $S = 1,000 D^2$  για τυπικές VAWTs με λόγο διαστάσεων (ύψος /διάμετρος) του 1,5. Οι ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα γενικώς ταξινομούνται σύμφωνα με τις αεροδυναμικές και μηχανικές ιδιότητες, τις επιφάνειες άνωσης ή την κίνηση των πτερυγίων του ρότορα, γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα κατά μήκος μιας διαδρομής σε ένα οριζόντιο επίπεδο. Σήμερα, υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι πιο διαδεδομένες και εμπορικά επιτυχείς [17]:

- ο αρθρωτός με ίσια πτερύγια Giromill
- ο Savonius
- ο μεταβλητής γεωμετρίας Musgrove
- ο Darrieus

Οι κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες (VAWTs) έχουν μελετηθεί από διάφορους ερευνητές με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών ανάλυσης. Κοινά παραδείγματα αυτών των καθέτων αξόνων ανεμογεννήτριες είναι οι Savonius και Νταριέ ανεμογεννήτριες. Το 1968, οι South και Rangī, από το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας του Καναδά [37], επανέφερε την ιδέα του ρότορα Darrieus. Από τότε, πολλά αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης της αεροδυναμικής απόδοσης αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας έχουν διατυπωθεί.

Στη συνέχεια παραθέτουμε συνοπτικά τα πλεονεκτήματα τις χρήσεις ανεμογεννητριών καθέτου άξονα:

- Αντιμετωπίζουν πάντα κατά μέτωπο τον άνεμο - δεν υπάρχει ανάγκη για μηχανισμό διεύθυνσης.
- Έχουν μεγαλύτερη επιφάνεια σάρωσης για τη σύλληψη της ενέργειας – η όποια μπορεί να είναι πολλές φορές μεγαλύτερη από άλλου τύπου γεννήτριες.
- Είναι πιο αποτελεσματικές σε θυελλώδεις ανέμους – αντιμετωπίζουν αποτελεσματικά τις ριπές αέρα.
- Έχουν τη δυνατότητα εγκατάστασης σε μεγάλη ποικιλία θέσεων - στις στέγες, κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων, σε χώρους στάθμευσης.
- Δεν σκοτώνουν πουλιά –είναι εξαιρετικά ορατή.
- Μπορούν να κλιμακωθούν πιο εύκολα - από mW σε MW.
- Είναι σημαντικά λιγότερο δαπανηρές για την κατασκευή - εγγενώς απλούστερες κατασκευές.
- Έχουν χαμηλό χρόνο διακοπής συντήρησης – οι μηχανισμοί βρίσκονται κοντά στο επίπεδο του εδάφους- εύκολη επισκόπηση της λειτουργίας.
- Παράγουν λιγότερο θόρυβο - χαμηλή ταχύτητα σημαίνει λιγότερο θόρυβο.

Συμπληρωματικά οι κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες δρουν ευεργετικά στην αναζήτηση καθαρών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως συνοψίζεται παρακάτω:

- Κόστος: Μεγάλες συστοιχίες VAWTs μπορούν να εγκατασταθούν σε πολύ λιγότερη γη, με πολύ λιγότερο κόστος, συχνά με τη χρήση τοπικών διαθέσιμων υλικών και δεξιοτήτων. Αυτό έχει όλο και μεγαλύτερη σημασία ως εναλλακτική λύση για την αποφυγή κοπής των πολύτιμων και αναντικατάστατων δασών για την καλλιέργεια φυτών για την παραγωγή αιθανόλης.
- Αξιοπιστία: τς.

### Ανεμογεννήτριες τύπου Savonius [17], [26], [36]

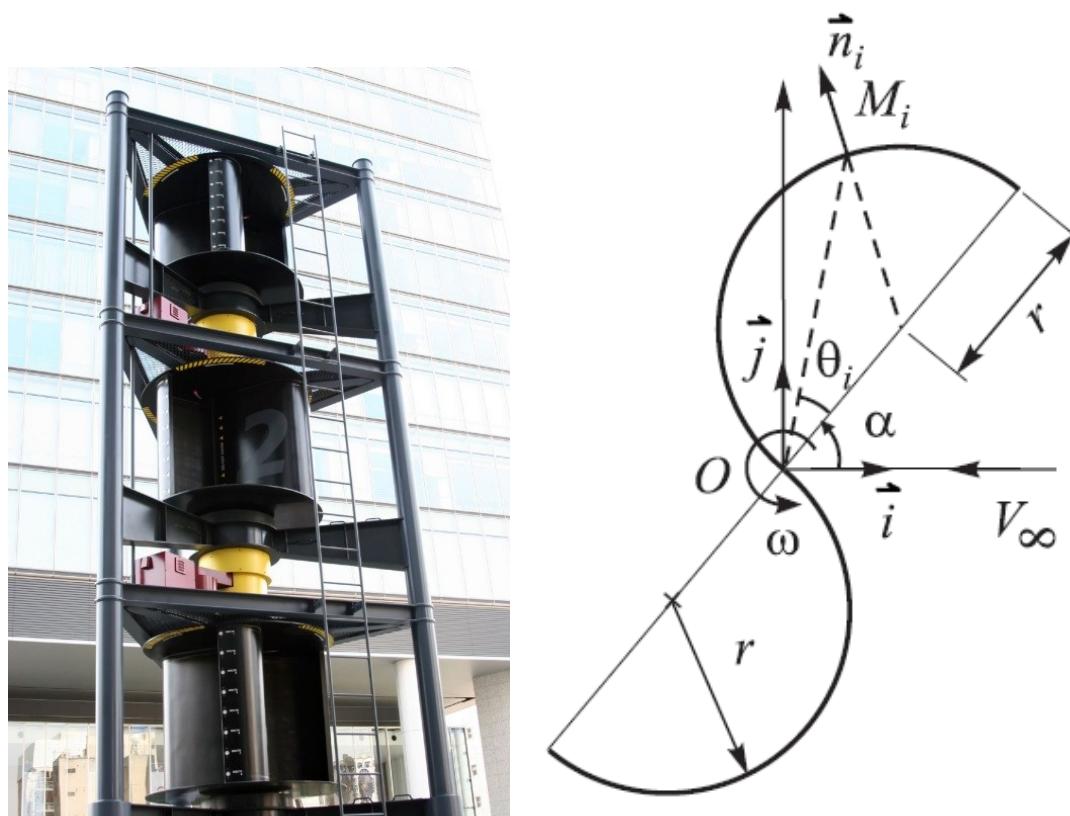
Οι ανεμογεννήτριες τύπου Savonius είναι καθέτου άξονα και χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της αιολικής ενεργείας σε ροπή στρέψης πάνω σε ένα περιστρεφόμενο άξονα. Εφευρέθηκαν από το μηχανικό Sigurd J. Savonius το 1924. Οι αεροκινητήρες Savonius είναι κατασκευές σχήματος 'S' (σε κάτοψη) και εμφανίζονται ως ένας κατακόρυφος κύλινδρος κομμένος από την κορυφή προς τον πυθμένα, οι οποίες εκμεταλλεύονται κυρίως την δύναμη της ιξώδους αντίστασης, ενώ στην παραγόμενη ισχύ μπορεί να συνεισφέρουν και κάποιες δυνάμεις άνωσης. Η περιστροφή του αεροκινητήρα Savonius οφείλεται κυρίως στη διαφορά πίεσης που ασκείται στη κοίλη και κυρτή επιφάνεια των 2 πτερυγίων, καθώς επίσης και στο γεγονός ότι ανάμεσα στα 2 πτερύγια υπάρχει ένα διάκενο το οποίο επιτρέπει στον αέρα να

επιστρέφει και να αυξάνει την πίεση στο πίσω μέρος του κυρτού πτερυγίου, αυξάνοντας έτσι την ροπή που αναπτύσσεται γύρω από τον άξονα της μηχανής.

Ο ρότορας Savonius έχει μελετηθεί με δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα από αρκετούς ερευνητές. Σε γενικές γραμμές ρότορες Savonius μπορούν να φθάσουν κατ'ανώτατο όριο συντελεστή ισχύος 30% ο οποίος λαμβάνεται σε πολύ χαμηλή περιστροφή ενώ σε υψηλότερες τιμές περιστροφής η απόδοση του στροφείου μειώνεται δραματικά. Επιπλέον, μια αύξηση του συντελεστή ισχύος, δεν θα ήταν αποτελεσματική σεβόμενη το λόγο βάρος / μονάδα της εξόδου ισχύος, δεδομένου ότι θα απαιτούνταν 30 φορές η επιφάνεια μιας συμβατικής ανεμογεννήτριας η οποία θα απέδιδε την ίδια ισχύ για το λόγο αυτό, αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν για μετρήσεις των καιρικών συνθηκών και για άντληση νερού. Έχουν το πλεονέκτημα της ευκολίας κατασκευής και του μικρού οικονομικού κόστους, ενώ σε σύγκριση με τις μηχανές Darrieus, πλεονεκτούν στο γεγονός ότι δεν χρειάζονται υποβοήθηση για να ξεκινήσουν γιατί έχουν μεγάλη ροπή εκκίνησης. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται στη χρήση τους η μικρή αντοχή που έχουν σε μεγάλες ταχύτητες του ανέμου και το γεγονός ότι η στιβαρότητά τους πλησιάζει την μονάδα, πράγμα που σημαίνει ότι είναι βαριές κατασκευές σε σύγκριση με την ισχύ που παράγουν. Η ισχύς που παράγουν είναι κάτω των 100W γι' αυτό και η χρήση τους προωθείται κυρίως για οικιακούς σκοπούς και για παραγωγή ενέργειας σε υποανάπτυκτες χώρες και απομακρυσμένες περιοχές ή ακόμη για να τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια σηματοδότες που είναι τοποθετημένες στον ωκεανό και οι οποίες χρειάζονται μικρά ποσά ενέργειας για να λειτουργήσουν όπως επίσης και σε οροφές λεωφορείων και μικρών φορτηγών για εξαιρεισμό.



**Εικ. 3.36** Εφαρμογή ανεμογεννήτριας τύπου Savonius σε οροφή κατοικίας  
[Πηγή: <http://www.zeroenergybuildings.org>]



**Εικ. 3.37** (α) Σύστημα με πολλαπλές ανεμογεννήτριες τύπου Savonius

[Πηγή: <http://www.zeroenergybuildings.org>]

(β) Σχήμα υπολογισμού των δυνάμεων που δρουν σε μια Α/Γ τύπου Savonius

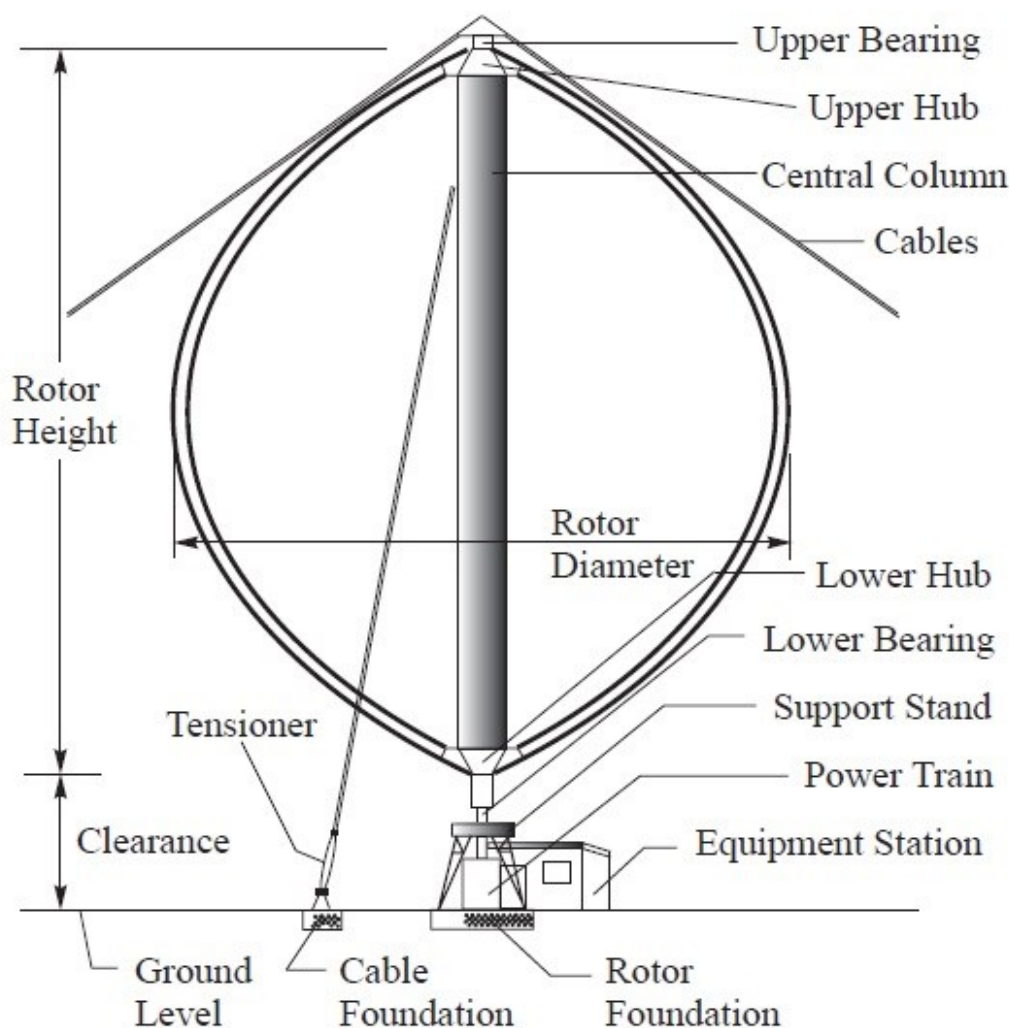
[Πηγή: «Wind Turbine Design—With Emphasis on Darrieus Concept», I. Paraschivoiu, 2002]

### Ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus [17], [29], [36]

Όπως έχουμε αναφέρει ο σχεδιασμός αυτού του είδους γεννήτριας έγινε από τον Γάλλο αεροναυπηγό George Jean Marie Darrieus το 1931, ενώ είχε εκτεταμένη εφαρμογή στον Καναδά μέχρι τη δεκαετία του 1970. Η έρευνα πάνω στην εξέλιξη του αρχικού αυτού ανεμοκινητήρα επαναξεκίνησε κατά τα μέσα της δεκαετίας του 70, με πρωτοβουλία του Εθνικού Συμβουλίου Ερευνών του Καναδά, ενώ σημαντικό μέρος ερευνών καλύπτεται από τα εργαστήρια Sandia των Η.Π.Α., στα πλαίσια του εθνικού προγράμματος αιολικής ενέργειας.

Οι ανεμοκινητήρες αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται από καμπτόμενα πτερύγια τα οποία λειτουργούν με τη χρήση των δυνάμεων άνωσης που εξασκούνται σε αυτά. Το πλήθος των πτερυγίων ποικίλει από ένα, δυο, τρία ή και περισσότερα σε κάποιες περιπτώσεις και μπορεί να έχουν διαφορετικές μορφές ανάλογα με τις παραλλαγές του δρομέα. Υπάρχουν ευθύγραμμα κατακόρυφα πτερύγια, στα όποια όμως δημιουργούνται μεγάλες καμπτικές τάσεις λόγω διαφορετικών φυγόκεντρων δυνάμεων εξαιτίας της περιστροφής. Αυτές οι καμπτικές τάσεις στα πτερύγια μειώνονται σημαντικά εάν έχουν τη μορφή του σχήματος που αποκαλείται “σχοινοειδής”. Αυτή είναι η μορφή που θα έπαιρνε ένα χαλαρό σχοινί κατά την περιστροφή του ή ένα τελείως εύκαμπτο καλώδιο σταθερού μήκους με τα άκρα του προσαρμοσμένα στον άξονα περιστροφής. Λόγω αυτού του σχήματος τα πτερύγια καταπονούνται με σταθερές εφελκυστικές τάσεις με αποτέλεσμα μικρότερες κατασκευαστικές απαιτήσεις των πτερυγίων και μικρότερη κόπωση του υλικού τους σε δυναμικές τάσεις.





**Εικ. 3.38** Συστατικά μέρη ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus

[Πηγή: «Wind Turbine Design—With Emphasis on Darrieus Concept», I. Paraschivoiu, 2002]

Τα άκρα των πτερυγίων του δρομέα είναι πακτωμένα στον άξονα περιστροφής και ο λόγος του ύψους προς τη διάμετρο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1 και 1.5. Η ακτίνα του δρομέα καθορίζεται ως η μέγιστη απόσταση των πτερυγίων από τον άξονα της μηχανής. Με δεδομένο το σχήμα των πτερυγίων, αυτό που επιδιώκεται είναι ο δρομέας να σαρώνει ένα ρεύμα αέρα μέγιστης επιφάνειας, οπότε αντιστοίχως επιδιώκεται το ύψος του δρομέα να ισούται με τη διάμετρό του. Από την άλλη όμως πλευρά τεχνικοοικονομικοί λόγοι επιβάλλουν μεγαλύτερες τιμές του λόγου ύψους-διαμέτρου.

Τα πτερύγια του δρομέα Darrieus δεν παρέχουν τη δυνατότητα ρύθμισης της γωνίας προσβολής και κατά συνέπεια βελτίωσης της αεροδυναμικής τους συμπεριφοράς. Τα πτερύγια συνήθως τοποθετούνται σε διάταξη 180 ή 120 αντίστοιχα ενώ η επιλογή του πλήθους τους πρέπει να γίνεται με τη δέουσα προσοχή καθώς υπάρχουν περιπτώσεις όπως αυτή του διπτέρυγου δρομέα που παρουσιάζει έντονη κυκλική μεταβολή της αεροδυναμικής του ροπής με έντονες αποκλίσεις από τη μέση τιμή (που μπορούν να φθάσουν μέχρι και το 100%). Αντιθέτως η αεροδυναμική ροπή του τριπτέρυγου δρομέα είναι σχετικά σταθερή σε ολόκληρη σχεδόν την περιοχή λειτουργίας του. Επίσης η αεροδυναμική απόδοση του τριπτέρυγου δρομέα είναι κατά κανόνα καλύτερη αυτής του διπτέρυγου, με τον τελευταίο όμως να είναι απλούστερος στην κατασκευή γεγονός που συμβάλλει στη μείωση του κόστους.



**Εικ. 3.39** (α) Εφαρμογή ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus (β) συνδυασμός Darrieus / Savonius  
[Πηγή: <http://www.zeroenergybuildings.org>]

Αυτός ο τύπος θεωρητικά είναι τόσο αποδοτικός όσο και οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα του αέρα είναι συνεχής, αλλά και πρακτικά αυτή η απόδοση σπάνια επιτυγχάνεται εξαιτίας φυσικών τάσεων και περιορισμών που επιβάλλονται πρακτικά από το σχεδιασμό.

Στις αρχικές εκδόσεις του Darrieus, τα πτερύγια κανονίζονταν έτσι ώστε να είναι συμμετρικά και να έχουν μηδενική γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η γωνία να καθορίζεται σε σχέση με τη δομή για την οποία τα πτερύγια είναι τοποθετημένα. Αυτή η ρύθμιση είναι εξίσου αποτελεσματική ανεξαρτήτως ποιας κατεύθυνσης ο άνεμος πνέει. Τα πτερύγια που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι συμμετρικής διατομής, σταθερής χορδής χωρίς συστροφή. Λειτουργούν σε μεγάλες τιμές, 4 έως 10, της παραμέτρου  $\lambda$ , με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν υψηλή αεροδυναμική απόδοση. Ο πλέον συνήθης τρόπος κατασκευής πτερυγίων είναι η εξέλαση ειδικών κραμάτων αλουμινίου, ενώ η σχοινοειδής μορφή προσδίδεται ακολούθως με κάμψη των ευθύγραμμων τμημάτων.

Οι αιολικές μηχανές τύπου Darrieus κατά την έναρξη της λειτουργίας τους δεν αναπτύσσουν ικανοποιητική ροπή εκκίνησης, γι αυτό το λόγο συνήθως απαιτείται μια βοηθητική πηγή ενέργειας για την έναρξη λειτουργίας τους. Έτσι χρησιμοποιείται ως βοηθητικό σύστημα με τη μορφή είτε ηλεκτρικής γεννήτριας ως κινητήρας είτε τοποθετούνται ένας ή δυο ομοαξονικοί δρομείς τύπου Savonius, οι οποίοι αναπτύσσουν υψηλή αεροδυναμική ροπή κατά την εκκίνηση. Έχει αποδειχθεί ότι η συνδυασμένη λειτουργία δεν επηρεάζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας τύπου Darrieus με μοναδικό πρόβλημα αυτής της προσέγγισης το αυξημένο βάρος.

Στις μηχανές αυτές η πέδηση γίνεται με αεροδυναμικά φρένα όπως και στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα, δηλαδή μετά από ένα ορισμένο όριο στροφών, λόγω της φυγόκεντρης δύναμης, απελευθερώνεται μια επίπεδη πλακά ή ένα τμήμα του δρομέα σε κάθετη θέση, αυξάνοντας σημαντικά την αεροδυναμική αντίσταση της πτερωτής με αποτέλεσμα την επιβράδυνσή της.

Το μηχανικό σύστημα κίνησης περιλαμβάνει τον άξονα του δρομέα και την έδραση του, το κιβώτιο ταχυτήτων, τους ελαστικούς συνδέσμους για την απόσβεση των στρεπτικών ταλαντώσεων, το σύστημα πέδησης, την ηλεκτρική γεννήτρια με τη βάση και το κέλυφος προστασίας των μηχανισμών αυτών. Οι επιμέρους περιγραφές των τιμημάτων αυτών δε διαφέρουν με αυτές του οριζοντίου άξονα.

Η κύρια διαφορά είναι στα έδρανα στηρίξεως των ανεμοκινητήρων καθέτου άξονα σε σχέση με αυτά του οριζοντίου άξονα. Πράγματι και εδώ ο άξονας της μηχανής στηρίζεται σε δυο έδρανα. Το άνω έδρανο παραλαμβάνει κυρίως τις ακτινικές δυνάμεις που αναπτύσσονται επί των πτερυγίων, ενώ το κάτω μέρος παραλαμβάνει μεγάλες ωστικές δυνάμεις συμπεριλαμβανομένου και του βάρους του δρομέα. Για τους λόγους αυτούς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό τους ενώ ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ειδικά κατασκευασμένα ωστικά υδροδυναμικά έδρανα, τα όποια λειτουργούν με υδραυλική σχέση και παρουσιάζουν ελάχιστη αντίσταση τριβής, στη θέση των συνηθισμένων ένσφαιρων ωστικών εδράνων.

#### Ανεμογεννήτριες τύπου Musgrove [17], [28]

Η ονομασία Darricus συνδέεται συνήθως με τις ανεμογεννήτριες οι οποίες εφαρμόζουν κυρτά πτερύγια, ωστόσο ένα μεγάλο μέρος των εργασιών κατά τις τρεις τελευταίες δεκαετίες έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και ανάλυση του ευθέως πτερυγίου, η οποία είναι μερικές φορές γνωστή ως H-VAWT από το σχήμα των λεπίδων και την υποστήριξη μέσω ορθοστατών. Ένας από τους βασικούς ερευνητές στη δεκαετία του 1970 ήταν ο Peter Musgrove ο οποίος πέρασε πάνω από 20 χρόνια εργασίας για ανεμογεννήτριες τέτοιου τύπου από όπου και η ονομασία τους σήμερα.

Ο Musgrove εύστοχα παρατήρησε ότι μία από τις βασικές προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνολογία των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα ήταν ο έλεγχος της ισχύος εξόδου της συσκευής σε υψηλές ταχύτητες ανέμου και ότι ο ενεργός έλεγχος του βήματος των πτερυγίων θα οδηγούσε σε ένα άσκοπα πολύπλοκο μηχανικό σύστημα για μεγάλες συσκευές. Οι έρευνες του επικεντρώθηκαν σε ένα σύστημα (γνωστό ως furling) στο οποίο τα ίσια πτερύγια θα μπορούσαν να είναι αρθρωμένα στο μέσο σημείο τους έτσι ώστε η γωνία των πτερυγίων, σε σχέση με τον άξονα του στροφείου, να μπορούν να ρυθμίζονται με μηχανικούς ενεργοποιητές. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα που περιγράφεται ανωτέρω μπορεί δυνητικά να οδηγήσει σε υψηλά παροδικά κατακόρυφα φορτία εξαιτίας των στροβιλισμών, τα οποία με τη σειρά τους να οδηγήσουν σε αποτυχία των ακτινικών βραχιόνων στήριξης. Περαιτέρω έρευνες κατέδειξαν πως η χρήση ενός τέτοιου συστήματος ήταν περιττή εξαιτίας της εγγενούς ικανότητας των ίσιων πτερυγίων να αποφεύγουν την ανάπτυξη υπερβολικής ταχύτητας με επακόλουθο η υπερβολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να καθυστερείται σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Εν κατακλείδι οι έρευνες του Musgrove αποτέλεσαν το αρχικό υπόβαθρο για την επιπλέον ανάπτυξη και εξέλιξη αυτού του είδους ανεμογεννητριών, οι οποίες έχουν καταλήξει στη σημερινή μορφή.

#### Ανεμογεννήτριες τύπου Giromill [17]

Μία συνέπεια της υιοθέτησης κατακόρυφου άξονα ανεμογεννήτρια είναι ότι η φαινόμενη ταχύτητα του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία σε μια λεπίδα θα αλλάζει καθόλη τη διάρκεια περιστροφής του δρομέα. Για παράδειγμα, όταν η λεπίδα κινείται ανάντη (δηλαδή όταν η γωνία αζιμούθιου είναι μεταξύ  $0^\circ < \beta < 180^\circ$ ) η ταχύτητα του αέρα για τη συγκεκριμένη πτερυγιο είναι μεγαλύτερη από την εφαπτομενική ταχύτητα πτερυγίου σε ως προς ένα στατικό πλαίσιο αναφοράς, αντίθετως, όταν η λεπίδα κινείται προς τα κάτω ( $180^\circ < \beta < 360^\circ$ ) η προκύπτουσα ταχύτητα αέρα είναι γενικά μικρότερη από την εφαπτομενική ταχύτητα του πτερυγίου. Αυτό κατ' επέκταση σημαίνει ότι η γωνία προσβολής του πτερυγίου αλλάζει συνεχώς και γενικά δεν είναι οι βέλτιστες σε όλη την περιστροφή περί τον άξονα του της γεννήτριας.

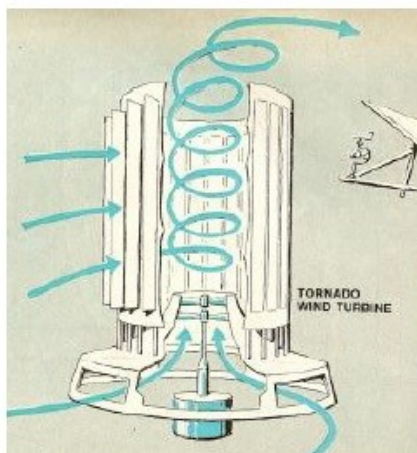
Για τη βελτίωση αυτής της κατάστασης, διάφορα μέσα έχουν επινοηθεί για τη βελτιστοποίηση της γωνία βήματος του πτερυγίου (δηλαδή η γωνία χορδής σε σχέση με μία εφαπτομένη προς την διαδρομή του πτερυγίου) ως συνάρτηση της γωνίας αζιμούθιου,  $\beta$ . Πολλά συστήματα έχουν επινοηθεί για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιώντας διάφορες μεθοδολογίες όπως μηχανικών μηχανισμών με μοχλούς ή μέσω αεροδυναμικών μηχανισμών. Οι ανεμογεννήτριες που επιδιώκουν να βελτιστοποιηθεί η γωνία βήματος πτερυγίου είναι γνωστές ως Giromills, αν και ορισμένοι συγγραφείς αναφέρονται επίσης σε αυτά τα συστήματα ως cycloturbines.



**Εικ. 3.40** Ανεμογεννήτριες τύπου Giromill [Πηγή: <http://www.2020solar.com>]

### Ανεμογεννήτριες τύπου Tornado [17]

Τέλος αξίζει να αναφέρουμε τις αιολικές μηχανές “τεχνητού ανεμοστρόβιλου” ή tornado, όπου ο αέρας εισρέει σε ένα κατακόρυφο κυλινδρικό μηχανισμό διαμέσου ενός συστήματος από κατακόρυφες σχισμές, με τη χρήση κινητών βανών που προσδίδουν περιστροφική κίνηση στον αέρα. Ο δημιουργούμενος ανεμοστρόβιλος έχει στον πυρήνα του χαμηλή πίεση, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ισχυρού ρεύματος αέρα μεταξύ του περιβάλλοντος και του πυρήνα του στροβίλου, το οποίο εισερχόμενο από τη βάση του κυλίνδρου, θέτει σε κίνηση ένα δρομέα κατακόρυφου άξονα. Η διάταξη αυτή αποτελεί πρόσφατη επινοήση και προβάλλεται σαν ένας αξιόλογος τρόπος για να κατασκευαστούν μονάδες της τάξεως των 10 έως 1000 MW. Για το λόγο αυτό και δεδομένου ότι οι υπόλοιπες αιολικές μηχανές εμφανίζουν κατασκευαστικά προβλήματα για ισχύς άνω των 4 MW, έχει υπάρξει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον.



**Εικ. 3.41** Ανεμογεννήτρια τύπου tornado

[Πηγή: «Μελέτη και κατασκευή ανεμογεννήτριας», Ν. Αντωνίου, Ν. Μπάκας Πάτρα, 2010]

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές ακόμη εφαρμογές διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών καθέτου άξονα:



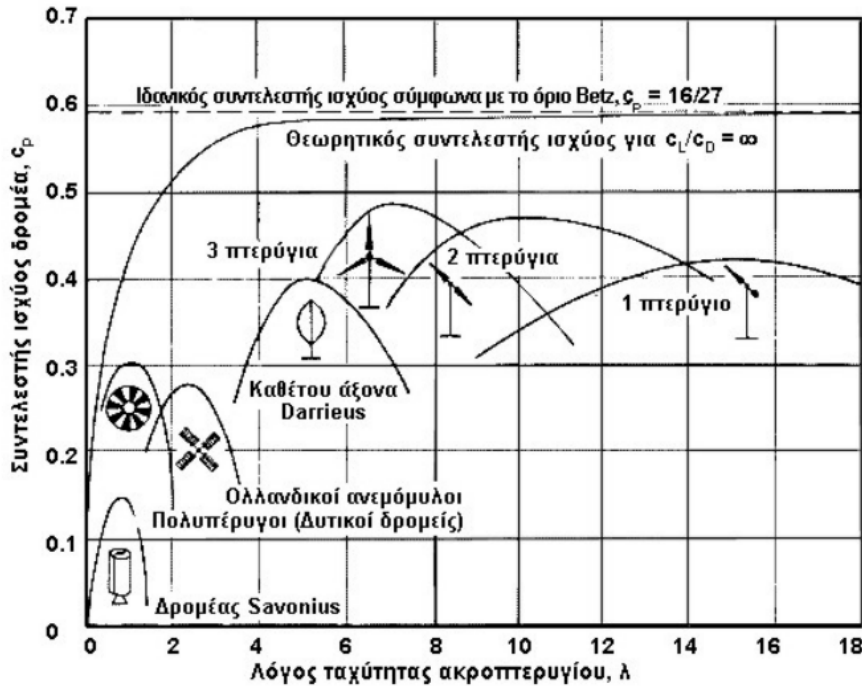
**Εικ. 3.42** (α) Ελικοειδής Α/Γ Quiet Revolution [Πηγή: <http://www.zeroenergybuildings.org>]  
(β) Α/Γ τύπου Savonius της Helix [Πηγή: <http://www.helixwind.com>]



**Εικ.3.43** (α) Ανεμογεννήτρια Turby [Πηγή: [http://en.wikipedia.org/wiki/Turby\\_wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Turby_wind_turbine)]  
(β) Ανεμογεννήτρια Windspire [<http://www.windspireenergy.com>]

### 3.7 ΤΥΠΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΩΝ ΠΤΕΡΥΓΙΩΝ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα συναντώνται με ένα, δύο ή τρία πτερύγια, που αποτελούν τη φτερωτή ή αλλιώς την έλικα. Η επιλογή συνήθως των τριών πτερυγίων δεν είναι αυθαίρετη, αλλά αποτελεί συνδυασμό διάφορων παραγόντων. Βασικό κριτήριο είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής που παίρνει μεγάλες τιμές για αριθμό πτερυγίων ίσο με 3, το κόστος κατασκευής τους, τα δυναμικά φορτία που αναπτύσσονται στην πλήμνη του δρομέα, την ταχύτητα περιστροφής τους, τα επίπεδα θορύβου και το συνολικό βάρος τους [14].



**Εικ. 3.44** Μεταβολή του αεροδυναμικού συντελεστή  $C_p$  συναρτήσει του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου  $\lambda$  για διαφορετικό αριθμό πτερυγίων  
[Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]

Πέραν όμως του αριθμού των πτερυγίων, το σημαντικότερο με το οποίο διαχωρίζονται οι ανεμογεννήτριες είναι ο τύπος ελέγχου των πτερυγίων που χρησιμοποιούνται. Διακρίνονται τρεις βασικοί τύποι ελέγχου πτερυγίων που αναλύονται παρακάτω [14], [17], [26]:

#### Έλεγχος του βήματος πτερυγίου (pitch control)

Το χαρακτηριστικό αυτών των πτερυγίων είναι η δυνατότητα περιστροφής κατά το διαμήκη άξονα τους. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο έλεγχος της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου και κατά προέκταση της απορριφθείσας αεροδυναμικής ισχύος από το δρομέα. Σε αυτού του τύπου πτερύγια ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $C_p$  αποτελεί συνάρτηση εκτός του  $\lambda$  και της γωνίας pitch. Έτσι επιτυγχάνεται περιορισμός της ισχύος πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, για λόγους ασφαλείας, ώστε η ανεμογεννήτρια να παράγει την ονομαστική ισχύ για μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου λειτουργώντας στο νέο μέγιστο αεροδυναμικό συντελεστή που ορίζεται για τις διαφορετικές γωνίες pitch. Με αυτόν τον τρόπο, η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε αυτό το φάσμα ταχυτήτων ανέμου, στις ονομαστικές της στροφές, που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η καλύτερη απόδοση σε χαμηλούς ανέμους και η μείωση των φορτίων κόπωσης στα πτερύγια και γενικότερα σε όλο το σύστημα της ανεμογεννήτριας. Στα

μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η αυξημένη πολυπλοκότητα λόγω του συστήματος ελέγχου τους, αλλά και λόγω της χρήσης υδραυλικών κι ηλεκτρομηχανικών μέσων, τα οποία αυξάνουν και την ανάγκη συντήρησης αυτών των πτερυγίων, καθώς κι η κόπωση των πτερυγίων λόγω αδρανειακής φόρτισης.

#### **Έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης (passive stall control)**

Οι ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο (stall control) της ροής και της ισχύος που δεσμεύει ο δρομέας διαθέτουν πτερύγια με σταθερή γωνία, τα οποία παρουσιάζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης σε υψηλούς ανέμους. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται η αναπτυσσόμενη ροπή κι άρα η παραγόμενη ισχύς. Τύπος παθητικού stall αποτελεί και το furling, το οποίο συναντάται συχνά στις μικρές ανεμογεννήτριες, εδώ ο περιορισμός της ισχύος επιτυγχάνεται μέσω αλλαγής της γωνίας πρόσπτωσης της κύριας κατεύθυνσης ανέμου προς τη φτερωτή, το οποίο βασίζεται στην ουρά που διαθέτουν αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες. Τα θετικά αυτών των πτερυγίων αφορούν στην απλότητα, στο χαμηλό κόστος, στην αξιοπιστία και στην ελάχιστη ανάγκη συντήρησης τους. Τα κύρια μειονεκτήματα τους είναι τα υψηλότερα δυναμικά φορτία που δέχεται ο δρομέας κι η αδυναμία ελέγχου και ρύθμισης της ισχύος εξόδου. Επιπλέον, υπάρχει ελλιπής κατανόηση του δυναμικού φαινομένου stall κι είναι δυνατόν να εμφανιστούν μεταβολές της καμπύλης ισχύος με την πάροδο του χρόνου.

#### **Έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control)**

Τα τελευταία χρόνια έχει εμφανιστεί ο ενεργός έλεγχος της γωνίας βήματος των πτερυγίων. Ο έλεγχος active stall συνδυάζει ουσιαστικά τα θετικά των δύο παραπάνω ελέγχων, αφού βασίζεται στην ίδια αρχή με αυτή του pitch, αλλά χρησιμοποιώντας την ικανότητα της απώλειας της αεροδυναμικής στήριξης (stall) των πτερυγίων, αποφεύγονται τα μεγάλα δυναμικά φορτία κι οι διακυμάνσεις της ισχύος, τα οποία λαμβάνουν χώρα στον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα στον ενεργό έλεγχο, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο το πλεόνασμα της αεροδυναμικής ισχύος που απορροφάται από την έλικα. Επομένως, παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερη παραγωγή από τον παθητικό έλεγχο, αφού η γωνία των πτερυγίων βελτιστοποιείται σύμφωνα με τον υπάρχον άνεμο. Η ικανότητα των πτερυγίων να αλλάζουν μέχρι και 90 μοίρες τη γωνία τους (feathering) μειώνει την ύπαρξη χαρακτηριστικά μεγάλων φορτίων κόπωσης, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους. Με τη ρύθμιση της γωνίας των πτερυγίων είναι πιθανή η πιο ομαλή έγχυση ισχύος στο δίκτυο κατά την ταχύτητα ένταξης και η διακοπή παροχής ισχύος κατά το "κλείσιμο" της ανεμογεννήτριας στην ταχύτητα αποκοπής (cut-off speed), έχοντας ως αποτέλεσμα δημιουργία μικρότερου θορύβου στο δίκτυο σε αυτές τις δύο ακραίες περιπτώσεις. Ο έλεγχος αυτός χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλης ονομαστικής ισχύος ανεμογεννήτριες τάξεως MW.

### **3.8 ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ**

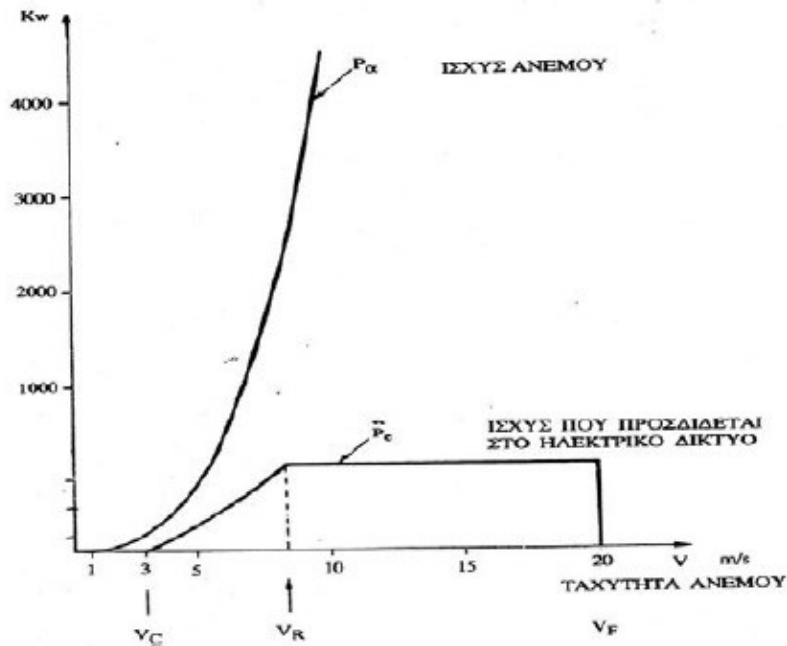
#### **3.8.1 Καμπύλη ισχύος**

Η παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου, και κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της, η οποία εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το σχεδιασμό της [40]. Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές ταχύτητας:

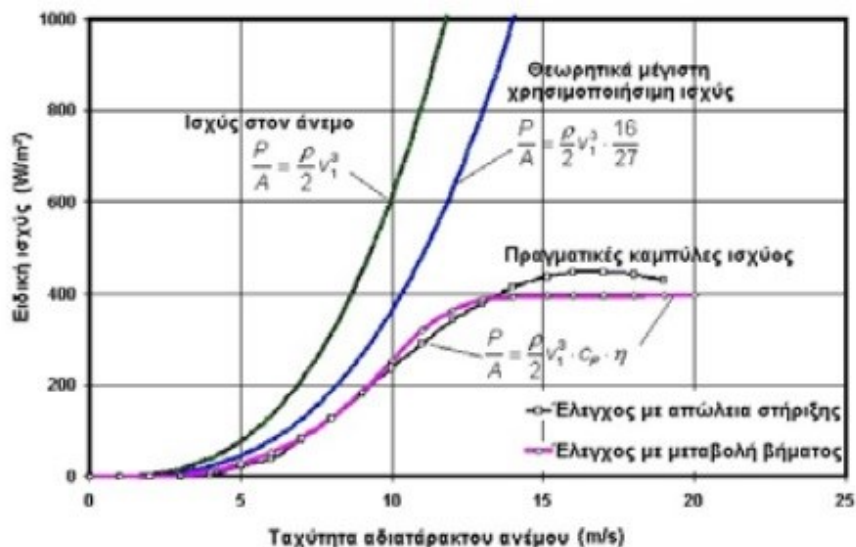
- Την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας ( $V_{cut-in}$ ), όπου η ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ισχύ.

- Την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (Vcut-out), όπου η μηχανή τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατευθεί από τον πολύ δυνατό άνεμο.
- Την ονομαστική ταχύτητα (VR), που είναι η μικρότερη ταχύτητα για την οποία η μηχανή παράγει την ονομαστική της ισχύ (PR). Στην ονομαστική ισχύ, η ανεμογεννήτρια παρέχει τη μέγιστη ροπή.

Το σχήμα που ακολουθεί, είναι χαρακτηριστικό της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια σε σχέση με την ταχύτητα και την ισχύ του ανέμου. Γνωρίζοντας δηλαδή τη στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου μπορούμε να πούμε πόση ισχύ μπορεί να παράγει μια ανεμογεννήτρια, μέσω της καμπύλης ισχύος της.



**Εικ. 3.45** Καμπύλη ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτριας [Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]



**Εικ. 3.46** Παραγόμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας του δίσκου του δρομέα συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου [Πηγή: «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.», ΚΑΠΕ, Ecole Des Mines de Paris, ZREU, Πρόγραμμα Leonardo da Vinci 1999]



### 3.8.2 Αεροδυναμική ισχύς

Για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ενέργεια περιστρεφόμενης μηχανής χρησιμοποιείται ειδικά διαμορφωμένη κατασκευή, η οποία τίθεται σε περιστροφή από τον άνεμο και ονομάζεται πτερωτή. Στην πτερωτή η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται, με ορισμένο ρυθμό, σε περιστροφική ενέργεια. Η ισχύς  $P_M$ , με την οποία αποδίδεται έργο στην αιολική μηχανή, χαρακτηρίζει τη δυνατότητά της για παραγωγή περαιτέρω μηχανικού έργου [14]. Επειδή όμως, ένα τμήμα της μάζας του αέρα που προσπίπτει στη πτερωτή τη διαπερνά χωρίς να αποδίδει σε αυτήν κατ' ανάγκη όλη την ενέργειά του, η μέγιστη μηχανική ισχύς,  $P_{M,max}$ , που θα μπορούσε να αποδώσει θεωρητικά ο άνεμος στην πτερωτή της αιολικής μηχανής είναι μικρότερη της  $P_a$  και είναι ίση με:  $P_{M,max} = C_{p,max} \cdot P_a$  [14] όπου  $C_{p,max}$ , ο ιδανικός συντελεστής (μηχανικής) απόδοσης της πτερωτής. Η τιμή του, όπως αναφέραμε, ισούται με 0,593 και ονομάζεται όριο Betz. Στην πράξη, ο συντελεστής απόδοσης πτέρυγας ή αιολικής μηχανής,  $C_p = P_M / P_a$ , είναι μικρότερος του ορίου Betz και εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και τη διαμόρφωση των πτερυγίων της αιολικής μηχανής.

Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου  $VR$ , αντιστοιχεί η ονομαστική ισχύς  $PR$  της Α/Γ. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της Α/Γ είναι  $V_{ci}$ , ενώ η ταχύτητα ανέμου στην οποία η Α/Γ τίθεται εκτός λειτουργίας συμβολίζεται  $V_{co}$  [26].

Από την αεροδυναμική ποιότητα των πτερυγίων, προκύπτει ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος (στο δρομέα)  $C_p$ , όπως είδαμε παραπάνω κι ο οποίος μέσω της συνολικής απόδοσης  $n$  των μηχανικών κι ηλεκτρικών μερών της Α/Γ δίνει την ηλεκτρική ισχύ εξόδου μίας Α/Γ [39]:

$$P_{el} = n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot C_p \cdot v_w^3$$

Όπου:

- $P_{el}$  : η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (Watt)
- $n$  : η συνολική απόδοση της γεννήτριας (μηχανικό και ηλεκτρικό μέρος)
- $\rho$  : η πυκνότητα του ανέμου (για το επίπεδο της θάλασσας (MSL)  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ )
- $R$  : η ακτίνα πτερυγίου της Α/Γ (m)
- $C_p$  : ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος
- $v_w$  : η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Παρατηρούμε από τα γραφήματα και την παραπάνω σχέση την προφανή εξάρτηση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ισχύος από μία Α/Γ, σε διάφορες ταχύτητες ανέμου. Είναι λοιπόν σημαντικό να επιλέγονται θέσεις εγκατάστασης των ανεμογεννητριών με κύριο κριτήριο το υψηλό αιολικό δυναμικό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό σημαίνει ότι οι θέσεις που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι θέσεις με υψηλή μέση μηνιαία ταχύτητα ανέμου και μικρές διακυμάνσεις της ταχύτητάς του, για όλους τους μήνες του έτους.

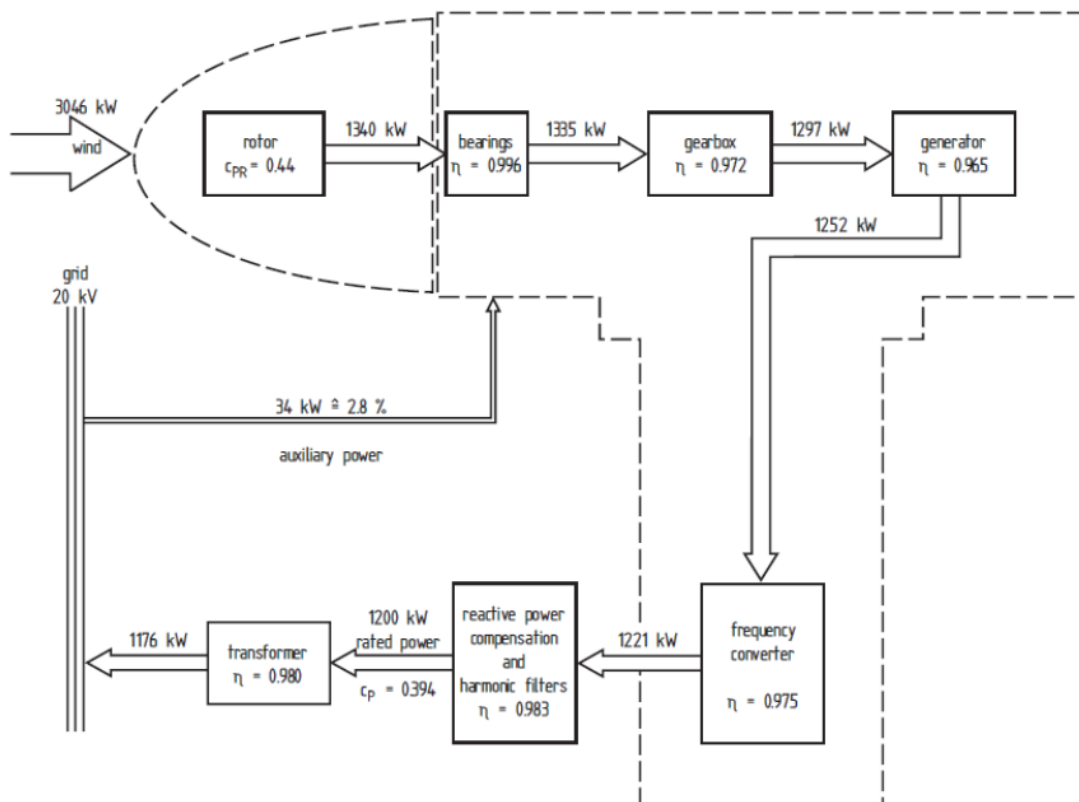
Τυπικό χαρακτηριστικό κάθε ανεμογεννήτριας αποτελεί η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της,  $PR$ , η οποία αφορά στην αποδιδόμενη ισχύ όταν λειτουργεί σε αιολικό πεδίο ονομαστικής ταχύτητας ανέμου  $VR$ . Ένα σχετικά αυστηρό κριτήριο καθορισμού της είναι η επιλογή εκείνης της ταχύτητας ανέμου στην οποία ο λόγος  $PR/P_a$  παίρνει μέγιστη τιμή. Επίσης σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, μέχρι την ορισμένη χαρακτηριστική τιμή  $V_{ci}$ , η αποδιδόμενη ισχύς είναι μηδενική, δηλαδή η Α/Γ δε λειτουργεί. Ομοίως, σε πολύ υψηλές ταχύτητες, μεγαλύτερες ενός ορίου  $V_{co}$ , η Α/Γ ακινητοποιείται για λόγους προστασίας της [14], [39].

Σε ορισμένη ταχύτητα ανέμου, λίγο πάνω από την  $VR$ , τίθεται σε λειτουργία κατάλληλη μηχανική διάταξη μείωσης του ρυθμού περιστροφής της Α/Γ, παρά την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Μια συνήθης τεχνική περιορισμού των στροφών της Α/Γ, που αφορά

στη χρήση μηχανισμού αυτόματης απόκλισης του ουραίου πτερυγίου της από τη διεύθυνση του άξονά της, είναι οι ανεμογεννήτριες με ουραίο πτερόγιο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, τόσο το επίπεδο της πτερωτής τείνει να προσανατολιστεί παράλληλα προς την κατεύθυνση ροής του ανέμου, ώστε τελικά ο ρυθμός περιστροφής της Α/Γ να μειώνεται ισχυρά. Υπάρχουν και άλλοι τρόποι που οδηγούν σε παρόμοιο αποτέλεσμα, π.χ. με κατακόρυφη κλίση ολόκληρης της Α/Γ προς τα πίσω ή με στροφή των πτερυγίων περί τον άξονά τους. Μετά την ταχύτητα αυτή και πολύ κοντά σε αυτήν, η αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς παίρνει τη μέγιστη τιμή της  $P_{max}$  ή  $P_p$  (Peak Power) [36].

Όσον αφορά στο μηχανικό - ηλεκτρικό κομμάτι μίας Α/Γ υπάρχουν απώλειες λόγω [39]:

- της τριβής στον άξονα του δρομέα
- της αποτελεσματικότητας του κιβωτίου ταχυτήτων (εάν υπάρχει)
- της αποδοτικότητας της ηλεκτρικής γεννήτριας και του αντιστροφέα που συνδέεται
- της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (για διασυνδεδεμένα συστήματα) ή στις μπαταρίες (για αυτόνομα συστήματα)
- της ανάγκης τροφοδότησης βοηθητικών λειτουργιών (εσωτερική κατανάλωση) και οργάνων μέτρησης που ενδεχομένως να υπάρχουν.



**Εικ. 3.47** Ενδεικτικό σχεδιάγραμμα αποδόσεων κι απωλειών του μηχανικού και ηλεκτρικού μέρους μίας Α/Γ [Πηγή: «Μέτρηση της καμπύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους», Α. Γκράβας, 2011]

### 3.8.3 Λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου, $\lambda$

Το πλήθος των πτερυγίων και η συχνότητα περιστροφής τους αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την αποδιδόμενη μηχανική ισχύ από την πτερωτή. Πυκνή διάταξη των πτερυγίων σε συνδυασμό με μεγάλη συχνότητα περιστροφής ή αραιά διατεταγμένα πτερόγυια

σε συνδυασμό με χαμηλή συχνότητα περιστροφής, οδηγούν σε μείωση του συντελεστή μηχανικής απόδοσης της αιολικής μηχανής [14].

