



5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



5.1 Εισαγωγή

Οι ανεμογεννήτριες (Α/Γ) [wind turbines] χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια [Wind Energy Conversion Systems – WECS]¹. Η εποχή των σύγχρονων Α/Γ άρχισε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα σε Ευρώπη και ΗΠΑ. Σήμερα ο τομέας της αιολικής ενέργειας είναι ταχέως αναπτυσσόμενος και αυτός με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ απ' όλες τις ΑΠΕ².

ΣΥΝΤΟΜΗ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Από την αρχαιότητα είναι γνωστές οι προσπάθειες του ανθρώπου να τιθασεύσει τον άνεμο, με πιο συνηθισμένη αξιοποίησή του τα ιστιοφόρα πλοία. Οι απαρχές της αξιοποίησης του ανέμου για την παραγωγή *μηχανικού έργου* (π.χ., ανεμόμυλοι ή αιολικές αντλίες) βρίσκονται στη Μεσοποταμία και στην Ινδία. Κάποιοι ιστορικοί ισχυρίζονται ότι στην αρχαία Βαβυλωνία της εποχής του αυτοκράτορα Χαμουραμπί (17^{ος} αιώνας π.Χ.) βρίσκονται τα πρώτα ίχνη αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας για αρδευτικά έργα, ενώ άλλοι μιλούν για τη χρήση ανεμό-

¹ Η έννοια του ενεργειακού συστήματος μετατροπής της αιολικής ενέργειας (WECS) είναι ευρύτερη από την έννοια της ανεμογεννήτριας (Α/Γ). Στα WECS εντάσσονται όλα τα συστήματα που έχουν κατασκευαστεί διαχρονικά από τον άνθρωπο (από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα) για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, όπως οι ανεμόμυλοι (όλων των τύπων) που χρησιμοποιούνταν για άλεση σπόρων ή αρδευτικά έργα. Η έννοια της ανεμογεννήτριας (wind electric generator) χρησιμοποιείται για εκείνα τα συστήματα που άρχισαν να κατασκευάζονται στο τέλος του 19^{ου} αιώνα (~1890) και τα οποία μετατρέπουν την αιολική σε ηλεκτρική ενέργεια.

² <http://www.wwindea.org/home/index.php> (10/11/2010).



μυλων στην Ινδία το 4^ο αιώνα π.Χ.³ Η πρώτη επιβεβαιωμένη μαρτυρία για τη χρήση ανεμόμυλων (κατακόρυφου άξονα) με σκοπό την άλεση σπόρων έρχεται από την Περσία το 200 π.Χ.⁴ Από τότε ακολούθησε η εξάπλωσή τους ανά τους αιώνες σε πολλά μέρη του τότε αρχαίου γνωστού κόσμου. Πολύ γνωστή είναι η περίπτωση του τροχού του ανέμου [windwheel] του Ήρωνα στην αρχαία Αλεξάνδρεια⁵. Το 13^ο αιώνα ανεμόμυλοι που άλεθαν σπόρους ήταν διαδεδομένοι στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης (και στην Ελλάδα). Σε αντίθεση με τους πρώιμους περσικούς ανεμόμυλους, αυτοί ήταν ανεμόμυλοι *οριζόντιου άξονα*. Ο πύργος τους ήταν κατασκευασμένος από ξύλο ή τούβλο, ενώ η φτερωτή τους από ξύλο. Οι Ολλανδοί ήταν πρωτοπόροι στο σχεδιασμό πιο αποδοτικών και νεωτεριστικών ανεμόμυλων. Τέτοιου είδους ανεμόμυλοι έφτασαν από τους Ολλανδούς αποίκους στις ακτές των ΗΠΑ στα μέσα του 1700. Εκεί (στις ΗΠΑ) δημιουργήθηκε ένας τύπος ανεμόμυλου με μεταλλικά φτερά και εξελιγμένο μηχανολογικό σχεδιασμό (water rump, wind mill) που λειτουργούσε ως αντλία νερού και χρησιμοποιήθηκε σε αγροτικές και άλλες χρήσεις. Πάνω από έξι εκατομμύρια τέτοιοι ανεμόμυλοι εγκαταστάθηκαν μόνο στις ΗΠΑ μεταξύ του 1850 και του 1930⁶. Η αρχή για τις πρώτες Α/Γ ηλεκτρικού ρεύματος έγινε στη Δανία στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Εκεί κατασκευάστηκε η πρώτη Α/Γ που τροφοδοτούσε με ηλεκτρική ενέργεια αγροτικές περιοχές. Την ίδια περίπου εποχή κατασκευάστηκε μια άλλη Α/Γ στο Κλίβελαντ του Οχάιο⁷. Από το 1925 ανεμογεννήτριες ήταν διαθέσιμες για εμπορικούς σκοπούς στις ΗΠΑ. Η πρώτη Α/Γ που τροφοδότησε το *κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο* λειτούργησε στη Σοβιετική Ένωση το 1931. Από τότε αναπτύχθηκαν πολλά καινοτόμα είδη Α/Γ (όπως η Darrieus turbine ή ο Savonius rotor κ.λπ.), που δοκιμάστηκαν κυρίως σε μικρά ερευνητικά έργα. Η ενεργειακή κρίση του 1973 ώθησε αρκετά κράτη και τους αντίστοιχους επιστήμονες και μηχανικούς στην επιτάχυνση της έρευνας για το σχεδιασμό και την κατασκευή καινούριων, αποδοτικότερων Α/Γ που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν αποτελεσματικά στα κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα κάθε χώρας.