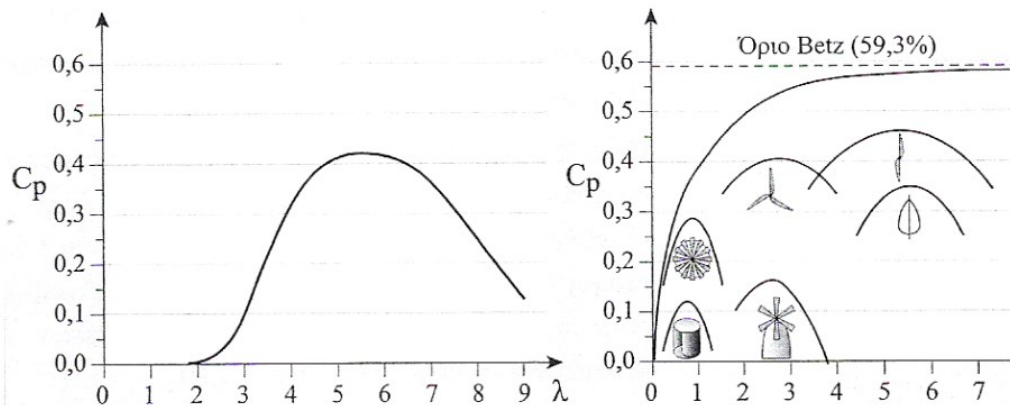
Για τη μελέτη της απόδοσης της  $C_p$  ορίζεται μια παράμετρος  $\lambda$ , ως το πηλίκο της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής του άκρου του πτερυγίου  $u_{\text{ακρ}} = \omega \cdot R$ , προς την ταχύτητα του ανέμου  $u$ , στο σημείο εκείνο, αν δεν υπήρχε η διατάραξη ροής που προκαλείται από την πτερωτή [14]. Δηλαδή:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{u}$$

Η απόδοση της αιολικής μηχανής,  $C_p$ , δηλαδή, εξαρτάται από την παράμετρο  $\lambda$  και την γωνία προσβολής του πτερυγίου από τον άνεμο. Μάλιστα, ο συντελεστής  $C_p$ , ως συνάρτηση του  $\lambda$ , εμφανίζει μέγιστο εξαρτώμενο από το πλήθος των πτερυγίων της Α/Γ. Με απλούς συλλογισμούς αποδεικνύεται ότι [14]:

$$\lambda = \frac{4 \cdot \pi}{n}$$

Η μέγιστη τιμή  $\lambda_0$ , εξαρτάται, κατά κύριο λόγο, από το πλήθος  $n$  των πτερυγίων της πτερωτής. Ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίων  $\lambda$  αποτελεί σημαντικότερη παράμετρο για τη μελέτη και το σχεδιασμό της πτερωτής μιας ανεμογεννήτριας. Εξαρτάται από την ακτίνα του κύκλου των πτερυγίων, την ταχύτητα του ανέμου και τη συχνότητα περιστροφής του κινητήρα της ανεμογεννήτριας. Η παρακάτω εικόνα δίνει την τυπική μορφή της εξάρτησης του  $C_p$  από τις τιμές του  $\lambda$  όπως επίσης δίνονται οι γραφικές παραστάσεις της εξάρτησης της μηχανικής απόδοσης της αιολικής μηχανής, ανάλογα με τον τύπο, το πλήθος και τη διαμόρφωση των πτερυγίων της [14].



**Εικ. 3.48** (α) Τυπική μορφή του συντελεστή απόδοσης πτέρυγας  $C_p$  για δίπτερες Α/Γ  
(β) γραφική παράσταση του  $C_p$  σε διάφορες περιπτώσεις πτερυγίων (Δίπτερη, τρίπτερη, πολύπτερη, κατακόρυφου άξονα και πτερυγίων ανεμόμυλου). Η περιοχή γύρω από το μέγιστο διαφέρει σε κάθε περίπτωση. [Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]

### 3.8.4 Διαθεσιμότητα ανεμογεννήτριας

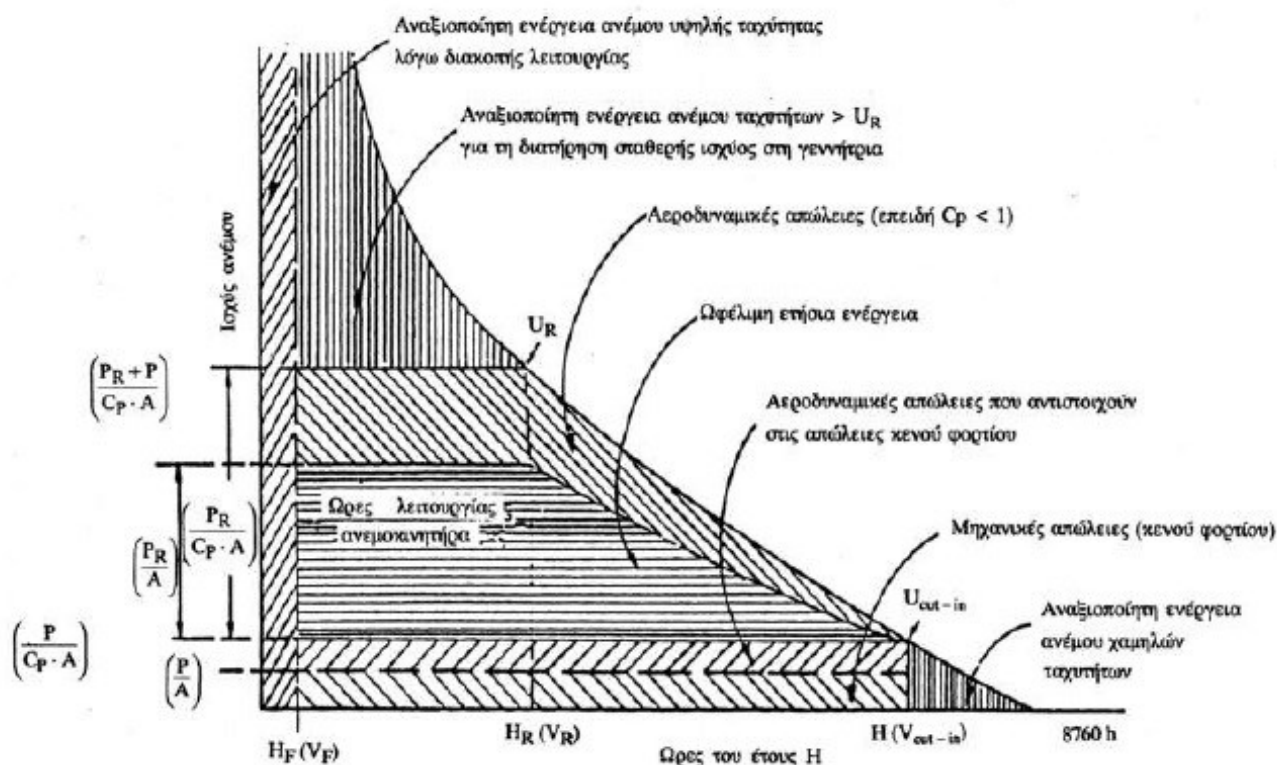
Η διαθεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό του χρόνου που είναι διαθέσιμη η ανεμογεννήτρια να λειτουργήσει και εκφράζει το συντελεστή διαθεσιμότητας (ΣΔ). Ο συντελεστής διαθεσιμότητας σχετίζεται δηλαδή με το ποσοστό του χρόνου που η ανεμογεννήτρια προορίζεται για συντήρηση. Υπάρχει βέβαια και η πιθανότητα να σημειωθεί κάποια βλάβη, οπότε η μηχανή μένει αναγκαστικά εκτός λειτουργίας μέχρι να επισκευαστεί. Τυπικές τιμές του συντελεστή διαθεσιμότητας είναι 0,96-0,99 [14].

### 3.8.5 Απώλειες ενέργειας

Μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την ετήσια ενέργεια του ανέμου για τους εξής λόγους [14]:

- Η ανεμογεννήτρια αποδίδει ωφέλιμη ισχύ μόνο όταν η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου (τριβές, άξονα, μειωτήρα γεννήτριας). Έτσι, σε περιόδους με ταχύτητες μικρότερες της  $V_{cut-in}$ , η ενέργεια του ανέμου μένει ανεκμετάλλευτη, αφού δεν είναι σε θέση δώσει ροπή στον δρομέα.
- Όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μεγαλύτερη της ονομαστικής, επιδιώκεται να διατηρηθεί σταθερή η ισχύς του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με αλλαγή της γωνίας κλίσης των πτερυγίων ή με τα μικροπτερύγια (flats) ή με την αλλαγή της γωνιακής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο ή την αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, ανάλογα φυσικά με την γεννήτρια που έχει το σύστημα. Άρα για ταχύτητες μεγαλύτερες της  $V_R$  χάνεται ένα ποσό του αιολικού δυναμικού.
- Όταν ο άνεμος φθάσει σε υψηλές ταχύτητες ενδείκνυται η διακοπή λειτουργίας της εγκατάστασης για λόγους ασφαλείας. Επομένως, η ενέργεια του ανέμου για ταχύτητες μεγαλύτερες της  $V_F$  παραμένει τελείως αναξιοποίητη.
- Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας έχουμε αεροδυναμικές απώλειες.
- Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας έχουμε πρόσθετα μηχανικές απώλειες στον άξονα, στον μειωτήρα και στη γεννήτρια, που μπορούν να θεωρηθούν σταθερές και ίσες με τις απώλειες κενού φορτίου. Οι συνολικές απώλειες κενού φορτίου μπορεί να ανέρχονται και στο 10% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής.

Το σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζει τις ετήσιες ενεργειακές απώλειες μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, σύμφωνα με την προηγούμενη περιγραφή των απωλειών.



Εικ. 3.49 Ενεργειακές απώλειες στην καμπύλη διάρκειας πνοής του ανέμου [Πηγή: «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005]

Ενεργειακές απώλειες παρατηρούνται επίσης και κατά τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια, αλλά και την μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος (αναστροφείς, συστήματα ελέγχου), προκειμένου να μπορεί να εκμεταλλευτεί με ασφάλεια και αξιοπιστία από τα φορτία [14].

### 3.9 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Για να υπολογιστεί η ονομαστική ισχύς της καταλληλότερης Α/Γ, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, απαιτούνται:

- Οι ενεργειακές απαιτήσεις της εφαρμογής, στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο χρήσης. Λαμβάνεται υπόψη ένας συντελεστής περιθωρίου ενεργειακών καταναλώσεων, που καλύπτει και τη διαθεσιμότητα του συστήματος.
- Ανεμολογικά στοιχεία για τη συγκεκριμένη θέση εγκατάστασης, με βάση το τυπικό μετεωρολογικό έτος του τόπου.
- Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος Α/Γ, που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Απαιτούνται στοιχεία για τους τύπους και τα μεγέθη ανεμογεννητριών, που μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικότερα στην πιθανότερη περιοχή ταχυτήτων της θέσης εγκατάστασης.

Γενικά, ο προσδιορισμός της ονομαστικής ισχύος της καταλληλότερης ανεμογεννήτριας, για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, βασίζεται στην απαίτηση η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να καλύπτει μερικώς ή ολικώς την ενέργεια ζήτησης στο ίδιο χρονικό διάστημα.

Στα συνδεδεμένα το δίκτυο αιολικά συστήματα η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διχετεύεται στο δίκτυο, που παίζει το ρόλο μιας τεράστιας ενεργειακής δεξαμενής, της οποίας η στάθμη παραμένει σε αντιστοιχία με την ισχύ ζήτησης, με ρύθμιση της ισχύος των εργοστασιακών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στα αυτόνομα αιολικά συστήματα, η μερική κάλυψη του φορτίου ζήτησης σχετίζεται οπωσδήποτε με την παρουσία Η/Ζ (ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους). Ο συνδυασμός Α/Γ με Φ/Β και Η/Ζ (Υβριδικά Συστήματα), οδηγεί σε οικονομικότερο σύστημα, με πιο αξιόπιστη ενεργειακή συμπεριφορά.

### 3.10 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΕΤΗΣΙΑ ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Η μέση ημερήσια (μηνιαία ή ετήσια) ηλεκτρική ισχύς που παρέχεται από μια ανεμογεννήτρια προκύπτει, με βάση τον ορισμό της, από τη σχέση [25], [39]:

$$\overline{P_{A/\Gamma}} = \frac{E_{A/\Gamma}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{A/\Gamma} dt$$

Όπου  $E_{A/\Gamma}$ : η παραγόμενη στην αντίστοιχη χρονική περίοδο,  $T$ : ηλεκτρική ενέργεια και  $P_{A/\Gamma}$ : η στιγμιαία ηλεκτρική ισχύς από την Α/Γ σε ταχύτητα ανέμου  $u$ . Διαιρώντας τη στιγμιαία ισχύ  $P_{A/\Gamma}$  δια της ονομαστικής  $PR$  προκύπτει η ποσότητα  $n_{A/\Gamma}(u) = P_{A/\Gamma} / PR$  που αποτελεί την ανηγμένη ισχύ της Α/Γ. Οι τιμές της μπορεί να προσδιοριστούν άμεσα, είτε από πειραματικές τιμές της αποδιδόμενης από την Α/Γ ηλεκτρικής ισχύος, για ορισμένη χρονική περίοδο, είτε από τη χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος της Α/Γ .

Μια άλλη προσέγγιση και μεθοδολογία εφαρμόζουμε όταν θέλουμε κατά την περίοδο των μετρήσεων των δεδομένων του ανέμου και πριν την εγκατάσταση μίας Α/Γ, να υπολογιστεί η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί θεωρητικά για την κατανομή ανέμου μίας περιοχής και για μία συγκεκριμένη καμπύλη ισχύος Α/Γ. Επιπροσθέτως, και με μεγαλύτερη ακρίβεια, αυτός ο υπολογισμός μπορεί να γίνει και μετά την εγκατάσταση μίας Α/Γ και την παράλληλη μέτρηση της πραγματικής της καμπύλης ισχύος. Αναφέρεται ο όρος πραγματική καμπύλη ισχύος, αφού συχνά οι κατασκευαστικές καμπύλες ισχύος που συνοδεύουν μία Α/Γ είναι ιδανικότερες κι εξιδανικευμένες σε σχέση με την πραγματική συμπεριφορά της. Συνήθως, αυτός ο υπολογισμός γίνεται για περίοδο ενός έτους και για αυτό έχει καθιερωθεί ο όρος ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (Ετήσια ΑΕΠ) και δίνεται συνήθως από τη σχέση [25], [39]:

$$E = \frac{8760}{100} \cdot \sum_{V_{\text{cut-in}}^{V_{\text{cut-out}}}} P_{el}(v_w) \cdot H(v_w)$$

Όπου:

$E$  : η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)

$h=8760$  : οι ώρες ενός έτους

$P_{el}$  : η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Α/Γ (kW)

$H$  : η διακριτή και συνεχή κατανομή του ανέμου σε ποσοστά % (όταν δεν είναι γνωστά αρκετά στοιχεία, λαμβάνεται ως Rayleigh)

Πέραν της ετήσιας ΑΕΠ, υπάρχουν κι άλλα σημαντικά μεγέθη που παρουσιάζουν την απόδοση μίας Α/Γ ή ενός αιολικού πάρκου. Αρχικά, υπάρχει ο συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor) που ουσιαστικά δείχνει το ποσοστό σε περίοδο ενός έτους που μία Α/Γ ή ένα Α/Π παράγει την ονομαστική ισχύ. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης έχει ιδιαίτερη σημασία, αφού σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα μίας ενεργειακής επένδυσης. Συνήθεις τιμές του είναι 25 - 35 %, δίχως να αποκλείονται χαμηλότερες τιμές. Είναι προφανές, ότι εάν προκύπτουν τιμές χαμηλότερες αυτού του διαστήματος, τότε η επένδυση αποτυγχάνει και δύσκολα αποσβήνεται το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης. Επιπλέον, οι μεγαλύτερες τιμές προκύπτουν, όπως γίνεται αντιληπτό για περιοχές με μεγάλη ετήσια ταχύτητα ανέμου, αλλά εξαρτάται επίσης από τη μορφή της καμπύλης ισχύος της Α/Γ κι από τη διαθεσιμότητα της [25], [39].

$$CF = \frac{E}{8760 \cdot P_n} = \frac{P}{P_n}$$

Όπου:

$CF$  : ο συντελεστής χρησιμοποίησης

$E$  : η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)

$P_n$  : η ονομαστική ηλεκτρική ισχύς μίας Α/Γ ή ενός Α/Π (kW)

$P$  : η μέση τιμή της παραγόμενης ισχύος (kW)

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό μέγεθος είναι οι Συμβατικές Ανηγμένες Ώρες Λειτουργίας ( $\Sigma \Lambda$ ). Αποτελούν χαρακτηριστικό ενός συστήματος κι ορίζονται ως το πηλίκο της μέγιστης δυνατή ετήσιας παραγωγής του προς την ονομαστική του ισχύ. Ουσιαστικά εκφράζουν τον ισοδύναμο χρόνο λειτουργίας του πάρκου υπό πλήρη ισχύ, ώστε να παράγει την μέγιστη δυνατή παραγωγή. Συνήθως χρησιμοποιείται παράλληλα με τους συντελεστές διαθεσιμότητας και τους περιορισμούς διείσδυσης ενός συστήματος (μεμονωμένη Α/Γ ή Α/Π), όπως συμβαίνει άλλωστε και με όλα τα προαναφερθέντα μεγέθη [25], [39].

$$\Sigma \Lambda \Omega = \frac{E}{P_n} = 8760 \cdot CF$$

Συνοψίζοντας, δίνονται επιγραμματικά τα στοιχεία που επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στην καμπύλη ισχύος και στην αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή:

- Αιολικό δυναμικό τοποθεσίας (μέση ταχύτητα ανέμου, στατιστική κατανομή του ανέμου, wind shear)
- Πυκνότητα αέρα (διαφορά ανάλογα με το υψόμετρο και τη θερμοκρασία), επισύρονται διορθώσεις στην κατασκευαστική καμπύλη ισχύος σύμφωνα με την επικρατούσα πυκνότητα ανέμου
- Τύρβη και τραχύτητα εδάφους (χαμηλότερη απόδοση της Α/Γ και καταπόνηση των αντοχών της)
- Διάμετρος φτερωτής (αύξηση της ισχύος με το τετράγωνο της καλυπτόμενης περιοχής  $\pi \cdot R^2$  (swept area) του δρομέα)
- Αεροδυναμικός συντελεστής  $C_p$  (εξαρτάται από την αεροδυναμική κι από τον αριθμό των περυγίων)
- Ταχύτητα περιστροφής δρομέα (μεταβλητών ή σταθερών στροφών)
- Σύστημα ελέγχου Α/Γ (pitch ή stall control)
- Εγκατεστημένη ισχύς της γεννήτριας
- Ύψος πλήμνης δρομέα (εξαρτάται από το wind shear και την τάξη τραχύτητας που παρουσιάζει μία περιοχή)
- Λειτουργικό φάσμα ταχυτήτων (όσο μεγαλύτερο, τόσο καλύτερο).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- 
- [1] Dodge DM. «The illustrated history of wind power development», Littleton, Colorado: U.S. Federal Wind Energy Program. Available at: <http://www.telosnet.com/wind/>, 2006 (accessed December 2010).
- [2] «Historical Development of the Windmill», D. Shepherd, NASA Contractor Report 4337, 1990
- [3] «Science and Civilization in China», J. Needham, 1965
- [4] «The Traditional Crafts of Persia, Their Development, Technology, and Influence on Eastern and Western Civilization», H. E. Wulff, 1966
- [5] «Blade Twist, Droop Snoot, and Forward Spars», J. Drees, 1977
- [6] «Δυναμικές επιδράσεις του αιολικού συστήματος στο σύστημα ηλεκτρικής ενεργείας», Ι. Σαμαράς, Ε. Σταματόπουλος, 2010
- [7] «A Field Guide to American Windmills», T. Lindsay Baker, 1985
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Blyth\\_\(engineer\)](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Blyth_(engineer))
- [9] «Wind Machines», Wind and Solar Energy – Proceedings of New Delhi Symposium, J. Juul, 1956
- [10] «Wind Energy Systems», G. Johnson, 2006
- [11] «Historical Wind Generators Machines», M. Ragheb, 2013
- [12] «The evolution of wind-turbines: An historical review», P. Fleming, S. Probert, 1984
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine), [el.wikipedia.org/wiki/Ανεμογεννήτρια](http://el.wikipedia.org/wiki/Ανεμογεννήτρια)
- [14] «Ανεμοκινητήρες», Γ. Μπεργελές, 2005
- [15] «Torque and Speed Control of a Pitch Regulator Wind Turbine», M. Rasila, 2003
- [16] «Wind Turbine Power: The Betz Limit and Beyond», M Huleihil, G Mazor, 2012
- [17] «Wind Power Generation and Wind Turbine Design», Wei Tong, 2010
- [18] «Συμβολή στη Βελτιστοποίηση Μεθοδολογιών Ελέγχου Συστημάτων Ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές σε Συνδυασμό με Αποθήκευση Ενέργειας», Χ. Πάτσιος, Διδακτορική Διατριβή, 2011
- [19] «Fixed vs. Variable», Renewable Energy World, H. Slootweg, E. de Vries, 2003

- [20] «Μελέτη κατασκευής – ανάλυση κυκλωματικής & πεδιακής συμπεριφοράς δοκιμίου 2,5 kW & ανεμογεννήτριας 25 kW», Γ. Τσεκούρας, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, 2000.
- [21] «Συμβολή στην ανάλυση ανεμογεννητριών μεταβλητών στροφών με ασύγχρονη γεννήτρια για την επιλογή του ηλεκτρικού σχήματος», Σ. Παπαθανασίου, Διδακτορική Διατριβή, ΕΜΠ, 1997
- [22] ΕΛΟΤ EN 61000.03.03:1996 Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα (EMC) – Μέρος 3: Όρια-Τμήμα2: όρια εκπομπής για αρμονικές ρεύματος
- [23] «Ανεμογεννήτριες και Ηλεκτρονικά Ισχύος», Μ. Μπράτισης, Ε. Τσιμπλοστεφανάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα ΗΜΤΥ Εργαστήριο Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας
- [24] «Ηλεκτρικές Μηχανές, Ασύγχρονες – Σύγχρονες Μηχανές», Ν. Τρωγάδας, Τ.Ε.Ι. Λάρισας Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Ηλεκτρολογίας
- [25] «Μελέτη και κατασκευή ανεμογεννήτριας», Ν. Αντωνίου, Ν. Μπάκας, Πάτρα, 2010
- [26] «Wind Energy Explained - Theory, Design and Application», J. F. Manwell and J. G. McGowan, A. L. Rogers, 2009
- [27] Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης - Ινστιτούτο Τεχνολογίας και Εφαρμογών Στερεών Καυσίμων – Περιβάλλον & Διαχείριση Ενέργειας: <http://www.allaboutenergy.gr>
- [28] «The Betz Limit - and the maximum efficiency for horizontal axis wind turbines. Can it be exceeded and does it apply to vertical axis wind turbines?», WindPower Program: <http://www.wind-power-program.com>
- [29] «Wind Turbine Design – With Emphasis on Darrieus Concept», I. Paraschivoiu, 2002
- [30] «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.», ΚΑΠΕ, Ecole Des Mines de Paris, ZREU, Πρόγραμμα Leonardo da Vinci 1999
- [31] «Computational micromechanical analysis of the strength of timber used for wind turbine blades», H. Qing, L. Mishnaevsky Jr., Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark
- [32] «Wind Energy. Materials Challenges now and in future», P. Brøndsted, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark
- [33] «Fracture, hardness and fatigue testing of wood: KAPEG experience», R. Sharma<sup>1</sup>, R. Sinha<sup>1</sup>, P. Acharya<sup>1</sup>, L. Mishnaevsky Jr., P. Freere, KAPEG
- [34] «Performance of Hand Carved Timber Blades on a Small Wind Turbine», P.D. Clausen<sup>1</sup>, P. Freere, P. Peterson, S.R. Wilson, D. H. Wood, University of Newcastle
- [35] «Selection of materials for wind turbines blades», P. Brøndsted, Risø DTU
- [36] «A Retrospective of VAWT Technology» H. J. Sutherland, D. E. Berg, and Th. D. Ashwill, 2012
- [37] «A Brief History of Wind Power Development in Canada 1960s-1990s», Adapted from: Collection Assessment on Wind Energy, A. Adamek, 2009
- [38] «UK Large-Scale Wind Power Programme From 1970 to 1990: The Carmarthen Bay Experiments and the Musgrove Vertical-Axis Turbines», WIND ENGINEERING VOLUME 30, No. 3, T. Price, 2006
- [39] «Μέτρηση της καμύλης ισχύος μικρών ανεμογεννητριών και βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής ενέργειας για εφαρμογές χαμηλού κόστους», Α. Γκράβας, Μάρτιος 2011
- [40] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Α. Ζερβός
- [41] «Αιολική Ενέργεια: Ανάπτυξη και Περιβάλλον - Η Ανάπτυξη της Αιολικής Ενέργειας και των ΑΠΕ στην Ευρώπη: Εισήγηση στη Δημερίδα» Α. Ζερβός, 2009
- [42] «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας», Ι. Καλδέλλης, 1999
- [43] «How to build a wind turbine», H. Piggott, 2005
- [44] «A note on Windmills – A History of Technology», R. Wailes, 1956
- [45] «The Dutch Windmill», F. Stokhuyzen, 1965
- [46] «Wind Power Fundamentals», A. Kalmikov, K. Dykes, MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projects in Action



- [47] «Wind-works by Paul Gipe – Smith-Putnam Industrial Photos: <http://www.wind-works.org>»
- [48] «Ανάλυση και έλεγχος αιολικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας», Διδακτ. Διατριβή, Α. Νέρης, Πανεπιστήμιο Πατρών, 1999
- [49] «Επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στα μεγέθη ενός μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής», Κ. Παγώνης, 2011
- [50] «Wind Energy Handbook», T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, B. Ervin, 2001
- [51] «[http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_wind\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power)»
- [52] «Drive & Control Technology for Wind Turbines», Rexroth Bosh Group
- [53] «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – Σημειώσεις Παραδόσεων», Σ. Παπαθανασίου, 2008
- [54] «Wind Turbines, fundamentals, technologies, application, economics», second edition, E. Hau, 2006.
- [55] «Wind Energy Technology J. F. Walker and N. Jenkins, 1997
- [56] ΚΕΝΤΡΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, επίσημη ιστοσελίδα: [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
- [57] «Wind Machines 2nd Ed., The MITRE Energy Resources and Environmental Series», F. R. Eldridge, 1980

# 4

## ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο αντικείμενο των λεγόμενων μικρών ανεμογεννητριών, αντικείμενο με το οποίο καταπιάνεται η παρούσα εργασία, και θα αναφερθούμε στο πώς ορίζονται, ποια είναι τα χαρακτηριστικά τους, ποιες οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την ορθότερη αξιοποίηση τους, τους ελέγχους και δοκιμές που απαιτούνται καθώς επίσης και για τις δυνατότητες σύνδεσης τους σε δίκτυα. Ωστόσο, πριν όλα αυτά πρέπει να επισημανθεί πως όπως είναι φυσικό να υπάρχουν διαφορές σε κάποια λειτουργικά χαρακτηριστικά στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους σε σχέση με τις μεσαίου και μικρού, **οι βασικές αρχές λειτουργίας ως ανεμογεννήτριες (χαρακτηριστικά πτερυγίων, μετάδοση κίνησης κλπ) παραμένουν ακριβώς οι ίδιες**, όπως αυτές έχουν περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο 3.

### 4.1 ΤΑΞΙΝΟΜΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΒΑΣΕΙ ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Με τον όρο μικρές χαρακτηρίζονται οι ανεμογεννήτριες που έχουν ονομαστική ισχύ μέχρι 75 kW. Η κατηγορία αυτή αποτελείται από δύο υποκατηγορίες, τις πολύ μικρές, κατηγορία XS (extra small) των οποίων η παραγόμενη ισχύς φτάνει μέχρι τα 10 kW και με εμβαδό φτερωτής ή αλλιώς εκμεταλλεύσιμη - καλυπτόμενη περιοχή του ανέμου (swept area) μέχρι τα 40 m<sup>2</sup>. Η άλλη υποκατηγορία είναι η κατηγορία S (Small), η οποία αφορά Α/Γ που η ονομαστική ισχύς τους κυμαίνεται από 10 μέχρι 75 kW, με αντίστοιχο διάστημα επιφάνειας φτερωτών μεταξύ 40 και 200 τετραγωνικών μέτρων. Αξίζει να σημειωθεί πως η ελληνική νομοθεσία προβλέπει ιδιαίτερη τιμή για μικρές α/γ ισχύος μέχρι 50kW, με τις υπόλοιπες μικρές ανεμογεννήτριες να μην απολαμβάνουν αυτό το προνομιο αν και μετεχουν σε αυτήν την κατηγορία [1].

Ενδεικτικές τιμές για μερικά από τα χαρακτηριστικά μεγέθη μικρών α/γ είναι οι ακόλουθες [1]:

- Εγκατεστημένη ισχύς, ενδεικτικά μέχρι 75kW
- Μέση διάμετρος πτερωτής
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 10kW, ενδεικτικά 8μ.
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 50kW, ενδεικτικά 15μ
- Μέσο ύψος πύργου:
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 10kW, ενδεικτικά 10μ.
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 50kW, ενδεικτικά 20μ.
- Μέση ετήσια παραγωγή για μέση ταχύτητα ανέμου 7m/sec:
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 10kW, ενδεικτικά 30.000kWh
  - για ανεμογεννήτρια ισχύος 50kW, ενδεικτικά 150.000kWh

Ενώ, οι πιο συνηθισμένες παράμετροι για την κατηγοριοποίηση των μικρών α/γ είναι:

- Η επιφάνεια σάρωσης του στροφείου (rotor swept area) [A]
- Η διάμετρος του στροφείου (rotor diameter) [D]
- Η ονομαστική ισχύς λειτουργίας [P]

Εν τελει η πλέον αποδεκτη μεθοδος για την κατηγοριοποίηση των μικρών α/γ προκύπτει από το πρότυπο IEC 61400-2 βάσει της επιφάνειας σάρωσης. Πιο συγκεκριμένα, ισχύει ο ακόλουθος πίνακας:

	<b>Micro</b>	<b>Πολύ Μικρές</b>	<b>Μικρές</b>
Επιφάνεια σάρωσης	$A < 3,5m^2$	$3,5m^2 < A \leq 40m^2$	$40m^2 < A \leq 200m^2$
Διάμετρος Στροφείου	$D < 2,1m$	$2,1m < D \leq 7m$	$7m < D \leq 16m$
Ονομαστική Ισχύς	$P \leq 1kW$	$1kW < P \leq 10kW$	$10kW < P \leq 75kW$

**Εικ. 4.1** Κατηγοριοποίηση μικρών Α/Γ κατά το πρότυπο IEC 61400-2  
[Πηγή: «Οδηγος Μικρων Ανεμογεννητριών», ΕΛΕΤΑΕΝ, Μαρτιος 2012]

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν περισσότεροι από 200 κατασκευαστές μικρών ανεμογεννητριών σε όλο τον κόσμο που παράγουν προϊόντα σε αυτή την κλίμακα. Στην αγορά είναι διαθέσιμα περίπου 600 μοντέλα Α/Γ, το 80% αφορούν σε Α/Γ οριζοντίου άξονα και το 20% αφορούν σε Α/Γ καθέτου άξονα. Η διαθέσιμη ονομαστική ισχύς σε μικρές Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι ευρεία, από μερικά Watt έως 100 kW ενώ στις Α/Γ καθέτου άξονα η αγορά περιορίζεται σε Α/Γ με ονομαστική ισχύ από 10W έως 10kW καθώς επίσης μικρός είναι και ο αριθμός κατασκευαστών Α/Γ καθέτου άξονα οι οποίοι διαθέτουν στην αγορά μοντέλα Α/Γ με ονομαστική ισχύ μεταξύ 10kW και 100kW.

Οι μεγαλύτερες αγορές εντοπίζονται στην Αμερική, το Ηνωμένο Βασίλειο και την Κίνα. Το 75% της παραγωγής των ΜΑΓ προορίζεται για αυτόνομα υβριδικά συστήματα σε συνδυασμό με έξυπνα μίνι δίκτυα. Σήμερα λόγω της θέσπισης συστημάτων εγγυημένης τιμής kWh (feed in tariffs) σε χώρες όπως η Ιταλία, το Ην Βασίλειο, η Πορτογαλία και η Ελλάδα, δημιουργείται μια αυξητική τάση εγκατάστασης διασυνδεδεμένων συστημάτων στην κατηγορία των Μικρών & Πολύ μικρών ανεμογεννητριών και κατά συνέπεια ξεκινούν οι συνθήκες ωρίμανσης της αγοράς αυτής [2], [3].

Country	Cumulative installed wind capacity MW	2009 Yearly estimated energy production MWh/year	Units installed during 2009 less than 1 kW		Units installed during 2009 from 1 kW to 10 kW			Units installed during 2009 greater than 10 kW and up to 65 kW	Units installed during 2009 greater than 65 kW and up to 100 kW	
			Off-grid	Grid-tie	Off-grid	Grid-tie	Grid-tie	Grid-tie		
			n°	n°	n°	n°	n°	n°		
Australia	0.2	325	(57*)						-	-
Japan	5.9	4,260	1,230	3	696	118	7	0		
Korea	1.04	1,367	-	-	-	11	-	-		
Spain	7.02	-	92	-	182	-	3	-		
Sweden	1.7	2,100	6	4	6	64	19	-		
United Kingdom	28.7	35,800	2,524	-	602	-	149	5		
United States	16.95	-	6,904	0	452	1,817	66	62		
Totals	61.51	43,852	10,756	7	1,938	2,010	244	67		

**Εικ. 4.2** Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς μικρών Α/Γ σε 7 χώρες μέλη του International Energy Agency, IEA [Πηγή: «Small Wind Annual Report», IEA 2009]

## 4.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ ΚΑΤΑΚΟΤΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ

---

Ιδιαίτερα οι μικρές ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα [3], [4]:

- Χαρακτηρίζονται ως ανεμογεννήτριες για αστικό περιβάλλον
- Δεν επηρεάζονται σημαντικά από τις αυξημένες διαταραχές του ανέμου (τύρβη)
- Παράγουν σχετικά χαμηλότερο θόρυβο σε σχέση με τις Α/Γ οριζοντίου άξονα
- Έχουν αξιόπιστη λειτουργία και μεγάλη διάρκεια ζωής
- Με τη λειτουργία τους αποφεύγεται η χρήση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρισμού
- Είναι φιλικές στο περιβάλλον και δεν ρυπαίνουν και βοηθούν στην μείωση των αερίων εκπομπών του θερμοκηπίου
- Μπορούν πολύ εύκολα να εγκατασταθούν σε απομονωμένες περιοχές και να λειτουργούν ως αποκεντρωμένες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής

## 4.3 ΧΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ [5]

---

Οι περιπτώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρές Α/Γ είναι αρκετές, σε αντίθεση με τις μεγάλες που υπό τη μορφή χερσαίων ή θαλάσσιων (offshore) αιολικών πάρκων συνδέονται σε διασυνδεδεμένα συστήματα είτε στη Μέση (ΜΤ) είτε στην Υψηλή τάση (ΥΤ) ή ακόμα και στην Υπερυψηλή τάση (ΥΥΤ) όταν πρόκειται για αιολικά πάρκα τάξεως 1GW κι άνω. Ακόμα, οι μεγάλες Α/Γ μπορούν να συνδεθούν σε μεγάλα αυτόνομα συστήματα απομακρυσμένων περιοχών (δίκτυα νησιών) αποτελώντας κομμάτι ενός υβριδικού συστήματος. Βεβαίως, σε αυτόνομα συστήματα μικρότερης κλίμακας όμως (απομονωμένα χωριά ή πόλεις), μπορεί να γίνει χρήση και μικρών ανεμογεννητριών με παράλληλη χρήση φωτοβολταϊκών.

Εκτός των μικρών υβριδικών συστημάτων, οι χρήσεις των μικρών Α/Γ ποικίλλουν και βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς. Μπορούν λοιπόν, να εγκατασταθούν σε μη διασυνδεδεμένες με το ηλεκτρικό δίκτυο περιοχές σε εφαρμογές όπως είναι οι μετεωρολογικοί και οι τηλεπικοινωνιακοί σταθμοί που βρίσκονται σε κορυφές βουνών, σε συστήματα φωτισμού εθνικών οδών που διασχίζουν ακατοίκητες περιοχές και σε μικροδίκτυα (απομακρυσμένα χωριά), όπως αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, με συνδυασμό συμβατικών πηγών ενέργειας (ντιζελογεννήτριες) κι άλλων μορφών ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά και μικρά υδροηλεκτρικά) με αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας σε συστήματα μπαταριών. Είναι γεγονός το φαινόμενο ότι το ένα τρίτο του πληθυσμού του πλανήτη δεν έχει πρόσβαση στον ηλεκτρισμό, κυρίως σε χώρες της Ασίας, Αφρικής και Νοτίου Αμερικής, με τις μικρές ανεμογεννήτριες να παίζουν πλέον καθοριστικό ρόλο και να αποτελούν κυρίαρχη επιλογή για την ηλεκτροδότηση τέτοιων περιοχών.

Επιπλέον, μπορούν να εγκατασταθούν σε offshore εφαρμογές, όπως σε συστήματα αφαλάτωσης του νερού για μικρά νησιά, με την τοποθέτησή τους σε πλωτές βάσεις, τομέας που πρωτοπόρησε η Ελλάδα με την εγκατάσταση του πρώτου αυτόνομου σταθμού αφαλάτωσης, την "Υδριάδα" στη νήσο Ηρακλεία, αφού μελετήθηκε και κατασκευάστηκε εξ ολοκλήρου από Έλληνες και πλέον βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στη χώρα μας. Ακόμα μία offshore χρήση είναι σε πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου, αλλά και τηλεπικοινωνιακούς σταθμούς που βρίσκονται χιλιόμετρα μακριά από κάποια κοντινή ακτή, όπως και σε πλωτούς φάρους. Επιπροσθέτως, μικρές Α/Γ της τάξεως των 500 Watt τοποθετούνται πλέον και σε ιστιοπλοϊκά για κάλυψη των μικρών φορτίων που διαθέτουν (φωτισμός, ψυγεία, τηλεοράσεις, κτλ), με μεγάλη ενεργειακή παραγωγή μάλιστα, αφού οι φτερωτές τους "βλέπουν"

μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου από αυτή που επικρατεί στην πραγματικότητα, λόγω της ταυτόχρονης κίνησης του ιστιοπλοϊκού.

Εξίσου σπουδαία είναι κι η χρήση μικρών Α/Γ στο διασυνδεδεμένο σύστημα, με οικονομικά μάλιστα οφέλη, αφού η τιμή πώλησης της αιολικής κιλοβατώρας στις δημόσιες εταιρείες ηλεκτρισμού είναι μεγαλύτερη από την τιμή αγοράς του ρεύματος από αυτές. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η απόσβεση της επένδυσης να επιτυγχάνεται σε διάστημα μικρότερο των 10 ετών, ανάλογα με την επικρατούσα κατανομή ανέμου και την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Επομένως, μετά το πέρας του διαστήματος απόσβεσης, μια μικρή Α/Γ μπορεί να μετατραπεί σε πηγή κέρδους για κάποιον ιδιώτη. Η εγκατάστασή τους μπορεί να γίνει στον προαύλιο χώρο μικρών βιομηχανιών, κτηνοτροφικών μονάδων, κλινικών, σχολείων, κτλ ή ακόμα στους κήπους εξοχικών κατοικιών ή μονοκατοικιών σε ημιαστικές περιοχές και προάστια πόλεων. Άλλο σημείο τοποθέτησής τους είναι στις οροφές σπιτιών και κτιρίων, υπό την αυστηρή τήρηση νομοθετικών διατάξεων και εγκεκριμένων προδιαγραφών όσον αφορά τους κανόνες ασφαλείας που απαιτείται να πληρούν. Τέλος, είναι δυνατόν να ενσωματωθούν και στην αρχιτεκτονική ενός κτιρίου.

#### 4.4 ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΣΤΟ ΑΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Σε αυτή την παράγραφο θα αναλυθεί περαιτέρω, η τοποθέτηση μικρών Α/Γ στις μεγάλες πόλεις σε περιπτώσεις όπως ταράτσες κτιρίων ή στέγες μονοκατοικιών αλλά και σε προάστια μεγάλων πόλεων στις αυλές των σπιτιών. Δίνεται περισσότερο έμφαση σε αυτές τις περιπτώσεις, διότι μία τέτοια περίπτωση αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας που θα παρουσιασθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

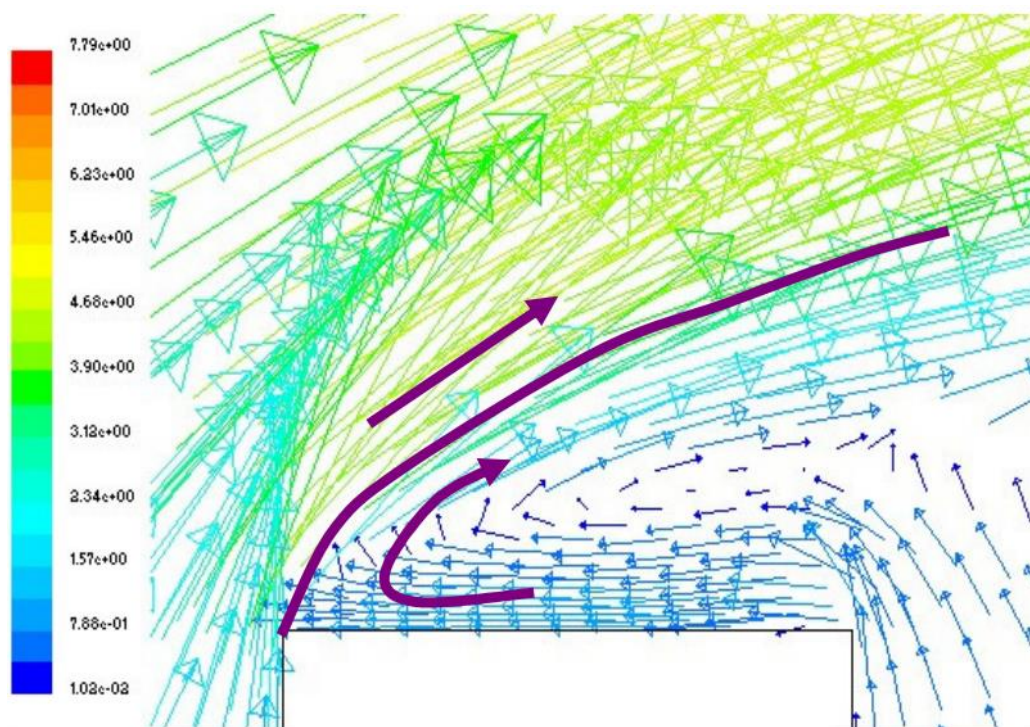
Αρχικά, πρέπει να τονιστεί ότι το αστικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται από υψηλό μήκος τραχύτητας, άνω των 0,8m, με επακόλουθο σε χαμηλά ύψη από το έδαφος να εμφανίζονται σπάνια εκμεταλλεύσιμες ταχύτητες ανέμου. Επιπλέον, σε μια τέτοια περιοχή εμφανίζονται πολλά "εμπόδια", είτε αυτά είναι κτίρια είτε δέντρα. Ως συνέπεια των αυτών, διαμορφώνεται ένα τοπικό αέρινο ρεύμα με έντονη τύρβη και με μεγάλης κλίμακας ριπές ανέμου. Μεγάλης σημασίας είναι οι κανόνες ασφαλείας που διέπουν την εγκατάσταση Α/Γ σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και οι προδιαγραφές που απαιτείται να ικανοποιούν.

Επομένως, έχουν διαμορφωθεί κάποιες γενικές αρχές σχετικά με το σχεδιασμό της εγκατάστασης Α/Γ στο περιβάλλον των πόλεων [6]:

- Κατά προτίμηση να τοποθετούνται σε οροφές ψηλών κτιρίων με όσο το δυνατόν πιο επίπεδες και μεγάλες επιφάνειες.
- Πραγματοποίηση έρευνας σχετικά με το ποιος τύπος και μοντέλο Α/Γ είναι η καλύτερη επιλογή για το συγκεκριμένο κτίριο ή περιοχή.
- Εγκατάσταση περισσότερων όμοιων Α/Γ στην ίδια περιοχή εάν αυτό καθίσταται δυνατό.
- Έρευνα σχετικά με το αν το κτίριο και τα γειτονικά του κτίσματα είναι κατάλληλα για υλοποίηση ενός τέτοιου σχεδίου.
- Βεβαίωση για την ενσωμάτωση Α/Γ στη χωροταξική ανάπτυξη μίας περιοχής
- Μεγάλη προσοχή για την αισθητική άποψη, θα πρέπει να ενσωματώνονται ομαλά με την όψη του κτιρίου και της περιοχής.
- Αρκετή απόσταση από γειτονικά κτίρια, ώστε να μην υπάρχουν παράπονα για το θόρυβο που μπορεί να προκαλέσει η περιστροφή των πτερυγίων.

Γενικά, οι περιοχές τοποθέτησης πρέπει να παρουσιάζουν μέση τιμή ταχύτητας ανέμου άνω των 5,5 m/s. Σε πυκνοκατοικημένους τόπους όμως, η μέση αυτή ταχύτητα μπορεί να διαφέρει αισθητά λόγω των διάφορων εμποδίων και της χωροταξικής διάταξης, με συνέπεια η

εγκατάσταση Α/Γ ακόμα και στην ίδια οροφή να παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στην αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή για αποστάσεις λίγων μέτρων. Σημαντικό είναι επίσης και το ύψος που βρίσκεται ο δρομέας, καθώς πιο ψηλά αποφεύγονται τα φαινόμενα τύρβης και παράλληλα ο άνεμος είναι έστω και λίγο πιο δυνατός, το οποίο όμως έχει ορατά αποτελέσματα στην παραγόμενη ισχύ, αφού η τελευταία εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας ανέμου. Ένα ακόμα αξιοσημείωτο στοιχείο που πρέπει να ελεγχθεί είναι η κύρια κατεύθυνση από την οποία προέρχονται οι υψηλές ταχύτητες ανέμου, αφού σε κάθε περιοχή διαφέρουν, οπότε η τοποθέτηση των Α/Γ όταν υπάρχουν εμπόδια θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο άνεμος να συναντά πρωτίστως την Α/Γ και στη συνέχεια τα διάφορα εμπόδια. Πρέπει, επίσης να ληφθεί υπόψη η τύρβη που δημιουργεί το ίδιο το κτίριο, από την οποία προκύπτει ότι ο δυνατότερος και πιο σταθερός άνεμος βρίσκεται στο κέντρο της οροφής και σε ύψος άνω του 30% του ύψους του κτιρίου (Εικ. 4.3) [7].



**Εικ. 4.3** Προσομοίωση ανέμου που συναντά κτίριο : όπως φαίνεται από την αριστερή κλίμακα, οι μεγαλύτερες και πιο σταθερές κατεύθυνσης τιμές ταχύτητας εμφανίζονται στο κέντρο της οροφής και σε κάποιο ύψος από αυτήν [Πηγή: «Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics», E. Hau, 2006]

Συνοψίζοντας όλες αυτές τις προϋποθέσεις, διαμορφώνονται τα κριτήρια που θα πρέπει να ακολουθηθούν για την επιτυχημένη τοποθέτηση μίας μικρής Α/Γ [6]:

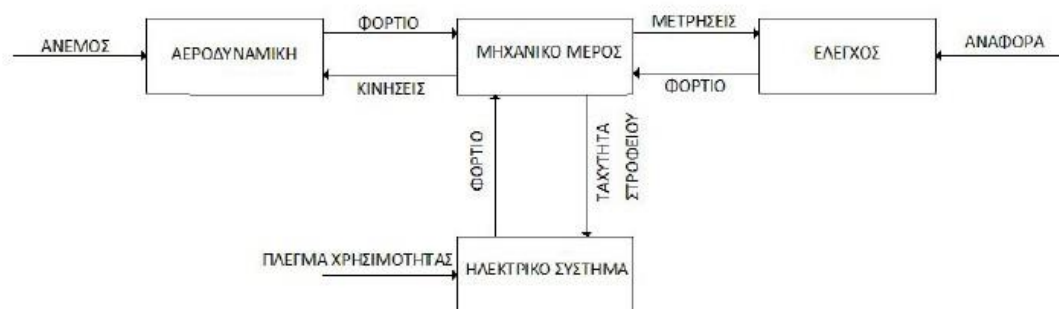
- Η μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή θα πρέπει να φτάνει τουλάχιστον τα 5,5 m/s.
- Η κορυφή του ιστού (για τις περιπτώσεις εγκατάστασης στο έδαφος) ή η οροφή του κτιρίου (για τις περιπτώσεις εγκατάστασης σε στέγη κτίσματος) θα πρέπει να βρίσκεται τουλάχιστον 50% πιο ψηλά από τα γειτονικά εμπόδια ή κτίσματα.
- Οι Α/Γ θα πρέπει να τοποθετούνται κοντά στο κέντρο μίας οροφής και προς την πλευρά της επικρατέστερης κατεύθυνσης του ανέμου.
- Το χαμηλότερο σημείο του δρομέα από την οροφή θα πρέπει να βρίσκεται σε ύψος τουλάχιστον 30% του ύψους του κτιρίου.
- Εάν είναι δυνατό, ο προσανατολισμός του κτιρίου θα πρέπει να είναι προς την κατεύθυνση από όπου φυσάει συχνότερα.

- Απαιτείται ότι η οροφή θα πρέπει να αντέχει στις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο δρομέα.
- Τοποθέτηση περισσότερων Α/Γ στην ίδια περιοχή ή κτίσμα εάν είναι δυνατόν, ώστε να αυξηθεί η ενεργειακή παραγωγή.
- Εξασφάλιση ότι η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας είναι σε αναλογία με τις ενεργειακές ανάγκες της εκάστοτε περιοχής ή κτιρίου.
- Τοποθέτηση αποθηκευτικών μέσων (συσσωρευτών) πριν την εγκατάσταση
- Λήψη μέτρων σχετικά με το flicker, το θόρυβο και τις δονήσεις
- Αισθητική αποδοχή των Α/Γ από τους γείτονες

#### 4.5 ΦΟΡΤΙΑ – ΔΡΩΣΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΤΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Όπως αναλύσαμε στο κεφάλαιο 3, κάθε Α/Γ αποτελείται από μία σειρά μηχανικών μερών. Τα κυριότερα από αυτά είναι: οι φτερωτές, ο άξονας, το σύστημα κίνησης, η γεννήτρια, η άτρακτος και ο πύργος. Οι δυνάμεις του ανέμου που ασκούνται στο στροφείο, πέρα από την επίδραση που έχουν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν και τα υπάρχοντα φορτία που ασκούνται. Δεδομένου ότι τα στοιχεία της ανεμογεννήτριας είναι περισσότερο ή λιγότερο ευέλικτα, τα προαναφερθέντα φορτία δημιουργούν κινήσεις. Επιπλέον, οι κινήσεις όλων των επιμέρους στοιχείων πρέπει να είναι δυναμικά εναρμονισμένες.

Στην Εικ. 4.4 παρουσιάζονται όλες οι πηγές των εξωτερικών φορτίων που ασκούνται στην Α/Γ. Το αεροδυναμικό φορτίο εξαρτάται από το εύρος της έντασης του ανέμου, καθώς επίσης και από τη κίνηση των μηχανικών μερών που εκτίθενται στον άνεμο. Παρόλο που η αιολική ενέργεια είναι απαραίτητη προϋπόθεση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών, αποτελεί παράλληλα και την πηγή πολλών προβλημάτων που περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους. Η ασταθής συμπεριφορά του ανέμου είναι η κύρια αιτία για το προαναφερθέν παράδοξο. Η χωρική διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί περιοδικές μεταβολές των φορτίων που ασκούνται στα πτερύγια. Τα περιοδικά φορτία που ασκούνται στην άτρακτο και στο πύργο, είναι αισθητά μικρότερα στη περίπτωση των ανεμογεννητριών που έχουν τρία πτερύγια, εξαιτίας της γεωμετρίας του στροφείου. Φυσικό επακόλουθο αυτού είναι ο πιο τακτικός έλεγχος των Α/Γ με δύο πτερύγια, εξαιτίας της μεγαλύτερης πιθανότητας εκτροπής.



**Εικ. 4.4** Αλληλεπίδραση του μηχανικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και του περιβάλλοντος [Πηγή: Control Engineering Laboratory, Chalmers University of Technology, Sweden]

Το φορτίο από το ηλεκτρικό σύστημα αποτελεί την ηλεκτρομηχανολογική ροπή για το στροφείο. Εάν γίνει προσπάθεια μείωσης της επίδρασης των εσωτερικών δυναμικών φορτίων ελέγχοντας τα εξωτερικά φορτία που ασκούνται, πρέπει να βασιστεί σε δύο βασικές αρχές. Η πρώτη είναι να χρησιμοποιηθεί άμεσα το φορτίο του συστήματος ενεργοποίησης. Η δεύτερη είναι να ελεγχτεί έμμεσα το αεροδυναμικό φορτίο, ελέγχοντας την κίνηση της γεννήτριας.

Υπάρχει ένα τέταρτο εξωτερικό φορτίο το οποίο δεν παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα, η δύναμη της βαρύτητας. Κάθε πτερύγιο δέχεται ένα ημιτονοειδές φορτίο το οποίο περιστρέφεται στο βαρυτικό επίπεδο. Ως εκ τούτου, ο λόγος για τον οποίο δεν συμπεριλήφθηκε το συγκεκριμένο φορτίο στο πιο πάνω σχήμα, δεν είναι επειδή το φορτίο αυτό είναι ασήμαντο, αλλά επειδή δεν μπορεί να ελεγχθεί.

Όσον αφορά την στατική προσομοίωση μιας μικρής ανεμογεννήτριας στην οροφή ενός κτιρίου την προσομοιάζουμε στατικά ως ένα πρόβολο ενώ το βάρος αυτής δεν ξεπερνά το βάρος μιας συνήθους μεγάλης συμβατικής μονάδας κλιματισμού σαν αυτές που απαντώνται συνηθέστατα στις οροφές δημοσίων κτιρίων.

Έμφαση, επίσης, πρέπει να δοθεί, όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες στις στέγες κτιρίων, στις συχνότητες συντονισμού και κατ'επέκταση στις δονήσεις που προκαλεί η λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Οι δονήσεις που θα προκαλούν θα είναι γενικά πολύ υψηλότερες από ότι οι φυσικές συχνότητες των κτιρίων. Εξακολουθούν να υπάρχουν ανησυχίες όσον αφορά την διέγερση των συχνοτήτων συντονισμού για κτίρια των διαφόρων τύπων κατασκευής και υψών, ενώ εκτός της ανησυχίας για ολόκληρο το κτίριο υπάρχει και για μεμονωμένα δομικά στοιχεία που μπορούν να διεγερθούν από τις δονήσεις. Για την αντιμετώπιση τέτοιων δυσκολιών έχουν εφευρεθεί διάφορες τεχνικές με επικρατέστερη ένα σύστημα ανάρτησης που μετριάξει τη μεταφορά δόνησης [8].

#### 4.6 ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ [9]

---

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες, γενικώς, έχουν σχεδιαστεί για περίπου 120.000 ώρες λειτουργίας σε ένα χρονικό διάστημα 29 ετών [9]. Ωστόσο η πραγματική διάρκεια ζωής εξαρτάται τόσο από την ποιότητα κατασκευής όσο και από τις κλιματικές συνθήκες στις οποίες θα εκτεθεί η ανεμογεννήτρια ενώ επίσης σημαίνουντα ρόλο έχουν και οι εργασίες συντήρησης οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

Όλοι οι τύποι ανεμογεννητριών είναι πολύ αξιόπιστοι, για αυτό και δεν χρειάζονται συνήθως συντήρηση. Ένας συνήθης - όμως - έλεγχος του όλου συστήματος είναι καλός για τη καλή λειτουργία του έτσι:

- Κατά τη διάρκεια των πρώτων τριών μηνών, μετά την εγκατάσταση, και μετά από πολύ ισχυρούς ανέμους, πρέπει να ελέγχεται πάντα η ένταση των αντηρίδων.
- Δύο τουλάχιστον φορές το χρόνο, έλεγχος και σφίξιμο στα παξιμάδια και τις βίδες που συγκρατούν τα πτερύγια, την ουρά και τους συνδέσμους του ιστού.
- Έλεγχος ότι όλες οι ηλεκτρικές συνδέσεις είναι καλά συνδεδεμένες και χωρίς σκουριά.
- Η συστοιχία των μπαταριών συντηρείται με τις οδηγίες του κατασκευαστή των μπαταριών.

#### 4.7 ΕΛΕΓΧΟΙ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΙΣ ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

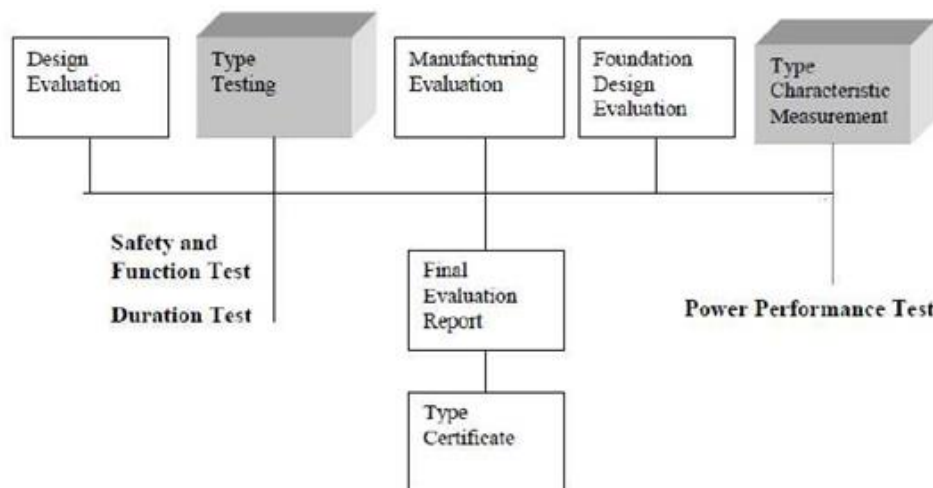
---

##### 4.7.1 Διαγνωστικοί έλεγχοι για μικρές ανεμογεννήτριες

Στις μικρές ανεμογεννήτριες πέραν της μέτρησης της καμπύλης ισχύος τους, πραγματοποιούνται κι άλλα τεστ που αφορούν στην απόδοσή τους, στις αντοχές τους, στις προδιαγραφές ασφαλείας τους και σε άλλα χαρακτηριστικά τους. Πολλοί από αυτούς τους ελέγχους γίνονται είτε από ειδικά εργαστήρια είτε από οργανισμούς αιολικής ενέργειας που υπάρχουν σε πολλές χώρες. Στην Ελλάδα, πραγματοποιούνται από το Κέντρο Ανανεώσιμων



Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) ή από άλλα πιστοποιημένα εργαστήρια. Οι έλεγχοι αυτοί ζητούνται συνήθως από τις κατασκευάστριες εταιρείες πριν προωθήσουν κάποια Α/Γ στο εμπόριο ή σπανιότερα από ιδιώτες για να διαπιστωθούν το κατά πόσο οι πραγματικές δυνατότητες των Α/Γ τους προσεγγίζουν τα θεωρητικά δεδομένα των εγχειριδίων που τις συνοδεύουν κατά την πώληση τους.



*Εικ. 4.5 Κάποιοι απαιτούμενοι έλεγχοι για την πιστοποίηση των μικρών ανεμογεωωητριών*

#### 4.7.2 Έλεγχοι της απόδοσης

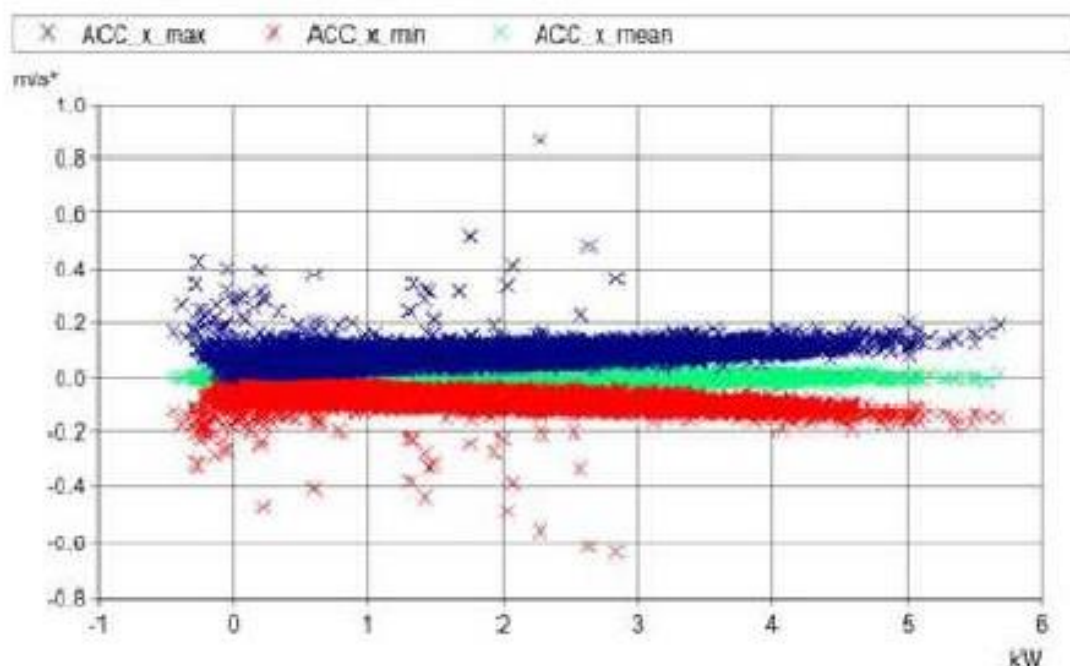
Η μέτρηση της καμπύλης ισχύος ανήκει σε αυτήν την κατηγορία δοκιμών και πολλές φορές γίνεται ώστε να υπάρξει σύγκριση των πραγματικών δυνατοτήτων της Α/Γ σε σχέση με την καμπύλη ισχύος που παρέχεται από τον κατασκευαστή της. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, μπορεί να γίνεται και καταγραφή της συχνότητας μέσω της οποίας προκύπτει η ταχύτητα περιστροφής, όταν πρόκειται για σύγχρονες γεννήτριες, ούτως ώστε να μπορεί να προκύψει ο λόγος ταχυτήτων ακροπερυγίου  $\lambda$ . Παράλληλα, γνωρίζοντας την απόδοση της γεννήτριας αναλόγως των στροφών ή του ρεύματος, είναι δυνατό να υπολογιστεί ο αεροδυναμικός συντελεστής ισχύος  $c_p$ , με τελικό αποτέλεσμα τον υπολογισμό της καμπύλης  $c_p - \lambda$  που αφορά την αεροδυναμική ικανότητα των πτερυγίων.

Ένας ακόμα έλεγχος που μπορεί να γίνει στις τριφασικές Α/Γ είναι ο έλεγχος της ποιότητας ισχύος, που πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο IEC standard 61400-21. Το τεστ αυτό περιλαμβάνει μετρήσεις της άεργου ισχύος, του flicker (οπτικό τρεμούλιασμα), των μεταβολών και των διακυμάνσεων της τάσεως και των αρμονικών που παράγονται. Μετά την επεξεργασία αυτών των μετρήσεων, συμπεραίνεται το κατά πόσο τα μεγέθη αυτά παρουσιάζονται στα επιθυμητά επίπεδα που ορίζονται από το πρότυπο IEC [10].

Σπουδαίας σημασίας αποτελεί και ο έλεγχος της διάρκειας των Α/Γ. Η δοκιμή διάρκειας εκτελείται για να προκύψει η απόδοση της Α/Γ κατά τη διάρκεια μακροπρόθεσμων περιόδων. Τα πειραματικά δεδομένα ταξινομούνται μηνιαία στις κατηγορίες χρόνου που διευκρινίζονται από τα πρότυπα και τα οποία υποβάλλονται σε μια άτυπη έκθεση. Η δοκιμή διάρκειας εκτελείται σύμφωνα με το πρότυπο IEC standard 61400-2. Το τεστ αυτό μπορεί να αντικαταστήσει τους ελέγχους των πτερυγίων και των δυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται σε μία μικρή Α/Γ. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται και κατά πολύ το κόστος των συνολικών ελέγχων που μπορούν να διεξαχθούν για μία μικρή Α/Γ. Προφανώς, οι έλεγχοι αυτοί διαρκούν μεγάλο χρονικό διάστημα, περίπου 6 μήνες ή περισσότερο μέχρι να υπάρξει ικανοποιητικός αριθμός δεδομένων ιδιαίτερα για τις μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου [11].

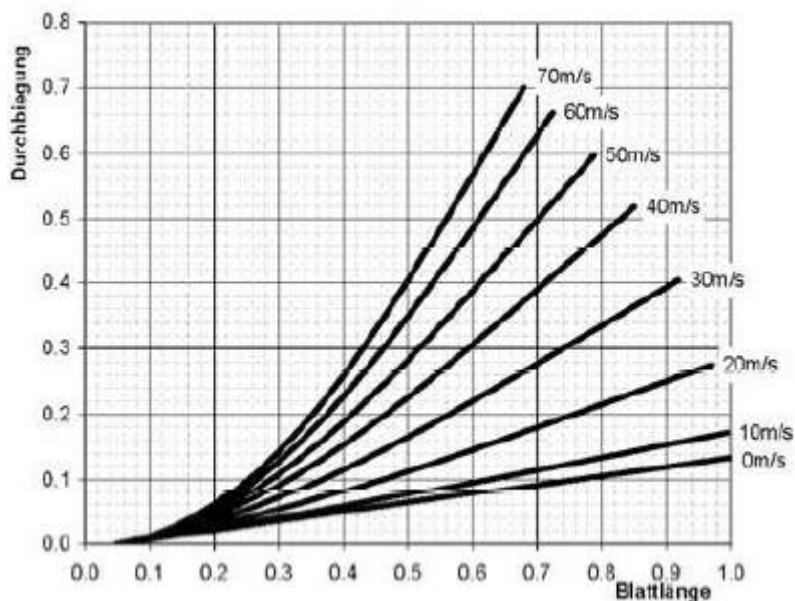
### 4.7.3 Έλεγχοι των αντοχών

Ο κύριος έλεγχος που αφορά την αντοχή των Α/Γ, είναι η μέτρηση των δυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται σε αυτές. Γίνεται καταγραφή των φορτίων στα διάφορα τμήματα μίας Α/Γ και συσχέτιση τους με τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του πνέοντος ανέμου (ταχύτητα, ένταση τύρβης, κτλ) και με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της (ταχύτητα περιστροφής, ρυθμίσεις ελέγχου, κτλ) με στόχο την ανάλυση της δυναμικής και κοπωτικής συμπεριφοράς της Α/Γ. Αυτές οι μετρήσεις αποτελούν έναν κρίσιμο παράγοντα για τον έλεγχο του σχεδιασμού μίας Α/Γ ή για τη βελτίωση των κατασκευαστικών της χαρακτηριστικών. Συνήθως, τέτοιου είδους μετρήσεις ζητούνται από τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών προκειμένου να ελεγχθούν τα νέα προϊόντα τους και να αποκτήσουν το πιστοποιητικό από τους οργανισμούς πιστοποίησης ανεμογεννητριών. Τα εν λόγω φορτία που υπολογίζονται, μετρούνται με τη βοήθεια ηλεκτρικών επιμηκυνσιομέτρων (strain gages), τα οποία τοποθετούνται σε κατάλληλα επιλεγμένα σημεία των τμημάτων της Α/Γ (στα πτερύγια, στον πύργο, στον κύριο άξονα, κτλ). Οι μετρήσεις και επεξεργασία αυτών γίνεται με το πρότυπο IEC standard 61400-13, διαρκούν περίπου τέσσερις μήνες και στόχος είναι η προσομοίωση όλων εκείνων των περιπτώσεων λειτουργίας (load cases) που έχουν προβλεφθεί από τον κατασκευαστή [12].



**Εικ. 4.6** Έλεγχος της αντοχής του πύργου : διάγραμμα της επιτάχυνσης του πύργου συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος της Α/Γ *aeroSmart5* [Πηγή: «The new generation of small wind energy converters», S. Siegfriedsen, SWEC]

Ένα εξίσου σημαντικό τεστ είναι κι η δοκιμή των πτερυγίων μίας Α/Γ. Κατά τη δοκιμή αυτή πραγματοποιείται πειραματικός προσδιορισμός της στατικής, δυναμικής και κοπωτικής συμπεριφοράς των πτερυγίων σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-23. Αναλυτικότερα, γίνεται εφαρμογή στατικών κι εναλλασσόμενων φορτίων κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες με στόχο την πιστοποίηση της δυσκαμψίας κι αντοχής του πτερυγίου κι εφαρμογή δυναμικών φορτίων συγκεκριμένης μορφής με στόχο τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων, των ιδιομορφιών και των συντελεστών απόσβεσης αυτού. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφονται οι παραμορφώσεις, οι μετατοπίσεις, οι κλίσεις κι οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται από το πτερύγιο, οι επιβαλλόμενες δυνάμεις κι οι επικρατούσες περιβαλλοντολογικές συνθήκες για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του πτερυγίου.



**Εικ. 4.7** Δοκιμή της εκτροπής των πτερυγίων για μεγάλα δυναμικά φορτία σε υψηλούς ανέμους [Πηγή: ΚΑΠΕ, <http://www.cres.gr/services>]

#### 4.7.4 Έλεγχος της ασφαλούς λειτουργίας

Ο σκοπός του ελέγχου ασφαλείας και λειτουργίας μίας Α/Γ είναι να επιβεβαιωθεί ότι διαθέτει τις κατάλληλες δυνατότητες να λειτουργήσει με ασφάλεια υπό όλες τις δυνατές συνθήκες, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος για οποιονδήποτε κι οτιδήποτε βρίσκεται κοντά σε αυτήν. Διεξάγεται σύμφωνα με το πρότυπο IEC standard 61400-2. Κατά τη διάρκεια των διάφορων δοκιμών, ελέγχονται ακραίες καταστάσεις, όπως η επείγουσα διακοπή λειτουργίας και η αεροδυναμική ικανότητα του stall των πτερυγίων σε πολύ μεγάλους ανέμους [11]. Επιπλέον, αυτές οι προδιαγραφές θα πρέπει να εξασφαλίζουν:

- Το συνεχή έλεγχο της ισχύος και της ταχύτητας περιστροφής της Α/Γ
- Τον έλεγχο της περιστροφής γύρω από τον πυλώνα της Α/Γ
- Τη σωστή συμπεριφορά του συστήματος στην περίπτωση διακοπής της σύνδεσης με το φορτίο
- Την προστασία σε περίπτωση υπερτάχυνσης της πτερυγίωσης
- Την επιβράδυνση της Α/Γ σε περίπτωση εκτάκτου κινδύνου

Επιπροσθέτως, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιβεβαίωση των παραπάνω προδιαγραφών:

- Οι εξωτερικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης, δηλαδή η μέση ετήσια ταχύτητα κι οι ακραίες τιμές ταχύτητας ανέμου, ο ριπαίος άνεμος, το ποσοστό της τύρβης, οι ακρότατες θερμοκρασίες, η σεισμικότητα της περιοχής, το είδος του εδάφους, κτλ.
- Η συμπεριφορά των διάφορων τμημάτων του συστήματος στις πιο δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας, όπως προκύπτουν από τους συνδυασμούς φορτίων, κοπωτικών ή μη.

#### 4.7.5 Έλεγχος των ακουστικών εκπομπών θορύβου

Ο θόρυβος που προκαλείται κατά την λειτουργία μιας Α/Γ είναι μηχανικός και αεροδυναμικός.

Ο μηχανικός θόρυβος προκαλείται από τον περιστρεφόμενο μηχανισμό στην άτρακτο, και κυρίως από το κιβώτιο των ταχυτήτων και την γεννήτρια. Κάποιες φορές είναι πιθανό να συμβάλλουν σ' αυτόν ο βοηθητικός εξοπλισμός, όπως αντλίες, συμπιεστές, περιστροφικά συστήματα κ.ο.κ. Αποτελεί μια αναγνωρίσιμη συχνότητα, που προκαλείται από τις παρεμβολές συχνότητας του κιβωτίου ταχυτήτων. Συνήθως, παράπονα εκδηλώνονται από την ύπαρξη μονότονων ήχων. Ο μηχανικός θόρυβος είτε προέρχεται από μετάδοση του στην δομή της Α/Γ από το κιβώτιο στην άτρακτο του ελάσματος βάσης, στα πτερύγια και τελικά στον πύργο είτε από τον άνεμο. Μάλιστα, έχει παρατηρηθεί ότι ο κυρίαρχος ήχος προέρχεται από το κιβώτιο και μεταδίδεται μέσω της δομής της Α/Γ. Για την μείωση του μηχανικού θορύβου προτείνεται [13]:

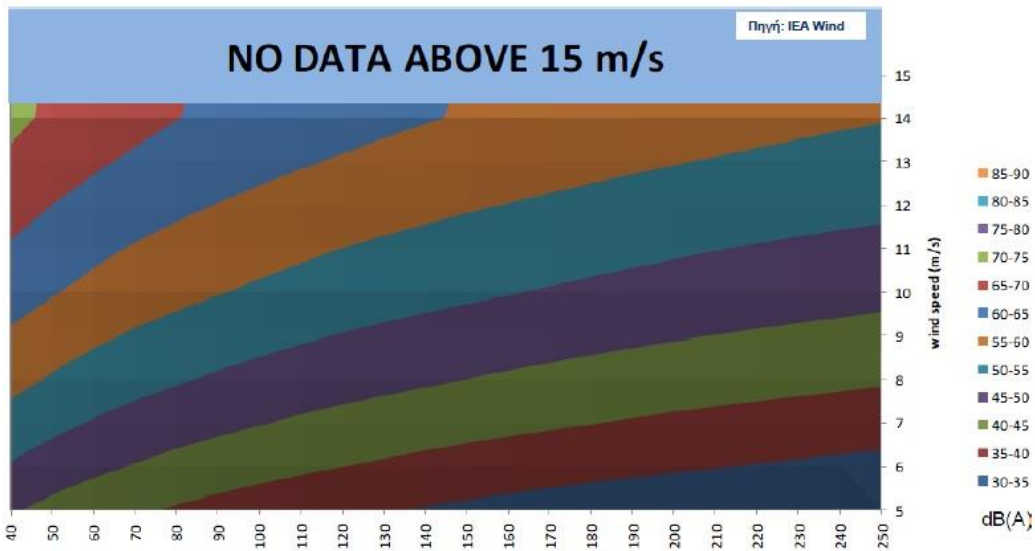
- Ο προσεκτικός σχεδιασμός και κατασκευή του κιβωτίου
- Η χρήση αντικραδασμικών εξαρτημάτων και συνδέσμων για την μείωση της μετάδοσης του στην ίδια την Α/Γ
- Ακουστική απόσβεση στην άτρακτο
- Η επιλογή υγρής ψύξης της γεννήτριας

Ο αεροδυναμικός θόρυβος δημιουργείται, λόγω διάφορων αιτιών, όπως της χαμηλής συχνότητας, του θορύβου τύρβης, του θορύβου της Α/Γ λόγω της κίνησης από τον άνεμο. Η γενεσιουργός αιτία του θορύβου χαμηλής συχνότητας είναι η αισθητή στα πτερύγια μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, λόγω του πύργου ή της διάτμησης του ανέμου. Το φάσμα του θορύβου κυριαρχείται από συχνότητες που διαπερνούν τα πτερύγια καθώς και αρμονικές αυτών. Υπάρχουν, βέβαια φίλτρα που περιορίζουν αυτές τις συχνότητες και έτσι δεν γίνονται αντιληπτές ως θόρυβος στο περιβάλλον. Η δημιουργία τύρβης προκαλεί μεταδιδόμενο στο εξωτερικό περιβάλλον θόρυβο, καθώς τα πτερύγια περιστρεφόμενα αλληλεπιδρούν με δίνες από την ατμοσφαιρική τύρβη. Ο θόρυβος αυτός είναι ιδιαίτερα ενοχλητικός, ενώ επηρεάζεται από την ταχύτητα πτερυγίων, την ένταση της τύρβης, αλλά και από την ποσότητα του αέρα. Το φαινόμενο, δεν έχει πλήρως εξηγηθεί, για αυτό και απαιτούνται μετρήσεις για τα επίπεδα του ήχου κατά την λειτουργία των Α/Γ. Η εισροή του ανέμου προκαλεί από μόνη της θόρυβο στο περιβάλλον, ακόμα και για ροή αέρα δίχως τύρβη. Ατέλειες στις επιφάνειες των πτερυγίων είναι πιθανό να παράγουν συνιστώσες μονότονου ήχου. Κύριοι τύποι του είναι ο θόρυβος πτερυγίου έλικας, ο θόρυβος των ακροπτερυγίων, ο θόρυβος από τις επιδράσεις stall, καθώς και ο θόρυβος που προέρχεται από τις ατέλειες επιφανείας [13].

Ο αεροδυναμικός θόρυβος ελαττώνεται με δύο κυρίως τρόπους, ο πρώτος είναι η μείωση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα και ο δεύτερος είναι η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στα πτερύγια. Βέβαια, με την ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής προκαλούνται απώλειες στην παραγόμενη ισχύ. Σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ο περιορισμός του θορύβου χαμηλών συχνοτήτων δύναται να επιτευχθεί. Η δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας σε χαμηλές ταχύτητες αποτελεί ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα ορισμένων Α/Γ ικανών σε λειτουργία σε ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου. Εδώ, πρέπει να τονιστεί, ότι ούτως ή άλλως θα σημειωθούν απώλειες στην παραγόμενη ισχύ και με τις δύο προτεινόμενες μεθόδους για την μείωση του αεροδυναμικού θορύβου.

Με όσα έχουν αναλυθεί μέχρι τώρα, είναι εμφανές ότι το κιβώτιο ταχυτήτων αναγνωρίστηκε ως η κύρια πηγή μονότονου, μηχανικού θορύβου. Έτσι, κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή του λαμβάνεται υπόψη αυτή η παράμετρος. Γι' αυτό και επιλέγεται επιπρόσθετη μονωτική επικάλυψη του, ως πρωταρχικό μέτρο ελέγχου του θορύβου. Αν καλυφθεί ολοκληρωτικά η άτρακτος και σχεδιαστούν προσεκτικά σιγαστήρες στα ανοίγματα εξαερισμού, ελαχιστοποιείται ο μηχανικός θόρυβος λόγω του αέρα. Όσο αναφορά το θόρυβο από την δομή της Α/Γ, μπορεί να αντιμετωπιστεί με την προσαρμογή ελαστικών εξαρτημάτων στο κιβώτιο και την γεννήτρια, που προκαλούν τον περισσότερο θόρυβο, αλλά και με ένα ελαστικό εξάρτημα στον άξονα που κινείται με υψηλή ταχύτητα περιστροφής.

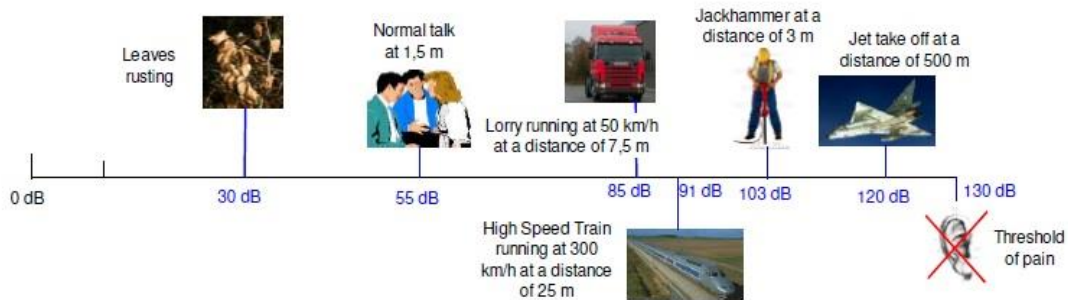
Άξονας μεγάλου μήκους περιστρεφόμενος με χαμηλή ταχύτητα ,έχει παρατηρηθεί ότι μεταφέρει λιγότερους κραδασμούς στον ρότορα. Ο θόρυβος των πτερυγίων έλικας ελέγχεται με την βοήθεια 1-2 mm αύξησης του πάχους του χείλους εκφυγής.



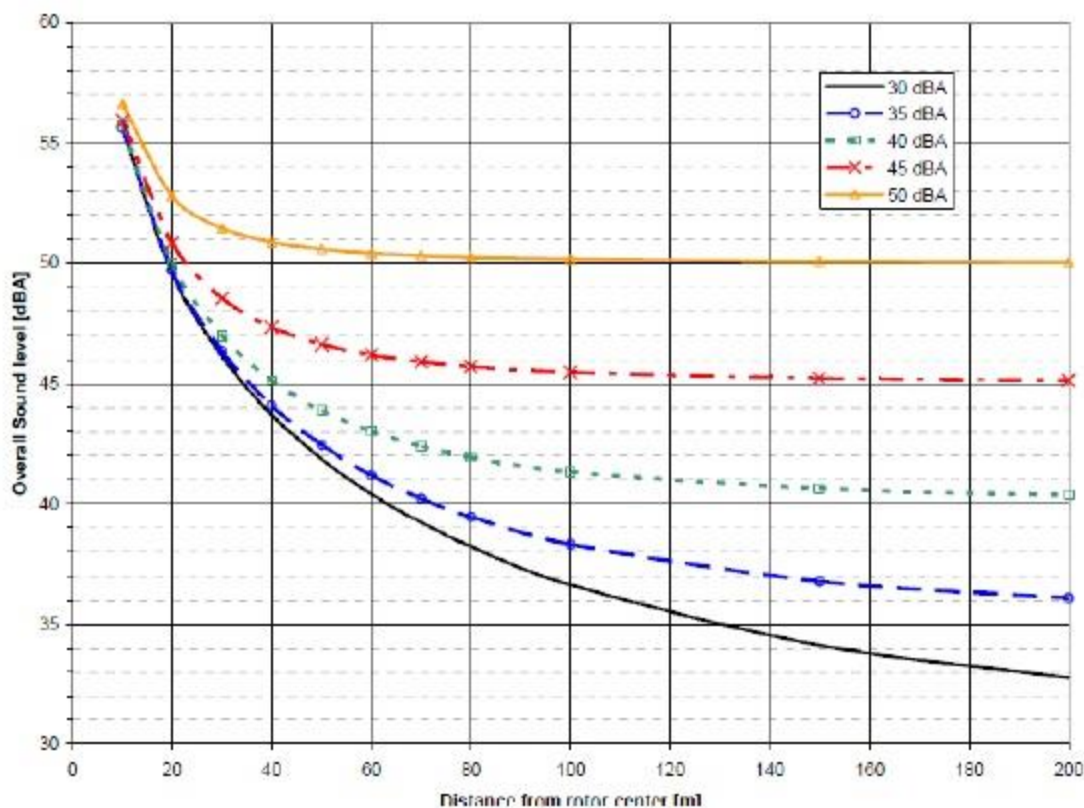
**Εικ. 4.8** Ακουστικός θόρυβος (σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-11) [Πηγή: «Πιστοποίηση μικρών ανεμογεννητριών: Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές», Σ. Τεντζεράκης, Τμήμα Αιολικής Ενέργειας, Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΚΑΠΕ ]

Ένα σύνηθες τεστ είναι κι αυτό της μέτρησης της ακουστικής ισχύος του θορύβου που εκπέμπεται από τη λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας και συσχετίσή του με τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του πνέοντος ανέμου καθώς και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της Α/Γ. Στόχος των δοκιμών αυτών είναι να διαπιστωθούν τα επίπεδα του παραγόμενου θορύβου σε έναν νέο τύπο Α/Γ προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία πιστοποίησης της ή να επιβεβαιωθεί η "εγγύηση" ακουστικών εκπομπών που δίνει ο κατασκευαστής της κι οι τιμές της οποίας χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη των αναμενόμενων επιπέδων θορύβου στη γύρω περιοχή. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται, γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC standard 61400-11. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων περιλαμβάνουν [12]:

- Τη στάθμη της εκπεμπόμενης ακουστικής ισχύος
- Την ηχοστάθμη ακουστικής πίεσης για το εύρος ταχυτήτων 6 - 10 m/s
- Την ανάλυση ανά 3dB του εκπεμπόμενου ακουστικού φάσματος
- Την ανάλυση τονικότητας του εκπεμπόμενου ακουστικού φάσματος



**Εικ. 4.9** Κλίμακα τυπικών θορύβων [Πηγή: «Urban Wind Turbines - Technology review A companion text to the Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers», WINEUR]



**Εικ. 4.10** Διάγραμμα που αναπαριστά τα επίπεδα θορύβου μίας Α/Γ σε συνάρτηση με την απόσταση από το δρομέα της [Πηγή: «Performance and Safety Standar», British Wind Energy Association, 2007]

#### 4.8 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΙΚΡΩΝ Α/Γ

Η μέτρηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής και τον υπολογισμό των εισροών από τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας. Επιπλέον η στατιστική αλλαγή των ακραίων καιρικών φαινομένων (ακραίες τιμές έντασης ανέμου & συχνότητα εμφάνισης), αποτελεί λόγο που καθιστά τη μέτρηση του αιολικού δυναμικού σημαντικό εργαλείο για το σωστό σχεδιασμό και ασφάλεια της επένδυσης [1].

Ο ενδιαφερόμενος θα πρέπει με τη συνεργασία του εξειδικευμένου προμηθευτή να εκτιμήσει τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων ή γενικά πληροφοριών από άλλες πηγές για το αιολικό δυναμικό στην περιοχή ενδιαφέροντος και να αποφασίσει αν θα προβεί ή όχι σε μετρήσεις στη θέση εγκατάστασης της μικρής ανεμογεννήτριας. Οι μετρήσεις συνίσταται να ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές που αρμόζουν στην εφαρμογή των μικρών ανεμογεννητριών ώστε να μπορούν να είναι αξιοποιήσιμες αλλά και συγκρίσιμες με άλλες μετρήσεις από άλλο επενδυτή σε άλλη περιοχή. Συστήνεται [1]:

- Μέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου σε ύψος κατ' ελάχιστον 10 μέτρων από το έδαφος στην θέση εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας.
- Δειγματοληψία της στιγμιαίας τιμής των μετρούμενων μεγεθών ανά δευτερόλεπτο και καταγραφή των ακραίων τιμών, της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης δεκαλέπτου.
- Χρήση βαθμονομημένων κυπελλοφόρων ανεμόμετρων.
- Ελάχιστη διάρκεια μετρήσεων 6 μηνών με 95% διαθεσιμότητα. Ενδεικνυόμενη διάρκεια μετρήσεων 1 έτος με 85% διαθεσιμότητα.

- Οι διαστάσεις των βραχιόνων και η τοποθέτηση των οργάνων να συμφωνούν με το πρότυπο IEC 61400-12-1 και ακόμη καλύτερα οι μετρήσεις να γίνονται από διαπιστευμένο κατά ISO 17025 εργαστήριο ώστε να είναι αποδεκτές από τράπεζες και χρηματοδοτικούς φορείς.

## 4.9 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΔΙΚΤΥΟ

---

Τα τελευταία χρόνια συντελείται μια αλλαγή στον τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες αποδεδειγμένα πλέον συντελούν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου με πιθανές καταστροφικές συνέπειες για τον άνθρωπο και όλες τις άλλες μορφές ζωής στη γη. Παράλληλα, τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σε συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι ανεξάντλητα ενώ τα ζητήματα ιδιοκτησίας και εκμετάλλευσης των ορυκτών καυσίμων έχουν οδηγήσει, ουκ ολίγες φορές, σε πολεμικές συρράξεις και ενεργειακές κρίσεις όπως στις δεκαετίες του '70 και '80. Έτσι, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, υπάρχει μια στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και σε τεχνολογίες που μπορεί να χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, αλλά έχουν υψηλότερο βαθμό απόδοσης όπως είναι οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Το γεγονός πως το κόστος παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται όσο αυξάνεται το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος, οδήγησε στη δημιουργία λίγων και μεγάλων μονάδων παραγωγής, είτε πρόκειται για θερμοηλεκτρικούς, υδροηλεκτρικούς ή πυρηνικούς σταθμούς. Η ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στους καταναλωτές που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση από τις μονάδες παραγωγής, μέσω γραμμών υψηλής τάσης και στη συνέχεια μέσω μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσης που βρίσκονται κοντά στους καταναλωτές. Έχοντας το οικονομικό κόστος ως το βασικότερο κριτήριο, περιβαλλοντικά και κοινωνικά ζητήματα, όπως η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, οι επιπτώσεις από την απόρριψη θερμότητας υδάτινους αποδέκτες, τα προβλήματα υγείας των ανθρώπων που διαβιώνουν κοντά σε μονάδες παραγωγής δεν λήφθηκαν σοβαρά υπόψη με αποτέλεσμα το ζήτημα της αλλαγής του μοντέλου παραγωγής να τίθεται επιτακτικά.

Μια τέτοια πρόταση αποτελεί η διεσπαρμένη παράγωγή ενέργειας η οποία βασίζεται σε ένα πλήθος μικρότερων μονάδων. Κατά τη διεσπαρμένη παράγωγή τοποθετούνται μονάδες Α.Π.Ε σε περιοχές όπου υπάρχει διαθέσιμη η πρωταρχική πηγή ενέργειας, καθώς και μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας κοντά σε τόπους κατανάλωσης όπως πόλεις και βιομηχανίες, εφόσον η μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις δεν είναι εφικτή. Ένα τέτοιο δίκτυο το οποίο περιέχει μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και πιθανώς μονάδες αποθήκευσης (όπως συσσωρευτές, σφονδύλους κ.α.) το οποίο σχεδιάζεται ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο αποκαλείται μικροδίκτυο.

## 4.10 ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΑ

---

### 4.10.1 Η Έννοια του Μικροδικτύου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το συγκεντρωτικό μοντέλο παραγωγής ενέργειας, δηλαδή τεράστιες μονάδες παραγωγής, οι οποίες είναι επιφορτισμένες με τη διανομή ενέργειας σε μεγάλες συνήθως αποστάσεις και οι οποίες στην πλειοψηφία τους αποτελούνται από συμβατικές μορφές καυσίμων παρουσιάζουν αρκετά προβλήματα κάποια από τα οποία είναι τα παρακάτω [14]:

- Οι μεγάλες αποστάσεις διανομής έχουν ως φυσικό επακόλουθο απώλειες κατά τη μεταφορά, αλλά και αυξημένο κόστος για τη δημιουργία ενός τόσο μεγάλου δικτύου.
- Περιβαλλοντικά προβλήματα λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων τα οποία ούτε ανεξάντλητα είναι αλλά ούτε και ιδιαίτερα φιλικά προς το φυσικό περιβάλλον.
- Κοινωνικά προβλήματα καθώς η ουσιαστική απαγόρευση των διεσπαρμένων κοινοτήτων να έχουν λόγο πάνω τόσο στον τρόπο αλλά και στο κόστος της ενέργειας που παράγουν –καταναλώνουν έχει ως αποτέλεσμα πρώτον τη μη ορθολογική παραγωγή και κατανάλωση αλλά και τη μη διάχυση της γνώσης, των εργαλείων και των μεθόδων που είναι ουσιώδη για την επιβίωση και την πρόοδο των ανθρώπινων και όχι μόνο κοινωνιών.

Μία λύση τουλάχιστον σε τεχνικό επίπεδο μπορεί να είναι η ανάπτυξη και η οργάνωση της παραγωγής σε μικροδίκτυα, τα οποία οδηγούν σε διεσπαρμένη παραγωγή δηλαδή σε μοντέλο παραγωγής που αποτελείται από μικρούς σταθμούς κοντά στα φορτία και αποτελούνται συνήθως από ένα συνδυασμό συμβατικών και ανανεώσιμων πηγών, κάτι που σε πρώτο επίπεδο τα κάνει εξαιρετικά φιλικά προς το περιβάλλον. Οι μέθοδοι και οι πηγές ενέργειας επιλέγονται με βάση τα χαρακτηριστικά κάθε περιοχής και φυσικά αξιοποιούνται όλες οι δυνατότητες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Έτσι τα μικροδίκτυα μπορεί να περιλαμβάνουν ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, μικρά υδροηλεκτρικά, κυψέλες καυσίμου, γεννήτριες Diesel και πολλά άλλα. Ακόμα περιλαμβάνουν μονάδες αποθήκευσης όπως συσσωρευτές και σφονδύλους. Μπορούν να λειτουργήσουν είτε αυτόνομα είτε να επικοινωνούν με το κεντρικό δίκτυο. Στην πρώτη περίπτωση πρέπει να ελέγχονται συνεχώς τα επίπεδα τάσης και συχνότητας όπως επίσης και η ισχύς. Στην δεύτερη περίπτωση το κεντρικό δίκτυο είναι αυτό που καθορίζει τα παραπάνω επίπεδα ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες.

Τα συνολικά πλεονεκτήματα που μπορεί να παρέχει στη λειτουργία του συστήματος ένα μικροδίκτυο συμπεριλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα περιοχών, όπως [15]:

- Τη συνέχιση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εντός του μικροδικτύου σε περιπτώσεις κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα απομονωμένης λειτουργίας μπορεί να εξασφαλίσει στον καταναλωτή που ανήκει στο εκάστοτε μικροδίκτυο την αδιάλειπτη λειτουργία την ίδια ώρα όπου το ανάντη δίκτυο διανομής μπορεί να είναι σε ασταθή κατάσταση ή να έχει καταρρεύσει προσωρινά (black out).
- Την αποδοτικότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την ελαχιστοποίηση των απωλειών και τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος με την ενσωμάτωση μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας (CHP), καθώς και με την εγκατάσταση αυτών κοντά στους καταναλωτές. Η τοπική κάλυψη του φορτίου συνεπάγεται ότι δεν παρεμβάλλονται ούτε μεγάλα μήκη γραμμών ούτε πολλοί ενδιάμεσοι καταναλωτές που αλλοιώνουν με τη χωρητική (ή επαγωγική αν πρόκειται για φορτία) συμπεριφορά τους τον συντελεστή ισχύος.
- Την πιο αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές εντός αυτού, το οποίο είναι ύψιστης σημασίας ζήτημα ιδιαίτερα για τους καταναλωτές, όπως νοσοκομεία κτλ., για τους οποίους είναι σημαντική η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.
- Τη μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση χρησιμοποιώντας σε μεγάλο βαθμό ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικότερα νέες τεχνολογίες, φιλικότερες προς το περιβάλλον. Η ενσωμάτωση τοπικά παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας διαμορφώνει ευνοϊκότερους όρους για το περιβάλλον και την αιεφόρο ανάπτυξη.
- Τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της προσαρμοστικότητας του συστήματος, αφού τα μικροδίκτυα ακολουθούν την αρχή της διεσπαρμένης παραγωγής, με αποτέλεσμα η ηλεκτρική ενέργεια να μην παράγεται αποκλειστικά από λίγες μεγάλες μονάδες.



- Τη μείωση του κόστους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών των καταναλωτών, όταν το μικροδίκτυο συμμετέχει σε πλήρως απελευθερωμένη αγορά ενέργειας.
- Την ενεργό διαχείριση των φορτίων (απορριψη φορτίων), διαδικασία η οποία είναι σε θέση να βοηθά σημαντικά στην ευστάθεια του δικτύου αλλά και στην οικονομική λειτουργία του συστήματος.
- Από την πλευρά του χειριστή του Δικτύου Διανομής Μέσης Τάσης ή της Επιχείρησης Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, η δυνατότητα τοπικής κάλυψης του φορτίου από το μικροδίκτυο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η δυνατότητα αναβολής επενδύσεων προς ενίσχυση του δικτύου και των κεντρικών σταθμών παραγωγής καθώς επίσης και η μεγαλύτερη ευελιξία στον έλεγχο του δικτύου, ιδιαίτερα κατά τον χειρισμό των συμφορήσεων και την επαναφορά του συστήματος μετά από σβέση, είναι μερικά από αυτά.

Κάποιες από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τις δυνατότητες ενός μικροδικτύου, από οικονομικής και τεχνικής απόψεως, αποτελούν:

- Ο τύπος του φορτίου (οικιακό, βιομηχανικό, εμπορικό ή συνδυασμός τους).
- Ο αριθμός των καταναλωτών.
- Ο τύπος των πηγών διανεμημένης παραγωγής (φωτοβολταϊκές πηγές, αιολική ενέργεια, κυψέλη καυσίμου/fuel cell κτλ.).
- Το μέγεθος και ο αριθμός των μονάδων παραγωγής.
- Το επίπεδο της αξιοπιστίας του συστήματος. Ένας τρόπος μέτρησης του συγκεκριμένου μεγέθους μπορεί να είναι το ποσοστό ανεπάρκειας τροφοδοσίας των προβλεπόμενων φορτίων.

Το μικροδίκτυο είναι σχεδιασμένο για λειτουργία τόσο σε διασύνδεση με το δίκτυο όσο και σε απομονωμένη κατάσταση, σε έκτακτες περιπτώσεις (interconnected or emergency mode). Η δυνατότητα διασύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε παραλληλισμένη λειτουργία καθιστά δυνατή την ανταλλαγή ενέργειας. Δηλαδή, την παροχή πλεονάζουσας ενέργειας σ' αυτό ή την απορρόφηση ενέργειας όταν οι μονάδες του μικροδικτύου δεν επαρκούν να καλύψουν τη ζήτηση. Ακόμα, σε περίπτωση μόνιμα διασυνδεδεμένης λειτουργίας είναι δυνατή η αξιόπιστη τροφοδότηση του μικροδικτύου από τις δικές του μονάδες σε περίπτωση κατάρρευσης του κεντρικού δικτύου, βάσει της δυνατότητας λειτουργίας σε απομονωμένη κατάσταση. Σε περιπτώσεις παραλληλισμένης λειτουργίας με το κεντρικό δίκτυο, αυτό που πρωτίστως επιδιώκεται είναι να μην προκαλεί το μικροδίκτυο προβλήματα. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα της τάσης πρέπει να ανταποκρίνεται στις προδιαγραφές του δικτύου και η απορροφώμενη ενέργεια να μην ξεπερνά τις απαιτήσεις ενός τυπικού καταναλωτή. Ακόμα περισσότερο, σε ένα δεύτερο επίπεδο, το μικροδίκτυο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παίζει υποστηρικτικό ρόλο ως προς το δίκτυο. Λειτουργία η οποία μπορεί για παράδειγμα να σημαίνει ότι το μικροδίκτυο θα απορροφά ή θα παρέχει ενεργό ή άεργο ισχύ όταν χρειάζεται για το κεντρικό δίκτυο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση απαιτείται η συντονισμένη λειτουργία και επικοινωνία μεταξύ των μονάδων ελέγχου του μικροδικτύου και του κεντρικού συστήματος.

#### 4.11 ΤΡΟΠΟΙ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

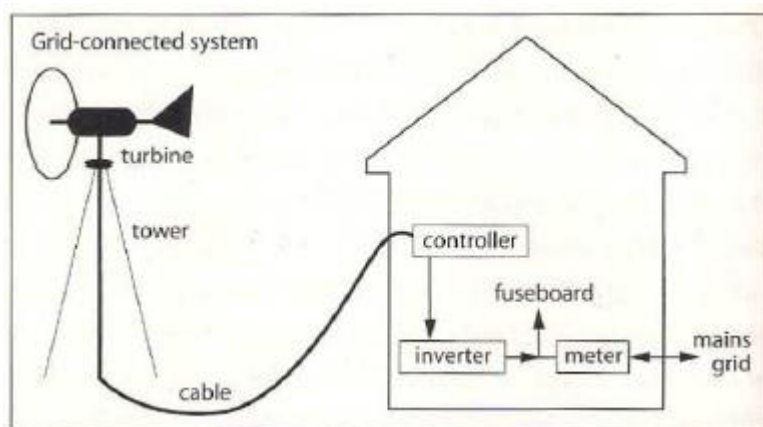
Οι πηγές που εμφανίζονται πιο συχνά σε ένα μικροδίκτυο είναι τα φωτοβολταϊκά και οι μικρές ανεμογεννήτριες. Το μικροδίκτυο μπορεί να αναφέρεται σε μια κοινότητα, σε ένα συγκρότημα κτιρίων ή ακόμη και σε μια μόνο οικία η όποια τροφοδοτείται για παράδειγμα από μια γεννήτρια Diesel, φωτοβολταϊκα και μικρές ανεμογεννήτριες. Η σύνδεση των πηγών μπορεί να γίνει στο ζυγό AC του μικροδικτύου (εναλλακτικά στο ζυγό χαμηλής τάσης του

δικτύου) ή σε ένα ζυγό DC ο οποίος περιλαμβάνει μέσα αποθήκευσης. Οι δυο συνδέσεις εφαρμόζονται σε διαφορετικές περιπτώσεις και προσεγγίσεις με καθεμία να έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της.

#### 4.11.1 Η AC Σύνδεση

Η σύνδεση μιας μικρής ανεμογεννήτριας σε ένα τυπικό μικροδίκτυο γίνεται στον κοινό ζυγό AC μέσω ενός αντιστροφέα. Με τον ίδιο ακριβώς τρόπο γίνεται η σύνδεση στο δίκτυο χαμηλής τάσης, είτε για πώληση ενεργείας στο δίκτυο, είτε για μείωση του κόστους ηλεκτρικής κατανάλωσης ανάλογα με τη νομοθεσία της κάθε χώρας.

Οι περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες διαθέτουν γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος που η τάση και η συχνότητα τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Η σύνδεση στον AC ζυγό γίνεται γενικά μέσω ηλεκτρονικών ισχύος. Έτσι η εναλλασσόμενη τάση γεννήτριας πρέπει πρώτα να περάσει από έναν ανορθωτή και μετά από έναν αντιστροφέα που θα μετατρέψει την DC τάση και συχνότητα του μικροδικτύου ή του δικτύου χαμηλής τάσης. Με τον τρόπο αυτό γίνεται εφικτή η μεγίστη απόδοση ισχύος από την ανεμογεννήτρια (Maximum Power Point Tracking).



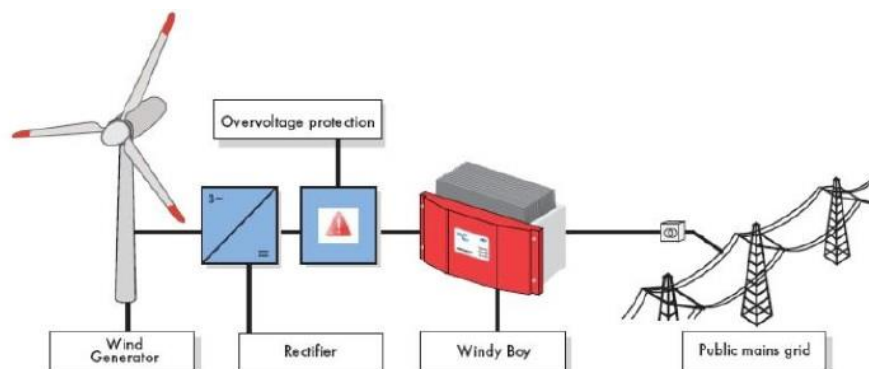
**Εικ. 4.11** Σύνδεση σε AC ζυγό [Πηγή: «Choosing Windpower», H. Piggott, Center for Alternative Technology, 2006]

#### 4.11.2 Δομή της AC Σύνδεσης

Η έξοδος της γεννήτριας μας, που είναι σύγχρονη τριφασική αρχικά ανορθώνεται μέσω μιας μη ελεγχόμενης ανόρθωσης ενώ στη συνέχεια περνά από ένα μονοφασικό αντιστροφέα όπου εκεί εκτελείται η λειτουργία MPPT η οποία αναλύεται παρακάτω. Τέλος αφού η έξοδος γίνει πάλι AC, όλο το σύστημα ξανασυνδέεται στο δίκτυο.

Η προστασία υπέρτασης που φαίνεται στο σχήμα συνοδεύει τον ανορθωτή και προστατεύει τον αντιστροφέα υπερτάσεις αλλά και την φτερωτή από ανάπτυξη μεγάλων επιταχύνσεων. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η ΗΕΔ της γεννήτριας και επομένως και η τάση που βλέπει ο ανορθωτής που χρειάζεται προστασία, αυξάνεται. Έτσι όταν φυσήξει πάνω από τα ονομαστικά και πριν προλάβει να επενεργήσει το σύστημα Furling, η γεννήτρια θα δώσει ισχύ στην προστασία υπέρτασης, που πλέον λειτουργεί σαν απορριπτικό φορτίο, και κατ' αυτόν τον τρόπο θα περάσουν μεγαλύτερα ρεύματα από το τύλιγμα της με αποτέλεσμα να επιβραδυνθεί, αυξάνοντας την ηλεκτρομαγνητική ροπή. Ουσιαστικά πρόκειται για σταδιακή βραχυκύκλωση της γεννήτριας με σταδιακή αφαίρεση αντιστάσεων, που ειδικά στις μικρές γεννήτριες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φρενάρισμα τους, έχει ως συνέπεια όμως την έντονη φθορά τους. Επίσης η συσκευή αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη για προστασία και

κατά τη διάρκεια που ο αντιστροφείας συγχρονίζει με το δίκτυο ενώ τέλος αν για κάποιο λόγο χαθεί το δίκτυο που τροφοδοτεί η γεννήτρια τότε όλη η ισχύς παρέχεται στο απορριπτικό φορτίο [16].



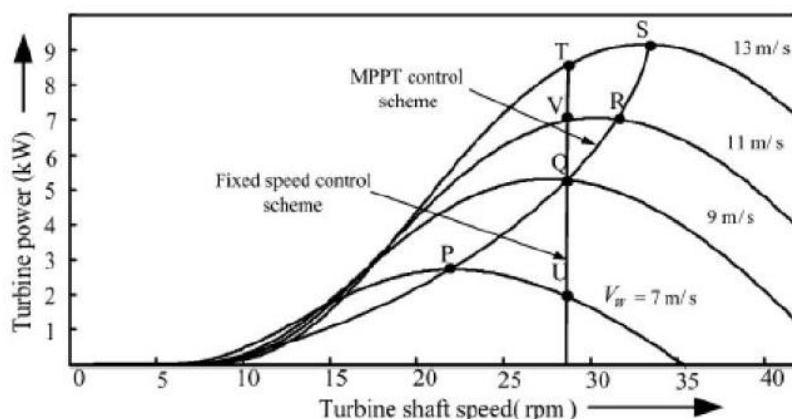
Εικ. 4.12 Δομή της AC σύνδεσης [Πηγή: «Choosing Windpower», H. Piggott, Center for Alternative Technology, 2006]

### 4.11.3 Λειτουργία Μεγιστοποίησης Αποδιδόμενης Ισχύος (MPPT)

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες παράγουν εναλλασσόμενη τάση η τιμή της οποίας εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, άρα και από την ταχύτητα του ανέμου. Ομοίως, από την ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται και η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης.

Όσον αφορά τις μικρές ανεμογεννήτριες οι περισσότερες διαθέτουν γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, ενώ κάποιες διαθέτουν γεννήτρια συνεχούς ρεύματος. Η σύνδεση στο ζυγό AC γίνεται μέσω ηλεκτρονικών ισχύος ενώ η απευθείας σύνδεση είναι σπάνια.

Λαμβάνοντας υπόψη την καμπύλη  $C_p$ - $\lambda$  που έχει αναπτυχθεί και σχολιαστεί παραπάνω, μπορούμε εύκολα να παρατηρήσουμε ότι ο αεροδυναμικός συντελεστής μεγιστοποιείται για συγκεκριμένες τιμές του  $\lambda$ . Συνεπώς για τις τιμές αυτές θα έχουμε και μέγιστη παραγόμενη ισχύ από την γεννήτρια. Αν λοιπόν σχεδιάσουμε το διάγραμμα ισχύος και στροφών, θα ήταν επιθυμητό η γεννήτρια να λειτουργεί στα σημεία εκείνα όπου μεγιστοποιείται η παραγόμενη ισχύς. Αυτό επιτυγχάνεται αν ακολουθεί την καμπύλη που ενώνει όλες τις κορυφές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Έτσι τόσο το  $\lambda$  όσο και το  $C_p$  παραμένουν στις μέγιστες τιμές τους και επομένως έχουμε μέγιστη ενέργεια και ισχύ.