³ Στο Ackermann, 2012, αναφέρεται ότι κατακόρυφου άξονα ανεμόμυλοι χρησιμοποιούνταν για το άλεσμα σπόρων στα υψίπεδα του Αφγανιστάν από τον 7^ο αιώνα π.Χ.

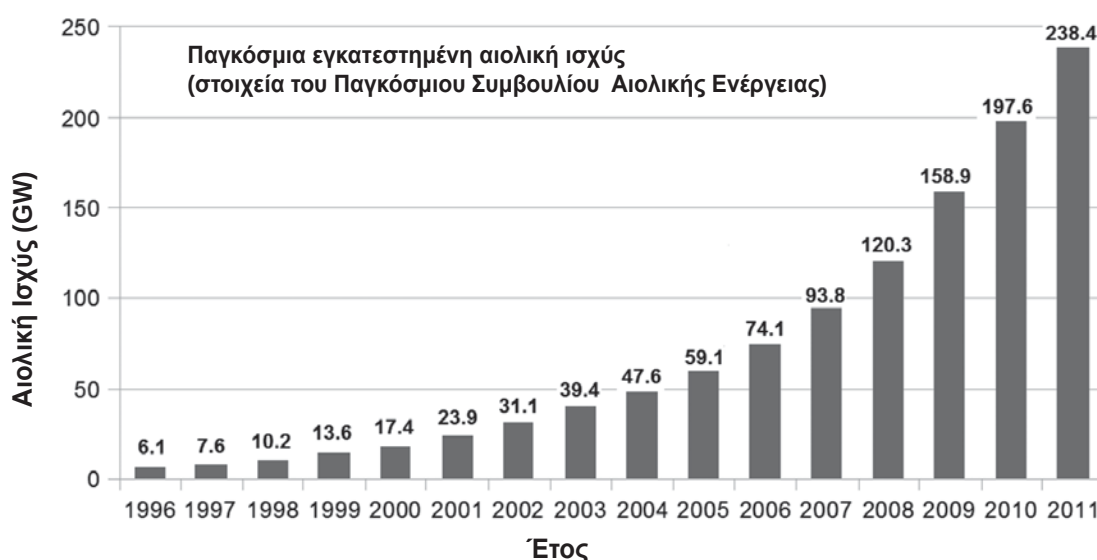
⁴ Sathyajith M., 2006, σελ. 2 και Ahmad Y Hassan, Donald Routledge Hill, 1986. *Islamic Technology: An illustrated history*, σελ. 54. Cambridge University Press. ISBN 0-521-42239-6.