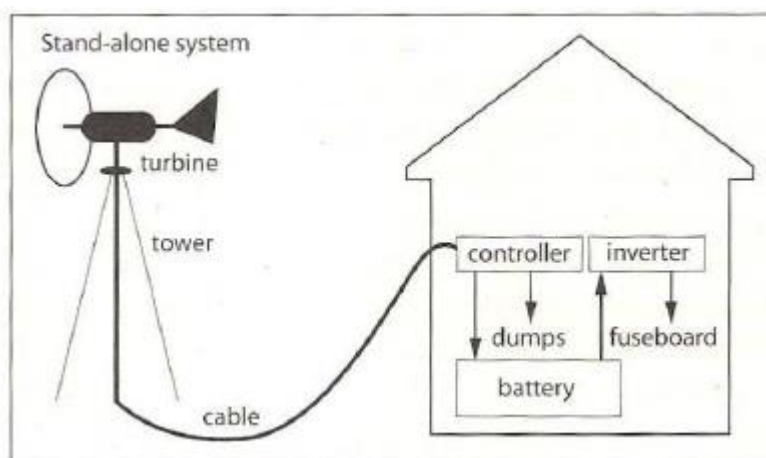


Εικ. 4.13 Αεροδυναμική ισχύς της έλικας σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα για διαφορετικές ταχύτητες ανέμου και η βέλτιστη καμπύλη ελέγχου [Πηγή: «Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines», G. Moor, J. Beukes]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται και η καμπύλη που θα ακολουθούσε μία γεννήτρια σταθερών στροφών. Από τη μορφή της καμπύλης είναι κατανοητό ότι μια τέτοιου είδους γεννήτρια δε λειτουργεί πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος καθώς δε μπορεί να μεταβάλλει τις στροφές της. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που γεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούνται πιο σπάνια.

#### 4.11.4 Η DC Σύνδεση

Έχει ήδη αναφερθεί ότι στην περίπτωση μιας κατοικίας ή γενικά μίας αυτόνομης εγκατάστασης, προτιμάται η DC σύνδεση καθώς από τη μία αποφεύγονται οι τουλάχιστον δύο αντιστροφείς της AC σύνδεσης και συνεπώς το κόστος γίνεται αρκετά μικρότερο. Συνήθως μία τέτοιου είδους εγκατάσταση περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες και είναι αρκετά εύκολο να υλοποιηθεί ακόμα και σε αμιγώς αστικά τοπία. Η σύνδεση έχει ως εξής [16]:



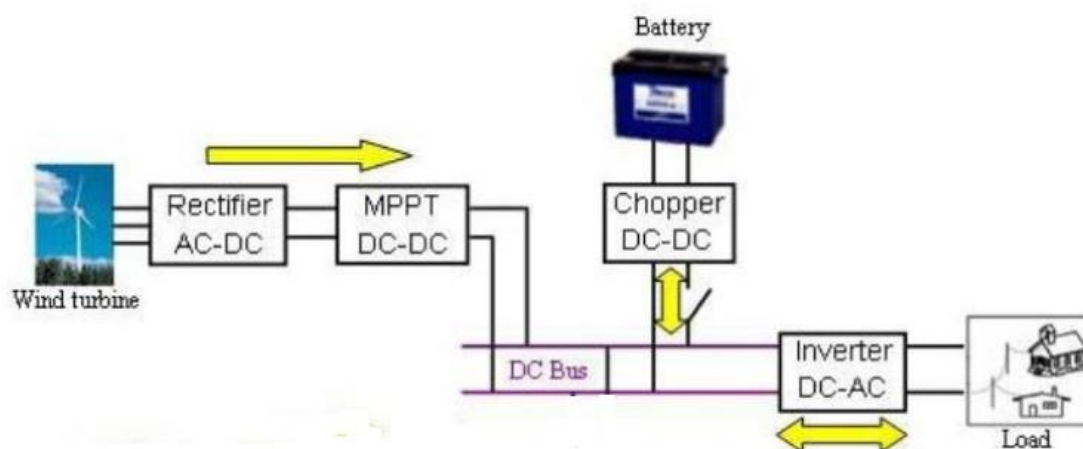
**Εικ. 4.14** Σύνδεση σε ζυγό DC [Πηγή: «Choosing Windpower», H. Piggott, Center for Alternative Technology, 2006]

Όλες οι πηγές συνδέονται άμεσα στον DC ζυγό συσσωρευτών, η τάση των οποίων αντιστρέφεται και λαμβάνει την κατάλληλη τιμή (τάση – συχνότητα) μέσω ενός αντιστροφέα πηγής τάσης. Εν συνεχεία ο αντιστροφέας αυτός τροφοδοτεί φορτίο. Όταν η παρεχόμενη ισχύς από τις πηγές είναι μεγαλύτερη από την ισχύ που καταναλώνεται αποθηκεύεται ενεργεία στους συσσωρευτές, ενώ όταν η παρεχόμενη ισχύς δεν επαρκεί για να καλύψει την κατανάλωση οι συσσωρευτές παρέχουν ισχύ στα φορτία.

Η έξοδος της γεννήτριας ανορθώνεται με βοήθεια ενός τριφασικού ανορθωτή γέφυρας. Επομένως πλέον η γεννήτρια μπορεί να συνδεθεί στις μπαταρίες. Ένας διπολικός διακόπτης παρεμβάλλεται μεταξύ γεννήτριας και ανορθωτή και στόχο έχει τη βραχυκύκλωση της γεννήτριας ώστε αυτή να μη περιστρέφεται σε περιπτώσεις εργασιών συντήρησης. Για να ελέγχεται το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών συνδέεται επίσης στο σύστημα και ένας ρυθμιστής φόρτισης, δουλειά του οποίου είναι να ελέγχει τόσο τον τρόπο φόρτισης και εκφόρτισης, καθ' όσον αυτοί πρέπει να ακολουθούν συγκεκριμένους αλγορίθμους, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο εισάγεται και εξάγεται αντίστοιχα από το σύστημα το απορριπτικό φορτίο.

Η σύνδεση απευθείας σε συσσωρευτές έχει το χαρακτηριστικό ότι η τάση της γεννήτριας παραμένει σταθερή και ίση περίπου με αυτή των συσσωρευτών. Επομένως δε μπορεί να ρυθμιστεί διαρκώς με σκοπό να έχουμε τη μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Κατ' αυτόν τον τρόπο λοιπόν δικαιολογείται και η έλλειψη συστήματος MPPT. Για να επιλυθεί το παραπάνω πρόβλημα αξιοποιείται ένας DC/DC μετατροπέας ο οποίος συνδέεται μεταξύ ανορθωτή και

συσσωρευτών και ενώ διατηρεί την τάση στην έξοδο του σταθερή και ίση με αυτή των συσσωρευτών έχει την δυνατότητα να ελέγχει την τάση στην είσοδο του ώστε η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί πάντα σε βέλτιστες τιμές  $C_p$  και  $\lambda$ . Μία τέτοια υλοποίηση φαίνεται παρακάτω :



**Εικ. 4.15** Σύστημα ανεμογεννήτριας σε DC σύνδεση με δυνατότητα MPPT [Πηγή: «Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines», G. Moor, J. Beukes]

Συμπερασματικά, τα μικρά συστήματα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνεργασία με το δίκτυο ή σε αυτόνομες εφαρμογές. Στα διασυνδεδεμένα συστήματα, η ενέργεια από την ανεμογεννήτρια καλύπτει το φορτίο (φωτισμός, λοιπές ηλεκτρικές χρήσεις) όταν είναι επαρκείς. Αν είναι λιγότερη από την απαιτούμενη, το δίκτυο καλύπτει τη διαφορά ενώ στην αντίθετη περίπτωση το πλεόνασμα πωλείτε στο δίκτυο. Η παραπάνω διαδικασία εξασφαλίζει ότι όλη η ενεργεία που παράγεται χρησιμοποιείται με τον ένα ή τον άλλο τρόπο προς όφελος του ιδιοκτήτη. Εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί στο τέλος κάθε περιόδου, ο Διαχειριστής του δικτύου μετράει τι κιλοβατώρες που έχει παράγει η ανεμογεννήτρια και ή σας καταβάλλει τα αντίστοιχο ποσό ή τις συμψηφίζει με τις κιλοβατώρες που καταναλώσατε. Στην ηπειρωτική χώρα, καθήκοντα διαχειριστή εκτελεί ο ΔΕΣΜΗΕ ένας ειδικός ανεξάρτητος φορέας, υπεύθυνος για την ομαλή λειτουργία του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου. Στα νησιά, καθήκοντα διαχειριστή εκτελεί η ΔΕΗ. Μια διασυνδεδεμένη ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε καθεστώς παραγωγού ή σε καθεστώς αυτοπαραγωγού. Στο καθεστώς παραγωγού, πωλείται το σύνολο της ενέργειας που παράγει η ανεμογεννήτρια. Σε καθεστώς αυτοπαραγωγού, η περισσότερη ενέργεια καταναλώνεται από κάποια ηλεκτρική εγκατάσταση (π.χ. την κατοικία ή το γραφείο σας) και ότι απομένει διοχετεύεται στο δίκτυο για πώληση. Προσοχή όμως, η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο για πώληση, δεν μπορεί να ξεπεράσει το 20% της συνολικής ενέργειας που έχει παραχθεί από την ανεμογεννήτρια. Παλιότερα επειδή η τιμή πώλησης του ρεύματος που παραγόταν από ανεμογεννήτριες ήταν μικρότερη από την τιμή με την οποία αγοράζαμε ρεύμα από τη ΔΕΗ, συνέφερε περισσότερο η κατανάλωση από την πώληση. Για το λόγο αυτό για μια διασυνδεδεμένη ανεμογεννήτρια προτιμήτο συνήθως το καθεστώς του αυτοπαραγωγού. Το καθεστώς του παραγωγού επιλεγόταν μόνο στις περιπτώσεις που ήταν δυνατή η εγκατάσταση ανεμογεννήτριας με παραγωγή πολύ μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να καταναλώσει η ηλεκτρική μας εγκατάσταση, οπότε για να μην πάει χαμένη επελέγετο η πώληση της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πλέον, με τις αναθεωρημένες τιμές πώλησης στη ΔΕΗ, το κλίμα έχει αντιστραφεί και το καθεστώς του παραγωγού προβλέπεται κερδοφόρο, όπου οι συνθήκες το επιτρέπουν. Πιθανότατα ο αριθμός των παραγωγών θα αυξηθεί έναντι των αυτοπαραγωγών σύντομα. Δείγματα για αυτό το μέτρο δεν έχουμε ακόμα καθότι είναι πολύ πρόσφατο. Τα αυτόνομα συστήματα μπορεί να είναι κατάλληλα για σπίτια, αγροκτήματα ή ακόμη ολόκληρες κοινότητες. Είναι απαραίτητο να περιλαμβάνουν διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας ή πρόσβαση σε άλλη μορφή ενεργείας για την κάλυψη των

ενεργειακών αναγκών σε περιόδους μειωμένου αιολικού δυναμικού. Οι μπαταρίες αποθήκευσης είναι η καρδιά ενός αυτόνομου συστήματος. Αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια για χρήση σε περιόδους που η ανανεώσιμη πηγή δεν είναι διαθέσιμη. Σε ένα τέτοιο σύστημα όμως υπάρχουν πολλές απώλειες. Τα αυτόνομα συστήματα είναι σύνθετα και οι πολλές διαδοχικές μετατροπές ενέργειας αυξάνουν τις απώλειες και μειώνουν τη συνολική απόδοση του συστήματος. Μια άλλη κατάσταση όπου υπάρχει απώλεια ενέργειας είναι σε περιόδους με αυξημένο άνεμο όπου η παραγόμενη ενέργεια ξεπερνά την απαιτούμενη για την κάλυψη του φορτίου και την φόρτιση των μπαταριών. Τότε μέρος της παραγόμενης ενέργειας δεν χρησιμοποιείται. Η ικανότητα αποθήκευσης πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να μπορεί να καλύπτει τις ανάγκες κατά τη διάρκεια των περιόδων μειωμένης παραγωγής. Συνήθως η συστοιχία των μπαταριών σχεδιάζεται για 1-3 ημέρες λειτουργίας χωρίς άνεμο.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] «Οδηγός Μικρών Ανεμογεννητριών», ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, 2012 επίσημη ιστοσελίδα: [www.eletaen.gr](http://www.eletaen.gr)
- [2] «Μικρές Ανεμογεννήτριες», Θ. Γεωργακόπουλος, Μέλος της Εξελεγκτικής Επιτροπής της ΕΛΕΤΑΕΝ, Συνέδριο ENERTECH 2011
- [3] «Μικρές Ανεμογεννήτριες-Τεχνολογία - Αγορά - Εφαρμογές- Νομοθεσία», Ε. Τζέν, Τμήμα Αιολικής Ενέργειας, ΚΑΠΕ, ENERTECH 2011
- [4] «Μικρές Ανεμογεννήτριες, Εφαρμογές στον Οικιακό Τομέα», Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών, Οκτώβριος 2009, επίσημη ιστοσελίδα: [www.cea.org.cy](http://www.cea.org.cy)
- [5] «Wind Power Generation and Wind Turbine Design», Wei Tong, WIT Press 2010
- [6] «Urban wind turbines: guidelines for small wind turbines in the built Environment», J. Cace, E. ter Horst, K. Syngellakis, M. Niel, P. Clement, R. Heppener, E. Peirano, Wineur, 2007
- [7] «Wind Turbines : Fundamentals, Technologies, Application, Economics», Eric Hau, 2006
- [8] «Built-Environment Wind Turbine Roadmap», J. Smith, T. Forsyth, K. Sinclair, and F. Oteri, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report, 2012
- [9] «Urban Wind Turbinew - Technology review-A companion text to the Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers, WINEUR
- [10] «Small Wind Turbine Testing Results from the National Renewable Energy Laboratory», A. Bowen, A. Huskey, H. Link, K. Sinclair, T. Forsyth, D. Jager, J. van Dam, J. Smith, NREL 2010
- [11] «Certification Testing for Small Wind Turbines», D. Corbus, H. Link, S. Butterfield, C. Stork, C. Newcomb, T. Sasseen, NREL 1999
- [12] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, <http://www.cres.gr/services>
- [13] «Wind Energy Handbook», T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, J. Wiley&Sons, 2001
- [14] «Microgrids and Active Distribution Networkd», Chowdhury S., Chowdhury S.P., Crossley P., IET Renewable Energy Series 6, Institution of Engineering and Technology, 2009
- [15] «Επίδραση της τιμολόγησης των ΑΠΕ στα Μικροδίκτυα», Α. Βαλαλάκη, Διπλωματική εργασία, 2010
- [16] «Μελέτη ,προσομοίωση της λειτουργίας μικρής ανεμογεννήτριας αξονικής ροής», Π. Κοτσαμπόπουλος ΕΜΠ, 2010
- [17] «Small Wind Annual Report», IEA 2009
- [18] «The new generation of small wind energy converters», S. Siegfriedsen, SWEC

- 
- [19] «Πιστοποίηση μικρών ανεμογεννητριών: Υφιστάμενη κατάσταση και προοπτικές», Σ. Τεντζεράκης, Τμήμα Αιολικής Ενέργειας, Διεύθυνση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ΚΑΠΕ
- [20] «Urban Wind Turbines - Technology review A companion text to the Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers», Performance and Safety Standar», British Wind Energy Association, 2007
- [21] «Choosing Windpower», Center for Alternative Technology, H. Piggott, 2006
- [22] «Maximum Power Point Tracking methods for small scale Wind Turbines», Gary Moor, Johan Beukes,

# 5

## ΤΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

### 5.1 ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ Envi-Met ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ

Το ENVI-met αποτελεί ένα περιβαλλοντικό-μετεωρολογικό πρόγραμμα το οποίο μέσω ενός τρισδιάστατου μη υδροστατικού μοντέλου προσομοιώνει, κυρίως μέσα στον αστικό ιστό, την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφόρων δομημένων επιφανειών, της βλάστησης και του αέρα. Επιτρέπει επίσης τη διερεύνηση της επίδρασης που ασκούν μικρής κλίμακας παρεμβάσεις όπως για παράδειγμα, η φύτευση δέντρων, η δημιουργία χώρων πρασίνου και η δημιουργία συγκροτημάτων κτιρίων στο αστικό μικροκλίμα. Η χωρική του ανάλυση δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης της παραπάνω αλληλεπίδρασης σε μικρή κλίμακα [1].

Η λειτουργία του βασίζεται στην τρισδιάστατη απεικόνιση του εκάστοτε μελετώμενου χώρου, λαμβάνοντας υπ' όψιν ταυτόχρονα την επίδραση του χρόνου και τα μεγέθη των παραγόντων που αυτός επηρεάζει (π.χ. η θερμοκρασία μιας συγκεκριμένης χρονιάς, ημέρας και ώρας του μελετώμενου χώρου). Ακόμη, το μοντέλο βασίζεται στη φυσική και τους υδροδυναμικούς και θερμοδυναμικούς νόμους της. Έτσι αναπαράγει τις φυσικές διαδικασίες της ατμόσφαιρας που επηρεάζουν το μικροκλίμα της περιοχής [2].

Οι κύριες προγνωστικές μεταβλητές που υπολογίζονται από το Envi-met είναι οι ακόλουθες:

- ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου
- θερμοκρασία εδάφους και αέρα
- υγρασία εδάφους και αέρα
- ατμοσφαιρική τύρβη
- διασπορά αερίων και μικροσωματιδίων

Οι δυνατότητες που παρέχει το Envi-met δεν έχουν περάσει απαρατήρητες από την επιστημονική κοινότητα. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότεροι εθνικοί και διεθνείς διαγωνισμοί που αφορούν έργα ανάπλασης ανοιχτών χώρων, ζητούν βιοκλιματική μελέτη βασισμένη στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, ενώ αρκετά είναι και τα πανεπιστήμια που με τη βοήθειά του διεξάγουν κλιματολογικές έρευνες.

Το γεγονός ότι το Envi-met θεωρείται αξιόπιστο στην προσομοίωση κλιματικών διαδικασιών δεν είναι καθόλου τυχαίο. Και αυτό διότι το λογισμικό του βασίζεται σε εξελιγμένους υπολογισμούς ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – C.F.D.), οι οποίοι χρησιμοποιούν αριθμητικές μεθόδους και αλγόριθμους για την επίλυση προβλημάτων ροής ρευστών. Έχει σχεδιαστεί για την ανάλυση του μικροκλίματος και της ποιότητας του τοπικού ανέμου. Είναι σε θέση να επιλύει τρισδιάστατες τυρβώδεις ροές υπολογίζοντας σύνθετες θερμοκρασιακές κατανομές, ποσοστά υγρασίας, την ακτινοβολία μικρού και μεγάλου μήκους



κύματος και τις συγκεντρώσεις αερίων και μικροσωματιδίων στον αέρα σε τοπική κλίμακα. Επιπλέον, περιλαμβάνει και ένα απλό βιομετεωρολογικό μοντέλο για να προβλέπει την θερμική άνεση. Προωθεί λοιπόν μέσω του PPD value (Predicted Percentage of Dissatisfied) μια εκτίμηση του ποσοστού των ανθρώπων που θα ήταν δυσαρεστημένοι με τις υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες (αναφέρεται ως PMV).

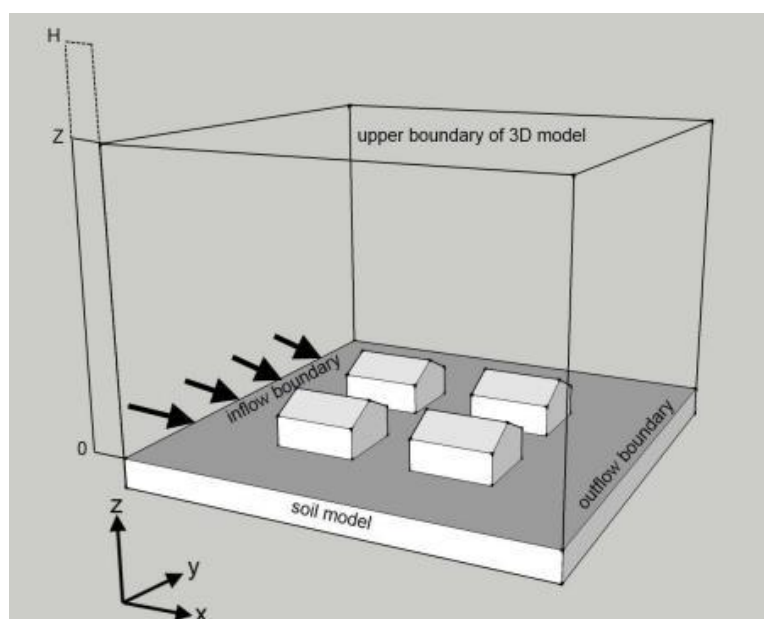
Σημειώνεται ότι το Envi-met είναι σχεδιασμένο για προσομοιώσεις σε μικρή κλίμακα. Ως ένα C.F.D. μοντέλο, έχει υψηλές απαιτήσεις από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή (CPU). Συνεπώς όσο μεγαλώνει το μέγεθος των προς προσομοίωση περιοχών, η πολυπλοκότητά τους και οι χρόνοι προσομοίωσης τόσο δυσκολότερη γίνεται η ανάλυση των δεδομένων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν στους υπολογισμούς [12]:

- Τη ροή ακτινοβολίας μικρού και μεγάλου μήκους κύματος, όπως επίσης και τη σκίαση
- Την ανάκλαση ακτινοβολίας και την ακτινοβολία από τα κτίρια και τη βλάστηση
- Τη διαπνοή, την εξάτμιση και την αισθητή ροή θερμότητας από τη βλάστηση στον αέρα, με πλήρη προσομοίωση όλων των φυσικών παραμέτρων των φυτών όπως, για παράδειγμα, ο ρυθμός φωτοσύνθεσης.
- Την επιφανειακή θερμοκρασία και αυτήν των τοίχων, για κάθε σημείο στον κάρναβο και κάθε τοίχο.
- Την ανταλλαγή θερμότητας και νερού στην εδαφική μάζα
- Βιομετεωρολογικές παραμέτρους, όπως η M.R.T. και ο δείκτης P.M.V
- Τη διασπορά διαφόρων αερίων και σωματιδίων, καθώς και την απόθεση των τελευταίων στα φύλλα και στις επιφάνειες.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παράγοντες πρόγνωσης και οι εξισώσεις που τους περιγράφουν κατά την προσομοίωση στο πρόγραμμα Envi-met 3.1.

## 5.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ Envi-Met 3.1



**Εικ. 5.1** Βασική δομή του μοντέλου Envi-met [Πηγή: «Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met», S. Huttner, Διδακτ. Διατριβή, 2012]

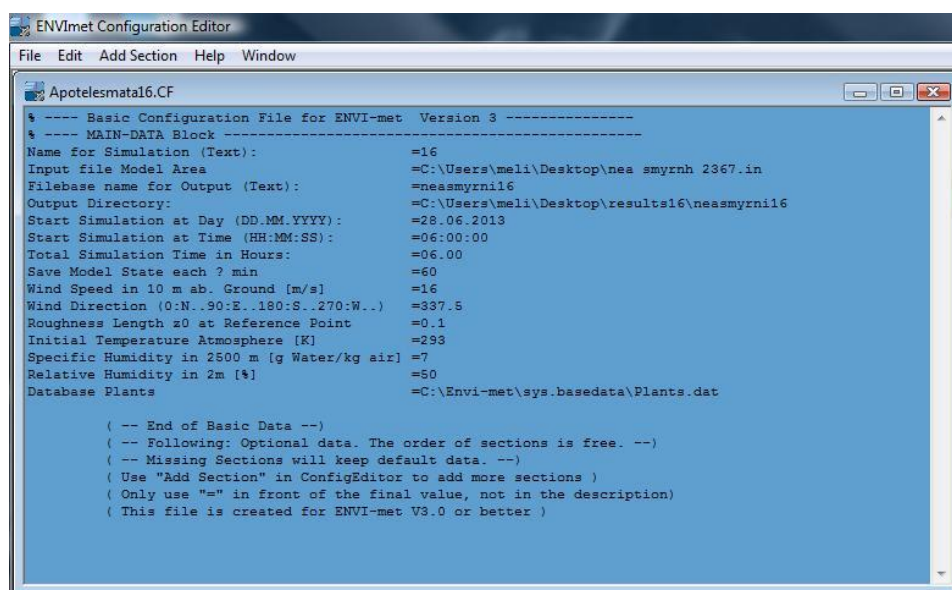
Στην εικόνα 5.1 φαίνεται η βασική δομή του μικροκλιματικού μοντέλου του Envi-met. Είναι σχεδιασμένο στις 3 διαστάσεις του χώρου, με τις 2 οριζόντιες (x,y) και τη μια κατακόρυφη (z). Στο εσωτερικό του τοποθετούνται τα βασικά στοιχεία που προσδιορίζουν την περιοχή μελέτης (κτίρια, βλάστηση, διάφορα είδη επιφανειών) μέσω του αρχείου εισαγωγής περιοχής (Area input file .IN). Για να γίνει χρήση των αριθμητικών μοντέλων του προγράμματος, η περιοχή πρέπει να αναχθεί σε μια εσχάρα κελιών (Grid cells). Όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των κελιών, τόσο ρεαλιστικότερη και ακριβέστερη είναι η προσομοίωση αλλά ταυτόχρονα απαιτούνται περισσότερα από αυτά για να καλύψουν την περιοχή μελέτης, συνεπώς αυξάνεται ο χρόνος υπολογισμού. Για την εκάστοτε προσομοίωση απαιτείται ένας συμβιβασμός μεταξύ ακρίβειας και ανάλυσης του μοντέλου, στοιχεία που επηρεάζονται άμεσα από τη διάσταση και τον αριθμό των κελιών. Σημειώνουμε ότι πάνω από το συνδυασμό 100x100x30 κελιών το μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί μεγάλο και απαιτείται αρκετός χρόνος επεξεργασίας και σημαντική υπολογιστική ισχύς (CPU) για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### 5.3 ΡΟΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ Envi-Met 3.1

#### Κύριο Αρχείο Διαμόρφωσης (Main Configuration File .CF)

Στο .CF (Configuration File) εισάγονται οι ρυθμίσεις της εκάστοτε προσομοίωσης. Κάθε προσομοίωση ορίζεται από το δικό της .CF ενώ περιλαμβάνει μια ομάδα βασικών πληροφοριών οι οποίες είναι απαραίτητες για τη λειτουργία του μοντέλου. Αυτές είναι [3]:

- Το όνομα της προσομοίωσης
- Το όνομα του αρχείου εισαγωγής της περιοχής (Area Input File .IN)
- Το όνομα και η θέση των παραγόμενων αρχείων (Output Files)
- Η ημέρα και ώρα της προσομοίωσης
- Η διάρκειά της
- Το διάστημα αποθήκευσης δεδομένων
- Οι βασικές μετεωρολογικές ρυθμίσεις που αφορούν: την ταχύτητα του ανέμου στα 10 m, από το έδαφος, τον δείκτη τραχύτητας του εδάφους  $z_0$ , την διεύθυνση του ανέμου, την αρχική ατμοσφαιρική θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία στα 2500 m, τη σχετική υγρασία στα 2 m και τη θέση της βιβλιοθήκης των αρχείων φυτών στον υπολογιστή.



```

ENVI-met Configuration Editor
File Edit Add Section Help Window

Apotelesmata16.CF
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):           =16
Input file Model Area                 =C:\Users\meli\Desktop\nea_smyrnh_2367.in
Filebase name for Output (Text):      =neasmyrn16
Output Directory:                    =C:\Users\meli\Desktop\results16\neasmyrn16
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY): =28.06.2013
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):  =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:       =06.00
Save Model State each ? min          =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]  =16
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =337.5
Roughness Length z0 at Reference Point =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]   =293
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7
Relative Humidity in 2m [%]          =50
Database Plants                       =C:\Envi-met\sys_basedata\Plants.dat

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )

```

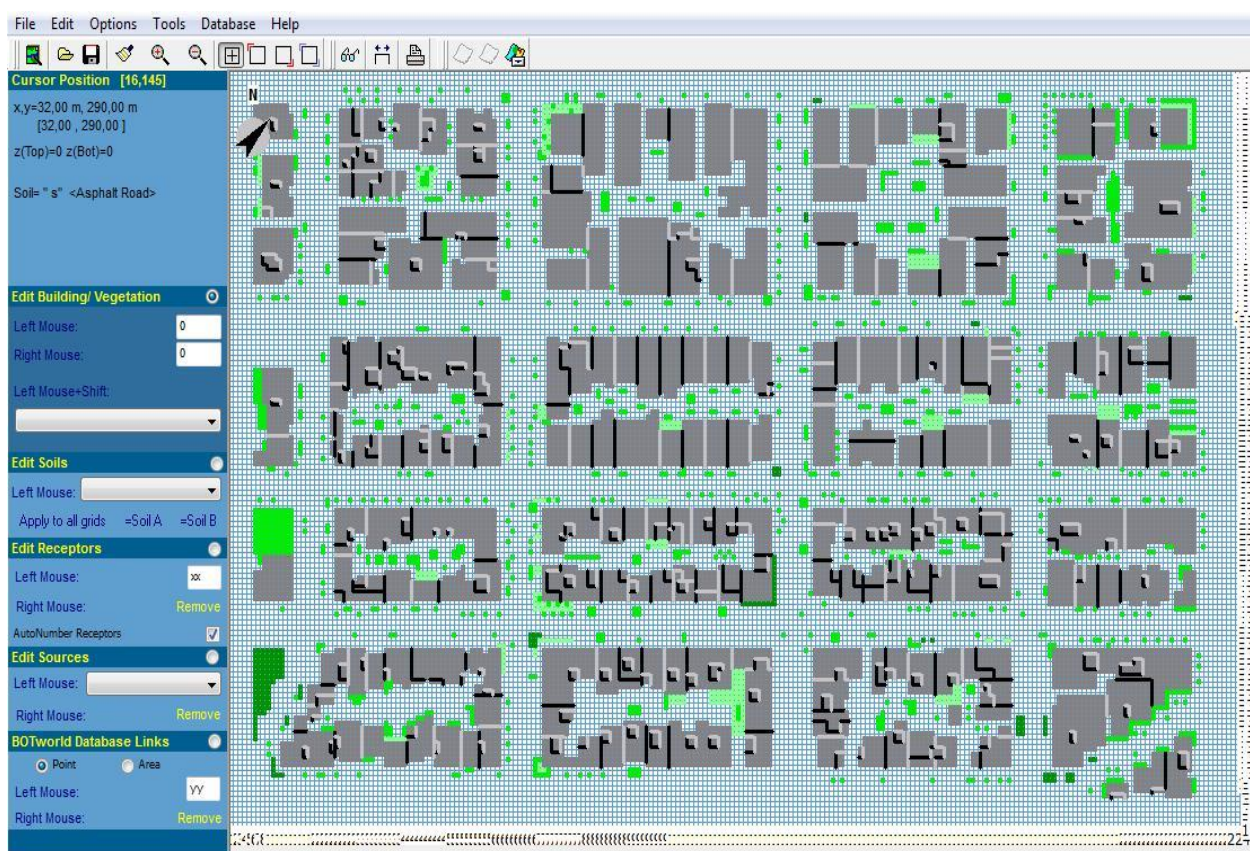
*Εικ. 5.2 Τα βασικά δεδομένα του .CF (Configuration File)*

### Αρχείο εισαγωγής περιοχής (Area Input File .IN)

Στο .IN (Area Input File) καθορίζεται η γεωμετρία του περιβάλλοντος της προσομοίωσης και πιο συγκεκριμένα εισάγονται δεδομένα που αφορούν [3]:

- Τη θέση και το ύψος των κτιρίων
- Τη θέση των φυτών
- Τα υλικά των επιφανειών και τους τύπους εδάφους
- Τη θέση των sources (πηγές)
- Τη θέση των receptors (υποδοχείς)
- Συνδέσεις με βάσεις δεδομένων
- Τη γεωγραφική θέση και τον προσανατολισμό του μοντέλου

Η περιοχή του μοντέλου αποτελεί ένα ορθογώνιο που εκτείνεται κατά x,y. Στο .IN δεν φαίνεται η διάσταση z, αποτελεί όμως σημαντικότερο κομμάτι του μοντέλου.



*Εικ. 5.3 Το Area Input File για την περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας*

### Αρχεία βάσης δεδομένων (DATABASE FILES)

Το Envi-met απαιτεί ένα μεγάλο όγκο πληροφοριών σχετικά με τις επιφάνειες, τη βλάστηση και τις πηγές εκπομπής αερίων ή μικροσωματιδίων στην περιοχή του μοντέλου. Οι πληροφορίες αυτές βρίσκονται στα αρχεία βάσης δεδομένων που είναι τα ακόλουθα [3]:

- Βάση δεδομένων εδαφών SOILS.DAT
- Βάση δεδομένων προφίλ PROFILES.DAT
- Βάση δεδομένων φυτών PLANTS.DAT
- Βάση δεδομένων πηγών SOURCES.DAT

### Παραγόμενα αρχεία (Output Files)

Τα δεδομένα που παράγονται σε κάθε προσομοίωση μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες [3]:

#### Κύρια αρχεία δεδομένων .EDI/EDT (Main Data Files)

Στα αρχεία αυτά περιέχονται όλες οι πληροφορίες για την πλήρη κατάσταση του τρισδιάστατου μοντέλου, συμπεριλαμβανομένων της ατμόσφαιρας, των επιφανειών και του εδάφους. Διαβάζονται με τα υποπρογράμματα XTract και Leonardo που συμπεριλαμβάνονται στο Envi-met και μπορεί να έχουν πολύ μεγάλο μέγεθος.

Ειδικά αναφορικά με τον άνεμο προκύπτουν οι ακόλουθες μεταβλητές:

FIELD	UNIT	MEANING
Flow u	m/s	Wind speed u-component
Flow v	m/s	Wind speed v-component
Flow w	m/s	Wind speed w-component
Wind Speed	m/s	Total wind speed
Wind Speed change	%	Change of wind speed comp. to inflow
Wind direction	deg	Direction of the wind flow relative to geographic north

*Εικ. 5.4 Μεταβλητές του κύριου παραγόμενου φακέλου που αφορούν ανεμολογικά δεδομένα [Πηγή: Envi-met]*

#### Αρχεία υποδοχέων (Receptors Files)

Σε αυτού του τύπου αρχεία αποθηκεύονται όλες οι παραπάνω πληροφορίες, αλλά για συγκεκριμένα σημεία εντός του μοντέλου.

#### Αρχεία Μονοδιάστατου μοντέλου

Παράλληλα με το τρισδιάστατο μοντέλο, στο Envi-met τρέχει και ένα μονοδιάστατο μοντέλο, έτσι ώστε να παραχθούν διαφορετικές αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Η κατάσταση του μονοδιάστατου μοντέλου αποθηκεύεται κάθε φορά που αποθηκεύονται τα κύρια δεδομένα του μοντέλου.

## 5.4 ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΟ Envi-Met 3.1

### 5.4.1 Κύρια ροή ανέμου

Η τρισδιάστατη τυρβώδης ροή του ανέμου στο μοντέλο περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις Navier-Stokes, που αναφέρονται σε μη υδροστατικό και ασυμπιεστο ρευστό [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x} + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial y} + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial z} + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{\text{ref}}(z)} - S_w$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Όπου:

$f$  : η παράμετρος Coriolis και λαμβάνεται  $f=104 \text{ sec}^{-1}$  με  $f=2\Omega \sin\phi$ ,

$p$  : η πίεση λόγω υδροστατικής κατανομής

$\theta$  : η δυναμική θερμοκρασία στη στάθμη  $z$ .

Η θερμοκρασία αναφοράς  $\theta_{\text{ref}}$  αντιπροσωπεύει τις μετεωρολογικές συνθήκες μεγαλύτερης κλίμακας και υπολογίζεται ως μία μέση θερμοκρασία σε όλα τα κελιά του καννάβου κατά τη διεύθυνση  $z$ , εξαιρουμένων αυτών που έχουν καταληφθεί από κτίρια.

Η πυκνότητα του αέρα ( $\rho$ ), δεν ακολουθεί τις εξισώσεις συμπιεστού των Navier-Stokes, ενώ χρησιμοποιείται η προσέγγιση Boussinesq, σύμφωνα με την οποία γίνεται η παραδοχή ότι σε περίπτωση μη ομογενούς ρευστού η χωρική διαφοροποίηση της πυκνότητας λαμβάνεται υπόψη μόνο στον υπολογισμό της πίεσης. Η παραδοχή αυτή οδηγεί αφενός στην εισαγωγή ενός επιπλέον πηγαίου όρου στην εξίσωση  $w$ , ο οποίος περιλαμβάνει την κατακόρυφη θερμική εξαναγκασμένη κίνηση, και αφετέρου στην εξίσωση συνέχειας, η οποία πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε χρονικό βήμα προκειμένου να διατηρείται σταθερή η μάζα στο πεδίο ροής.

Σημειώνεται ότι όλοι οι όροι στην εξίσωση μεταφοράς – διάχυσης παρουσιάζονται στην σύνοψη αποτελεσμάτων του Einstein. ( $u_i=u,v,w$  και  $x_i=x,y,z$  για  $i=1,2,3$  για εξοικονόμηση χώρου).

Οι τοπικοί όροι  $S_u$ ,  $S_v$  και  $S_w$ , περιγράφουν την απώλεια ταχύτητας ανέμου λόγω της τραχύτητας που προκαλούν τα στοιχεία φυτών. Σύμφωνα με τους Liu [4] και Yamada [5], το φαινόμενο αυτό μπορεί να παραμετροποιηθεί με βάση τη σχέση:

$$S_{u(i)} = \frac{\overline{\partial p'}}{\partial x_i} = c_{d,f} LAD(z) W u_i$$

Όπου:

$W=(u^2+v^2+w^2)^{0.5}$  : η κύρια ταχύτητα ανέμου στο ύψος  $z$ ,

LAD( $z$ ) (leaf area density): η πυκνότητα του φυλλώματος σε [ $\text{m}^2\text{m}^{-3}$ ], ενός φυτού στο συγκεκριμένο ύψος  $z$ .

Ο συντελεστής επισθέλκουσας δύναμης (αντίστασης) στα φυτά,  $c_{d,f}$  τίθεται ίσος με 0.2.

### Οριακές συνθήκες

Για όλες τις επιφάνειες εδάφους χρησιμοποιείται η συνθήκη μη ολίσθησης. Η διαδικασία της εισροής, προσομοιώνεται από ένα μονοδιάστατο μοντέλο αναφοράς, ενώ για την εκροή και τα πλευρικά σύνορα, χρησιμοποιείται η συνθήκη Neumann μηδενικής κλίσης. Όσον αφορά το άνω όριο, όλες οι κατακόρυφες κινήσεις προσομοιώνονται ώστε να είναι μηδενικές. Ειδικές οριακές συνθήκες χρησιμοποιούνται για την διαταραχή πίεσης στα όρια της εκροής ούτως ώστε να διατηρείται σταθερή η μάζα [3].

### 5.4.2 Θερμοκρασία και υγρασία

Η διανομή της θερμοκρασίας του αέρα  $\theta$  και της ειδικής υγρασίας  $q$  δίνεται από μία συνδυασμένη εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης με εσωτερικές πηγές εκπομπής [3]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i} = K_h \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_i^2} \right) + \frac{1}{c_p \rho} \frac{\partial R_{n,lw}}{\partial z} + Q_h$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

Παρόμοια με τις εξισώσεις στροφορμής, οι όροι  $Q_h$  και  $Q_q$  χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν την ανταλλαγή θερμότητας και υδρατμών των φυτών με το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Η ποσότητα των  $Q_h$  και  $Q_q$  παρέχεται από το μοντέλο βλάστησης που θα περιγραφεί παρακάτω. Με τον όρο  $\partial R_{n,lw} / \partial z$  αναφέρεται η κατακόρυφη απόκλιση της μακροκυματικής ακτινοβολίας, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση τόσο της ζέστης όσο και της δροσιάς της ακτινοβολούσας ροής [3].

#### Οριακές συνθήκες

Η επιφανειακή θερμοκρασία των εδαφικών επιφανειών, των στεγών και των τοίχων κτιρίων, χρησιμοποιείται σαν ένα πραγματικό φυσικό όριο για τους μαθηματικούς υπολογισμούς. Για το μοντέλο εισροής μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συνθήκες Dirichlet, Neuman ή αυτή του κυκλικού ορίου. Για την εκροή και τα πλευρικά όρια, χρησιμοποιείται η συνθήκη μηδενικής κλίσης πίεσης.

Οι τιμές για το άνω όριο του τρισδιάστατου μοντέλου, προκύπτουν από το μονοδιάστατο μοντέλο οριακού στρώματος, το οποίο εκτείνεται μέχρι τα 2500 μέτρα [3].

### 5.4.3 Ατμοσφαιρική τύρβη

Η τύρβη προκύπτει όταν η ροή του ανέμου συναντά τοίχους κτιρίων ή στοιχεία βλάστησης. Υπό συνθήκες ανέμου, οι στροβιλισμοί είναι αρκετά ανθεκτικοί, οπότε μεταφέρονται από τη κύρια ροή του ανέμου. Ανάλογα με τη δομή της ροής, αυτό οδηγεί σε αυξημένες αναταραχές μακριά από την πηγή της τύρβης [3].

Για να προσομοιωθεί το φαινόμενο αυτό, χρησιμοποιείται το λεγόμενο μοντέλο «κλεισίματος τύρβης» (turbulence closure model) δηλαδή εισάγουμε συντελεστή ιξώδους και οι τάσεις λόγω μοριακού ιξώδους είναι αμελητέες με διάταξη 1,5 στο ENVI-met. Βασίζόμενοι στην εργασία των Mellor και Yamada [6], 2 επιπρόσθετες μεταβλητές πρόγνωσης προστίθενται στο μοντέλο, η τοπική τύρβη ( $E$ ) και ο ρυθμός απώλειάς της ( $\varepsilon$ ). Η κατανομή τους δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + P_T - T_h + Q_E - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = K_E \left( \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\varepsilon}{E} P_T - c_3 \frac{\varepsilon}{E} T_h - c_2 \frac{\varepsilon^2}{E} + Q_\varepsilon$$

Οι όροι  $P_T$  και  $T_h$  περιγράφουν την παραγωγή και την απώλεια της τυρβώδους ενέργειας εξαιτίας της τμήσης της ροής του αέρα και της θερμικής στρωμάτωσης ενώ οι όροι  $Q_E$  και  $Q_\varepsilon$

είναι οι αντίστοιχοι δείκτες για παραγωγή και απώλεια τύρβης στην βλάστηση. Η μηχανική παραγωγή  $P_r$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση, χρησιμοποιώντας τον τρισδιάστατο παραμορφωσιακό ταυυστή του πεδίου ανέμου [3]:

$$P_r = K_m \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

με:  $i, j = 1, 2, 3$

Η  $T_h$  παραγωγή άνωσης δίνεται από την σχέση:

$$T_h = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Προκειμένου να τεθεί σε εφαρμογή η ε-εξίσωση, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες τιμές για τις σταθερές  $c_1, c_2, c_3$ , πιο συγκεκριμένα λαμβάνονται οι ακόλουθες τιμές  $c_1=1.44$   $c_2=1.92$  και  $c_3=1.44$ , όπως αυτές προσδιορίστηκαν από τους Launder και Spalding το 1974 [7]. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου «κλεισίματος τύρβης» (turbulence closure model) στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα που προαναφέρθηκε, παρουσιάζει ορισμένες ασάφειες. Ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση που ερευνάται, επιλέγονται οι κατάλληλες μεταβλητές ενώ η παραγωγή τυρβώδους ροής απαιτείται να περιοριστεί στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τους Liu et al. [4] και Wilson [8], δύο επιπλέον όροι προστέθηκαν στο E-ε σύστημα ούτως ώστε να συμπεριλάβουν αφενός την πρόσθετη τύρβη που δημιουργείται στην βλάστηση και αφετέρου την απώλεια τύρβης που πραγματοποιείται κατά το πέρασμα από τις ισχυρότερες δίνες -δημιουργούμενες από διάτμηση- στις ασθενέστερες:

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) W^3 - 4c_{d,f} LAD(z) |W| E$$

$$Q_\varepsilon = 1.5c_{d,f} LAD(z) W^3 - 6c_{d,f} LAD(z) |W| \varepsilon$$

Οι όροι που υπεισέρχονται στην εξίσωση απώλειας βασίζονται στην σχέση Kolmogorov [7] και θα πρέπει να προσαρμόζονται με τα δεδομένα που μετρούνται, όταν αυτά είναι διαθέσιμα [4]. Από το σύστημα εξισώσεων E-ε που προαναφέρθηκε, υπολογίζονται οι συντελεστές ανταλλαγής τύρβης κάνοντας την παραδοχή ότι εξετάζεται κατάσταση τοπικής ισότροπης τύρβης. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες [3]:

$$K_m = c_m \frac{E^2}{\varepsilon}$$

$$K_H, K_q = 1.35 K_m$$

$$K_E = \frac{K_m}{\sigma_E}$$

$$K_\varepsilon = \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}$$

Όπου λαμβάνονται:

$$c_m = 0.09, \sigma_E = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

### Οριακές Συνθήκες

Σε όλες τις στερεές επιφάνειες τα  $E$ ,  $\varepsilon$  υπολογίζονται συναρτήσει της εφαπτομενικής ταχύτητας τριβής  $u^*$  λαμβάνοντας υπόψη εκείνες τις συνιστώσες ροής οι οποίες είναι παράλληλες στην επιφάνεια που εξετάζεται [3]:

$$E(z=0), \quad E_w = \frac{(u_*^2)^{\tan}}{\sqrt{c_\mu}}, \quad \varepsilon(z=0), \quad \varepsilon_w = \frac{(u_*^3)^{\tan}}{\kappa z_0}$$

όπου  $\kappa$ : η σταθερά von-Kármán, λαμβάνεται ίση με 0.4 και  $z_0$ : το μήκος τραχύτητας της επιφάνειας.

#### 5.4.4 Το μοντέλο εδάφους

Το αστικό περιβάλλον χαρακτηρίζεται ανομοιόμορφο ως προς το γεγονός ότι συναντώνται σε αυτό μία πληθώρα διαφορετικών τύπων εδάφους και επιφανειών, που άλλοτε αποτελούνται αποκλειστικά από φυσικά εδάφη και άλλοτε από τεχνητά υλικά. Για να προσομοιωθεί ακριβώς αυτή η ετερογενής κατάσταση, ορισμένα μεμονωμένα εδαφικά χαρακτηριστικά όπως παραδείγματος χάριν η θερμοδυναμική και υδραυλική αγωγιμότητα (η υδροπερατότητα) ή το albedo, μπορούν να καταχωρηθούν σε κάθε κελί του καννάβου του εδαφικού μοντέλου.

Η διάταξη του εδαφικού μοντέλου συνίσταται από 14 στρώματα ανάμεσα στην επιφάνεια και το κατώτατο όριο της σε βάθος 2m. Η επίλυση κατά τον κατακόρυφο άξονα κυμαίνεται ανάμεσα στα 0.01m κοντά στην επιφάνεια και στα 0.5m στο κατώτερο στρώμα. Οι υπολογισμοί στο λογισμικό εστιάζουν στην μεταφορά θερμότητας και νερού που πραγματοποιείται ανάμεσα στα στρώματα, εφόσον αυτά επικοινωνούν. Εξαιρουμένου του υψηλότερου εδαφικού στρώματος, στο οποίο η μεταφορά θερμότητας μελετάται σε τρεις διαστάσεις, το υπόλοιπο έδαφος μελετάται σαν μία μονοδιάστατη κατακόρυφη στήλη. Η κατανομή της θερμότητας  $T$  και της εδαφικής περιεκτικότητας κατά όγκο σε υγρασία  $\eta$  δίνεται από τις μονοδιάστατες εξισώσεις που ακολουθούν [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z)$$

Όσον αφορά τα φυσικά εδάφη, η θερμική διαχυτότητα  $K_s$  (δείκτης διάχυσης της θερμότητας) εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα διαχέεται με αγωγή σε ένα υλικό και είναι συνάρτηση της διαθέσιμης εδαφικής υγρασίας  $\eta$  και υπολογίζεται σύμφωνα με τις σχέσεις Tjernström [9]. Οι υδραυλικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στην τελευταία σχέση είναι:

Η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό ( $\eta$ ), ο βαθμός κορεσμού του ( $\eta_s$ ), η υδραυλική αγωγιμότητα ( $K_\eta$ ) και η υδραυλική διαχυτικότητα ( $D_\eta$ ), ενώ όλοι οι συντελεστές προκύπτουν από τις εξισώσεις των Clapp και Hornberger [10]. Ένας πρόσθετος παράγοντας, ο οποίος θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ως μια επιπλέον πηγή περιεκτικότητας εδαφικής υγρασίας, είναι η πρόσληψη νερού που πραγματοποιείται από τις ρίζες των φυτών ( $S_\eta$ ).



### 5.4.5 Αριθμητικά στοιχεία – Μεθοδολογία

#### Τεχνικές επίλυσης [3]

Οι διαφορικές εξισώσεις που υπεισέρχονται στο μοντέλο επιλύονται κλιμακωτά στο σύστημα του καννάβου χρησιμοποιώντας διαφορικά πεπερασμένα στοιχεία. Οι τρισδιάστατες εξισώσεις μεταφοράς – διάχυσης επιλύονται με τη χρήση της έμμεσης μεθόδου εναλλασσόμενων διευθύνσεων (ADI-alternating directions implicit) σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα οριζόντιας μεταφοράς. Η ADI είναι μια πεπερασμένη διαφορική μέθοδος για την επίλυση παραβολικών και ελλειπτικών μερικών διαφορικών εξισώσεων σε δύο ή περισσότερες διαστάσεις και το πλεονέκτημα αυτής είναι ότι οι εξισώσεις που πρέπει να επιλυθούν σε κάθε επανάληψη έχουν απλούστερη μορφή επομένως μπορούν εύκολα να επιλυθούν. Ακόμα, το πρόγραμμα που προαναφέρθηκε προϋποθέτει μια σχετικά μεγάλη αριθμητική διάχυση αλλά επιτρέπει γρήγορη επίλυση των εξισώσεων, για αυτό και επιλέχθηκε στο υπολογιστικό μοντέλο ENVI-met. Όσον αφορά την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes χρησιμοποιείται η μέθοδος διαιρετών των Patrinos και Kistler [11]. Συνεπώς, οι προγνωστικές εξισώσεις για τη διατήρηση της μάζας στο πεδίο ανέμου  $u_i^{t+\Delta t}$  διαιρείται σε ένα βοηθητικό πεδίο ροής  $u^{aux}$  (auxiliary) και σε ένα πεδίο πίεσης  $p$  [3]:

$$\frac{\partial u_i^{t+\Delta t}}{\partial t} = \frac{\partial u_i^{aux}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla p$$

Η μεταβλητή της πίεσης μετακινείται επομένως από τις τρεις προγνωστικές εξισώσεις και δημιουργείται ένα νέο σύστημα τριών εξισώσεων για το βοηθητικό πεδίο ροής [3]:

$$\frac{\partial u^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial u^{aux}}{\partial x_i} = K_m \left( \frac{\partial^2 u^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u$$

$$\frac{\partial v^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial v^{aux}}{\partial x_i} = K_m \left( \frac{\partial^2 v^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + f(u - u_g) - S_v$$

$$\frac{\partial w^{aux}}{\partial t} + u_i \frac{\partial w^{aux}}{\partial x_i} = K_m \left( \frac{\partial^2 w^{aux}}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w$$

Αυτό το πεδίο ροής περιέχει την σωστή στροβιλότητα αλλά δεν ισχύει η διατήρηση της μάζας σε αυτό, πράγμα που σημαίνει ότι δεν ικανοποιεί την συνθήκη [3]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Το συνδυασμένο πεδίο πίεσης μπορεί να προσδιοριστεί από την επίλυση της εξίσωσης Poisson:

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla u_i^{aux}$$

Χρησιμοποιώντας την μη γραμμική επαναληπτική μέθοδο Simultaneous Over-Relaxation (SOR). Τέλος, το πραγματικό πεδίο ροής για διατήρηση μάζας μπορεί να υπολογιστεί από [3]:

$$u_i^{t+\Delta t} = u_i^{\text{aux}} - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

Η απότομη κλίση πίεσης που μπορεί να προκύψει στις προσομοιώσεις μικρής κλίμακας απαιτεί μικρό χρονικό βήμα για την επίλυση των εξισώσεων του πεδίου ανέμου. Συνεπώς, το πεδίο ανέμου δεν αντιμετωπίζεται σαν μια ‘κανονική’ προγνωστική μεταβλητή στο ENVI-met, αλλά ενημερώνεται μετά από δεδομένο χρονικό διάστημα ούτως ώστε να λάβει υπόψη ενδεχόμενες αλλαγές στην τύρβη και στην θερμική διαβάθμιση. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να θεωρηθεί το πεδίο ανέμου ως κανονική μεταβλητή, πρακτικά όμως απαιτείται να δαπανηθεί πολύς χρόνος ώστε να προκύψει αποτέλεσμα δεδομένων των σύγχρονων ηλεκτρονικών υπολογιστών.

### Υπολογιστικό πεδίο και κατασκευή καννάβου

Ανάλογα με το πρόβλημα που εξετάζεται κάθε φορά, το συνολικό μέγεθος του τρισδιάστατου μοντέλου X,Y και Z που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του καννάβου ποικίλλει και μπορεί να επιλεγεί από ένα μεγάλο εύρος. Από παράλειψη τα διαστήματα των Δx, Δy και Δz είναι ισαπέχοντα σε κάθε διεύθυνση (μόνο το χαμηλότερο κελί του καννάβου πάνω από το έδαφος διαιρείται σε 5 υπο-κελιά με μέγεθος Δz<sub>g</sub>=0.2Δz ούτως ώστε να αυξηθεί η ορθότητα των υπολογισμών στην επιφάνεια). Το τρισδιάστατο μοντέλο μετατρέπεται σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο το οποίο εκτείνεται σε ύψος 2500m. Οι τιμές του μονοδιάστατου μοντέλου χρησιμοποιούνται ως αναφορά τόσο για την εισροή όσο και για τις οριακές συνθήκες (top) για το τρισδιάστατο μοντέλο.

## 5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το Envi-met αν και δίνει μια πληθώρα δυνατοτήτων στο πλαίσιο της προσομοίωσης του μικροκλίματος ανοιχτών χώρων, εντούτοις δεν παύει να αποτελεί ένα αναπτυσσόμενο πρόγραμμα που παρουσιάζει στην παρούσα έκδοσή του και αρκετές ατέλειες. Συνοπτικά οι πιο σημαντικές από αυτές είναι οι εξής:

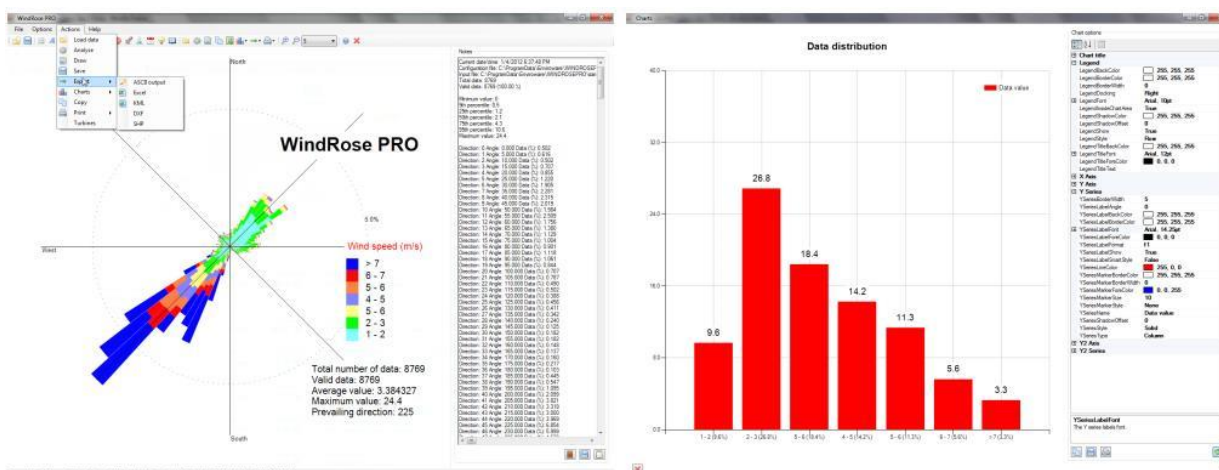
- Η χρήση του Envi-met δεν ενδείκνυται για μελέτη σε περιοχές με περίπλοκο ή πολυεπίπεδο ανάγλυφο εδάφους. Σε αυτές τις περιπτώσεις αυξάνεται δραματικά ο χρόνος υπολογισμού, ενώ είναι πολύ πιθανόν το πρόγραμμα να διακόψει τη λειτουργία του λόγω αριθμητικών ασταθειών.
- Μέχρι στιγμής το έδαφος θεωρείται ότι είναι απολύτως επίπεδο στις προσομοιώσεις, ενώ δεν δύναται η δυνατότητα προσομοίωσης στέγης σε κτίριο παρά μόνο επίπεδης οροφής.
- Προς το παρόν, οι βιβλιοθήκες βλάστησης και υλικών είναι αρκετά περιορισμένες, ενώ η δημιουργία νέων στοιχείων απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και αποτελεί επίπονη διαδικασία. Δεν είναι επίσης εφικτή η προσομοίωση φυτεμένων ταρατσών ή προσόψεων κτιρίου.
- Δεν διαθέτει στοιχείο ρηχού νερού. Το μόνο στοιχείο ύδατος που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, ονομάζεται «deep water» και αφορά νερά μεγάλου βάθους.
- Αν και πρόκειται για πρόγραμμα τρισδιάστατης ανάλυσης, η διαμόρφωση του μοντέλου γίνεται σε δισδιάστατο περιβάλλον, γεγονός που δυσχεραίνει την κατανόησή του από τον χρήστη.
- Στην περίπτωση της βλάστησης ιδιαίτερα, τα δέντρα μοντελοποιούνται ως «στήλες» σταθερής διατομής, οπότε δεν προσεγγίζεται σωστά η μορφή τους.
- Φαινόμενα όπως αυτό της θερμικής νησίδας, τα οποία παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του μικροκλίματος των αστικών χώρων, δεν λαμβάνονται υπόψη.
- Μέχρι τώρα τα κτίρια αποτελούνται αποκλειστικά από ένα υλικό το οποίο μάλιστα αφορά αυτόματα όλα τα κτίρια του μοντέλου.

## 5.6 Η ΕΦΑΡΜΟΦΗ WindRose Pro

Για την επεξεργασία τόσο των αρχικών ανεμολογικών δεδομένων, όσο και αυτών που προέκυψαν μετά τις προσομοιώσεις στο Envi-met, παρέστη η ανάγκη χρησιμοποίησης ενός εξειδικευμένου λογισμικού ανάλυσης.

Το WindRose Pro είναι ένα τέτοιο πρόγραμμα ανάλυσης ανεμολογικών δεδομένων, φιλικό προς το χρήστη, που επεξεργάζεται τις διάφορες τιμές ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου, παράγοντας ροδογράμματα, ενώ με κατάλληλες προσθήκες είναι δυνατόν να υπολογίσει τη θεωρητική κατανομή του ανέμου για τις δοθείσες τιμές.

Στην εφαρμογή δύναται η δυνατότητα δημιουργίας της καμπύλης ισχύος μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας και υπολογισμού της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής της, χαρακτηριστικό απαραίτητο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων της παρούσας εργασίας.



**Εικ. 5.5** Παραδείγματα παραγόμενων γραφημάτων από την εφαρμογή WindRose Pro  
[Πηγή: <http://www.enviware.com/portfolio/windrose-pro3/>]

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] «Βιοκλιματική σχεδιασμός και περιβαλλοντική άνεση στον αστικό χώρο – προσομοίωση με το λογισμικό Envi-met», Δ. Παπουτσή, Διπλ. Εργασία, 2012
- [2] «Βιοκλιματική θεώρηση αστικών χώρων – οι περιπτώσεις των πλατειών Κοτζιά και Δικαιοσύνης στην Αθήνα», Χ. Πατούνης, Ν. Σίμος, Διπλ. Εργασία, 2012
- [3] «ENVI-met 3.0: Updated Model Overview», M. Bruse, 2004
- [4] «E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge», J. Liu et al., 1996
- [5] «A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy», T. Yamada, 1982
- [6] «A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data», G.L. Mellor and T. Yamada, 1975
- [7] «The numerical computation of turbulent flows», B.E. Launder, D.B. Spalding, 1974
- [8] «A second order closure model for flow through vegetation», J. D. Wilson, 1988
- [9] «Some tests with a surface energy balance scheme including a bulk parameterization for vegetation in a mesoscale model», M. Tjernström, 1989

- [10] «Empirical equations for some soil hydraulic properties», R. B. Clapp and G. Hornberger, 1978
- [11] «A numerical study of the chicago lake breeze», A. Patrinos, A. Kistler, 1976
- [12] «ENVI-met Model Architecture», <http://www.envi-met.com/architecture.htm#wind>
- [13] «Further development and application of the 3D microclimate simulation ENVI-met», S. Huttner, 2012

# 6

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 6.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης η οποία επιλέχθηκε προς διερεύνηση για τη χρήση ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι η περιοχή της Νέας Σμύρνης η οποία βρίσκεται στο νότιο τομέα των Αθηνών. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε καθώς η περιοχή αντικατοπτρίζει τις μέσες συνθήκες δόμησης στην περιοχή της Αττικής και αποτελείται από 16 οικοδομικά τετράγωνα τα οποία περικλείονται από τις οδούς Βάρνης, Στενιμάχου, Βοσπόρου και Βαπορίδου. Μετά από επιτόπια έρευνα αλλά και μελέτη δορυφορικών λήψεων διαπιστώθηκε ότι η σύνθεση της οικοδομικής διαμόρφωσης είναι κυρίως πολυκατοικίες πέντε οροφών, δευτερεύοντος μεγάλης συχνότητα εμφάνιση έχουν οι κατασκευές περισσότερων οροφών (6 έως 7) ενώ οι μονοκατοικίες και οι διώροφες κατασκευές σπανίζουν. Ως επί των πλείστον οι κατασκευές αποτελούνται από ισόγειους και ακάλυπτους χώρους στάθμευσης, οι οποίοι σε συνδυασμό με τη μη συνεχόμενη δόμηση κατά μήκος του τετραγώνου και την ύπαρξη επιπλέον ακάλυπτων χώρων πρασίνου, δημιουργείται ένα ποσοστό της τάξεως 15 έως 20 % μη οικοδομημένου χώρου στο οικοδομικό τετράγωνο. Αποτέλεσμα να δημιουργούνται πεδία ροής του ανέμου σε μεγάλο βαθμό τόσο στο εσωτερικό του οικοδομικού τετραγώνου όσο και περιμετρικά των κτιρίων.



*Εικ 6.1 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες της περιοχής μελέτης όπου απεικονίζεται το ύψος δόμησης και σχετικά αραιή φυτοκάλυψη*



*Εικ 6.2 Άλλες απόψεις της περιοχής μελέτης*

Η φυτοκάλυψη η οποία παρατηρείται στα πεζοδρόμια είναι αραή σε αντίθεση με την εσωτερική περιοχή των οικοδομικών τετραγώνων που εμφανίζεται μεγαλύτερη. Τα φυτά που εμφανίζονται πιο συχνά είναι:

- γρασίδι ύψους 50 εκατοστών
- δένδρα χαμηλής πυκνότητας ύψους 3-4 μέτρων
- δένδρα μέσης πυκνότητας 3-7 μέτρων
- δένδρα σχετικά μεγάλης πυκνότητας ύψους 7-14 μετρά (σπανίως)

Τέλος αξίζει να σημειωθεί η ύπαρξη 2 πάρκων μικρής έκτασης με δένδρα της τρίτης και τέταρτης κατηγορίας όπως αναφέρονται παραπάνω στο άνω δεξιά και κάτω αριστερά άκρο της περιοχής μελέτης.



*Εικ. 6.3 Δορυφορική άποψη της περιοχής μελέτης [Πηγή: Google Earth]*



*Εικ. 6.4* Κοντινότερη άποψη της περιοχής [Πηγή: <http://www.aerial-view.org/>]

## 6.2 ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα ανεμολογικά δεδομένα προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στην περιοχή της Νέας Σμύρνης και είναι ιδιοκτησίας του 4<sup>ου</sup> δημοτικού σχολείου Νέας Σμύρνης και του Αστεροσκοπείου Αθηνών. Ο σταθμός βρίσκεται σε ύψος 51 μέτρων από το επίπεδο της θάλασσας ενώ οι μετρήσεις του λαμβάνουν χώρα σε υψόμετρο 10 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους του σταθμού [2]. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ανεμολογικών δεδομένων το οποίο αποτελείται από τα στοιχεία των τριών πιο αντιπροσωπευτικών μηνών: Ιανουαρίου, Απριλίου και Αυγούστου. Ύστερα από επικοινωνία με την αρμόδια υπηρεσία μας εστάλειςαν οι ανεμολογικές μετρήσεις σε μέσες τιμές δεκαλέπτων για το διάστημα των τριών αυτών μηνών. Από τα δεδομένα μέσω επεξεργασίας τους με το πρόγραμμα WindRose κατασκευάστηκαν το ροδόγραμμα και η κατανομή Weibull, για την υπό μελέτη περιοχή, που παρατίθενται παρακάτω.

Παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα:

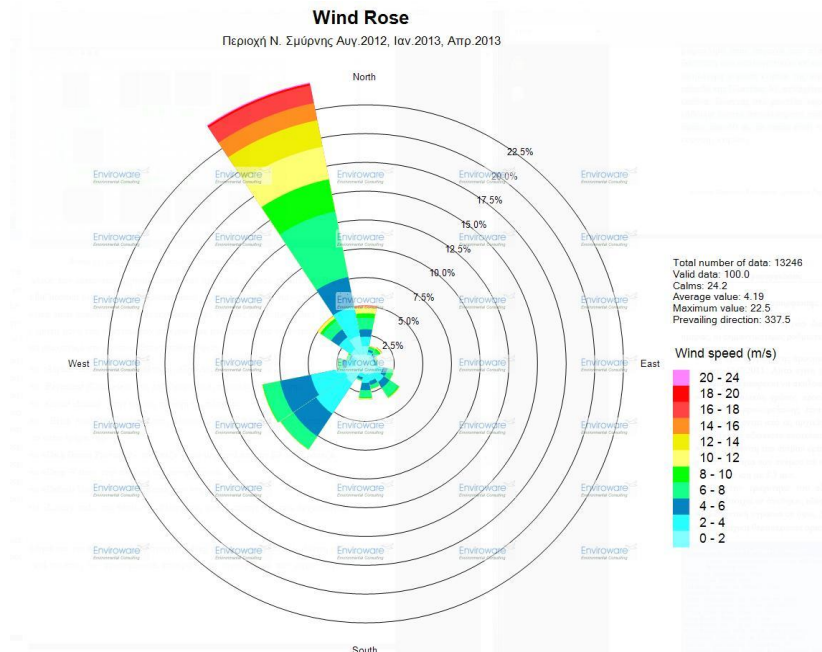
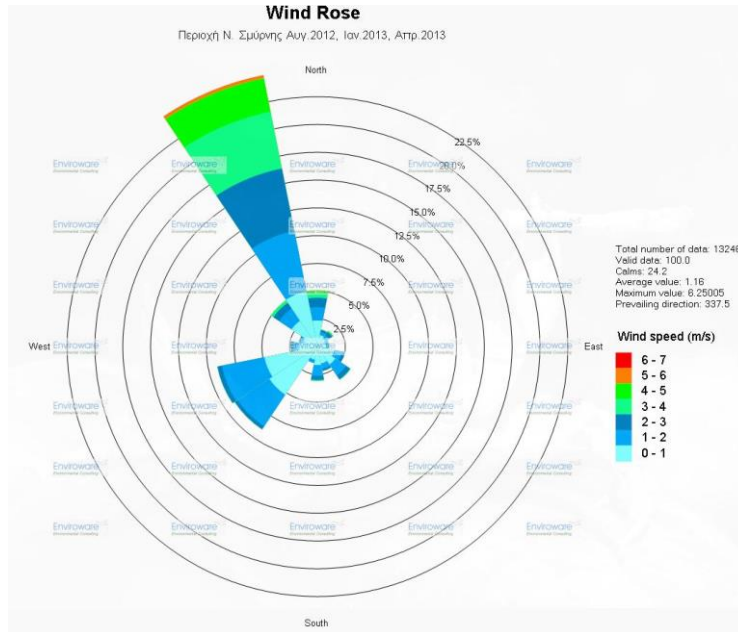
- μέση ταχύτητα ανέμου 1,16 m/s
- μεγάλη πιθανότητα η ένταση των ανέμων να κυμαίνεται στο διάστημα 0 – 3.5 m/s (95% των μετρήσεων ήταν κάτω από την τιμή των 3.58 m/s)
- επικρατούσα διεύθυνση η ΒΒΔ (NNW) με ποσοστό 24.91%
- μέση ταχύτητα ανέμου στην επικρατούσα διεύθυνση 2.35 m/s

Η ταχύτητα αυτή είναι πολύ μικρή και αυτομάτως προδικάζει την μη εφαρμογή της τεχνολογίας των αστικών ανεμογεννητριών στην περιοχή της Νέας Σμύρνης όταν απαιτείται να εκπληρώνεται ως κριτήριο μια ελάχιστη μέση ταχύτητα 5 m/s [1]. Παρόλα αυτά για να διαπιστωθεί σε ποία κλίμακα τιμών έντασης των ανέμων θα μπορούσε υπό προϋποθέσεις να υπάρξει δυνατότητα εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε μια περιοχή όπως η Νέα Σμύρνη με τη ρυμοτομία και την κτιριακή σύνθεση που διαθέτει, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν στοιχεία διαφορετικού αιολικού δυναμικού, μέσω δοκιμών.

Για τα νέα ανεμολογικά δεδομένα έγινε η απλή παραδοχή ότι η θα ακολουθούν την κατανομή των πραγματικών ανεμολογικών δεδομένων που διαθέταμε, θα είναι όμως πολλαπλάσιας

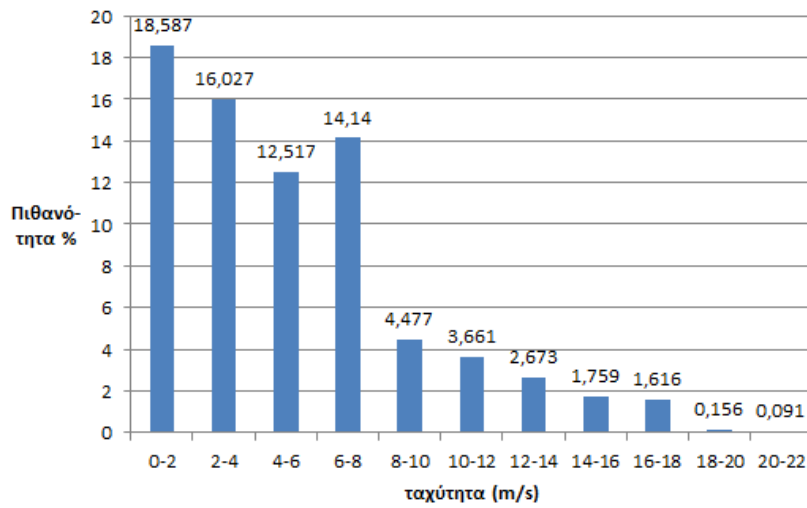
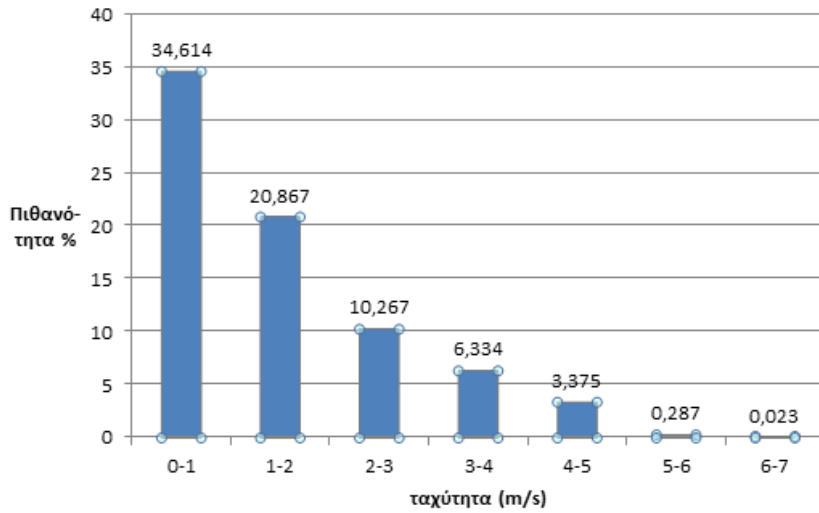
έντασης, με κριτήριο η μέση ταχύτητά τους να είναι κοντά στα 5 m/s που όπως αναφέραμε προτείνεται στη βιβλιογραφία σαν ελάχιστη μέση ταχύτητα για την οικονομική βιωσιμότητα αστικών Α/Γ.

Κατ' αυτόν τον τρόπο προέκυψαν οι νέες ταχύτητες ανέμου για τις οποίες μετρήθηκε μέση ταχύτητα 4,19 m/s η οποία κρίθηκε ικανοποιητική για την περετέρω επεξεργασία τους (κοντά στο όριο των 5 m/s), και η επικρατούσα διεύθυνση παρέμεινε ΒΒΔ (βόρειο-βορειοδυτική).

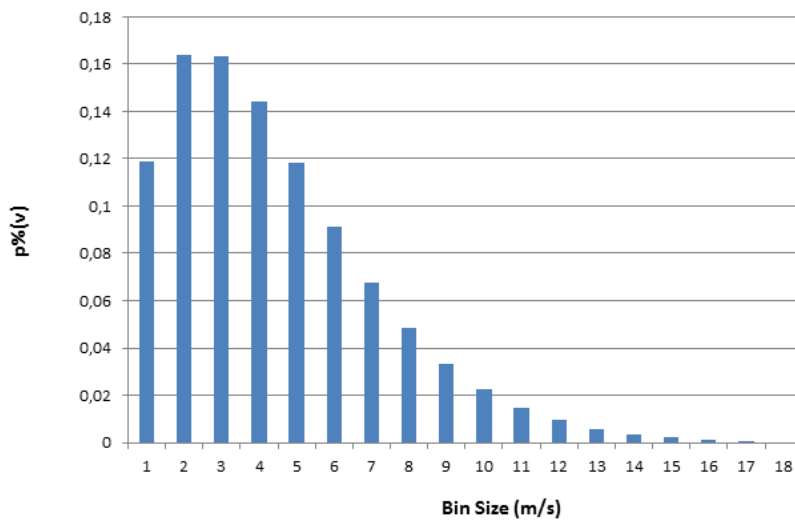


**Εικ. 6.5** Ροδογράμματα της περιοχής μελέτης για τα πραγματικά (πάνω) και τα νέα (κάτω) ανεμολογικά δεδομένα [Πηγή: Πρόγραμμα WindRose]





**Εικ. 6.6** Κατανομή των ταχυτήτων της περιοχής μελέτης για τα πραγματικά (πάνω) και τα νέα (κάτω) ανεμολογικά δεδομένα [Πηγή: WindRose]



**Εικ. 6.7** Κατανομή Weibull για τα νέα ανεμολογικά δεδομένα [Πηγή: WindRose]

### 6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΒΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι μια αρχική εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα εντός του αστικού ιστού.

Αρχικά θα πρέπει να επισημανθεί η επιλογή ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα αντί οριζοντίου όπως έχουμε αναλύσει και στις παραγράφους 3.6.2 και 4.2 βασίζεται [2]:

- Στην απαίτηση των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα για σταθερή και στρωτή ροή αέρα για τη λειτουργία τους
- Στην καλύτερη απόδοση σε περίπλοκη πνοή ανέμου, στην αξιοποίηση του ανέμου προερχόμενου από οποιαδήποτε διεύθυνση και κυρίως στην καλύτερη αντιμετώπιση των φαινομένων της τυρβώδους ροής που εμφανίζεται συχνότατα σε αστικό περιβάλλον.
- Στην απαίτηση για μεγαλύτερη ασφάλεια της κατασκευής εντός δομημένου περιβάλλοντος κάτι που εξασφαλίζουν σε μεγαλύτερο βαθμό οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα
- Στα πολύ χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών θορύβου και δονήσεων
- Στον απλό και ανθεκτικό σχεδιασμό
- Στην ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης
- Αισθητική αποδοχή

Το κριτήριο που ορίστηκε για την εξακρίβωση της ωφέλειας ή μη της ανεμογεννήτριας στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί το συνολικό ετήσιο ποσό ενέργειας που θα παράξει η ανεμογεννήτρια και επακολούθως η απόσβεση του αρχικού κόστους επένδυσης σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε την κατανομή Weibull των ταχυτήτων των ανέμων, η οποία προκύπτει από τη συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου, στη συνέχεια συσχετίζοντας με την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρία, μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε την Ετήσια Ενεργειακή Παραγωγή. Εν συνεχεία βάσει της εγγυημένης τιμής πώλησης της kWh στη Δ.Ε.Η μπορούμε να υπολογίσουμε την ακριβή διάρκεια της απόσβεσης του αρχικού κόστους επένδυσης. Συνοψίζοντας:

- Υπολογισμός κατανομής Weibull
- Συσχέτιση κατανομής Weibull με καμπύλη ισχύος (power curve) της Α/Γ
- Εξαγωγή Ετήσιας Ενεργειακής Απόδοσης από το συνδυασμό των παραπάνω
- Εξαγωγή διάρκειας αποπληρωμής αρχικού κεφαλαίου

Επισημαίνεται ότι η διεξαγωγή συγκεκριμένου αριθμού προσομοιώσεων, όπως παρουσιάζονται παρακάτω, οφείλεται στο γεγονός ότι το πρόγραμμα Envi-met ως ένα C.F.D μοντέλο έχει υψηλές απαιτήσεις από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή (C.P.U) και την κεντρική μνήμη (R.A.M) με αποτέλεσμα για μια μεγάλη και πολύπλοκη περιοχή προσομοίωσης, όπως η συγκεκριμένη, να απαιτούνται από συμβατικούς υπολογιστές αρκετές δεκάδες ώρες για την ολοκλήρωση μιας προσομοίωσης με τον κίνδυνο ανά πάσα στιγμή τη διακοπή της προσομοίωσης λόγω αριθμητικών ασταθειών.

Επομένως στα πλαίσια αυτής της εργασίας προκειμένου να καλυφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος του αντικειμένου και όσο το δυνατόν περισσότερο αξιόπιστα, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις στο πρόγραμμα Envi-met για το διάστημα ταχυτήτων από 3 m/s έως 18 m/s για την επικρατούσα διεύθυνση ανέμων, η οποία αντιστοιχεί στο 25% όλων των διευθύνσεων των ανέμων, όπως αυτή προέκυψε από το ροδόγραμμα που κατασκευάστηκε από τα δοθέντα ανεμολογικά δεδομένα. Το εύρος ταχυτήτων καθορίστηκε στις συγκεκριμένες τιμές καθώς σε το διάστημα περιλαμβάνονται οι ταχύτητες έναρξης και διακοπής λειτουργίας στις οποίες οι ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ. Σημαντικό στοιχείο για

μεγαλύτερη εμπειριστατωμένη ανάλυση αποτελεί επίσης το γεγονός πως στην επικρατούσα διεύθυνση εμφανίζονται και οι πιο ισχυροί άνεμοι από τους οποίους μια ανεμογεννήτρια παράγει τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών εξήχθησαν συμπεράσματα για το ποσοστό αυξομείωσης της ταχύτητας εντός του αστικού ιστού. Εν συνέχεια επεξεργάζοντας όλα τα πραγματικά δεδομένα για την επικρατούσα διεύθυνση και για το ποσοστό μείωσης που προέκυψε από τις προσομοιώσεις καταρτίστηκε η καινούργια κατανομή Weibull βάσει της οποίας υπολογίσαμε την Ετήσια Ενεργειακή Απόδοση καθώς και τη χρονική διάρκεια εξοικονόμησης του κεφαλαίου για την επιλεχθείσα ανεμογεννήτρια.

Επίσης επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές θέσεις τοποθέτησης ανεμογεννήτριας με διαφορετικά χαρακτηριστικά η καθεμία.

- Η 1 θέση είναι και η ευνοϊκότερη καθώς βρίσκεται στο υψηλότερο δυνατό σημείο (25 μέτρα χωρίς να συνυπολογίζεται το ύψος της ανεμογεννήτριας) είναι απαλλαγμένη από κάθε είδους εμπόδια περιμετρικά της με αποτέλεσμα να έχουμε την πιο στρωτή, σταθερή και μεγαλύτερη σε ποσότητα και ένταση ροή αέρα σε σχέση με τις υπόλοιπες θέσεις.
- Η 2 θέση που επιλέχθηκε βρίσκεται σε ύψος 18 μέτρων (χωρίς να συνυπολογίζεται το ύψος της ανεμογεννήτριας) και αποτελεί μια ενδιάμεση περίπτωση για την καταγραφή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ενώ αποτελεί όπως έχουμε ήδη αναφέρει το σύνηθες ύψος των περισσότερων κατασκευών στην εξεταζόμενη περιοχή.
- Τέλος, για θέση 3, επιλέχθηκε η οροφή μιας διώροφης κατοικίας που βρίσκεται ανάμεσα σε ψηλές κατασκευές προκειμένου να μελετηθεί αν σε αυτή τη περίπτωση υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης των χαμηλών εντάσεων του αέρα καθώς και της έντονης τυρβώδους ροής.

Πρέπει να τονιστεί πως επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα ενδιάμεσο οικοδομικό τετράγωνο από την περιοχή μελέτης διότι εκεί εμφανίζονται τα περισσότερα αντικειμενικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το πρόγραμμα Envi-met ,αφού σχεδιαστεί η κάτοψη της περιοχής, για την ορθή λειτουργία του απαιτεί τη δημιουργία μιας επιπλέον περιμετρικής περιοχής (Nesting Area) πέρα από τα όρια της υπάρχουσας σχεδιασμένης. Η περιοχή αυτή δεν εμφανίζεται στην κάτοψη του αρχείου εισαγωγής των δεδομένων (input file.in).Αυτό το κομμάτι το Envi-met το προσομοιάζει με μια κενή επίπεδη περιοχή χωρίς κανένα καθ' ύψος εμπόδιο, σαν μια πεδιάδα θα λέγαμε. Αποτέλεσμα αυτού είναι στις προσομοιώσεις οι ταχύτητες του ανέμου στα περιφερειακά σύνορα της περιοχής να εμφανίζονται αρκετά υψηλές καθώς "εισέρχονται" χωρίς να έχουν συναντήσει κανένα εμπόδιο, κάτι το οποίο δεν είναι αντιπροσωπευτικό αφού στην πραγματικότητα και πέρα από τα όρια της περιοχής συνεχίζεται η ίδια οικοδομική σύνθεση οπότε θα έπρεπε να εμφανίζονται και εκεί μειωμένες.

Γι' αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα ενδιάμεσο τετράγωνο διότι εκεί η προσομοίωση αναπαριστά όσο πιο πιστά γίνεται την πραγματική ροή του ανέμου όταν αυτός εισέρχεται στον αστικό ιστό συναντώντας στην πορεία του το κάθε είδος πιθανού εμποδίου. Αυτός είναι και ο λόγος που οι θέσεις των ανεμογεννητριών επιλέχθηκαν στο ίδιο οικοδομικό τετράγωνο και όχι διεσπαρμένες σε διαφορετικά.

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι τρεις χαρακτηριστικές θέσεις για τις οποίες μελετήθηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων



Εικ. 6.8 Θέσεις μελέτης ανεμογεννητριών [Πηγή: <http://www.aerial-view.org/>]

#### 6.4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

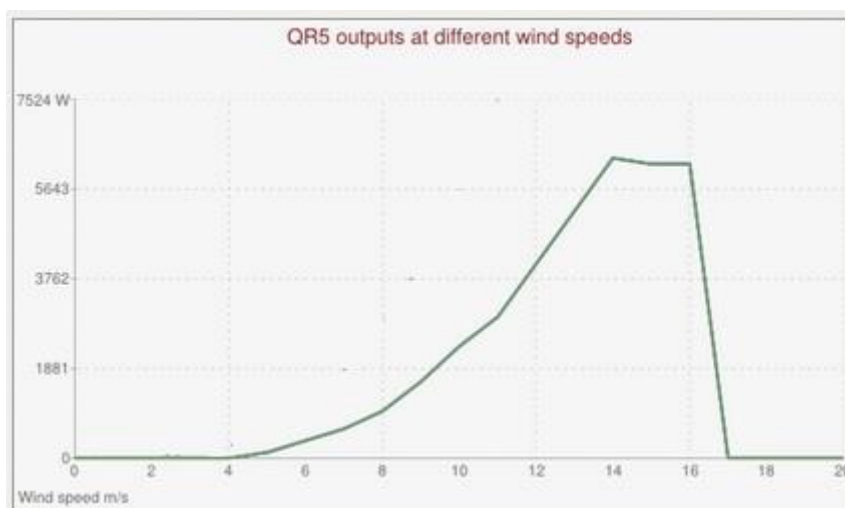
Όπως κατέδειξε η συλλογιστική πορεία που περιγράφηκε παραπάνω για την εξαγωγή συμπερασμάτων στην εν λόγω έρευνα η επιλογή είδους ανεμογεννήτριας είναι συνάρτηση δυο παραγόντων: της κατανομής Weibull και της καμπύλης ισχύος (power curve) της εκάστοτε ανεμογεννήτριας. Διαθέτοντας την κατανομή Weibull, που παρουσιάζεται στη συνέχεια αναλυτικά, ο καθένας μπορεί να υπολογίσει μέσω του προγράμματος *Windrose* την Ετήσια Ενεργειακή Παράγωγή για οποιαδήποτε ανεμογεννήτρια επιθυμεί εφόσον διαθέτει την καμπύλη ισχύος που την παρέχει ο κατασκευαστής. Ωστόσο είναι δυνατή μια αρχική εκτίμηση του είδους της ανεμογεννήτριας με βάσει τα κριτήρια που έχουμε αναφέρει προηγουμένως στις παραγράφους 6.1 και 4.4 με την ακόλουθη ιεραρχία:

- τη μέση ταχύτητα της περιοχής, η οποία είναι 4,19 m/s, ενώ (γενικά ως κριτήριο προτείνεται μέση ταχύτητα μεγαλύτερη των 5 m/s [1]),
- τα επίπεδα εκπομπής θορύβων και δονήσεων
- την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας
- τις ταχύτητες έναρξης και τερματισμού λειτουργίας

Οπότε επιλέγονται για τις 2 πρώτες εξεταζόμενες θέσεις οι ανεμογεννήτριες *QuietRevolution5* και η *Windside12* ενώ για την τρίτη εξεταζόμενη θέση όπου αναμένονται χαμηλές ταχύτητες ανέμων επιλέγεται η *Windside12* η οποία διαθέτει ταχύτητα έναρξης λειτουργίας 2 m/s. Η επιλογή προέκυψε μέσω σύγκρισης των τεχνικών χαρακτηριστικών μεγεθών των ανεμογεννητριών, δίνοντας βάρος στην εκπλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων, τόσο από τις ανεμογεννήτριες που παρατίθενται στο παράρτημα Β όσο και από τη μελέτη[1]. Τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων ανεμογεννητριών παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες ενώ για λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο παράρτημα Β.

**QuietRevolution5**

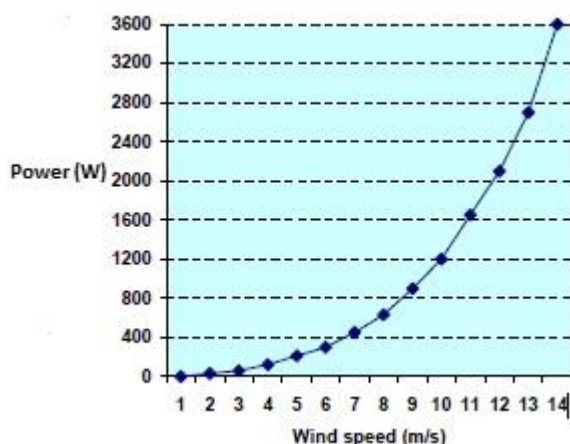
Ονομαστική Ισχύς	6	kW
Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4,0	m/s
Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	16	m/s
Διάμετρος Ρότορα	3,1	m
Ύψος Ρότορα	5	m
Επιφάνεια Σάρωσης	15,5	m <sup>2</sup>
Ύψος Ιστού	5-10	m
Υλικό Πτερυγίων	Ανθρακονήματα	
Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	0	DB



Εικ. 6.9 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας QR5 [Πηγή: [www.quietrevolution.co.uk](http://www.quietrevolution.co.uk)]

**Windside12**

Ονομαστική Ισχύς	3,9	kW
Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	2	m/s
Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
Διάμετρος Ρότορα	2	m
Ύψος Ρότορα	6	m
Επιφάνεια Σάρωσης	12	m <sup>2</sup>
Ύψος Ιστού	6 m	m
Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	Αλουμίνιο
Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	0	DB



**Εικ. 6.10** Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Windside12 [Πηγή: *Energy from Wind – Concept to Product*, Pharos Marine Automatic Power, AB Pharos Marine Ltd, Steyning Way, Hounslow, Middx TW4 6DL, England.]

## 6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ENVI-MET

### 6.5.1 Δημιουργία του αρχείου εισαγωγής περιοχής .IN (Area Input File)

Για τη μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα Envi-met, λόγω της έκτασης και της πολυπλοκότητάς της, κρίθηκε αναγκαία η χρησιμοποίηση της version 250x250x35. Η επιλογή του μεγέθους των κελιών του πλέγματος έγινε με κριτήριο την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, καθότι θεωρήθηκε ότι οι διαστάσεις τους είναι ικανές να αποτυπώσουν ικανοποιητικά τις διαφοροποιήσεις του ανάγλυφου (δώματα, εσοχές ανομοιογενή τετράγωνα), σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση υπολογιστικής ισχύος, ως εκ τούτου χρόνου προσομοίωσης. Έτσι επιλέχθηκαν:

- 224 κελιά κατά τον x άξονα με διάσταση κελιού  $dx=2.00m$ , αφού η κάτοψη έχει διάσταση 440m στον αντίστοιχο άξονα
- 145 κελιά κατά τον y άξονα με διάσταση κελιού  $dy=2.00m$ , αφού η κάτοψη έχει διάσταση 290 m στον αντίστοιχο άξονα
- 30 κελιά κατά τον z άξονα με διάσταση κελιού  $dz=2.00m$ , δεδομένου ότι το ψηλότερο κτήριο στο μοντέλο έχει ύψος 28m και πως το πρόγραμμα απαιτεί το μοντέλο να έχει ύψος περίπου διπλάσιο του ψηλότερου κτιρίου [5], δηλαδή  $30 \times 2 > 28 \times 2$ .

Στα παραπάνω κελιά, κατά τις διευθύνσεις x, y συμπεριλαμβάνονται 16 (8+8) κελιά μορφής επάλληλων πλεγμάτων (nesting grids), με σκοπό να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή θέση των ορίων του υπολογιστικού πεδίου και να μην επηρεαστεί η ροή του αέρα από την ύπαρξη υπό προσομοίωση στοιχείων. (Στη θέση αυτή η κατανομή των παραμέτρων του ροϊκού πεδίου θεωρείται γνωστή σύμφωνα με τις σχέσεις ροής σε επίπεδο ανάγλυφο. Η ταχύτητα του ανέμου έχει λογαριθμική κατανομή, η απόσταση από τα όρια στην έξοδο του πεδίου διασφαλίζει ότι τα μεγέθη δεν παρουσιάζουν εγκάρσιες διαφοροποιήσεις ενώ τα πλάγια θεωρείται ότι τα μεγέθη δεν παρουσιάζουν κλίσεις στα όρια. [5]. Επιλέχθηκε ακόμα, τα υπολογιστικά κελιά να διατηρούν σταθερό ύψος κατά τον άξονα z (equidistant), ενώ ως ευρύτερη περιοχή μελέτης ορίστηκε η Αθήνα, οπότε και τα γεωγραφικά στοιχεία της εισήχθησαν αυτομάτως στο σύστημα.

**Εικ. 6.11** Βασικά στοιχεία διαμόρφωσης του μοντέλου στο αρχείο .IN  
[Πηγή: Envi-met]

Για τη δημιουργία του μοντέλου αρχικά μελετήθηκαν δορυφορικές εικόνες της περιοχής και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε επιτόπια έρευνα κατά την οποία αποτυπώθηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα ύψη και οι επιφάνειες των κτηρίων και τα είδη και οι θέσεις πρασίνου.

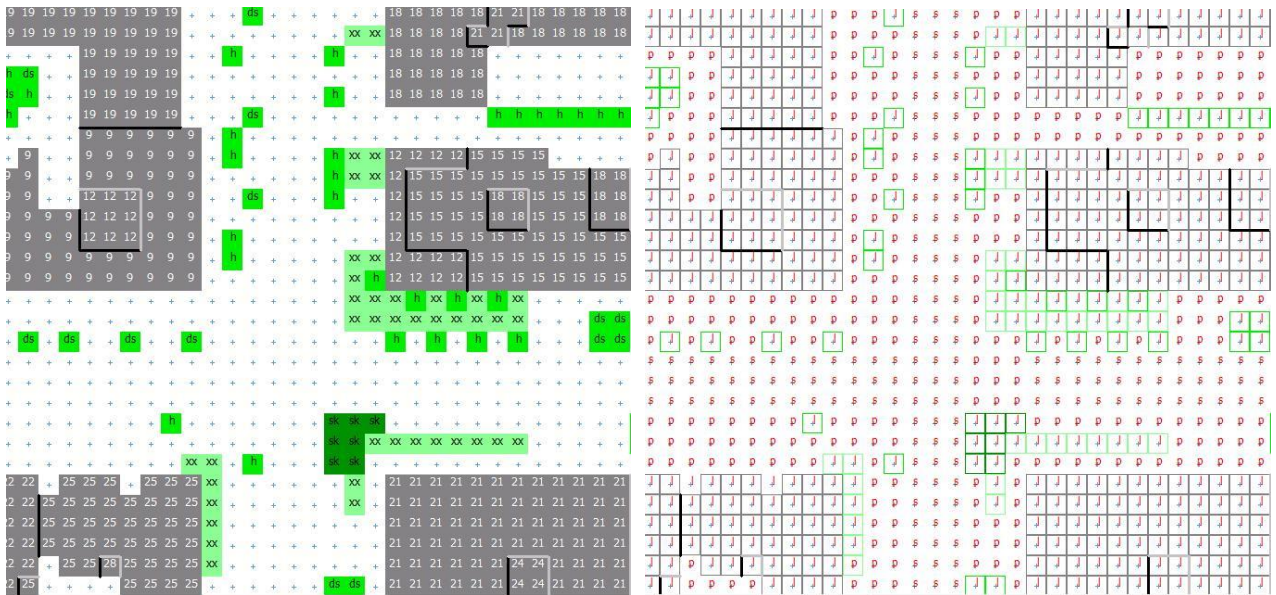
Πιο συγκεκριμένα και αρχικά σχετικά με τη βλάστηση χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία φυτών που περιείχε ήδη η βιβλιοθήκη (plants.dat):

- στοιχείο γρασιδιού μέσου ύψους 50 cm πυκνό (κωδικός: xx)
- στοιχείο δέντρου ύψους 2 m με τη μέγιστη πυκνότητα φυλλώματος στις ανώτερες στρώσεις του (κωδικός: h)
- στοιχείο δέντρου ύψους 10 m μικρής πυκνότητας (κωδικός: ds)
- στοιχείο δέντρου ύψους 15 m μικρής πυκνότητας (κωδικός: I1)
- στοιχείο δέντρου ύψους 15 m μέσης πυκνότητας (κωδικός: TH)
- στοιχείο δέντρου ύψους 15 m μεγάλης πυκνότητας (κωδικός: T2)
- στοιχείο δέντρου ύψους 15 m με τη μέγιστη πυκνότητα φυλλώματος στις ανώτερες στρώσεις του (κωδικός: sk)
- στοιχείο δέντρου ύψους 20 m μικρής πυκνότητας (κωδικός: I2)

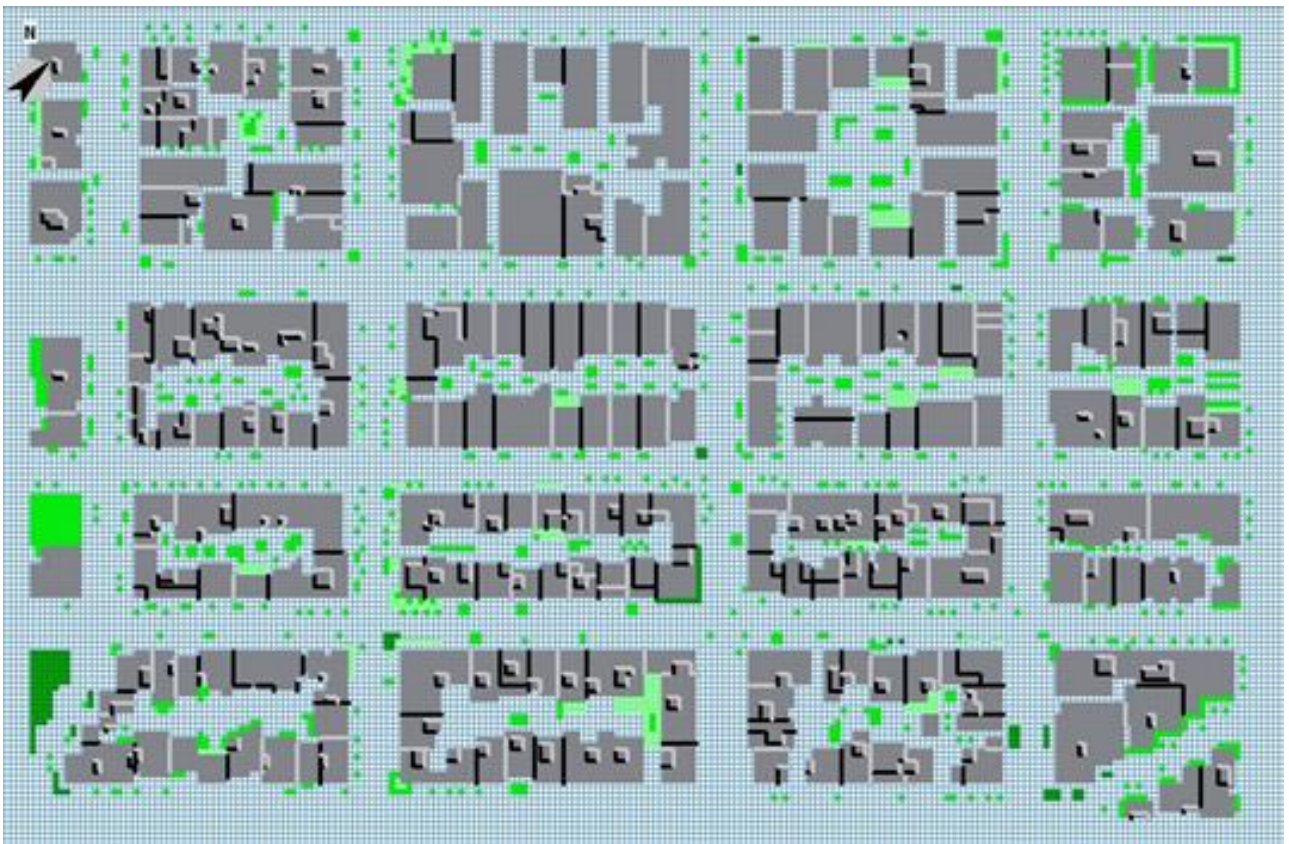
Ως προς τα υλικά επιφανειών χρησιμοποιήθηκαν αυτά του αρχείου profiles.dat και ειδικότερα:

- στοιχείο ασφάλτου για όλες τις οδούς της περιοχής μελέτης (κωδικός: asphalt road)
- στοιχείο πεζοδρομίου από σκυρόδεμα για όλα τα πεζοδρόμια της περιοχής (κωδικός: pavement (concrete)).
- στοιχείο εδάφους στις θέσεις βλάστησης (κωδικός: loamy soil)

Στις ακόλουθες εικόνες φαίνονται αριστερά χαρακτηριστικά αποσπάσματα από την διασταύρωση των οδών Δαρδανελλίων και Ανδριανουπόλεως, όπου αποτυπώνεται η βλάστηση και τα υλικά επιφανειών, και ακολούθως η τελική διαμόρφωση του αρχείου εισαγωγής περιοχής (Area Input File).



*Εικ. 6.12 Άποψη μοντέλου κτιρίων και φυτών στην διασταύρωση των οδών Δαρδανελλίων και Ανδριανουπόλεως (αριστερά), το μοντέλο υλικών των επιφανειών της ίδιας περιοχής (δεξιά) [Πηγή: Envi-met]*



*Εικ. 6.13 Τελική άποψη του αρχείου εισαγωγής περιοχής .IN (Area Input File) [Πηγή: Envi-met]*



### 6.5.2 Δημιουργία του κύριου αρχείου διαμόρφωσης .CF (Main Configuration File)

Για το κύριο αρχείο διαμόρφωσης πριν την έναρξη των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες ρυθμίσεις:

- Ως ώρα έναρξης της προσομοίωσης ορίστηκε η έκτη πρωινή ώρα (06:00) της 10.05.2013, για να δοθεί στο μοντέλο ο απαραίτητος χρόνος ώστε να μπορέσει να ακολουθήσει τις ατμοσφαιρικές διεργασίες [5].
- Ως συνολικός χρόνος προσομοίωσης ορίστηκαν οι 6 ώρες, χρόνος που είναι ο ελάχιστος ώστε τα αποτελέσματα να μην επηρεάζονται από τις αρχικές συνθήκες [5], αλλά ταυτόχρονα να πραγματοποιηθεί η προσομοίωση εντός λογικών ορίων.
- Η διεύθυνση του ανέμου ορίστηκε ως Βόριο-βορειοδυτική (BBΔ/NNW), σύμφωνα με την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων που περιγράφηκε νωρίτερα.
- Για την τραχύτητα του εδάφους δόθηκε η τιμή 0.1 m
- Η ειδική υγρασία στα 2500 m τέθηκε ίση με 7 g Water/kg air
- Η σχετική υγρασία σε ύψος 2 m από το έδαφος τέθηκε ίση με 50%
- Η αρχική θερμοκρασία της προσομοίωσης ορίστηκε 20° C = 293K

Σχετικά με την ταχύτητα του ανέμου ως πρώτη τιμή ορίστηκαν τα 3 m/s. Όπως περιγράφηκε νωρίτερα για να καταστεί δυνατή η μελέτη της ροής του ανέμου για κάθε εύρος ταχύτητας στις επιλεγμένες θέσεις, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικές προσομοιώσεις για κάθε 1 m/s αύξησής της, με όλες τις υπόλοιπες ρυθμίσεις να παραμένουν οι ίδιες.

Συνολικά προέκυψαν 15 κύρια αρχεία διαμόρφωσης .CF, ένα για κάθε προσομοίωση. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα.

```

Apotelesmata16.CF
% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):                =16
Input file Model Area                      =C:\Users\meli\Desktop\nea smyrnh 2367.in
Filebase name for Output (Text):          =neasmynrni16
Output Directory:                         =C:\Users\meli\Desktop\results16\neasmynrni16
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):     =10.05.2013
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):      =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:           =06.00
Save Model State each ? min               =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]      =16
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =337.5
Roughness Length z0 at Reference Point    =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]       =293
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =7
Relative Humidity in 2m [%]              =50
Database Plants                           =C:\Envi-met\sys.basedata\Plants.dat

( -- End of Basic Data --)
( -- Following: Optional data. The order of sections is free. --)
( -- Missing Sections will keep default data. --)
( Use "Add Section" in ConfigEditor to add more sections )
( Only use "=" in front of the final value, not in the description)
( This file is created for ENVI-met V3.0 or better )

```

**Εικ. 6.14** Κύριο αρχείο διαμόρφωσης για την προσομοίωση ταχύτητας 16 m/s [Πηγή Envi-met]

## 6.6 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

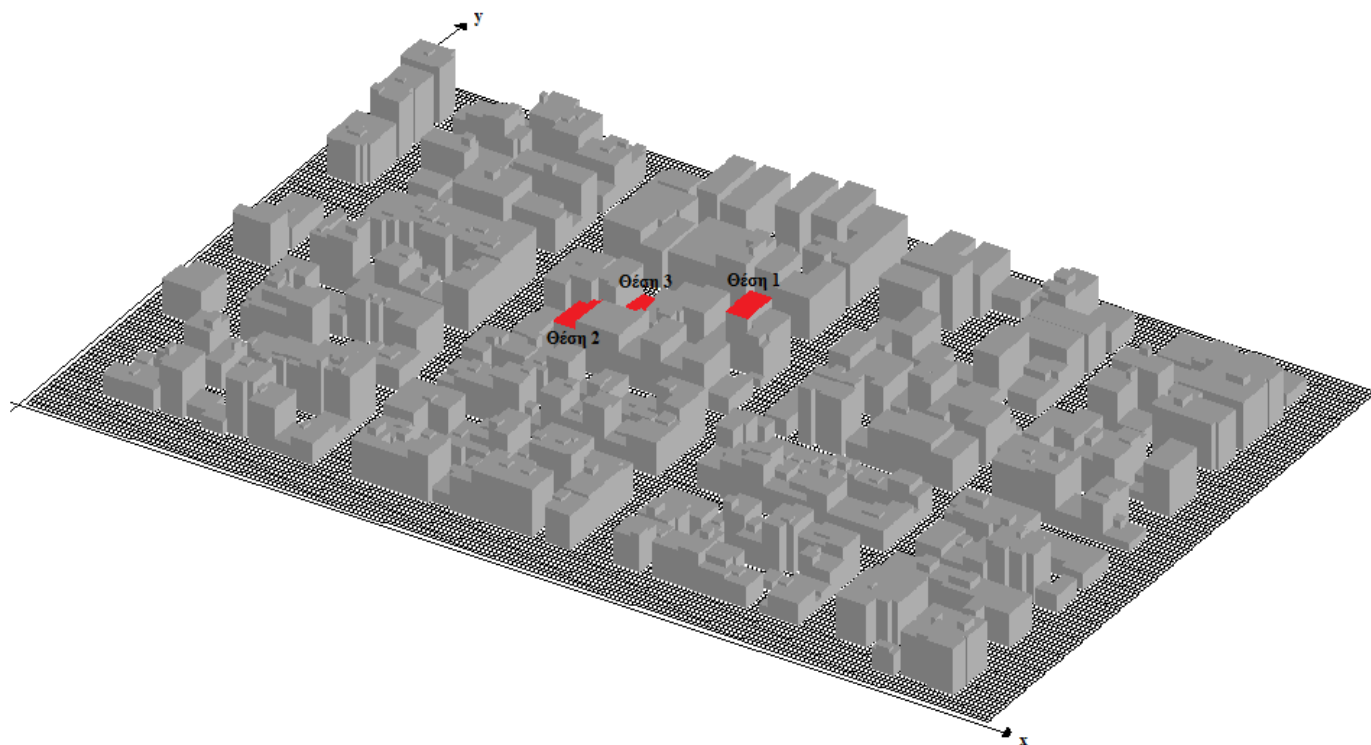
Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε η παρουσίαση της διαδικασίας με την οποία μελετήθηκε η εξεταζόμενη περιοχή με την χρήση του προγράμματος.

Παρακάτω παρατίθενται, ενδεικτικά λόγω του μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων, οπτικοποιημένα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις του Envi-met μέσω του υποπρογράμματος Leonardo, για την ταχύτητα 8.5 m/s της επικρατούσας διεύθυνσης αρχικά, και κατόπιν συγκριτικά χαρακτηριστικά αποτελέσματα για τις ταχύτητες 5, 10 και 18 m/s για τις τρεις εξεταζόμενες θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρατίθενται πληροφορίες:

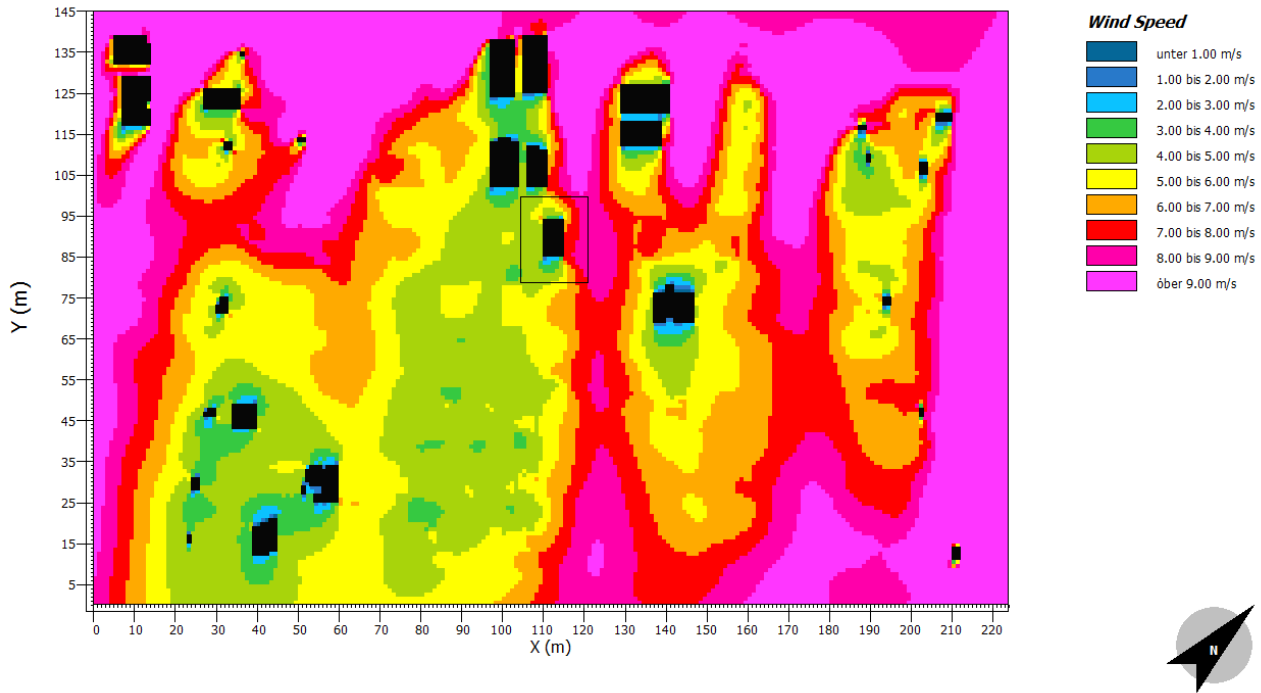
- για την κατανομή της ταχύτητας στην εκάστοτε θέση και εκάστοτε ύψος σε τομές κατά τον άξονα z (οι τομές πραγματοποιούνται στο ύψος της οροφής του κτιρίου καθώς και στο ύψος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας)
- για την διεύθυνση της ταχύτητας στην εκάστοτε θέση και εκάστοτε ύψος σε τομές κατά τον άξονα z (οι τομές πραγματοποιούνται στο ύψος της οροφής του κτιρίου καθώς και στο ύψος τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας)
- για την κατανομή, τη διεύθυνση της ταχύτητας αλλά και την τύρβη σε τομές κατά τον άξονα y και x στην εκάστοτε θέση.

Επιπροσθέτως αναφέρεται πως σε κάθε εικόνα, η υπό μελέτη θέση τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας, σημειώνεται με πλαίσιο.

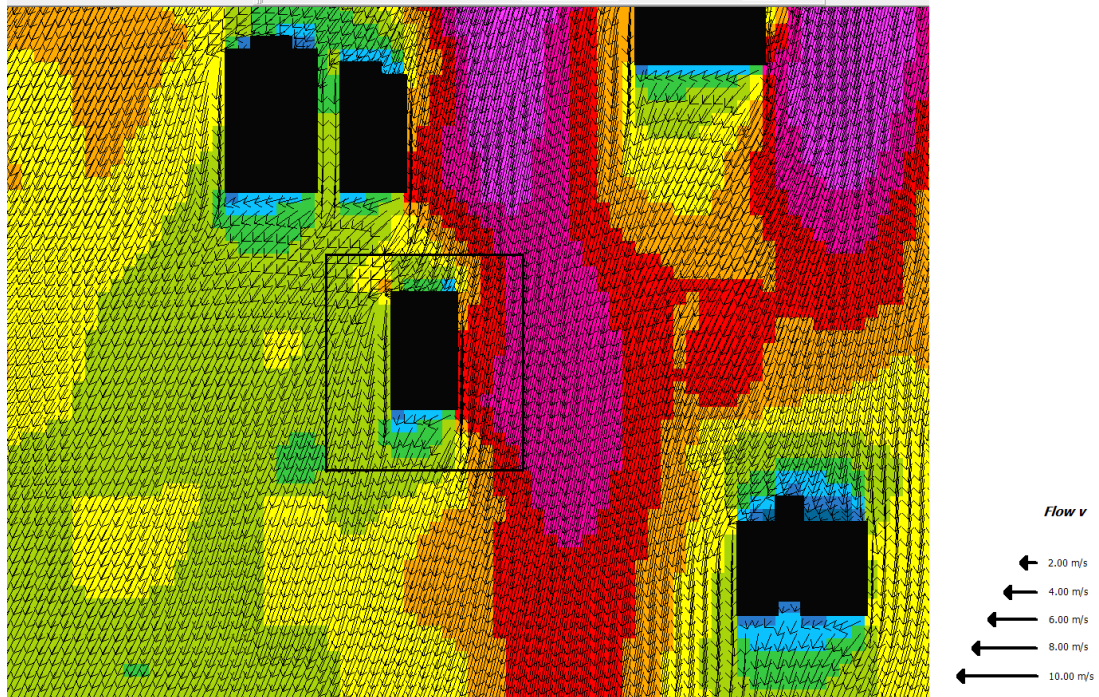


**Εικ. 6.15** Χαρακτηριστική τρισδιάστατη άποψη της περιοχής μελέτης. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι υπό μελέτη θέσεις τοποθέτησης των Α/Γ [Πηγή: Envi-met]

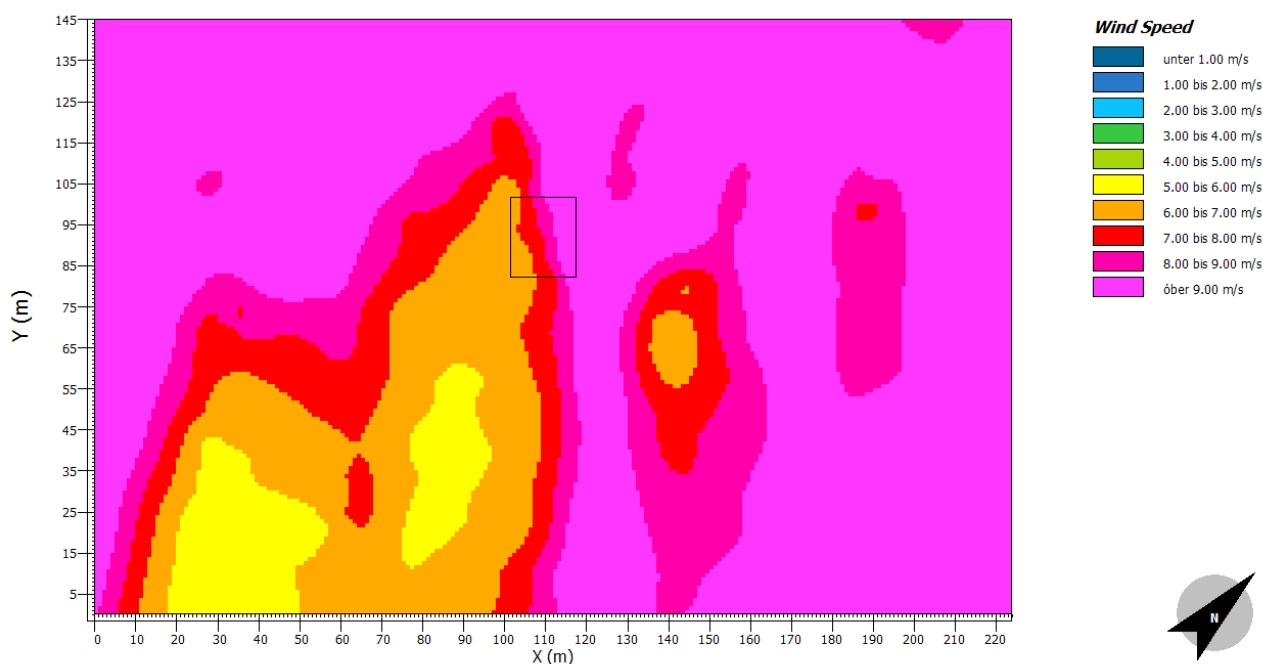
**ΘΕΣΗ 1**



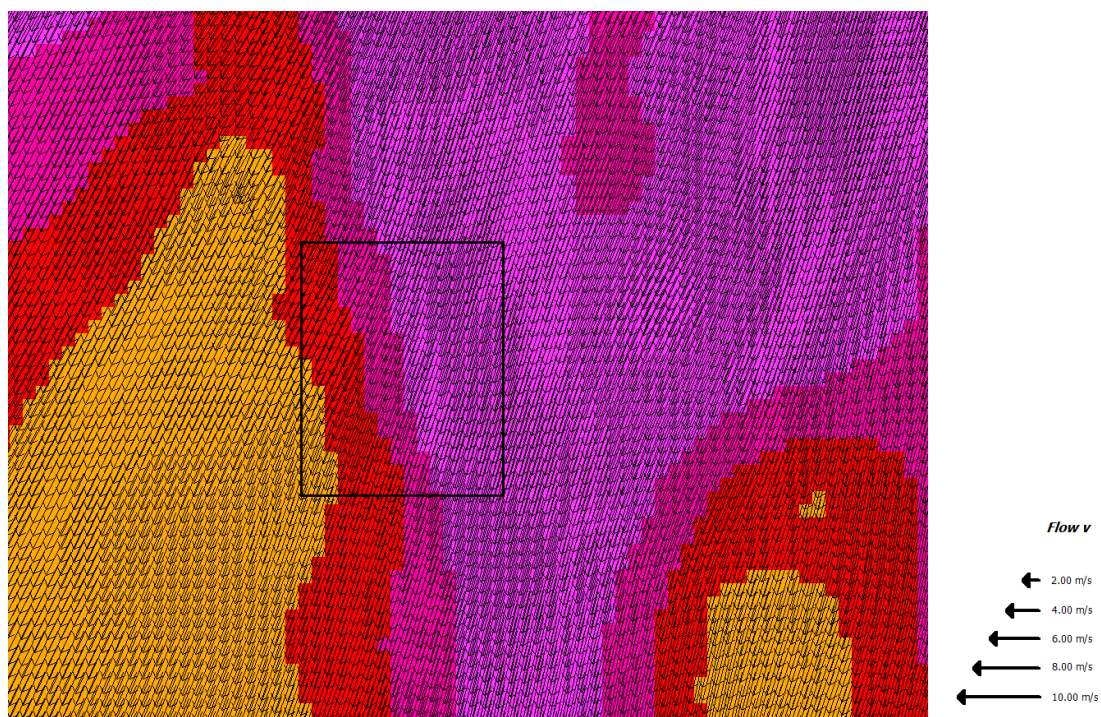
**Εικ. 6.16** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 25 μέτρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]



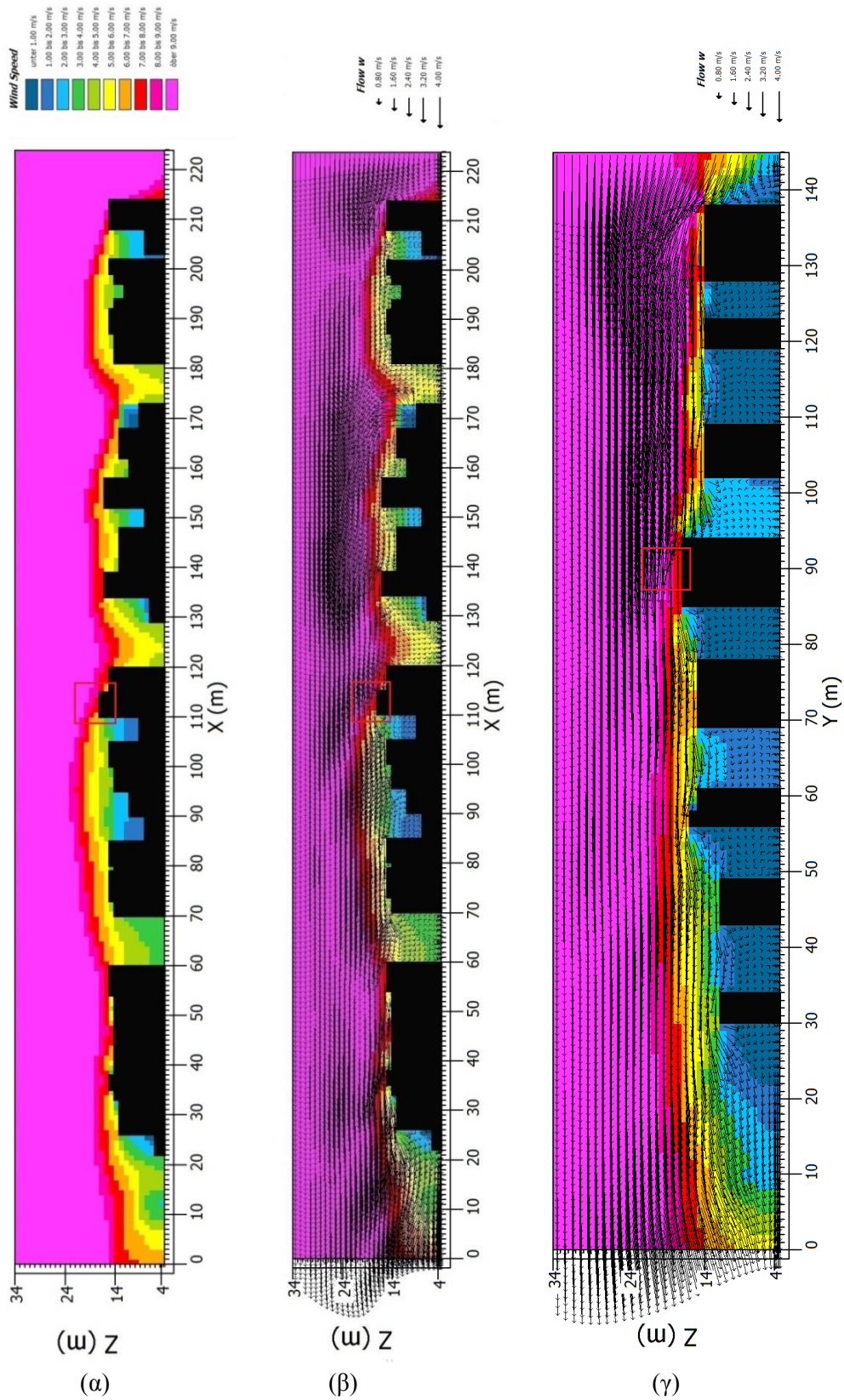
**Εικ. 6.17** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 25μετρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]



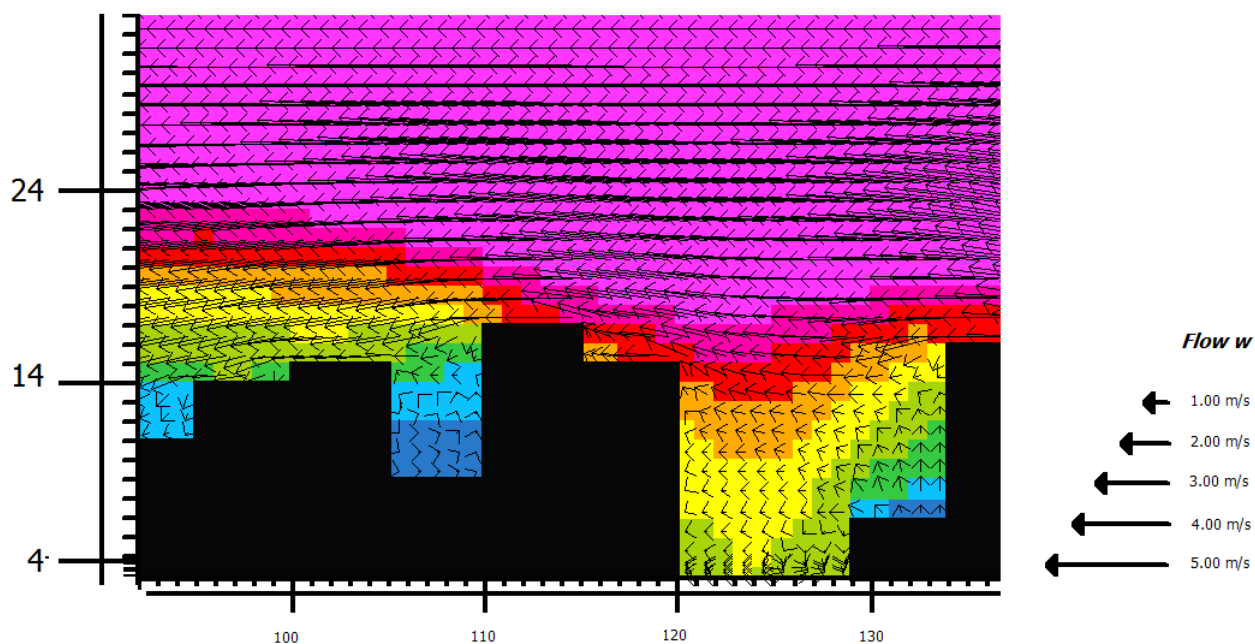
**Εικ. 6.18** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]



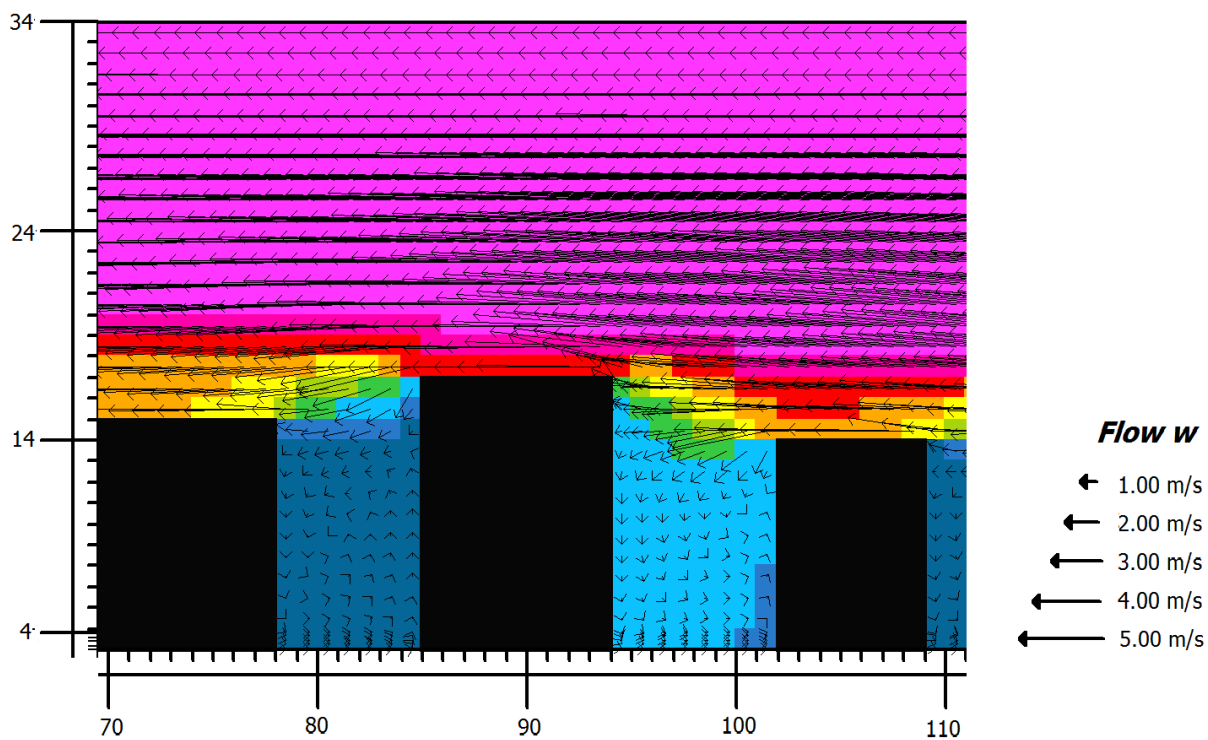
**Εικ. 6.19** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]



**Εικ. 6.20** (α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα  $y$  στην εξεταζόμενη θέση, (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα  $y$  στην εξεταζόμενη θέση, (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα  $x$  στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

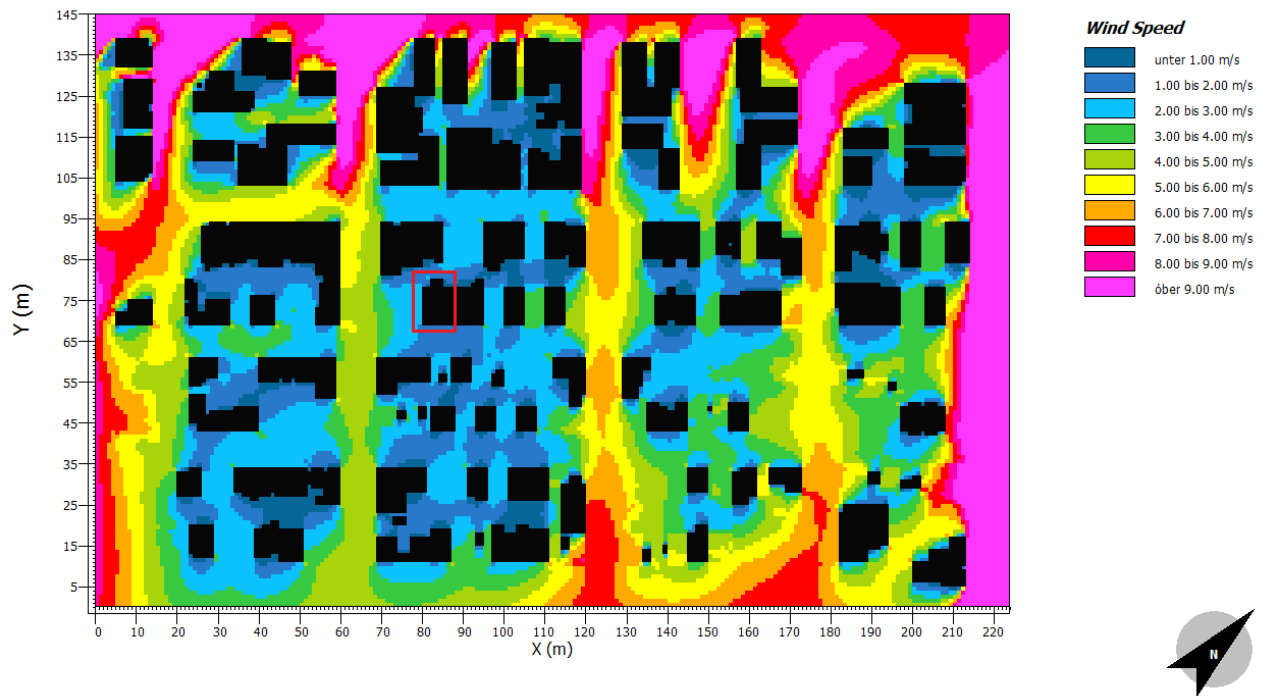


Εικ. 6.21 Λεπτομέρεια εικόνας 6.16 (β). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

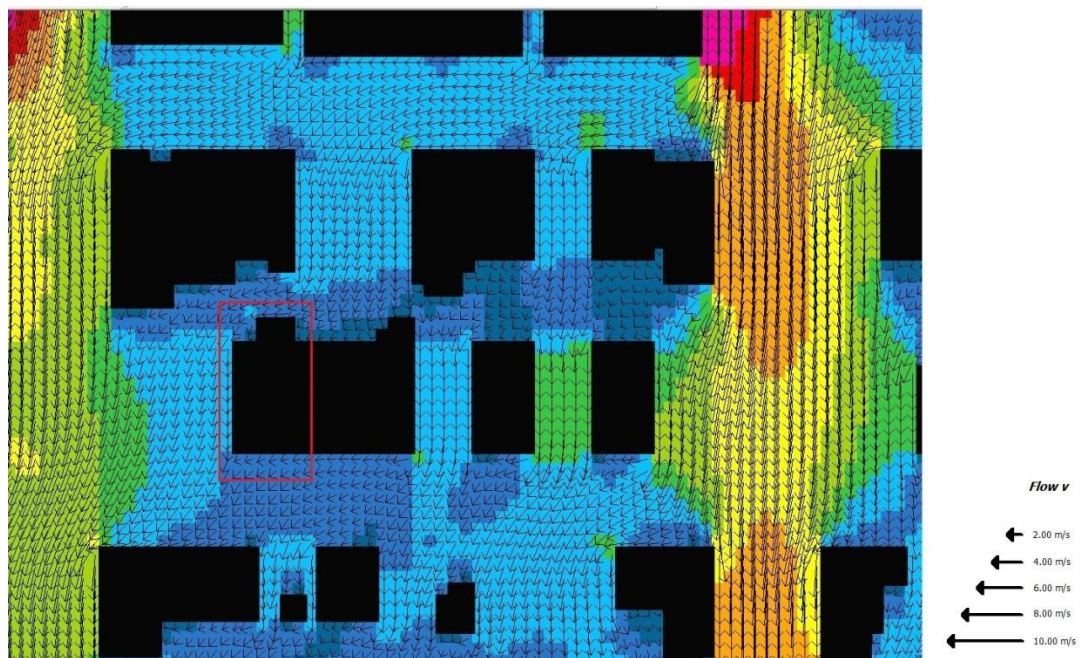


Εικ. 6.22 Λεπτομέρεια εικόνας 6.16 (γ). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

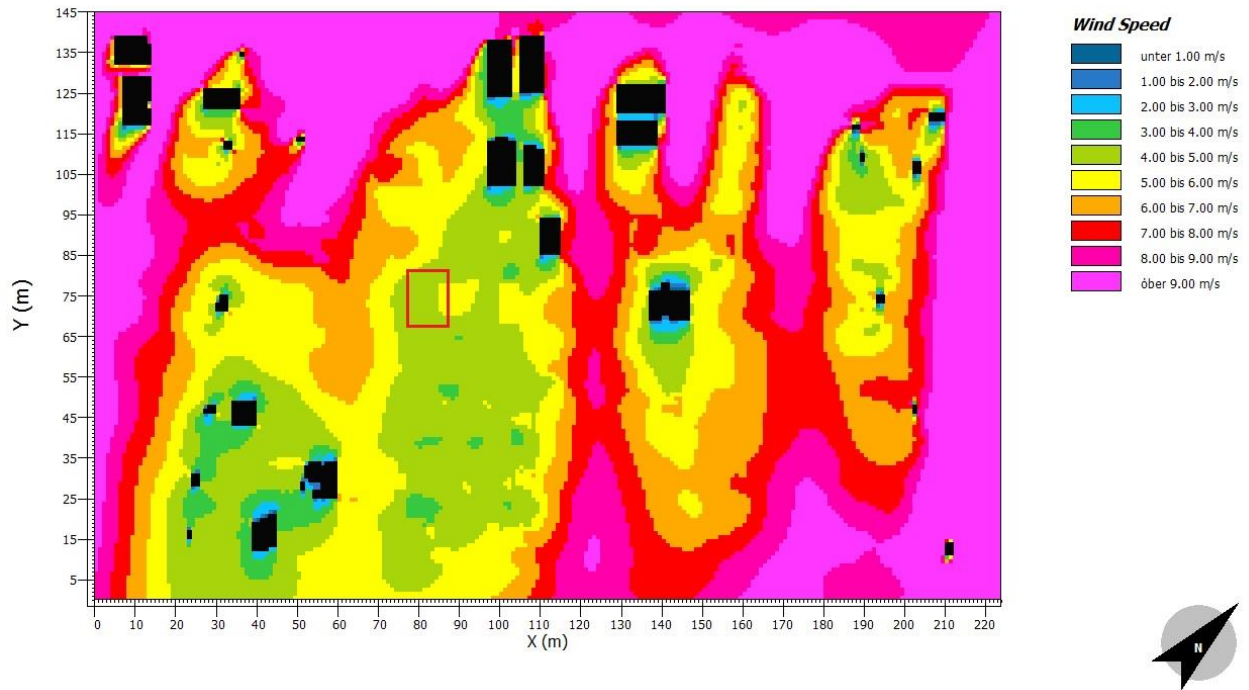
**ΘΕΣΗ 2**



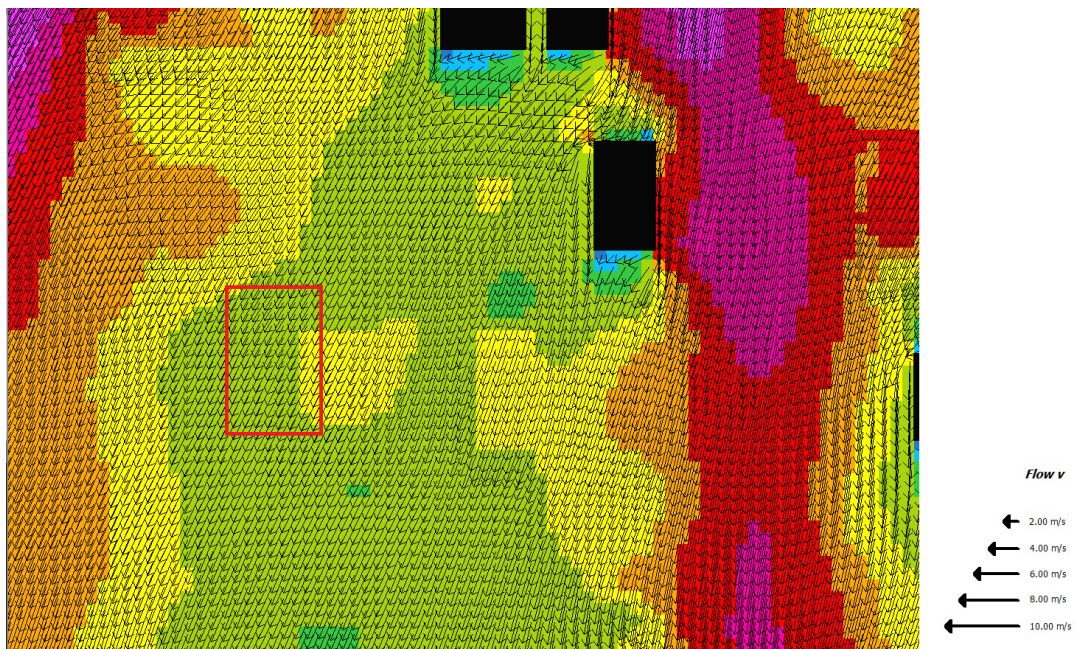
**Εικ. 6.23** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 18 μέτρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]



**Εικ. 6.24** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 18μετρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]

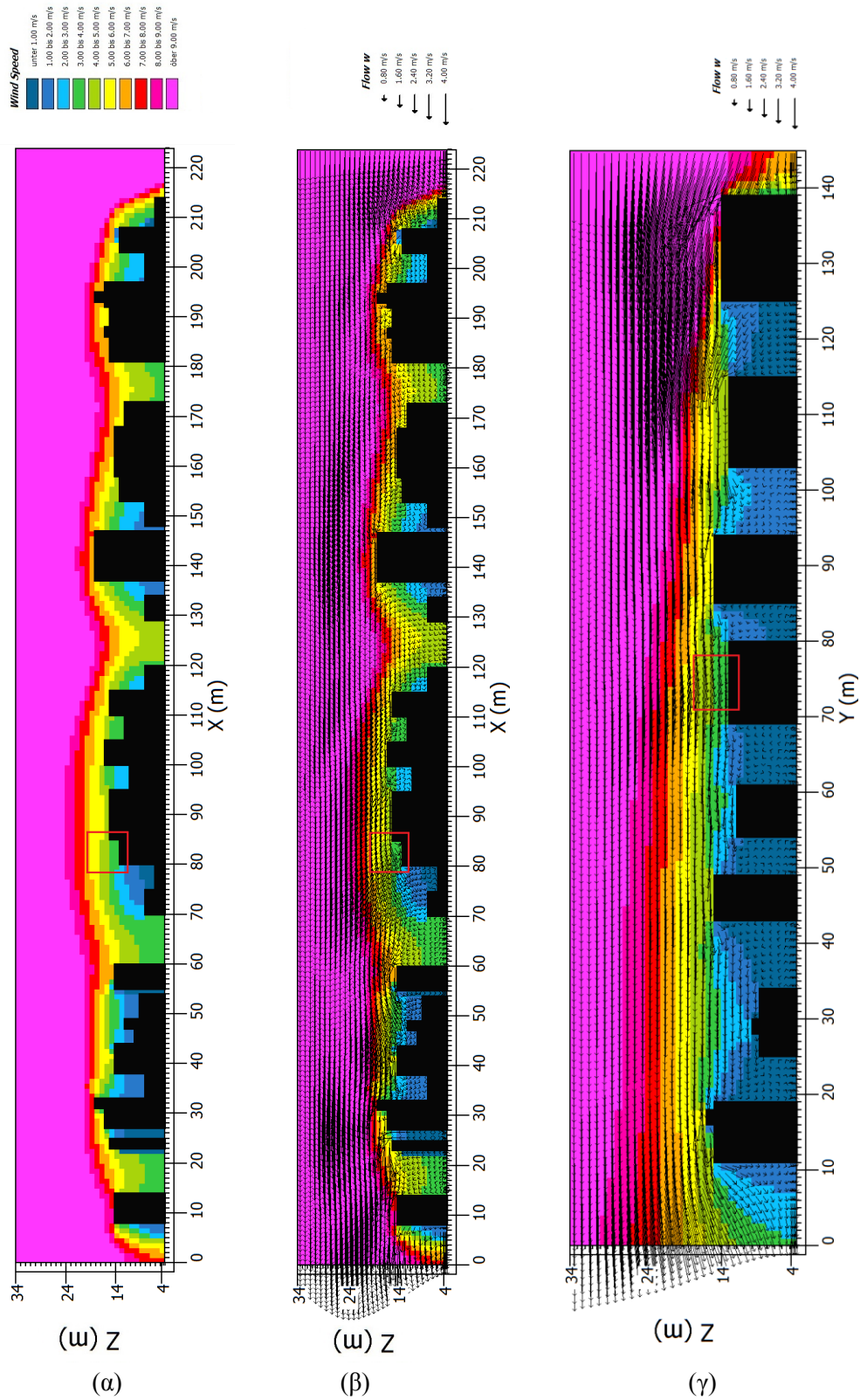


**Εικ. 6.25** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 30 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]

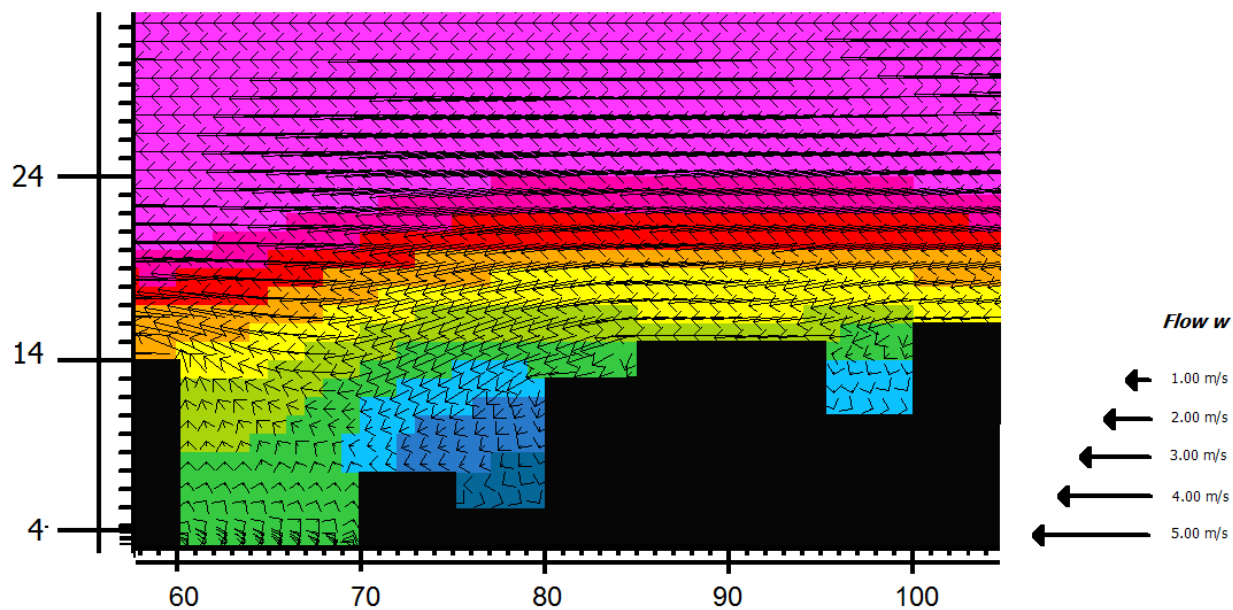


**Εικ. 6.26** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 23 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]

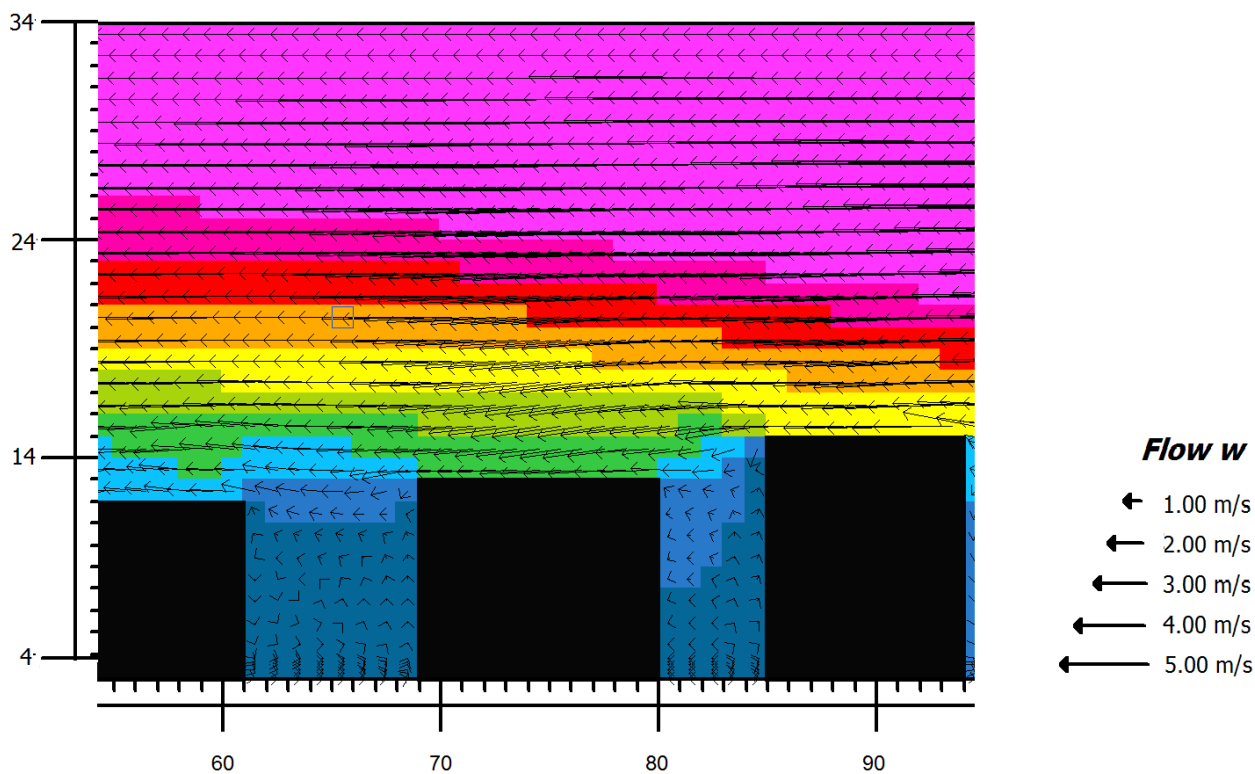




**Εικ. 6.27** (α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση, (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση, (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα x στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

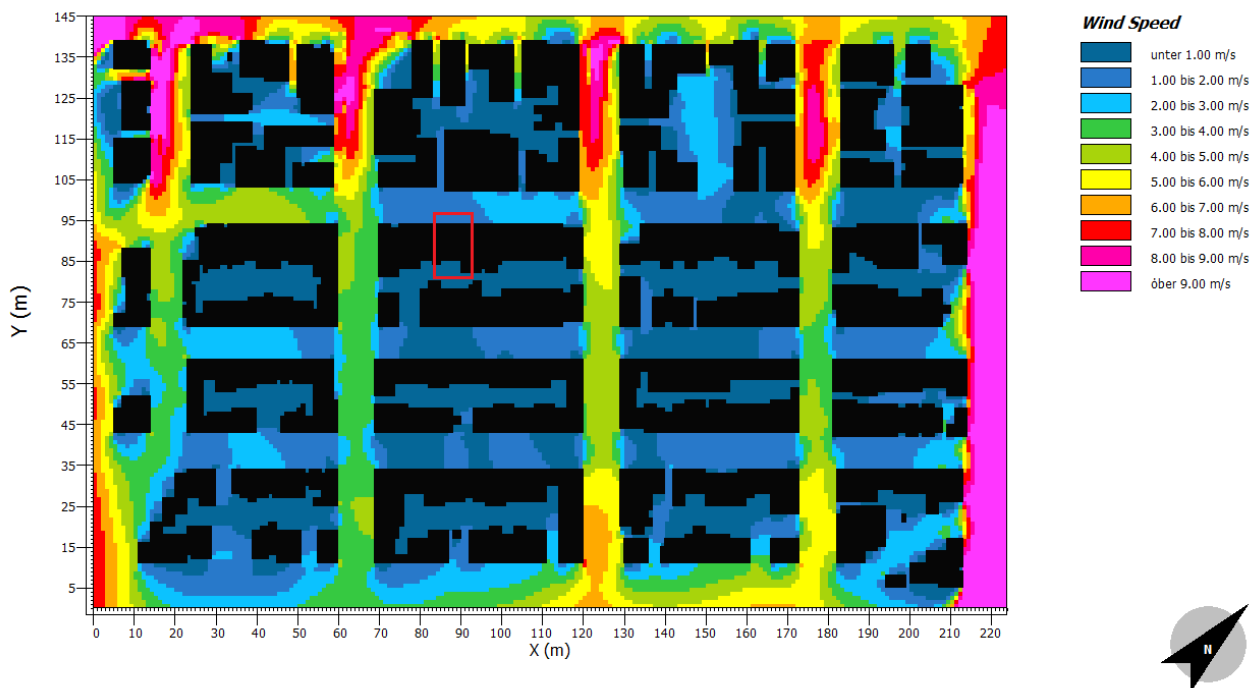


Εικ. 6.28 Λεπτομέρεια εικόνας 6.24 (β). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

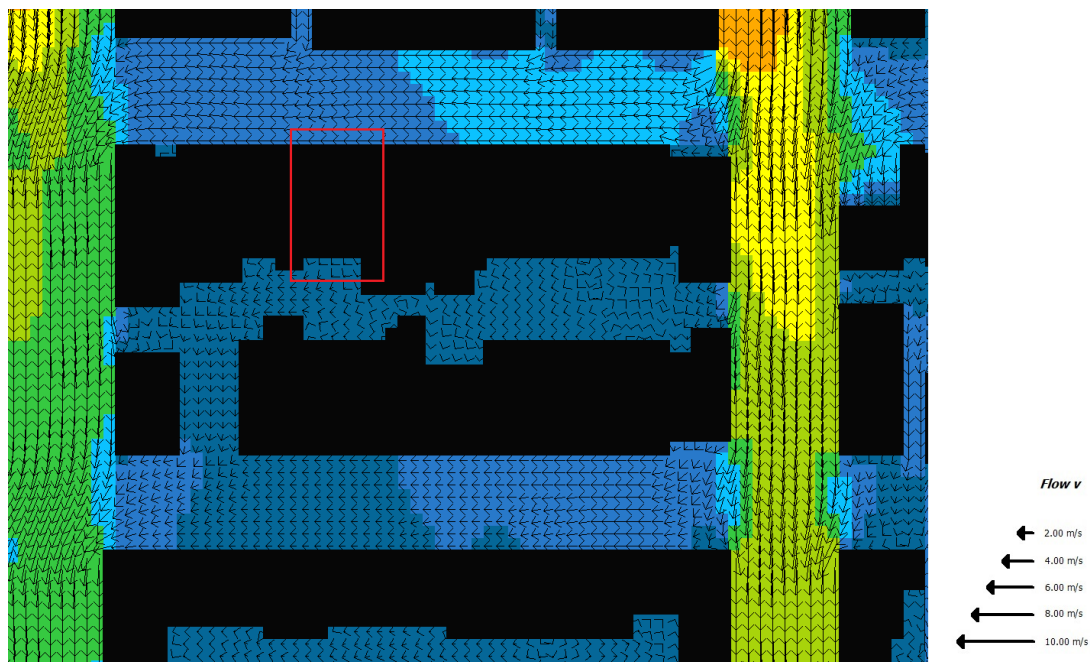


Εικ. 6.29 Λεπτομέρεια εικόνας 6.24 (γ). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

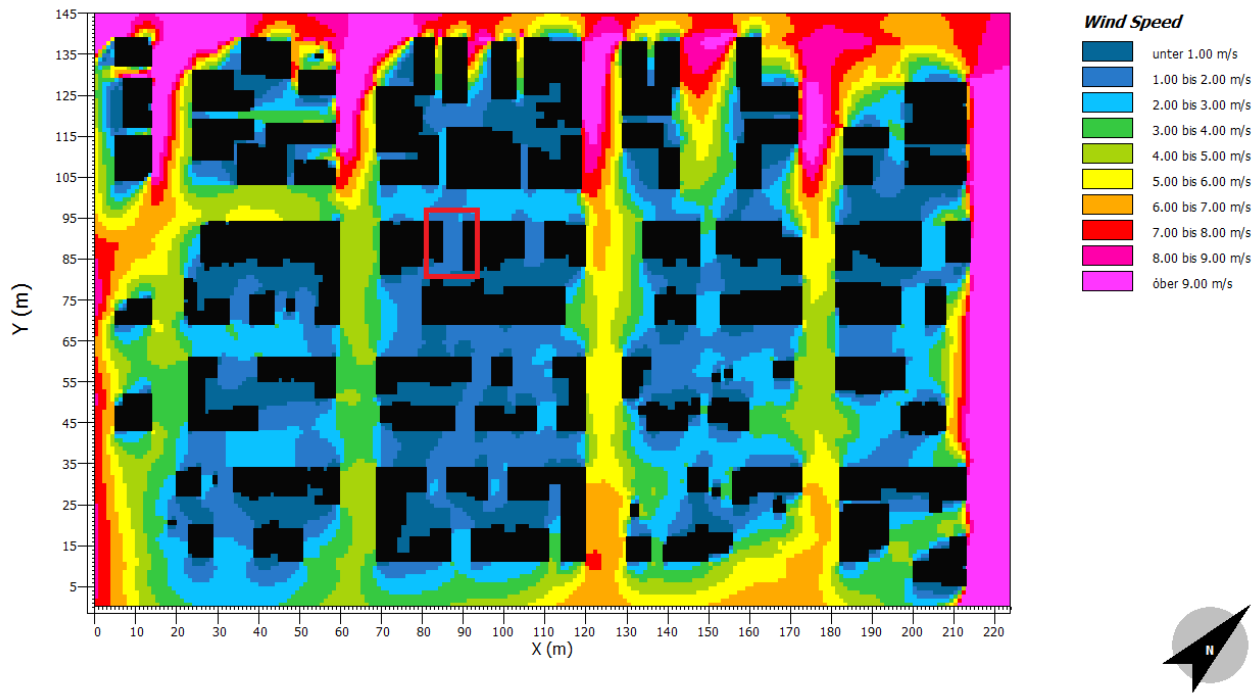
**ΘΕΣΗ 3**



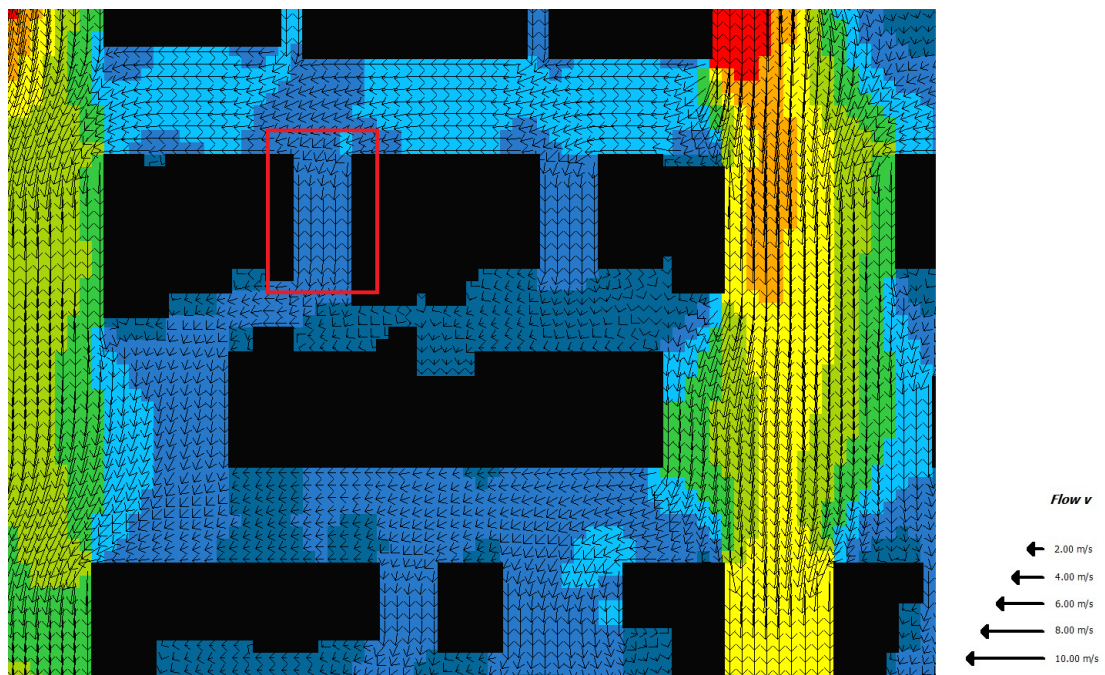
**Εικ. 6.30** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 7 μέτρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]



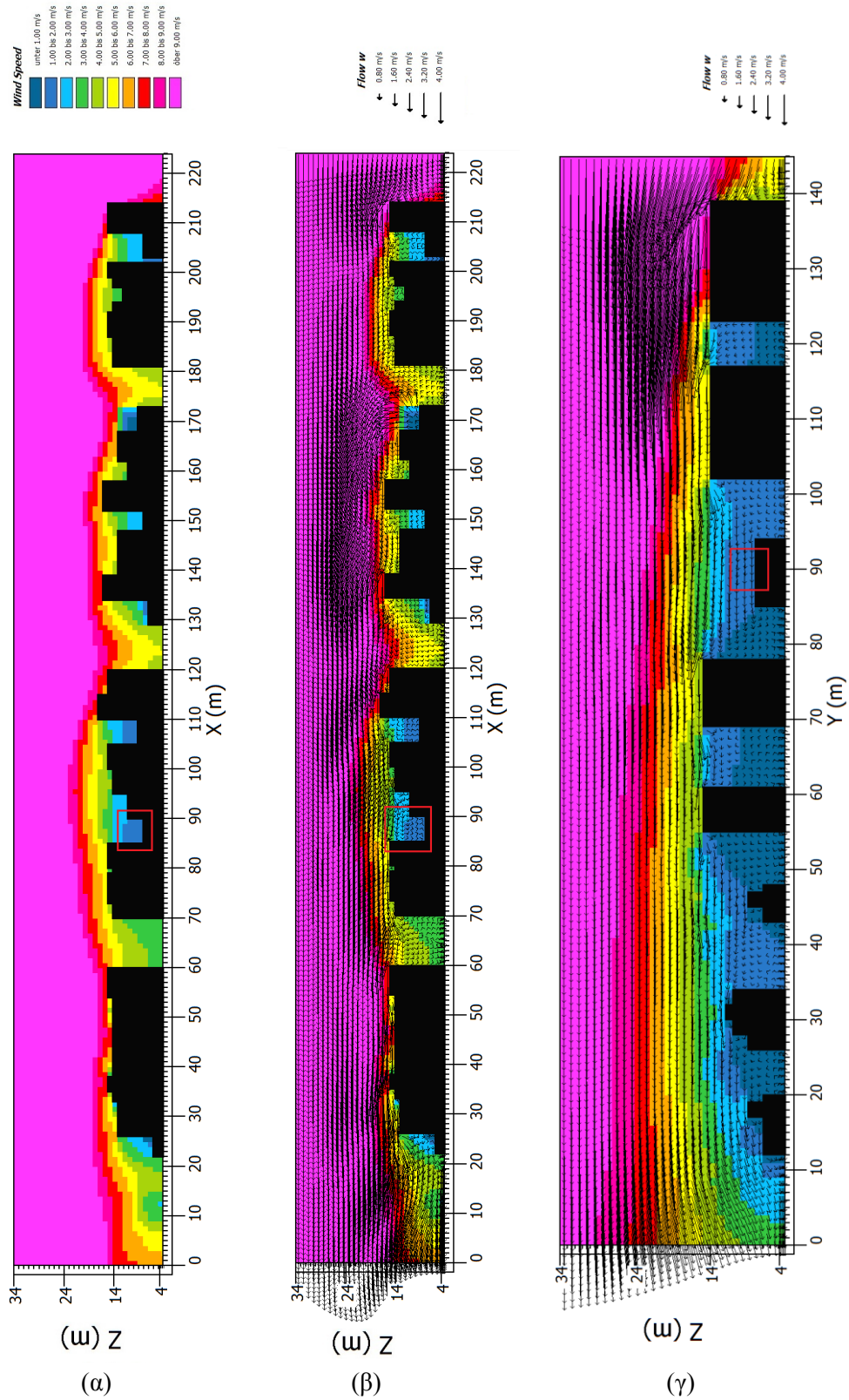
**Εικ. 6.31** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 7 μέτρων (οροφή κτιρίου) [Πηγή: Envi-met]



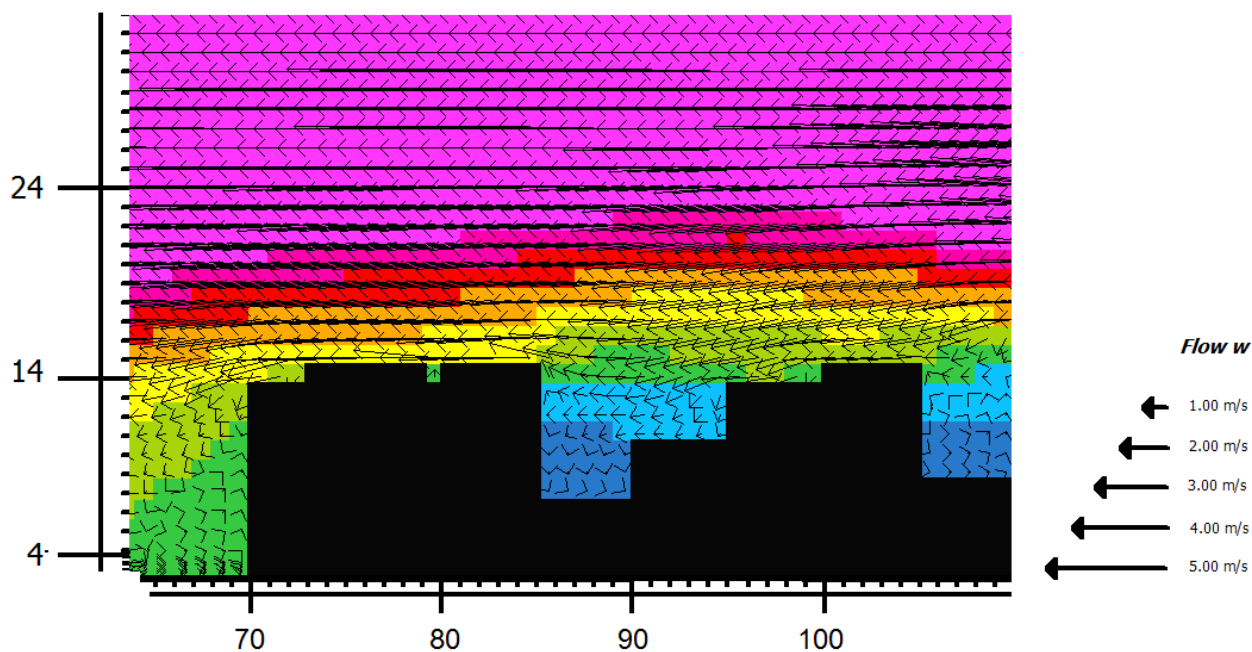
**Εικ. 6.32** Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 12 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]



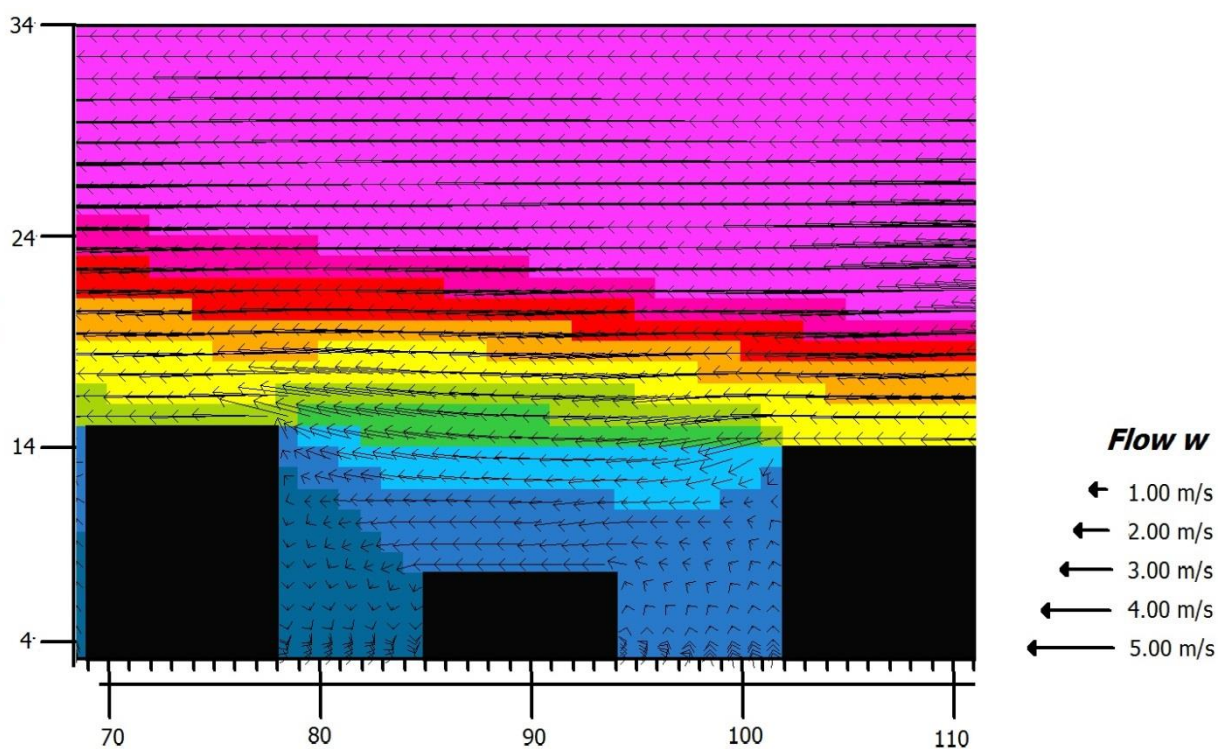
**Εικ. 6.33** Διεύθυνση και κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα z σε ύψος 12 μέτρων (θέση εγκατάστασης ανεμογεννήτριας) [Πηγή: Envi-met]



**Εικ. 6.34** (α) Κατανομή ταχυτήτων σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση, (β) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα y στην εξεταζόμενη θέση, (γ) Κατανομή ταχυτήτων, διευθύνσεων και τύρβης σε τομή κατά τον άξονα x στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

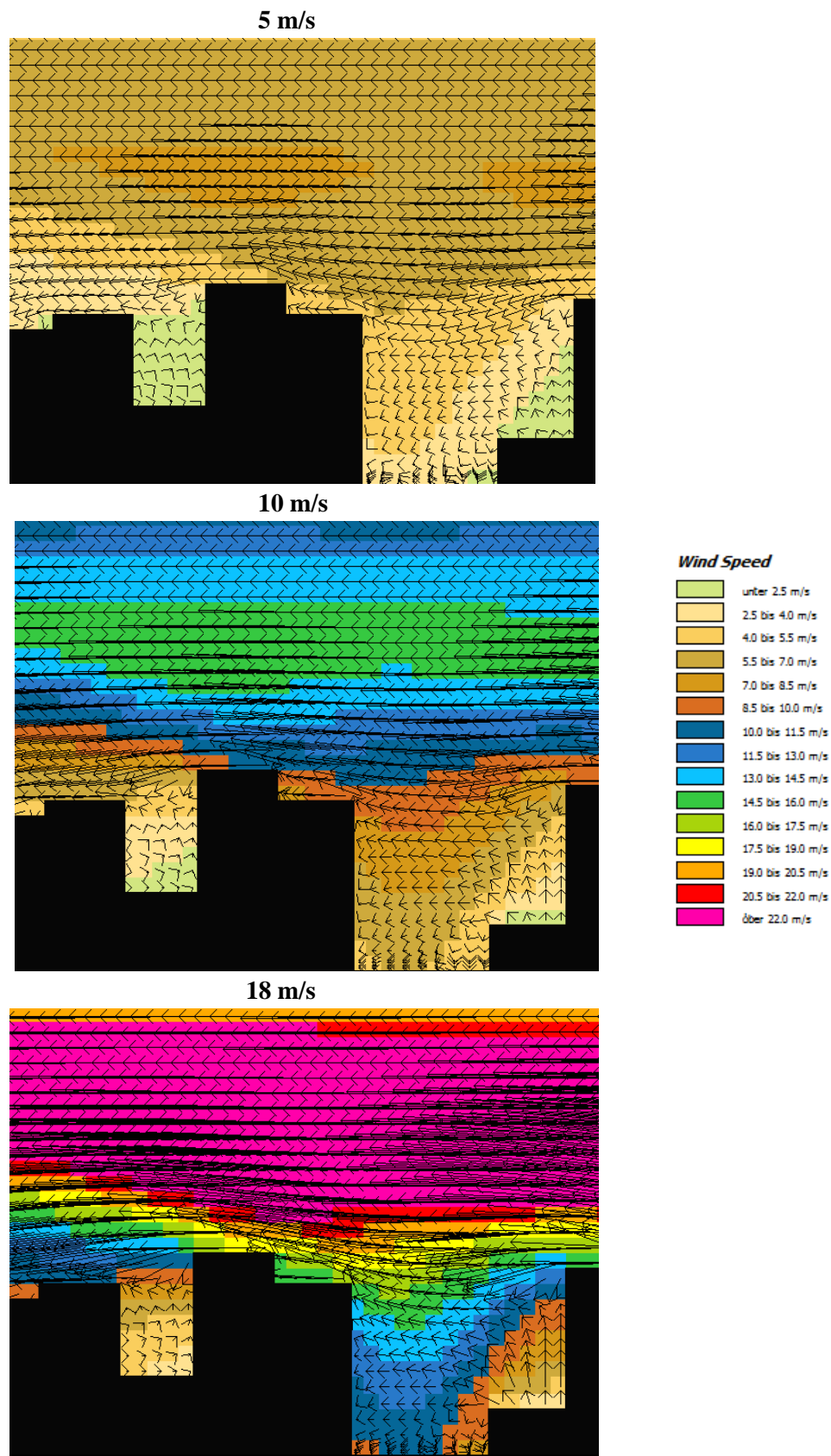


**Εικ. 6.35** Λεπτομέρεια εικόνας 6.34(β). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]



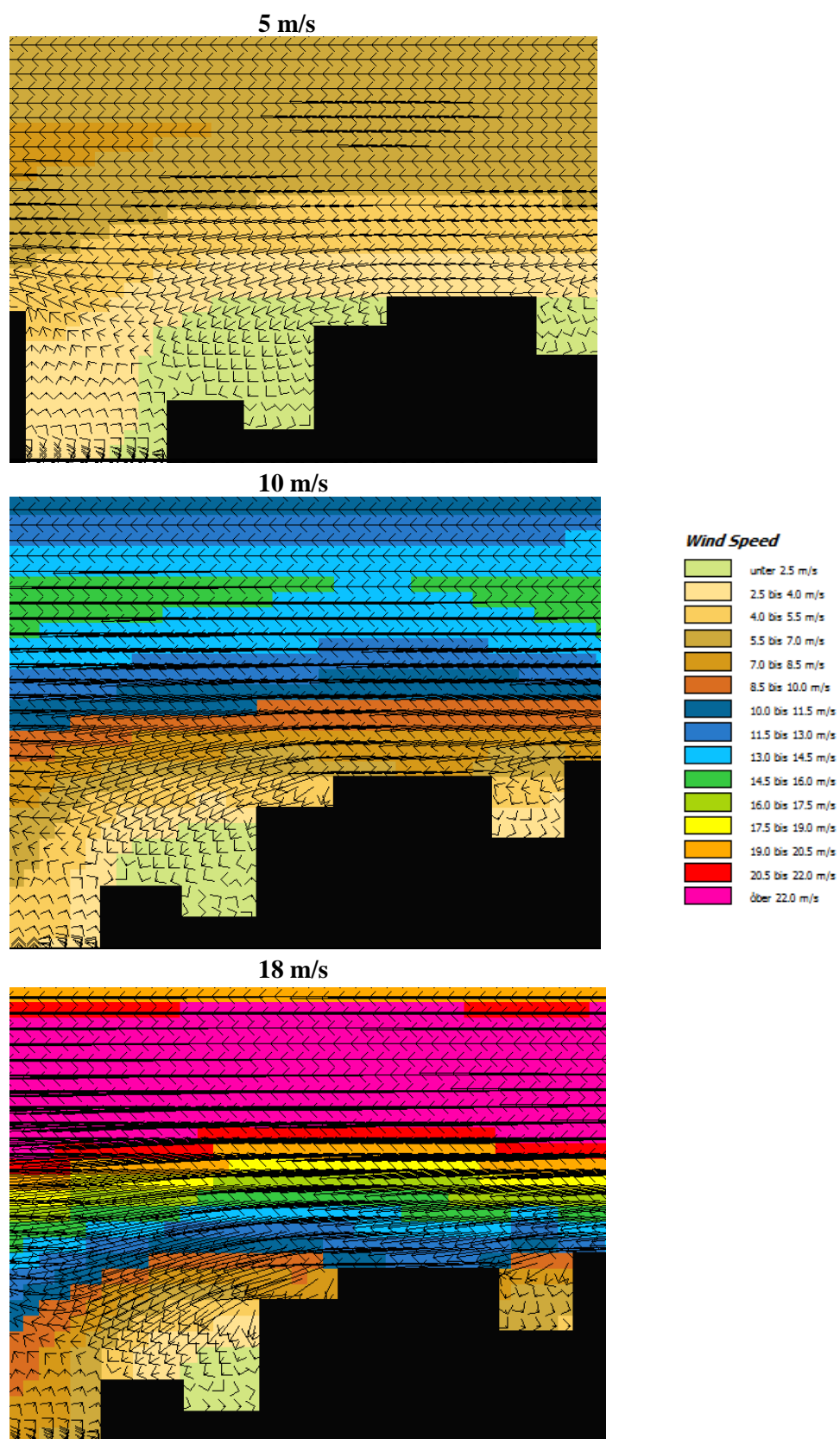
**Εικ. 6.36** Λεπτομέρεια εικόνας 6.34(γ). Διεύθυνση και τύρβη στην εξεταζόμενη θέση [Πηγή: Envi-met]

**ΘΕΣΗ 1**



*Εικ. 6.37 Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 1 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s [Πηγή: Envi-met]*

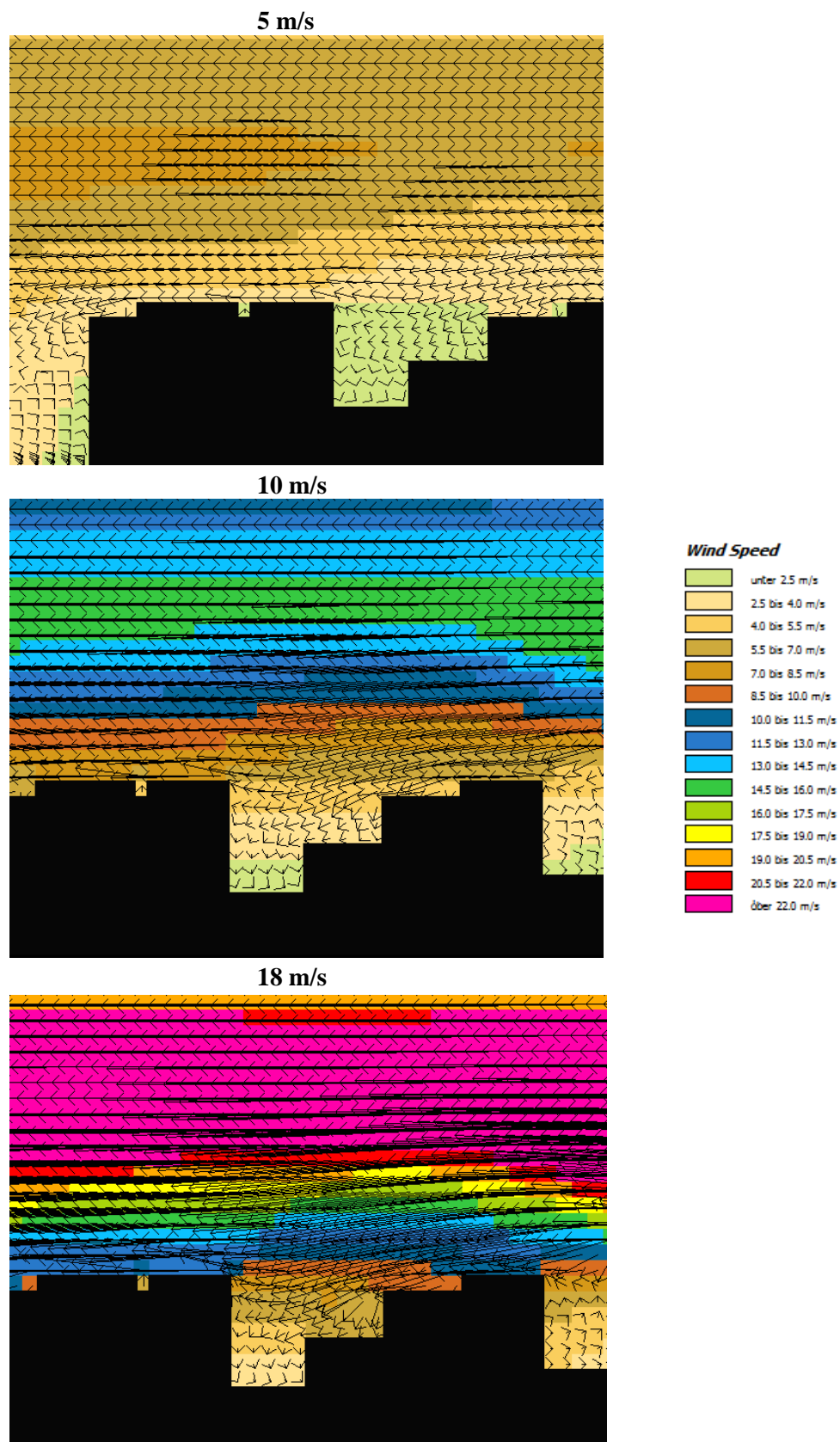
**ΘΕΣΗ 2**



*Εικ. 6.38* Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 2 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s [Πηγή: Envi-met]



## ΘΕΣΗ 3

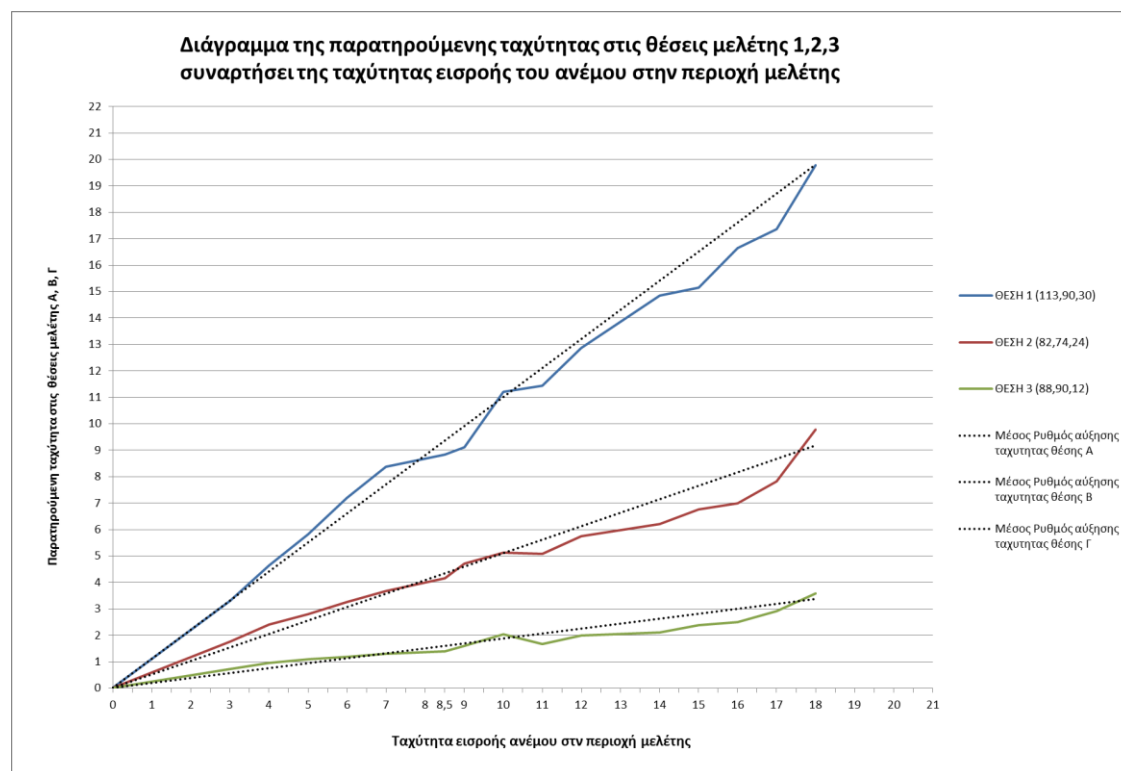


*Εικ. 6.39* Χαρακτηριστικές τομές κατά τον άξονα y στη θέση 3 για ενδεικτικές ταχύτητες 5 m/s, 10 m/s, 18 m/s [Πηγή: Envi-met]

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ταχύτητες σε κάθε θέση ενδιαφέροντος, που προέκυψαν για κάθε αρχική ταχύτητα προσομοίωσης

m/s	ΘΕΣΗ 1 (113,90,30)	ΘΕΣΗ 2 (82,74,24)	ΘΕΣΗ 3 (88,90,12)
0	0	0	0
3	3,31	1,76	0,72
4	4,65	2,41	0,96
5	5,81	2,8	1,1
6	7,2	3,25	1,18
7	8,38	3,67	1,31
8,5	8,84	4,15	1,39
9	9,12	4,72	1,59
10	11,22	5,13	2,04
11	11,43	5,08	1,66
12	12,87	5,74	1,99
14	14,86	6,21	2,11
15	15,15	6,76	2,39
16	16,64	7	2,51
17	17,36	7,82	2,91
18	19,78	9,77	3,58

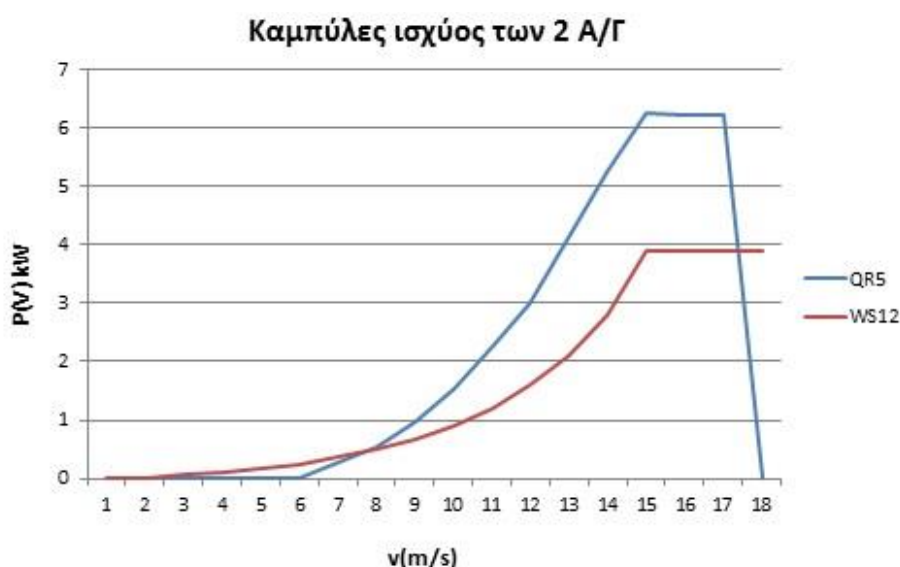
Από τον παραπάνω πίνακα δημιουργήθηκε το διάγραμμα που ακολουθεί στο οποίο παρουσιάζεται γραφικά η μεταβολή της ταχύτητας στις θέσεις μελέτης 1, 2 και 3 σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα προσομοίωσης.



**Εικ. 6.40** Μεταβολή της ταχύτητας στις θέσεις μελέτης 1, 2 και 3 σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα προσομοίωσης [Πηγή Envi-met]

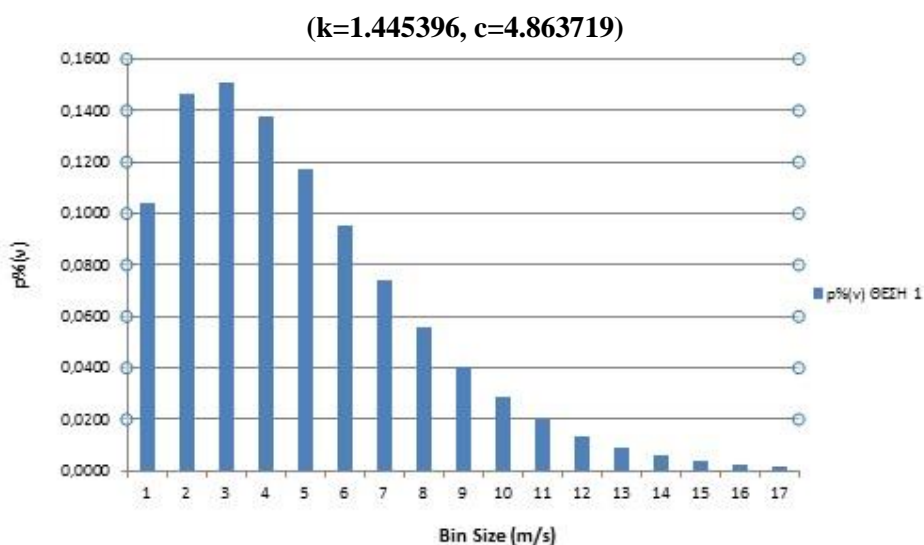
## 6.7 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΘΕΣΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Με το πέρας του συνόλου των προσομοιώσεων και χρησιμοποιώντας απλοποιητικά την μέση αύξηση της ταχύτητας για κάθε θέση μελέτης, σε σχέση με την ταχύτητα προσομοίωσης, είμαστε σε θέση να αναγάγουμε τα αποτελέσματα σε χρονικό διάστημα ενός έτους και στο σύνολο πιθανών διευθύνσεων του ανέμου για τον υπολογισμό της Ετήσιας Ενεργειακής Παραγωγής για τις τρεις θέσεις εγκατάστασης που επιλέχθηκαν. Με χρήση του λογισμικού WindRose Pro μελετήθηκαν εκ νέου οι ταχύτητες που προέκυψαν και δημιουργήθηκαν οι καμπύλες Weibull για καθεμία από αυτές τις θέσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται μέσω γραφημάτων τα αποτελέσματα.



*Εικ. 6.41 Καμπύλες ισχύος (power curve) ανεμογεννητριών Qr5 και Ws12 [Πηγή: WindRose]*

### ΘΕΣΗ 1



*Εικ. 6.42 Κατανομή Weibull θέσης 1 [Πηγή: WindRose]*

Για τον υπολογισμό της Ετήσιας Παραγωγής Ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σχέση που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3.10

$$E = \frac{8760}{100} \cdot \sum_{V_{\text{cut-in}}^{V_{\text{cut-out}}} \text{Pel}(v_w) \cdot H(v_w)$$

Όπου:

$E$  : η ετήσια αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh)

$h=8760$  : οι ώρες ενός έτους

$\text{Pel}$  : η ηλεκτρική ισχύς εξόδου της Α/Γ (kW)

$H$  : η διακριτή και συνεχής κατανομή του ανέμου σε ποσοστά % (από τις καμπύλες Weibull για κάθε θέση)



**Εικ. 6.43** Ετήσια Παράγωγή Ενέργειας ανεμογεννητριών Qr5και Ws12 στη θέση 1 [Πηγή: WindRose]

Από τα παραπάνω γραφήματα μπορούμε να κατασκευάσουμε τον ακόλουθο πίνακα όπου παρουσιάζονται τα ποσά ενέργειας που παράγονται σε κάθε διάστημα ταχύτητας ταχύτητας όπως επίσης και το σύνολο αυτών.

Ταχύτητα (m/s)	Ενέργεια (kWh) Qr5	Ενέργεια (kWh) Ws12
0	0	0
1	0	0
2	0	79,26048
3	0	120,8004
4	0	164,5478
5	0	208,2033
6	162,5104	233,0826
7	267,5917	243,2652
8	339,0659	237,8787

9	391,1822	227,138
10	394,2	210,24
11	355,6928	190,3373
12	326,2284	166,2814
13	271,479	144,7888
14	207,9468	129,3449
15	130,5338	81,58363
16	81,00968	50,63105
17	0	30,92867
<b>Σύνολο</b>	<b>2.947,441</b>	<b>2.487,384</b>

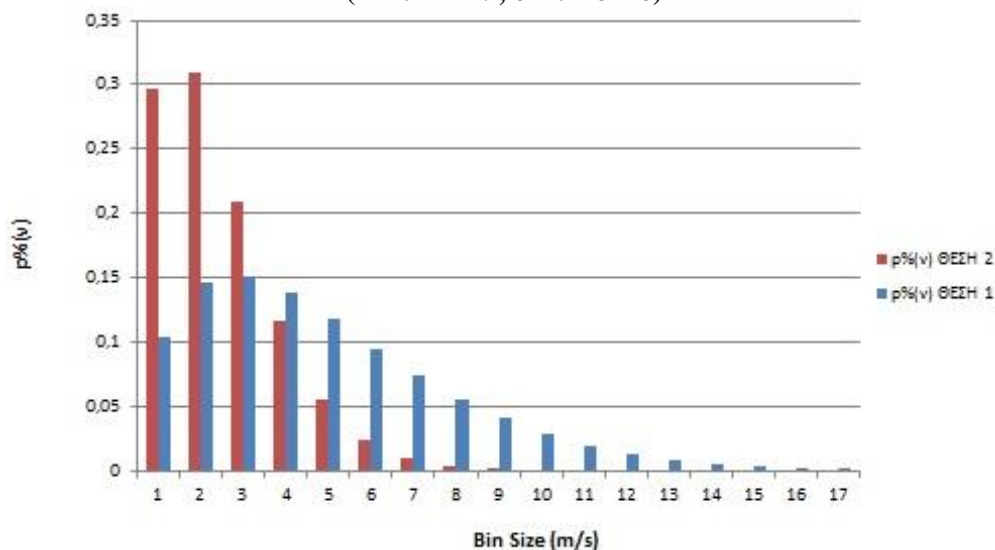
Μέσω των παραπάνω γραφημάτων και του πίνακα η Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας για τη θέση 1 και για το μοντέλο ανεμογεννήτριας Qr5 ανέρχεται σε περίπου 2.950 kWh ενώ για την ανεμογεννήτρια Ws12 σε 2.490 kWh. Λαμβάνοντας υπόψη το αρχικό κεφάλαιο, την Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας και την τιμή πώλησης kWh στη Δ.Ε.Η μπορούμε να υπολογίσουμε πλέον τη διάρκεια αποπληρωμής.

Στο αρχικό κεφάλαιο περιλαμβάνονται όλα τα επιμέρους κόστη, όπως απόκτηση ανεμογεννήτριας με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό και εργασίες εγκατάστασης, το οποίο ανέρχεται σε ένα ποσό της τάξεως των 30.000 € [6] για την ανεμογεννήτρια Qr5 και 25.000 € για την Ws12 [7]. Η τιμή πώλησης kWh στη Δ.Ε.Η κυμαίνεται στο 0,25 € / kWh στο διασυνδεδεμένο σύστημα [4].

Ισχύς	5 kW	3,9 kW
Αρχικό κόστος	30.000 €	25.000 €
Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας	2.950 kWh	2.490 kWh
Ετήσιο Εισόδημα	740,00 €	630,0 €
Τιμή πώλησης kWh	0,25 € / kWh	0,25 € / kWh
Απόσβεση επένδυσης	40 χρόνια	40 χρόνια

## ΘΕΣΗ 2

( $k=1.444779$ ,  $c=2.228176$ )



Εικ. 6.44 Κατανομές Weibull για τις θέσεις 2 και 1 [Πηγή: WindRose]

Παρατηρούμε τη μεγαλύτερη πιθανότητα που έχουν για εμφάνιση ταχύτητες μικρής έντασης, έως 3 m/s, στη θέση 2 σε σχέση με τη θέση 1.

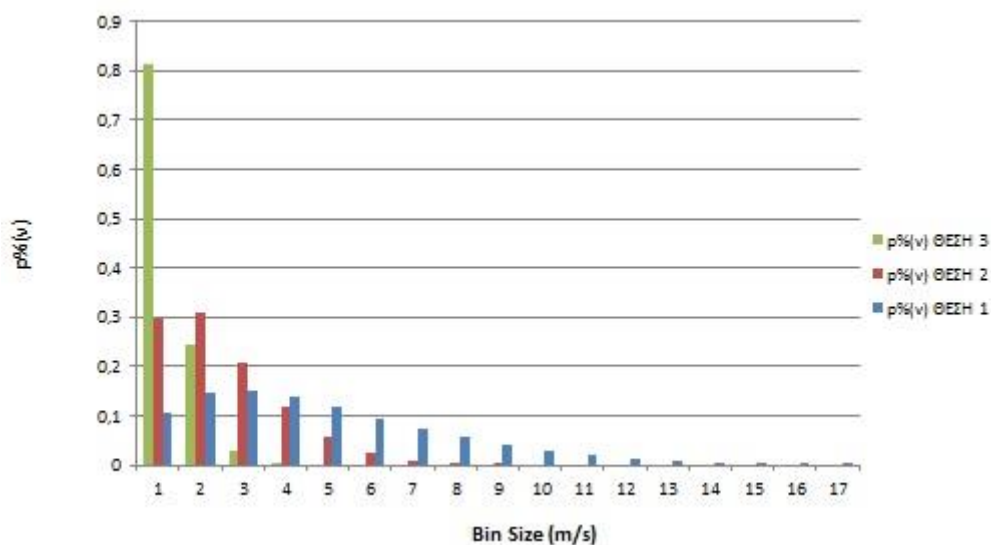


**Εικ. 6.45** Ετήσια Παράγωγή Ενέργειας ανεμογεννητριών Qr5και Ws12 στη θέση 2 [Πηγή: WindRose]

Ομοίως με τη θέση 1 προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας όπου παρουσιάζονται τα ποσά ενέργειας που παράγονται σε κάθε διάστημα ταχύτητας όπως επίσης και το σύνολο αυτών.

Ταχύτητα (m/s)	Ενέργεια (kWh) Qr5	Ενέργεια (kWh) Ws12
0	0	0
1	0	0
2	0	110,1132
3	0	101,7912
4	0	78,5737
5	0	53,0418
6	20,94979	30,0475
7	16,63655	15,12414
8	9,72106	6,82001
<b>Σύνολο</b>	<b>47,374</b>	<b>395,5115</b>

Παρατηρούμε πως η Ετήσια Παράγωγή Ενέργειας είναι παρά πολύ μικρή για τη θέση 2 οπότε και δεν κρίνεται σκόπιμο να μελετήθηκε το μέγεθος της χρονικής διάρκειας απόσβεσης.

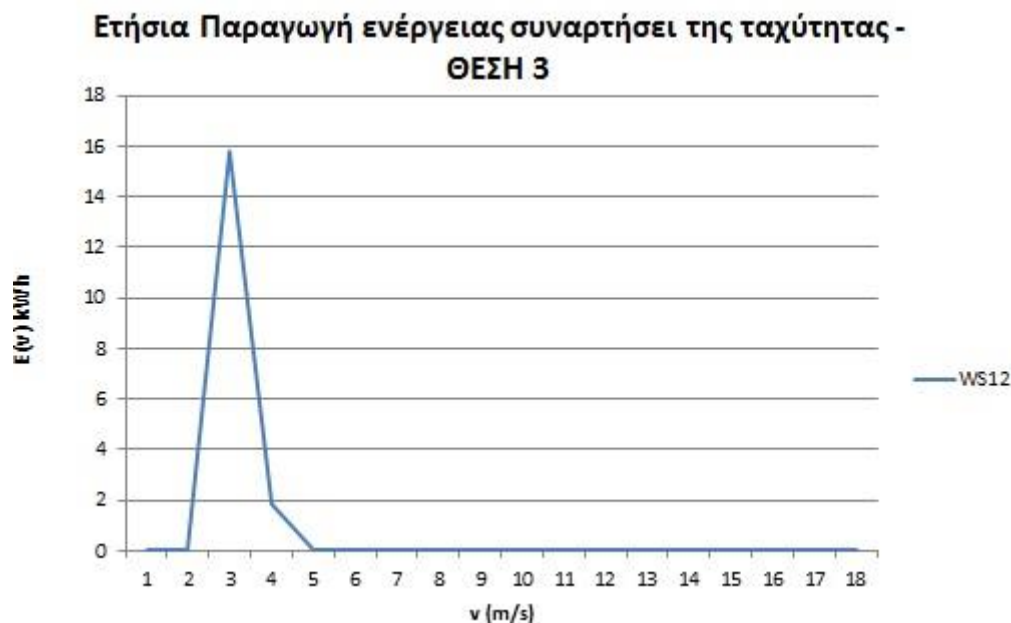
**ΘΕΣΗ 3****( $k=1.445001$ ,  $c=0.8895738$ )****Εικ. 6.46** Κατανομές Weibull για τις θέσεις 3,2 και 1 [Πηγή: WindRose]

Βλέπουμε πως οι ταχύτητες που εμφανίζονται είναι στο σύνολο τους παρά πολύ μικρές και οριακά ξεπερνούν τα 2 m/s.

Ο υπολογισμός της Ετήσιας Ενεργειακής Παραγωγής έγινε μόνο για την WS12 καθώς στις ταχύτες αυτές η QR5 δεν μπορεί να ξεκινήσει καν τη λειτουργία της.

Παρατίθεται η καμπύλη ισχύος της συγκεκριμένης Α/Γ

**Εικ. 6.47** Καμπύλη ισχύος (power curve) ανεμογεννήτριας Ws12 [Πηγή: WindRose]



**Εικ. 6.48** Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας ανεμογεννήτριας Ws12 στη θέση 3  
[Πηγή: WindRose]

Ταχύτητα (m/s)	Ενέργεια (kWh)
0	0
1	0
2	15,77851
3	1,87464
Σύνολο	17,65

Παρατηρούμε πως η Ετήσια Παράγωγη Ενέργειας είναι επίσης παρά πολύ μικρή για τη θέση 3 όπως και στη θέση 2 οπότε και δεν κρίνεται σκόπιμο να μελετηθεί το μέγεθος της χρονικής διάρκειας απόσβεσης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- [1] «Urban Wind Turbines Guidelines for Small Wind Turbines in the Built Environment», J. Cace( RenCom) , E.I ter Horst( HoriSun) ,K. Syngellakis (IT Power), M. Niel( Axenne), P. Clement (Axenne),R. Heppener( ARC), E. Peirano( Ademe), 2007
- [2] Επίσημη ιστοσελίδα μετεωρολογικού σταθμού N. Σνύρνης  
<http://penteli.meteo.gr/stations/neasmynri/>
- [3] «Small wind turbines for the built environment», G. J. W. van Bussel, S. M. Mertens, EACWE4 – The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, 2005
- [4] Παράρτημα Α
- [5] Envi-met 3.1 Online Manual: <http://www.envi-met.com/htmlhelp/helpindex.htm>
- [6] <http://www.quietrevolution.com/>
- [7] <http://www.windside.com/>



## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση σκοπιμότητας εφαρμογής ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα σε αστικό περιβάλλον με προσομοίωση σε πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, οι δυσκολίες καθώς και οι προτάσεις στους τομείς που κριθήκαν σημαντικότερης σημασίας.

Τα απαραίτητα ανεμολογικά δεδομένα που χρειάστηκαν για την εργασία ελήφθησαν από μετεωρολογικό σταθμό της περιοχής, αλλά όχι στην ακριβή εξεταζόμενη θέση. Για την ορθότερη εξαγωγή αποτελεσμάτων σε μελλοντικές εργασίες παρεμφερούς αντικειμένου προτείνεται:

- Η συλλογή ανεμολογικών μετρήσεων για μια περίοδο τουλάχιστον ενός έτους στη συγκεκριμένη θέση τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας
- Η κατασκευή σε κλίμακα κατάλληλου μεγέθους της θέσης εγκατάστασης και του μοντέλου ανεμογεννήτριας και έκθεση αυτών σε αεροδυναμική σήραγγα σε συνθήκες ανέμου αντίστοιχες των πραγματικών
- Προσομοιώσεις σε λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής

### 7.1 Συμπεράσματα για το λογισμικό Envi-met

Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι όπως έχουμε αναφέρει το Envi-met. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που κρίνεται αξιόπιστο και ακριβές σε προσομοιώσεις για την μελέτη και πρόβλεψη βιοκλιματικών συνθηκών αστικών περιοχών, δεν ισχύει ωστόσο το ίδιο για προβλέψεις πεδίων ροών ανέμων εντός αστικού ιστού χωρίς αυτό να σημαίνει έλλειψη αξιοπιστίας αποτελεσμάτων, αλλά μικρότερο βαθμό. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα των αριθμητικών υπολογισμών που απαιτούνται για την προσομοίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των ανέμων εντός του αστικού ιστού (ένταση, πεδία ροής, τύρβη) και τα όποια το Envi-met τα προσεγγίζει σε μικρότερο βαθμό από αντίστοιχα προγράμματα όπως το UrbanWind όπως αυτό προέκυψε μετά από συγκρίσεις που πραγματοποιήσαμε της μεθοδολογίας υπολογισμού των εκάστοτε μεγεθών. Στην πολυπλοκότητα των υπολογισμών επίσης οφείλεται και η αριθμητική αστάθεια που παρουσιάζει, η οποία επιφέρει παράδοξα αποτελέσματα και τη διακοπή της λειτουργίας.

Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 6.3 οι υψηλές απαιτήσεις από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή (C.P.U) και την κεντρική μνήμη (R.A.M) απαιτούν από συμβατικούς υπολογιστές αρκετές δεκάδες ώρες για την ολοκλήρωση μιας προσομοίωσης. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε Η/Υ που διέθετε 8G RAM χωρίς ωστόσο να μειωθούν οι χρόνοι υπολογισμού αισθητά ή να αποφευχθούν οι αριθμητικές αστάθειες που

διέκοπταν τη λειτουργία. Εν τέλει για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων απαιτήθηκε η λειτουργία τριών συμβατικών Η/Υ για 720 συνολικά ώρες για την επίτευξη 120 ωρών προσομοιώσεων, χωρίς να συνυπολογίζονται και οι διακοπές λειτουργίας λόγω αριθμητικών ασταθειών. Είναι προφανές από τα παραπάνω οι τεράστιες απαιτήσεις σε χρόνο υπολογισμού. Ωστόσο όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5 αποτελεί ένα φιλικό και εύκολο στη χρήση πρόγραμμα χωρίς ιδιαίτερες δυσκολίες και προαπαιτούμενες γνώσεις.

Γενικώς διαθέτει πληθώρα επιλογών για απεικόνιση μεγεθών όπως η ένταση ή διεύθυνση ταχύτητας μέσω πολλαπλών χρωματικών απεικονίσεων και συμβόλων σε οποιαδήποτε μήκος, πλάτος και ύψος της περιοχής ωστόσο μειονέκτημα αποτελεί η μη ευκρινής και ταυτόχρονα κατατοπιστική απεικόνιση μεγεθών όπως της τύρβης σε περίπλοκα σημεία εμφάνισης της. Επιπροσθέτως πρέπει να αναφερθεί και η μη δυνατότητα του προγράμματος της πίστης αναπαράστασης του φυσικού ανάγλυφου (κατά μήκος κλίσεις, υψομετρικές διαφορές εδαφικών σημείων λ.χ. λόφων ) του εδάφους. Σημαντικό στοιχείο αποτελεί επίσης η μη δυνατότητα πίστης αναπαράστασης σχεδιαστικών στοιχείων όπως για παράδειγμα ένα δέντρο μέσης πυκνότητας ύψους 3 μέτρων το πρόγραμμα το προσομοιάζει με ένα “κουτί” ύψους τριών μέτρων με αποτέλεσμα να αλλάζει ο τρόπος επιρροής του στοιχείου στα υπό μελέτη μεγέθη.

Συμπερασματικά:

- Το λογισμικό Envi-met μέσα από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων κρίνεται εν τέλει ως ένα χρήσιμο εργαλείο ρευστοδυναμικής ανάλυσης το οποίο όμως διαθέτει περιθώρια βελτίωσης. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί ότι είναι χρηστικά αρκετά πιο απλό σε σύγκριση με αλλά μοντέλα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ενώ μετά από κάθε προσομοίωση ο χρήστης διαθέτει μια πληθώρα από δεδομένα για την περιοχή μελέτης τα όποια εύκολα μπορούν να οπτικοποιηθούν για την εξαγωγή γρήγορων συμπερασμάτων.
- Για την ελαχιστοποίηση των χρόνων υπολογισμού, των σφαλμάτων και των ανακριβειών του λογισμικού προτείνεται μικρό μέγεθος περιοχής μελέτης, απλή γεωμετρία, αραιή οικοδομική σύνθεση και πυκνότητα και να αποφεύγονται γενικώς οι πολύπλοκες περιοχές μελέτης.

Πρέπει να αναφερθεί πως αρχική επιλογή ως πρόγραμμα υπολογιστικής ρευστοδυναμικής επιλέχθηκε το UrbanWind, η απόκτηση του οποίου δεν κατέστη εφικτή καθώς ύστερα από επικοινωνία με την εταιρία για την παραχώρηση δοκιμαστικής έκδοσης διάρκειας ενός μηνός το αντίτιμο ανερχόταν σε πολύ υψηλά επίπεδα (της τάξεως των δυο χιλιάδων ευρώ).

## 7.2 Συμπεράσματα του αντικειμένου της μελέτης

Βασικό αποτέλεσμα της εργασίας είναι η διαπίστωση πως σε αστικές περιοχές που παρουσιάζουν το αιολικό δυναμικό που παρουσιάζει η περιοχή μελέτης της Ν. Σμύρνης η εγκατάσταση μικρών αστικών Α/Γ θεωρείται ασύμφορη. Η υποψήφια για μια τέτοια μελέτη περιοχή θα πρέπει να παρουσιάζει μέσες ταχύτητες ανέμου τουλάχιστων 4 m/s. Ειδικά για την περιοχή της Αθήνας τις τιμές αυτές προσεγγίζουν παραλιακές περιοχές (Ελληνικό, Γλυφάδα κ.α.), στις οποίες παρόλα αυτά είναι αναγκαία η πραγματοποίηση μετρήσεων στο ακριβές σημείο ενδιαφέροντος πριν ληφθεί οποιαδήποτε απόφαση.

Σχετικά με τα αποτελέσματα της έρευνας που πραγματοποιήθηκε για τη διερεύνηση της δυνατότητας εγκατάστασης Α/Γ σε μια περιοχή με τα ανεμολογικά δεδομένα που υποθέσαμε, μπορούμε πλέον να αξιολογήσουμε την ορθότητα της επιλογής του μοντέλου για την κάθε θέση.

- Στη θέση 1 παρατηρούνταν ικανοποιητικές ταχύτητες ανέμου και ένα σχετικά καλό παραγόμενο ποσό ενέργειας. Η μεγαλύτερη παράγωγη ενέργειας παρατηρείται από το μοντέλο Qr2 (τύπου Darrieus) κάτι που επιβεβαιώνει την υψηλότερη απόδοση τέτοιου είδους ανεμογεννητριών σε υψηλές ταχύτητες σε σχέση με τα μοντέλα Savonious ενώ καταδεικνύει και την εκθετική αύξηση της ενεργειακής απόδοσης με την αύξηση της ταχύτητας. Το είδος Darrieus που δύναται να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τις ανάγκες που πρόκειται να ικανοποιήσει και τη σειρά ιεραρχίας των κριτηρίων. Για παράδειγμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια ακόμη πιο μεγάλη ανεμογεννήτρια από την Qr5 ή μια σειρά από μικρότερες που μπορεί να έχουν ίδια και μεγαλύτερη παράγωγη ενέργειας αλλά και μεγαλύτερο κόστος επένδυσης. Όλα αυτά αποτελούν ζητήματα ενδελεχούς έρευνας από το μελετητή μέσα από συγκρίσεις ενεργειακής απόδοσης και κόστους επένδυσης προκειμένου να επιλεγεί η προσφορότερη λύση.
- Στη θέση 2 εμφανίζονται μέτριας έντασης ταχύτητες οι οποίες κρίνονται μη αξιοποιήσιμες από εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών. Αξιόλογο συμπέρασμα από τη μελέτη της θέσης 2 αποτελεί μεγαλύτερη απόδοση της ανεμογεννήτρια Ws12 (Savonious) που επιβεβαιώνει την καλύτερη απόδοση τέτοιων μοντέλων ανεμογεννητριών σε χαμηλές ταχύτητες.
- Στη θέση 3 τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα λόγω του χαμηλού υψόμετρου της θέσης εγκατάστασης αλλά και λόγω της μεγάλης υψομετρικής διαφοράς των γειτονικών κτιρίων. Οι ταχύτητες που παρατηρούνται είναι πολύ μικρές και στις περισσότερες περιπτώσεις δεν προσεγγίζουν την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας. Η χρήση ανεμογεννήτριας στη συγκεκριμένη θέση κρίνεται μη χρηστική.

Επιπλέον συμπεραίνουμε πως η επιλογή ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα σε αστικό περιβάλλον αποτελεί την περισσότερο ενδεδειγμένη λύση πρώτιστος εξαιτίας της καλύτερης αντιμετώπισης των φαινομένων τύρβης που παρουσιάζονται εντός του αστικού ιστού, όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, στις οροφές κτιρίων αλλά καθώς επίσης και για τα πολύ μικρότερα επίπεδα όχλησης. Η περίπτωση αξιοποίησης ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα δεν απορρίπτεται ολοσχερώς. Σε περιπτώσεις που παρακάμπτονται οι παραπάνω απαιτήσεις στον αστικό ιστό, με τέτοιες περιπτώσεις να αποτελούν μεγάλα εμπορικά συγκροτήματα ή συγκροτήματα γραφείων, όπου λόγω του μεγάλου υψόμετρου υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης στρωτής ροής ανέμου ενώ οι οχλήσεις δε αποτελούν εμπόδιο μπορούν να εφαρμοστούν ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα εκμεταλλεύοντας έτσι την μεγαλύτερη αεροδυναμική απόδοση τους σε σχέση με τις κατακόρυφου άξονα και καθιστώντας ιδανική επιλογή.

Ένα επίσης βασικό συμπέρασμα που κατέδειξε, στο μετρό του δυνατού, η εν λόγω εργασία είναι η δυναμική αξιοποίησης των αστικών ανεμογεννητριών. Βελτιώνοντας τις προϋποθέσεις των περιοχών εγκαταστάσεις των ανεμογεννητριών όπως επιλογή περιοχών με υψηλό αιολικό δυναμικό, θέσεις σε μεγάλο υψόμετρο και απαλλαγμένες περιμετρικά από εμπόδια που διαταράσσουν τη ροή του ανέμου καθώς και βελτίωση της υπάρχουσας τεχνολογίας των ανεμογεννητριών καθίσταται εφικτή η κάλυψη ποσοστού των ενεργειακών αναγκών. Θέσεις όπου κρίνεται προσφορότερη η εγκατάσταση ανεμογεννητριών αποτελούν τα μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα, όπως εμπορικά κέντρα, εγκαταστάσεις εταιριών και ίσως υπό προϋποθέσεις νοσοκομεία, παραθαλάσσιες περιοχές, δημόσια κτίρια όπως δημαρχεία, σχολεία κ.α. όπου θεωρητικά η διάρκεια του χρόνου απόσβεσης του αρχικού κεφαλαίου δεν αποτελεί βασικό κριτήριο όπως σε μια ιδιωτική επένδυση, λιμάνια, αεροδρόμια, σταθμοί τρένων και λεωφορείων, αθλητικές εγκαταστάσεις, βιομηχανίες. Συνοπτικά στις θέσεις εγκατάστασης εντός αστικού ιστού πρέπει :

- να υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό στην ευρύτερη περιοχή
- να παραμένει υψηλό το αιολικό δυναμικό και μετά την εισροή του εντός αστικού ιστού
- να εξασφαλίζεται μεγάλο ύψος εγκατάστασης

- να εξασφαλίζεται η απαλλαγή από περιμετρικά εμπόδια που διαταράζουν τη ροή του αέρα
- να μειώνονται στο ελάχιστο οι ηχητικές και δονητικές οχλήσεις

Εν τέλει με τον υπολογισμό της διάρκειας απόσβεσης που υπολογίστηκε στα 40 χρόνια για τη θέση 1 και για τις δυο ανεμογεννήτριες, συμπεραίνουμε πως εξακολουθεί να αποτελεί μία μη προσοδοφόρα επένδυση για έναν ιδιώτη. Ωστόσο αναλογιζόμενοι πως μια μέση κατοικία καταναλώνει περί τις 8.000 kWh δεν πρέπει να μας αφήσει αδιάφορους η παράγωγη ενός ποσού ενέργειας της τάξεως των 3.000 kWh δηλαδή κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων σε ένα ποσοστό 37%. Το γεγονός αυτό πρέπει να αποτελέσει το εφαλτήριο για την προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών που θα επιφέρουν αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των ανεμογεννητριών αλλά και μείωση του κόστους παραγωγής τους που θα τις καταστήσει περισσότερο φιλικές στο κοινωνικό σύνολο.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄ - ΝΟΜΙΚΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

---

### A.1 Τιμολόγηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας

Η τιμολόγηση της ενέργειας που παράγεται από μικρές α/γ διαμορφώνεται ως ακολούθως (άρθρο 13, παράγραφος 1 του ν.3468/2006, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 5, παράγραφος 2 του ν.3851/2010):

- για αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με εγκαταστάσεις ισχύος μικρότερης ή ίσης των 50kW, η τιμή ισούται με 250 €/MWh (τιμή ίδια για Διασυνδεδεμένο Δίκτυο και Σύστημα και για μη Διασυνδεδεμένα Νησιά),
- για αιολική ενέργεια που αξιοποιείται με χερσαίες εγκαταστάσεις ισχύος μεγαλύτερης των 50kW, η τιμή ισούται με 87,85 €/MWh (Διασυνδεδεμένο Δίκτυο και Σύστημα) και 99,45€/MWh (μη Διασυνδεδεμένα Νησιά).

Ο τρόπος αναπροσαρμογής των τιμών αυτών και λοιπές λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν στη σχετική διάταξη του νόμου, η οποία γενικά προβλέπει ως δείκτη αναπροσαρμογής τη μεσοσταθμική αναπροσαρμογή των τιμολογίων λιανικής της ΔΕΗ. Ο δείκτης αυτός εφαρμόζεται για όσο χρόνο τα τιμολόγια της ΔΕΗ καθορίζονται με υπουργική απόφαση. Όταν αυτό παύσει και η ΔΕΗ θα καθορίζει τα τιμολόγια της ελεύθερα, για την αναπροσαρμογή της τιμής πώλησης της ενέργειας από μικρές α/γ (όπως και για τις λοιπές Α.Π.Ε. πλην φωτοβολταϊκών) θα εφαρμόζεται το 80% του πληθωρισμού.

### A.2 Βασικές άδειες ενεργειακής νομοθεσίας

Οι α/γ ισχύος έως 100kW (και γενικά αιολικές εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος έως 100kW) απαλλάσσονται από την υποχρέωση έκδοσης:

- άδειας παραγωγής (άρθρο 4, παράγραφος 4δ του ν.3468/2006, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 2, παράγραφος 12 του ν.3851/2010)
- αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας (άρθρο 8, παράγραφος 8 του ν.3468/2006, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 8, παράγραφος 13 του ν.3851/2010).

Αυτό σημαίνει ότι δεν απαιτείται η πλήρωση των κριτηρίων αξιολόγησης για τη χορήγηση άδειας παραγωγής (π.χ. δεν απαιτείται η προσκόμιση ανεμολογικών μετρήσεων από διαπιστευμένο κατά IEC-17025 φορέα). Σημειώνεται ότι στις ανωτέρω περιπτώσεις δεν εκδίδεται καμία διοικητική πράξη, όπως για παράδειγμα ήταν κατά το παρελθόν η Απόφαση Εξαίρεσης από τη Ρ.Α.Ε., δεδομένου ότι αυτό ρητά καθορίζεται στη νέα διατύπωση που εισήγαγε ο ν.3851/2010.

### A.3 Περιβαλλοντική αδειοδότηση

1. Με βάση το άρθρο 8, παράγραφος 13 του ν.3468/2006, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 3, παράγραφος 2 του ν.3851/2010, οι μικρές α/γ απαλλάσσονται από την υποχρέωση περιβαλλοντικής αδειοδότησης (έκδοσης Απόφασης Έγκρισης

Περιβαλλοντικών Όρων Ε.Π.Ο. ή λήψης Πρότυπων Περιβαλλοντικών Δεσμεύσεων Π.Π.Δ.) όταν εγκαθίστανται σε γήπεδα, εφόσον η συνολική τους ισχύς δεν υπερβαίνει τα 20kW. Στην περίπτωση αυτή, απαιτείται η χορήγηση βεβαίωσης απαλλαγής από Ε.Π.Ο. εντός αποκλειστικής προθεσμίας 20 ημερών από την αρμόδια περιβαλλοντική αρχή της οικείας αιρετής Περιφέρειας (Εγκύκλιος 17 ΥΠΕΚΑ, 18.11.2011). Επιπλέον, ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται σε κτίρια ή εντός οργανωμένων βιομηχανικών υποδοχέων, ανεξαρτήτως ισχύος, απαλλάσσονται τόσο από την υποχρέωση έκδοσης Απόφασης Ε.Π.Ο. όσο και βεβαίωσης απαλλαγής από Ε.Π.Ο.

2. Ωστόσο, σε διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης υπόκεινται οι μικρές α/γ με εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη ή ίση με το ως άνω όριο των 20 kW εφόσον εγκαθίστανται:

- σε γήπεδα που βρίσκονται σε οριοθετημένες περιοχές του δικτύου Natura 2000 ή σε παράκτιες ζώνες που απέχουν λιγότερο από 100 μέτρα από την οριογραμμή του αιγιαλού (εκτός βραχονησίδων),
- σε απόσταση μικρότερη των 150 μέτρων από γήπεδο εγκατάστασης (ως γήπεδο εγκατάστασης νοούνται οι κορυφές του πολυγώνου του γηπέδου όπου χωροθετείται άλλος αιολικός σταθμός για τον οποίο έχει εκδοθεί άδεια παραγωγής ή απόφαση Ε.Π.Ο. ή προσφορά σύνδεσης και εφόσον η ισχύς του συνόλου των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών υπερβαίνει (αθροιστικά) το προαναφερθέν καθοριζόμενο όριο των 20kW, με βάση δημοσιοποιημένα στοιχεία ή ίδια προφανή γνώση του επενδυτή.

3. Η διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης και οι απαιτούμενες μελέτες καθορίζονται από τις Υ.Α. 104247/2006 και 104248/2006 (ΦΕΚ Β' 663) [1]. Ωστόσο, ο νόμος 3851/2010 και ο νόμος 4014/2011 έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη διαδικασία περιβαλλοντικής αδειοδότησης (ενδεικτικά έχει καταργηθεί το στάδιο της προκαταρκτικής περιβαλλοντικής επίπτωσης και αξιολόγησης) αλλά οι ανωτέρω υπουργικές αποφάσεις δεν έχουν ακόμα τροποποιηθεί. Σύμφωνα με την απόφαση του ΥΠΕΚΑ 1958/13.1.2012 (ΑΔΑ: ΒΟΝΝ0-ΜΒ0) για την κατάταξη των έργων σε κατηγορίες περιβαλλοντικής αδειοδότησης, οι μικρές α/γ κατατάσσονται στην κατηγορία Β (όπως ισχύει πλέον μετά την ισχύ του νέου περιβαλλοντικού νόμου 4014/2011). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι μικρές α/γ δεν υπόκεινται σε διαδικασία Ε.Π.Ο., αλλά θα λαμβάνουν τις λεγόμενες Πρότυπες Περιβαλλοντικές Δεσμεύσεις (Π.Π.Δ.) με απλή αίτησή τους στη Διεύθυνση Περιβάλλοντος της οικείας Περιφέρειας. Για την πλήρη εφαρμογή αυτής της διαδικασίας θα πρέπει να εκδοθεί η υπουργική απόφαση που θα καθορίζει το περιεχόμενο των Π.Π.Δ. Μέχρι τότε, οι μικρές α/γ αδειοδοτούνται περιβαλλοντικά σύμφωνα με την παλιά κατηγορία Β4 και λαμβάνουν Ε.Π.Ο. από την αιρετή Περιφέρεια κατ'εφαρμογή της παρ. 3 του αρ. 30 του ν.4014/2011.

4. Μετά την έκδοση της απόφασης για το περιεχόμενο των Π.Π.Δ., οι ενδιαφερόμενοι θα πρέπει να απευθύνονται στις Δ/νσεις Περιβάλλοντος των οικείων αιρετών Περιφερειών ώστε να λάβουν Π.Π.Δ. Μέχρι τότε όμως, οι ενδιαφερόμενοι θα πρέπει να απευθύνονται κατά περίπτωση ως ακολούθως:

- Προκειμένου για μικρές α/γ που απαλλάσσονται από Ε.Π.Ο. (δηλ. για μικρές α/γ σε κτίρια ή εντός οργανωμένων βιομηχανικών υποδοχέων ή ισχύος μικρότερης των 20kW πλην της περίπτωσης 4.2) στις Δ/νσεις Περιβάλλοντος των οικείων αιρετών Περιφερειών, προκειμένου να λάβουν βεβαίωση απαλλαγής από Ε.Π.Ο.. Ειδικά σε αυτήν την αίτηση θα πρέπει να ληφθεί μέριμνα από τον αιτούντα για παραλαβή του αριθμού πρωτοκόλλου της υπηρεσίας –αν είναι δυνατό πάνω σε αντίγραφο της αίτησης– ώστε να τεκμαίρεται με ασφάλεια η παρέλευση του 20ημέρου που

προβλέπεται στο άρθρο 8 του ν.3468/2006, όπως ισχύει, και μετά την παρέλευση του οποίου η εν λόγω βεβαίωση θεωρείται χορηγηθείσα. Παρά την ύπαρξη της αποκλειστικής αυτής προθεσμίας, οι ενδιαφερόμενοι παροτρύνονται να επιδιώκουν με υπομονή τη χορήγηση της βεβαίωσης από την Περιφέρεια δεδομένου ότι ένας πλήρης φάκελος διευκολύνει σημαντικά την συνέχιση της αδειοδοτικής διαδικασίας και να επικαλούνται το αποκλειστικό της προθεσμίας μόνο σε έσχατη ανάγκη.

- Προκειμένου για μικρές α/γ που υποχρεούνται να λάβουν Ε.Π.Ο. (δηλ. για μικρές α/γ ισχύος μεγαλύτερης των 20kW ή ισχύος μικρότερης των 20 kW που εμπίπτουν στην περίπτωση 4.2), οι ενδιαφερόμενοι θα πρέπει και πάλι να απευθύνονται στις Δ/σεις Περιβάλλοντος των οικείων αιρετών Περιφερειών προκειμένου να λάβουν Ε.Π.Ο. ως έργα κατηγορίας Β4, σύμφωνα με την παρ. 3 του αρ. 30 του ν.4014/2011. Η αίτηση θα συνοδεύεται από Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων.

Αν και δεν υπάρχει κάποια ειδική υπουργική απόφαση ή εγκύκλιος που να ρυθμίζει το περιεχόμενο της αίτησης για τις μικρές α/γ, με βάση την εμπειρία άλλων τεχνολογιών και τις διατάξεις του νόμου, εκτιμάται ότι η αίτηση θα πρέπει να περιλαμβάνει κατ' ελάχιστο τα ακόλουθα:

- Τοπογραφικό διάγραμμα του γηπέδου με σημειωμένο το κτίριο ή τη θέση, όπου πρόκειται να εγκατασταθεί η μικρή α/γ σε συντεταγμένες ΕΓΣΑ87.
- Απόσπασμα χάρτη ΓΥΣ κλίμακας 1:50.000.
- Φωτογραφίες του χώρου εγκατάστασης.
- Τομή της α/γ και διαστάσεις.
- Στοιχεία του φορέα εγκατάστασης.
- Στοιχεία του εξοπλισμού με βασικές πληροφορίες από τα τεχνικά φυλλάδια (π.χ. φωτογραφία του εξοπλισμού, ταχύτητα περιστροφής κ.λπ.) που επιτρέπουν σε μη τεχνικούς να αποκτήσουν άποψη της σκοπούμενης εγκατάστασης. Αν και οι μικρές α/γ, όπως και όλες οι α/γ, δεν δημιουργούν ηχητική όχληση σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 200-300 μ., θα πρέπει να επιδιώκεται να προσκομίζονται στοιχεία για την προκαλούμενη στάθμη θορύβου, ώστε να προληφθούν σχετικά ερωτήματα από τις αδειοδοτούσες υπηρεσίες.
- Στοιχεία των απαιτούμενων εγκαταστάσεων υποδομής (τρόπος στήριξης/θεμελίωσης, τρόπος ανέγερσης κ.λπ.).

Τέλος, προκειμένου μετά το πέρας της αδειοδοτικής διαδικασίας να αποφευχθούν προβλήματα με άλλες υπηρεσίες, η αρμοδιότητα των οποίων υφίσταται πιθανά ανάλογα με το είδος και τον χαρακτήρα του χώρου εγκατάστασης με βάση άλλες νομοθεσίες (δασική, αρχαιολογική κ.λπ.), συνιστάται οι ενδιαφερόμενοι να απευθύνονται εγκαίρως με σχετικό αίτημά τους και στις ακόλουθες αρχές: Εφορεία Προϊστορικών και Κλασσικών Αρχαιοτήτων, Εφορεία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων, Εφορεία Νεωτέρων Μνημείων, Δασαρχείο, Δ/ση Αγροτικής Ανάπτυξης, Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας, ΓΕΕΘΑ, ΓΕΑ.

	Σε κτίρια ή ΒΙΠΕ	Σε γήπεδα		
		≤ 20kW		> 20 kW
		εκτός περιοχής Natura κλπ.	εντός περιοχής Natura κλπ. (παρ. 4.2)	
Ισχύοντα σήμερα (Ιαν. 2012)	Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. -	Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. Περιφέρεια	Υποχρέωση για Ε.Π.Ο. ως Β4 Περιφέρεια	Υποχρέωση για Ε.Π.Ο. ως Β4 Περιφέρεια
Μετά την απόφαση για τις Π.Π.Δ.	Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. -	Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. Περιφέρεια	Υποχρέωση για Π.Π.Δ. Περιφέρεια	Υποχρέωση για Π.Π.Δ. Περιφέρεια

**Εικ. Α.1** Υποχρέωση και αρμόδιες υπηρεσίες για περιβαλλοντική αδειοδότηση μικρών ανεμογεννητριών

#### Α.4 Πολεοδομικά θέματα και θέματα χρήσεων γης

Ταυτόχρονα με την αίτηση για την περιβαλλοντική αδειοδότηση, ο ενδιαφερόμενος πρέπει να υποβάλει αίτηση στην αρμόδια πολεοδομική αρχή. Δυστυχώς για τις μικρές α/γ δεν έχουν θεσπιστεί ειδικές διατάξεις σχετικά με τους όρους δόμησης στον χώρο, σε κτίρια ή άλλες δομικές κατασκευές. Με βάση το γενικό πλαίσιο και τις ειδικές αναφορές που αυτό περιλαμβάνει σε μερικές περιπτώσεις, ισχύουν τα ακόλουθα:

##### Βαθμοί όχλησης και αποστάσεις από οικισμούς

Με βάση την υπουργική απόφαση 13727/724/24.7.2003 (ΦΕΚ Β' 1087/5.8.2003), όπως τροποποιήθηκε και συμπληρώθηκε με την Δ6/Φ1/οικ.19500/4.11.2004 (ΦΕΚ Β' 1671/11.11.2004), σχετικά με την αντιστοίχιση δραστηριοτήτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τους βαθμούς όχλησης που αναφέρονται στην πολεοδομική νομοθεσία, οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες βαθμών όχλησης (άρθρο 1):

Όνομαστική ισχύς	$P \leq 20 \text{ kW}$	$20 \text{ kW} < P \leq 700 \text{ kW}$	$P > 700 \text{ kW}$
Βαθμός όχλησης	μη οχλούσα	χαμηλής όχλησης	μέσης όχλησης

*Εικ. Α.2 Βαθμοί όχλησης μικρών ανεμογεννητριών*

Με βάση την ίδια Υπουργική Απόφαση, ισχύουν οι ακόλουθοι περιορισμοί:

- δεν επιτρέπεται (άρθρο 2 παρ.1) η χωροθέτηση μικρών α/γ σε παραδοσιακούς οικισμούς, περιοχές ιστορικών τμημάτων πόλεων και περιοχές RAMSAR,
- επιτρέπεται (άρθρο 2 παρ.3) η εγκατάσταση σταθμών μηδενικής όχλησης, δηλαδή μικρών α/γ ισχύος μικρότερης ή ίσης από 20 kW, σε περιοχές:
  - ✓ εντός σχεδίου,
  - ✓ εντός ορίων οικισμών με πληθυσμό μικρότερο από 2.000 κατοίκους,
  - ✓ εντός ορίων οικισμών προϋφιστάμενων του 1923 και
  - ✓ εκτός σχεδίου

Με βάση το από 24.4.1985 προεδρικό διάταγμα (ΦΕΚ Δ' 181), και συγκεκριμένα το άρθρο 7 παρ.3 αυτού, όπως τροποποιήθηκε με το από 16.5.1989 (ΦΕΚ Δ' 293), η ελάχιστη απόσταση από οικισμούς για εγκαταστάσεις μέσης όχλησης ορίζεται σε 500μ. Επομένως, οι απαιτούμενες αποστάσεις από οικισμούς έχουν ως εξής:

Όνομαστική ισχύς	$P \leq 20 \text{ kW}$	$20 \text{ kW} < P \leq 700 \text{ kW}$	$P > 700 \text{ kW}$
Απόσταση από οικισμό	Εντός οικισμού *	Εκτός οικισμού ασκέτως απόστασης	> 500 μέτρα

*Εικ. Α.3 Αποστάσεις από οικισμούς για την εγκατάσταση μικρών ανεμογεννητριών (\*Υπό τους περιορισμούς που αναφέρονται στις παρ. 2 και 3 του αρ. 2 της ΥΑ 13727/724/24.7.2003 όπως ισχύει και που αναφέρθηκαν ανωτέρω)*

Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι θα πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα ώστε η προκαλούμενη ηχητική όχληση να μην ξεπερνά το όριο των 45db από κατοικίες.



### Όροι δόμησης

Με βάση το ν.2244/1994 άρθρο 3 παρ.4, εδάφιο τρίτο, όπως προστέθηκε με τον ν.2941/2001 άρθρο 2 παρ.7, αντικαταστάθηκε με τον ν.3734/2009 άρθρο 27<sup>Α</sup> παρ. 9 και τροποποιήθηκε με τον ν.3851/2010 άρθρο 9 παρ.8:

- Για την εγκατάσταση μικρών α/γ δεν απαιτείται άδεια δόμησης, αλλά έγκριση εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας από την αρμόδια Διεύθυνση Πολεοδομίας.
- Ειδικά για την τοποθέτηση μικρών α/γ σε κτίρια και στέγαστρα, μπορεί, με απόφαση του Υπουργού Π.Ε.Κ.Α. να προβλέπεται μόνο γνωστοποίηση των εργασιών αυτών στον οριζόμενο, κατά περίπτωση, αρμόδιο φορέα. Τέτοια απόφαση δεν έχει ακόμα εκδοθεί.
- Δεν απαλλάσσονται από την υποχρέωση έκδοσης οικοδομικής άδειας δομικές κατασκευές, όπως τα θεμέλια των πύργων ανεμογεννητριών, οικήματα στέγασης εξοπλισμού ελέγχου και μετασχηματιστών.
- Για την έκδοση οικοδομικής άδειας ανέγερσης δεν απαιτείται έγκριση της αρμόδιας Επιτροπής Πολεοδομικού και Αρχιτεκτονικού Ελέγχου (Ε.Π.Α.Ε.), εκτός εάν η εγκατάσταση προβλέπεται να γίνει σε παραδοσιακούς οικισμούς ή περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους, που προστατεύονται ως προς την πολεοδομική ανάπτυξη από ειδικά διατάγματα.
- Η εγκατάσταση μικρών α/γ υπάγεται στις περί βιομηχανικών εν γένει εγκαταστάσεων διατάξεις του άρθρου 4 του από 24.5.1985 προεδρικού διατάγματος (ΦΕΚ Δ' 270) για την εκτός σχεδίων πόλεων δόμηση, καθώς και σε κάθε άλλη ειδική διάταξη του ίδιου προεδρικού διατάγματος, που αφορά σε έργα της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού Α.Ε., ανεξάρτητα από το φορέα υλοποίησής τους.
- Σε υπουργική απόφαση μπορεί να καθορίζονται ειδικοί όροι και περιορισμοί δόμησης για την ανέγερση εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης Α.Π.Ε. κατά παρέκκλιση των διατάξεων των άρθρων 1, 4 και 7 του από 24.5.1985 προεδρικού διατάγματος, που δημοσιεύθηκε στις 31.5.1985 (ΦΕΚ Δ' 270), καθώς και ειδικές αποστάσεις από τα όρια οικισμών, κατά παρέκκλιση των διατάξεων του άρθρου 4 του ίδιου προεδρικού διατάγματος και των διατάξεων του άρθρου 7 του από 24.4.1985 προεδρικού διατάγματος που δημοσιεύθηκε στις 3.5.1985 (ΦΕΚ Δ' 181).

Το από 24.5.1985 προεδρικό διάταγμα (ΦΕΚ Δ' 270), καθορίζει τα ακόλουθα:

- άρθρο 1 παρ.1: αρτιότητα, οικοδομησιμότητα, περίφραξη
- άρθρο 4: αποστάσεις εγκαταστάσεων μέσης όχλησης από οικισμούς, αποστάσεις από όρια γηπέδου, ποσοστό κάλυψης, ύψος, συντελεστής δόμησης, παρεκκλίσεις
- άρθρο 7: όροι δόμησης για υποσταθμούς και κτίρια που στεγάζουν ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό

### **A.5 Σύνδεση στο δίκτυο**

Ταυτόχρονα με την αίτηση για την περιβαλλοντική αδειοδότηση και την αίτηση στην αρμόδια πολεοδομική αρχή, ο ενδιαφερόμενος πρέπει να υποβάλει αίτηση σύνδεσης στον αρμόδιο Διαχειριστή, που μέχρι σήμερα είναι η ΔΕΗ Α.Ε.

### Προσφορά σύνδεσης

Αιτήσεις σύνδεσης για μικρές α/γ, όπως και γενικά για σταθμούς Α.Π.Ε. & Σ.Η.Θ.Υ.Α., πλην φωτοβολταϊκών, υποβάλλονται στη Διεύθυνση Διαχείρισης Δικτύου, Πατησίων 27, 10432 Αθήνα, 8ος όροφος) με το έντυπο του παραρτήματος της Υ.Α. 13310/2007, που βρίσκεται αναρτημένο στον δικτυακό τόπο της ΔΕΗ [2]. Σύμφωνα με τη διαδικασία που έχει καθορίσει η ΔΕΗ, κατά την αίτηση προσκομίζονται τα ακόλουθα δικαιολογητικά:

- Τοπογραφικό 1:5.000 ΓΥΣ της θέσης εγκατάστασης του σταθμού.

- Τίτλος κυριότητας ή νόμιμης κατοχής του χώρου εγκατάστασης.
- Τεχνικά χαρακτηριστικά και πιστοποιήσεις του εξοπλισμού.
- Στοιχεία Μ/Σ ανύψωσης, όταν πρόκειται για σύνδεση στη μέση τάση.
- Μονογραμμικό ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης του σταθμού, όπου θα παρουσιάζεται λεπτομερώς ο σημαντικός εξοπλισμός της εγκατάστασης, οι μονάδες παραγωγής με διακριτή αρίθμηση, οι Μ/Σ ανύψωσης τάσης, οι διατάξεις αντιστάθμισης και τα μέσα απόζευξης και προστασίας.
- Σύντομη τεχνική περιγραφή

Όλα τα παραπάνω έγγραφα πρέπει να υποβάλλονται σε τρία αντίτυπα. Τα στοιχεία της αίτησης στη ΔΕΗ θα πρέπει να συμπληρωθούν:

- με αντίγραφο της έγκρισης από την Πολεοδομία (μικρής κλίμακας ή δόμησης), όταν αυτή εκδοθεί,
- με αντίγραφο της απαλλαγής από Ε.Π.Ο. ή αποδεικτικό παρέλευσης του 20ημέρου από την υποβολή της αίτησης στην Δ/ση Περιβάλλοντος της αιρετής Περιφέρειας ή απόφαση Ε.Π.Ο ή Π.Π.Δ. κατά περίπτωση.

Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία η ΔΕΗ, ως Διαχειριστής του Δικτύου, θα εκδώσει την Προσφορά Σύνδεσης, που θα είναι εξαρχής δεσμευτική σε κάθε περίπτωση, πλην των περιπτώσεων εκείνων κατά τις οποίες το έργο δεν απαλλάσσεται από έκδοση Ε.Π.Ο.. Στην τελευταία περίπτωση, η Προσφορά Σύνδεσης καθίσταται δεσμευτική με την προσκόμιση της Ε.Π.Ο. ή των Π.Π.Δ. κατά περίπτωση. Σημειώνεται ότι, κατά τον νόμο, ο τίτλος κυριότητας και η έγκριση της Πολεοδομίας, δεν απαιτούνται για την έκδοση της προσφοράς σύνδεσης από τη ΔΕΗ, αλλά απαιτούνται για την υπογραφή της Σύμβασης Σύνδεσης η οποία έπεται αυτών, με βάση σχετικές οδηγίες και την πρακτική της ΔΕΗ. Σημειώνεται ότι οι σχετικές διατάξεις της Υ.Α. 13310/2007 που αφορούν τα ζητούμενα δικαιολογητικά για την χορήγηση προσφοράς σύνδεσης, δεν θα πρέπει να ακολουθούνται (τουλάχιστον όχι εξαντλητικά) για τις μικρές α/γ διότι αφενός δεν τις καταλαμβάνουν τυπικά, αφού η συγκεκριμένη Υ.Α. αφορά έργα τα οποία δεν απαλλάσσονται από την έκδοση αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας (δηλαδή αιολικές εγκαταστάσεις συνολικής ισχύος έως 100 kW), αφετέρου δεν είναι κατάλληλες για τις μικρές α/γ.

#### Σύμβαση σύνδεσης και παροχή εγγυήσεων για τη σύνδεση

Μετά την έκδοση από τη ΔΕΗ της δεσμευτικής προσφοράς σύνδεσης, την υποβολή του τίτλου κυριότητας και την έγκριση της Πολεοδομίας, ο φορέας υποβάλλει στη ΔΕΗ αίτηση για την υπογραφή της Σύμβασης Σύνδεσης. Με την υπογραφή της Σύμβασης αυτής, ο φορέας καταβάλλει στη ΔΕΗ όλο το κόστος σύνδεσης που έχει καθορισθεί στη δεσμευτική προσφορά. Ένα σημείο που είναι αδιευκρίνιστο σχετίζεται με την υποχρέωση να έχει εκδοθεί η έγκριση από την Πολεοδομία προκειμένου να υπογραφεί η σύμβαση σύνδεσης. Η ακολουθούμενη πρακτική από τη ΔΕΗ στην περίπτωση των μικρών φωτοβολταϊκών, για τα οποία όμως απαιτείται μόνο έγκριση εργασιών μικρής κλίμακας όταν δεν συνοδεύονται από κάποια δομική κατασκευή (π.χ. μη προκατασκευασμένος οικίσκος), επιβάλλει την προσκόμιση της έγκρισης αυτής. Στην περίπτωση των μεγάλων α/γ για τις οποίες απαιτείται άδεια δόμησης για το θεμέλιο (διαδικασία σαφώς πιο χρονοβόρα από αυτή της έγκρισης εργασιών δόμησης μικρής κλίμακας) αυτή δεν απαιτείται για την υπογραφή της σύμβασης σύνδεσης. Είναι ασαφές πώς θα αντιμετωπισθούν οι μικρές α/γ που απαλλάσσονται από την άδεια εγκατάστασης και θεμελιώνονται σε γήπεδο. Ένα επίσης βασικό σημείο στη διαδικασία, που θα πρέπει να είναι εκ των προτέρων γνωστό, είναι η υποχρέωση παροχής εγγυήσεων. Στις συμβάσεις σύνδεσης που συνάπτει ο Διαχειριστής με τους φορείς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. οι οποίοι εξαιρούνται από την υποχρέωση για λήψη άδειας παραγωγής (εν προκειμένω για μικρές α/γ έως 100kW), καθορίζεται (σύμφωνα με το άρθρο 8, παρ. 15 του ν.3468/2006, όπως τροποποιήθηκε με το άρθρο 3 παρ.2 ν.3851/2010),

προθεσμία σύνδεσης στο Σύστημα ή το Δίκτυο, η οποία είναι αποκλειστική, και ορίζεται εγγύηση ή ποινική ρήτρα (150€/kW εγκατεστημένης ισχύος), που καταπίπτει αν ο φορέας δεν υλοποιήσει τη σύνδεση εντός της καθορισθείσας προθεσμίας. Από την παροχή εγγυήσεων, σύμφωνα με την ίδια παράγραφο και το άρθρο του ν.3851/2010 εξαιρούνται:

- α/γ που εγκαθίστανται σε κτίρια,
- α/γ για τις οποίες έχει υπογραφεί σύμβαση σύνδεσης πριν τη θέση σε ισχύ του ν.3851/2010.

#### **A.6 Σύναψη Σύμβασης πώλησης και αγοράς της ενέργειας**

Μετά την υπογραφή της σύμβασης σύνδεσης με τη ΔΕΗ θα πρέπει να υπογραφεί η σύμβαση πώλησης ενέργειας με τον αρμόδιο Διαχειριστή που είναι ο ΔΕΣΜΗΕ (Κάστορος 72, Τ.Κ. 18 545, Πειραιάς) για το Διασυνδεδεμένο Δίκτυο και η ΔΕΗ για τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Σημειώνεται ότι, μετά την αναδιάρθρωση του Διαχειριστή και τη δημιουργία των ΑΔΜΗΕ και ΛΑΓΗΕ, όπως προβλέπεται από τον ν.4001/2011, ο αντισυμβαλλόμενος θα αλλάξει. Ο τύπος της σύμβασης πώλησης έχει καθορισθεί με υπουργική απόφαση και βρίσκεται στον δικτυακό τόπο του Υ.Π.Ε.Κ..Α. στην ηλεκτρονική διεύθυνση:

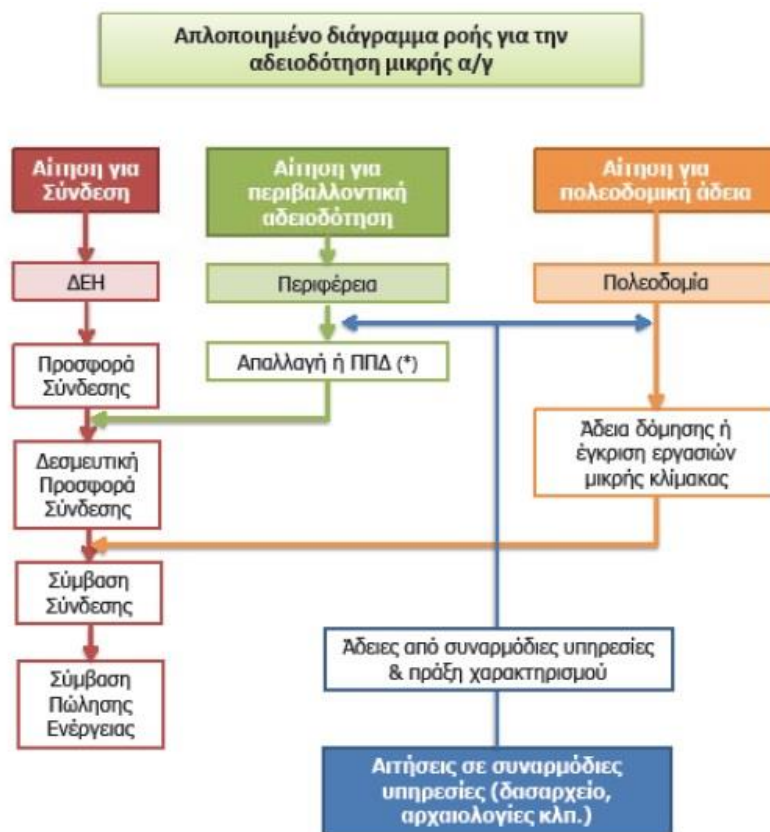
<http://www.ypeka.gr> > Υπηρεσία Εξυπηρέτησης ΑΠΕ > Θεσμικό Πλαίσιο > 30.08.2010

Τα απαιτούμενα δικαιολογητικά αναφέρονται αναλυτικά στο δικτυακό τόπο του ΔΕΣΜΗΕ, στην ηλεκτρονική διεύθυνση:

<http://www.desmie.gr> > ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ > Δικαιολογητικά Συμβάσεων Αγοραπωλησίας

#### **A.7 Χρήσιμες διευθύνσεις από όπου μπορεί να αντλούνται πληροφορίες:**

- α) Η Υπηρεσία Α.Π.Ε. του ΥΠΕΚΑ ([www.ypeka.gr](http://www.ypeka.gr) > Ενέργεια > menu Υπηρεσία Α.Π.Ε.): όπου υπάρχει ενημερωμένη λίστα του εκδιδόμενου θεσμικού πλαισίου μετά τον ν.3851/2010.
- β) Η σελίδα της ΔΕΗ για τη σύνδεση παραγωγών Α.Π.Ε. στο Δίκτυο Διανομής [www.dei.gr](http://www.dei.gr) > Φωτοβολταϊκά και άλλες ΑΠΕ > Συνδέσεις Σταθμών ΑΠΕ.
- γ) Η σελίδα του Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. για τα απαιτούμενα δικαιολογητικά ([www.desmie.gr](http://www.desmie.gr) > Δικαιολογητικά Συμβάσεων Α.Π.Ε. και Σ.Η.Θ.Υ.Α.).
- δ) Η σελίδα της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, όπου υπάρχει η βασική νομοθεσία περί Α.Π.Ε. ([www.rae.gr](http://www.rae.gr) > Τι είναι η ΡΑΕ-Θεσμικό πλαίσιο ενέργειας > Νομοθεσία για την ενέργεια > Α.Π.Ε. και Συμπαρογωγή).
- ε) Η σελίδα του Κ.Α.Π.Ε. ([www.cres.gr](http://www.cres.gr)), όπου υπάρχει οδηγός για μικρά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε.



*Εικ. Α.4 Απλοποιημένο διαγραμμα ροής για την αδειοδότηση μικρής ανεμογεννητριας*

## A.8 Πιστοποιήσεις (Certifications) Μικρών Ανεμογεννητριών

Η Γερμανία δεν έχει εκδώσει κάποιο πρότυπο για την πιστοποίηση μικρών α/γ, αλλά έχει υιοθετήσει τα ακόλουθα δύο:

- AWEA Standard 9.1 -2009
- BWEA standard on small wind turbine performance and safety [3]

Ομοίως, η Ισπανία δεν διαθέτει κάποιο ειδικό πρότυπο αλλά:

- έχει υιοθετήσει τα αντίστοιχα πρότυπα της AWEA & BWEA,
- χαρακτηρίζει τις μικρές α/γ με βάση την καμπύλη ισχύος, τις μετρήσεις θορύβου και τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής αυτών,
- αφήνει ανοικτή την υιοθέτηση του προτύπου IEC 61400 -2 σε μεταγενέστερο χρόνο, όταν η αγορά θα έχει ωριμάσει, δεδομένου ότι τώρα χαρακτηρίζεται ως πολύ σοβαρό και οικονομικά δυσβάσταχτο για τις ανάγκες της σημερινής αγοράς μικρών α/γ.

Στο Ηνωμένο Βασίλειο υφίσταται το Microgeneration Certification Scheme (MSC) [4], στο οποίο εντάσσονται και οι μικρές α/γ. Η πρόσβαση των μικρών α/γ σε μηχανισμούς στήριξης συνδέεται άρρηκτα με τη συμμόρφωσή τους με το MSC. Στις ΗΠΑ υφίσταται το Small Wind Certification Council [5]. Σε διεθνές επίπεδο, οι σχεδιαστικές απαιτήσεις στην αγορά της αιολικής ενέργειας προκύπτουν από τον οργανισμό IEC (International Electrotechnical Commission), σύμφωνα προς το πρότυπο 61400 το οποίο περιέχει δέσμη επιμέρους κριτηρίων και ελέγχων που περιγράφονται στη συνέχεια, επιγραμματικά:

- IEC 61400-1 Design requirements
- IEC 61400-2 Design requirements for small wind turbines
- IEC 61400-3 Design requirements for offshore wind turbines
- IEC 61400-4 Gears
- IEC 61400-5 Wind turbine rotor blades
- IEC 61400-11 Acoustic noise measurement techniques
- IEC 61400-12 Wind turbine power performance testing
- IEC 61400-13 Measurement of mechanical loads
- IEC 61400-14 Declaration of apparent sound power level and tonality values
- IEC 61400-21 Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines
- IEC 61400-22 Conformity testing and certification
- IEC 61400-23 Full-scale structural testing of rotor blades
- IEC 61400-24 Lightning protection
- IEC 61400-25 Communication protocol

Οι κατασκευαστές μεγάλων α/γ συμμορφώνονται πλήρως με τα αντίστοιχα πρότυπα IEC 61400. Για τις προδιαγραφές σχεδίασης μικρών α/γ ισχύει το πρότυπο IEC 61400-2 και η κατηγοριοποίηση βάσει διαστάσεων, που προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1 του κειμένου. Για επιφάνεια σάρωσης του στροφείου μεγαλύτερη των 200τ.μ., η ανεμογεννήτρια εντάσσεται στο πρότυπο σχεδιασμού των μεγάλων α/γ. Στις ανεμογεννήτριες των 50kW πολλές ξεπερνούν την κρίσιμη διάμετρο στροφείου των 16 μέτρων, οπότε εντάσσονται στο πρότυπο 61400-1. Γενικά και τα δύο αυτά πρότυπα είναι αρκετά αναλυτικά και άρα απαιτητικά, όσον αφορά σε δοκιμές κόπωσης και αντοχών των διαφόρων μηχανολογικών υποσυστημάτων της ανεμογεννήτριας. Αυτό αποτρέπει τις εταιρίες κατασκευής μικρών α/γ από το να συμμορφώνονται προς αυτά. Επίσης η μη τυποποιημένη διάσταση των μικρών α/γ ισχύος 50kW και η ένταξή τους σε διαφορετικά πρότυπα δημιουργεί σύγχυση στον επενδύτη και τις καθιστά δύσκολα συγκρίσιμες. Το ζητούμενο σε αυτήν την αγορά είναι να υπάρχει ένα ενιαίο πρότυπο στο οποίο να εντάσσονται όλες οι μικρές α/γ, το οποίο θα εξασφαλίζει την ασφαλή λειτουργία της κατασκευής αλλά και τις απαραίτητες προδιαγραφές με τις οποίες θα πρέπει να συμμορφώνονται. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας έχει εκδώσει το IEA Small Wind Turbine Recommended Practice [6] με σκοπό τον ορισμό ενός ενιαίου προτύπου σε παγκόσμιο επίπεδο και τον καθορισμό των ελάχιστων απαιτούμενων δοκιμών για την σήμανση μικρών α/γ. Η πιο διαδεδομένη κατηγορία μικρών α/γ είναι τεχνολογίας Direct drive permanent magnet. Κάποιες από αυτές συνδέονται στο δίκτυο με αντιστροφείς γνωστών εταιρειών του χώρου των φωτοβολταϊκών, οπότε και εξασφαλίζουν τις προδιαγραφές που απαιτούνται από τον διαχειριστή του συστήματος, όσον αφορά τα ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α΄

---

- [1] <http://www.rae.gr/downloads/sub2/KYA104247-8.pdf>
- [2] <http://www.dei.gr> > Φωτοβολταϊκά και άλλες Α.Π.Ε. > Συνδέσεις Σταθμών Α.Π.Ε. > Έντυπα Αιτήσεων > Αιτήσεις για λοιπούς Σταθμούς Α.Π.Ε.
- [3] [http://www.bwea.com/pdf/small/BWEA\\_SWT\\_Standard\\_Feb2008.pdf](http://www.bwea.com/pdf/small/BWEA_SWT_Standard_Feb2008.pdf)
- [4] <http://www.microgenerationcertification.org/>
- [5] <http://www.smallwindcertification.org/>
- [6] <http://www.ieawind.org/>

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΥΡΩΠΑΪΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΩΝ  
ΑΣΤΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΑΞΟΝΑ [1]**
**ECOFYS**
**VAWT 3 kW**

Όνομα Επικοινωνίας: Geert Timmers  
 Διεύθυνση: PO Box 8408, 3503 RK Utrecht  
 Τηλέφωνο: +31-30 3808300  
 Χώρα: Netherlands

Χωρίς Αναφορές Χρήσης

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ
ΜΕΤΡΗΣΗΣ		
1) Ονομαστική Ισχύς	3	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	14	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	3,5	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	20	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	-	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	200	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	2,8	m
8) Ύψος Ρότορα	4	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	5,5	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Κυμαίνεται από 1-12	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	300	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς Κιβώτιο Ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρικά Φρένα και Δισκόφρενο	
14) Αριθμός Πτερυγίων	5	
15) Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	
16) Τάση Εξόδου	230	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	- 30	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+ 50	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	-	DB

20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



Neoga 3 kW

<b>Eurowind Small Turbines Ltd</b>
------------------------------------

**VAWT – from 1,3 kW to 30 kW**

Όνομα Επικοινωνίας: Steven Peace  
 Διεύθυνση: 38 Kings Avenue, Newhaven, East Sussex BN9 0NA  
 Τηλέφωνο: +44 (0) 12 73 61 23 83  
 Χώρα: United Kingdom

Αναφορές για χρήση Eurowind 1,3 kW

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
-	Πρωτότυπο	Ηνωμένο Βασίλειο

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	1,3	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	12	m/s

3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	3 - 4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	28 - 32	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	255	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	-	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	2,25	m
8) Ύψος Ρότορα	2	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	4,5	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ανάλογα την περιοχή τοποθέτησης	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	-	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	-	
13) Σύστημα Πέδης	-	
14) Αριθμός Πτερυγίων	5	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο fiberglass	
16) Τάση Εξόδου	24 - 240	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	-	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20 Χρόνια	
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



Eurowind 1,3 kW



**Eurowind 5 kW**

Χωρίς Αναφορές Χρήσης

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	5	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	12	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	3 - 4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	28 - 32	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	255	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	-	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	4,25	m
8) Ύψος Ρότορα	4	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	17	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ανάλογα την περιοχή τοποθέτησης	m
ΆΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	-	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	-	
13) Σύστημα Πέδης	-	
14) Αριθμός Πτερυγίων	3	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο fiberglass	
16) Τάση Εξόδου	24 -240	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	-	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

**Eurowind 10,8 kW**

Χωρίς Αναφορές Χρήσης

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	10,8	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	12	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	3 - 4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	28 - 32	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	255	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	-	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	6,26	m
8) Ύψος Ρότορα	5	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	37	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ανάλογα την περιοχή τοποθέτησης	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	-	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	-	
13) Σύστημα Πέδης	-	
14) Αριθμός Πτερυγίων	3	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο fiberglass	
16) Τάση Εξόδου	24 -240	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	-	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

**Eurowind 19 kW**

Χωρίς Αναφορές Χρήσης

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	19	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	12	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	3 - 4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	28 - 32	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	255	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	-	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	8,25	m
8) Ύψος Ρότορα	8	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	66	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ανάλογα την περιοχή τοποθέτησης	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	-	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	-	
13) Σύστημα Πέδης	-	
14) Αριθμός Πτερυγίων	3	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο fiberglass	
16) Τάση Εξόδου	24 - 240	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	-	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

<b>OY Windside Production Ltd</b>
-----------------------------------

**VAWT from 1 kW to 8 kW**

Όνομα Επικοινωνίας: Risto Joutsiniemi  
 Διεύθυνση: Niemenharjuntie 85, 44800 Pihtipudas  
 Τηλέφωνο: +358 208 350 700  
 Χώρα : Finland

Αναφορές Χρήσης WS-4B &amp; 4C/ 1-2 kW

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Doncaster	Earth Centre	Αγγλία
Helsinki	Arabianranta	Φινλανδία
Chicago	Millenium Park	Η.Π.Α
Yurigaoka, Fukuoka	Αθλητικό Κέντρο	Ιαπωνία
Oulu	In a Park wind art work Synergia	Φινλανδία

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	1	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	18	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	1	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	144	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	400	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	1	m
8) Ύψος Ρότορα	4	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	4	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	-	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	170-400	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Δισκόφρενο	
14) Αριθμός Πτερυγίων	2	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο fiberglass	
16) Τάση Εξόδου	0-200	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-60	°C

18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+80	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	0	DB
20) Διάρκεια Ζωής	100	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Ναι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



WS-4B &amp; 4C/ 1-2 kW

**WS-12/ 8 kW**

Αναφορές Χρήσης WS-12/ 8 kW

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Raisio	Εμπορικό κέντρο	Φινλανδία

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	3,9	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	20	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	2	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	216	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	3000	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	2	m
8) Ύψος Ρότορα	6	m

9) Επιφάνεια Σάρωσης	12	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	6	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	100 - 300	Στην ταχύτητα
	ονομαστική ανέμου	
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Δισκόφρενο	
14) Αριθμός Πτερυγίων	2	
15) Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	
16) Τάση Εξόδου	0-200	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-60	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+80	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	0	DB
20) Διάρκεια Ζωής	100	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Ναι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



WS-12/ 8 kW

**Ropatec S.p.a.**
**VAWT from 0,75 kW to 6 kW**

Όνομα Επικοινωνίας: Hannes Riegler  
 Διεύθυνση: Via Siemens 19  
 Τηλέφωνο: +39 0471 568 180  
 Χώρα : Italy

## Αναφορές Χρήσης Roratec WRE.030

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Monte Cimone	Ερευνητικό κέντρο	Ιταλία
Foggia	Υποστηρικτικό ηλεκτρικές αντλίες	Ιταλία
Sennes	Καταφύγιο	Ιταλία
Marchetti	Καταφύγιο	Ιταλία

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	3	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	14	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	2	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	150	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	430	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	3,3	m
8) Ύψος Ρότορα	2,2	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	7,26	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ποικίλει	m
ΆΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	100 - 120	Στην ονομαστική ανέμου ταχύτητα
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδη	Υδραυλική Πέδη	
14) Αριθμός Πτερυγίων	2	
15) Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	
16) Τάση Εξόδου	0-220	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-30	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+50	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	32	DB
20) Διάρκεια Ζωής	15/20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



Ropatec WRE.30

**WRE.060 / 6 kW**

Αναφορές Χρήσης WRE.060 / 6 kW

ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Valley of Aoste	Υδραυλικό σύστημα θέρμανσης	Ιταλία
Hallau	Διασύνδεση σε ηλεκτρικό δίκτυο	Ελβετία
Townsville	Μονάδα επίδειξης	Αυστραλία

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	6	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	14	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	2	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	150	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	750	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	3,3	m
8) Ύψος Ρότορα	2,2	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	14,52	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	Ποικίλει	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	110	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	



13) Σύστημα Πέδης	Υδραυλική πέδη	
14) Αριθμός Πτερυγίων	2	
15) Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	
16) Τάση Εξόδου	220	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-30	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+50	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	32	DB
20) Διάρκεια Ζωής	15/20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

### Turby B.V.

#### VAWT 2,5 kW

Όνομα Επικοινωνίας: Dick Sidler  
 Διεύθυνση: Heuvelenweg 18, 7241 HZ Lochem  
 Τηλέφωνο: +31 - 6-55822169  
 Χώρα : Netherlands

#### Αναφορές Χρήσης Turby 2,5 kW

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Amsterdam	Δημόσιο κτίριο(πρώην σχολείο)	Ολλανδία
Tilburg	Κτίριο	Ολλανδία
Den Haag	Δημαρχείο	Ολλανδία
Delft	Πανεπιστήμιο	Ολλανδία

#### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	2,5	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	14	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	14	m/s

5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	55	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	135	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	1,99	m
8) Ύψος Ρότορα	2,88	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	5,3	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	6-7,5	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	400	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρικό σύστημα	
14) Αριθμός Πτερυγίων	3	
15) Υλικό Πτερυγίων	Σύνθετο εποξικό Carbon	
16) Τάση Εξόδου	230	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-20	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+40	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	45	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Όχι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



Turby 2,5 kW

**VR & Tech****VAWT from 2,5 kW to 100 kW**

Όνομα Επικοινωνίας: Alain Van Ranst  
 Διεύθυνση: Rue Trou du Sart 5 C-D 5 380 Fernelmont  
 Τηλέφωνο: +32 (0) 81 22 42 14  
 Χώρα : Belgium

Αναφορές Χρήσης VR & Tech Telecom tower / 2 m

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Namur	Βιομηχανική	Βέλγιο

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ**

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	2,5	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	8	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	Δεν έχει	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	Ποικίλει	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	2	m
8) Ύψος Ρότορα	2-3	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	Ποικίλει	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	-	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	800	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρονική σταθερή πέδηση	
14) Αριθμός Πτερυγίων	9	
15) Υλικό Πτερυγίων	Fibre glass	
16) Τάση Εξόδου	400	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	Μη διαθέσιμο	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+100	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	40	DB
20) Διάρκεια Ζωής	15	Χρόνια

21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου

## VR & Tech House tower / 4 m

Αναφορές Χρήσης VR & Tech Telecom tower / 4 m

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Bastogne	Εκπαιδευτικό κέντρο στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	Βέλγιο

### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	Ελάχιστη 10	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	8	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	Δεν έχει	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	Ποικίλει	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	4	m
8) Ύψος Ρότορα	4-5	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	Ποικίλει	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	-	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	800	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρονική σταθερή πέδηση	
14) Αριθμός Πτερυγίων	9	
15) Υλικό Πτερυγίων	Fibre glass	
16) Τάση Εξόδου	400	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	Μη διαθέσιμο	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+100	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο	40	DB

(ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)		
20) Διάρκεια Ζωής	15	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

## VR & Tech House tower / 6 m

Αναφορές Χρήσης VR & Tech Telecom tower / 6 m

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Andenne	Βιομηχανία τροφίμων	Βέλγιο

### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	Ελάχιστη 25	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	8	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	Δεν έχει	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	Δεν έχει	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	Ποικίλει	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	6	m
8) Ύψος Ρότορα	Ελάχιστο 6	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	Ποικίλει	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	-	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	800	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρονική σταθερή πέδηση	
14) Αριθμός Πτερυγίων	9	
15) Υλικό Πτερυγίων	Fibre glass	
16) Τάση Εξόδου	400	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	Μη διαθέσιμο	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+100	°C

19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	40	DB
20) Διάρκεια Ζωής	15	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	

### WindWall B.V.

#### VAWT from 2,9 kW to 60 kW

Όνομα Επικοινωνίας: Rob Roelofs  
 Διεύθυνση: De Eiken 5D, 7491 HP Delden  
 Τηλέφωνο: +31 – 74 2434885  
 Χώρα : Netherlands

Αναφορές Χρήσης WW2000 / 2,9 kW

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Zwolle	Δημόσιο κτίριο	Ολλανδία
Den Haag	Δημόσιο κτίριο	Ολλανδία
Den Haag	Δημόσιο κτίριο	Ολλανδία
Rotterdam	Πανεπιστήμιο	Ολλανδία

#### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ		ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ
1) Ονομαστική Ισχύς	2,9	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	10,5	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	20	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	55	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	3000	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	2	m
8) Ύψος Ρότορα	5 (οριζόντιο) – 15 (κάθετο)	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	10	m <sup>2</sup>

10) Ύψος Ιστού	-	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	500	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	-	
13) Σύστημα Πέδης	Ηλεκτρικό σύστημα	
14) Αριθμός Πτερυγίων	6	
15) Υλικό Πτερυγίων	Αλουμίνιο	
16) Τάση Εξόδου	400	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-20	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+40	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	74	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Ναι	
23) Σύστημα Προσανατολισμού	Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου	



WW2000 / 2,9 kW

### XCO2 (Qr5)

#### VAWT – 6 kW

Όνομα Επικοινωνίας:

Richard Cochrane

Διεύθυνση:

1-5 Offord Street, London, N1 1DH

Τηλέφωνο: +44 (0) 207 700 1000

Χώρα : United Kingdom

Αναφορές Χρήσης XCO2(Qr5) / 6 kW

ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΧΡΗΣΗ	ΧΩΡΑ
Southwark Bridge Rd, London	Πιλοτική εγκατάσταση από 12/2005	Ηνωμένο Βασίλειο
Temple Meads Roundabout, Bristol	Πιλοτική εγκατάσταση από 1/2006	Ηνωμένο Βασίλειο

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

ΙΣΧΥΣ	ΜΟΝΑΔΑ ΜΕΤΡΗΣ ΗΣ	
1) Ονομαστική Ισχύς	6	kW
2) Ονομαστική Ταχύτητα Ανέμου	~12,5	m/s
3) Ταχύτητα Έναρξης Λειτουργίας	4,0	m/s
4) Ταχύτητα Διακοπής Λειτουργίας	16	m/s
5) Αντοχή σε μέγιστη ταχύτητα Ανέμου	-	Km/h
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ		
6) Βάρος Ρότορα	-	kg
7) Διάμετρος Ρότορα	3,1	m
8) Ύψος Ρότορα	5	m
9) Επιφάνεια Σάρωσης	15,5	m <sup>2</sup>
10) Ύψος Ιστού	5-10	m
ΑΛΛΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ		
11) Μέγιστες rpm	-	Στην ονομαστική ταχύτητα ανέμου
12) Τύπος κιβωτίου ταχυτήτων	Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων	
13) Σύστημα Πέδης	Δυναμική πέδη	
14) Αριθμός Πτερυγίων	3	
15) Υλικό Πτερυγίων	Ανθρακονήματα	
16) Τάση Εξόδου	48 dc ή 240 ac	V
17) Μικρότερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	-40	°C
18) Μεγαλύτερη Θερμοκρασία Λειτουργίας	+100	°C
19) Εκπομπές Θορύβου σε απόσταση 20 m από την Άτρακτο (ταχύτητα ανέμου= 5 m/s)	ελάχιστες	DB
20) Διάρκεια Ζωής	20	Χρόνια
21) Αυτόματη Εκκίνηση	Ναι	
22) Χρήση Ασύγχρονης Γεννήτριας	Όχι	



23) Σύστημα Προσανατολισμού

Ανεξάρτητο από τη Διεύθυνση του Ανέμου



XCO2 (Qr5)

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β´**

---

- [1] Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers, Supported by the European Commission under the Intelligent Energy-Europe Programme