⁵ A.G. Drachmann, 1961, *Heron's Windmill*, Centaurus, 7, σελ. 145-151 και Dietrich Lohrmann, 1995, *Von der östlichen zur westlichen Windmühle*, Archiv für Kulturgeschichte, Vol. 77, Issue 1, σελ. 1-30 (10f.).

⁶ Sathyajith M., 2006, σελ. 4.

⁷ Και τα δύο παραδείγματα αναφέρονται στο Sathyajith M., 2006, σελ. 4.

Το 2009 η εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών παγκοσμίως ήταν 159.313 MW⁸, ενώ η παραγωγή αιολικής ηλεκτρικής ενέργειας (390 TWh – 2009) ισοδυναμούσε με την ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση της Ιταλίας (7^η μεγαλύτερη οικονομία του κόσμου) ή διαφορετικά με το 2% της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης⁹. Οι χώρες με το μεγαλύτερο παγκοσμίως ποσοστό αιολικής ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική εγχώρια ηλεκτρική κατανάλωση είναι η Δανία (20%), η Πορτογαλία (15%), η Ισπανία (14%) και η Γερμανία (9%)¹⁰.



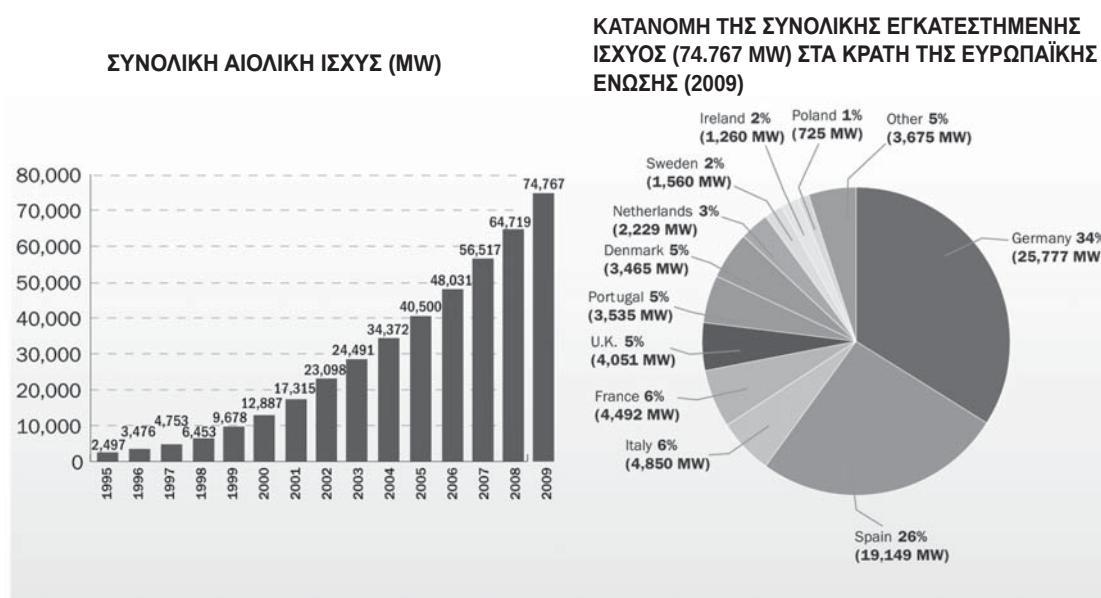
Σχήμα 5.1 Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε παγκόσμιο επίπεδο (σε GW) σύμφωνα με τα στοιχεία του Παγκόσμιου Συμβουλίου Αιολικής Ενέργειας [Global Wind Energy Council / GWEC). (Πηγή: commons.wikimedia.org)

⁸ World Wind Energy Association, *World Wind Energy Report 2009*, <http://www.wwindea.org/home/index.php> (18/10/2010).

⁹ Στην έκθεση της World Wind Energy Association για το 2009 (*World Wind Energy Report 2009*) μπορεί κάποιος να δει αναλυτικά στοιχεία για την παγκόσμια κατάσταση του τομέα της αιολικής ενέργειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι το 2009 οι ΗΠΑ βρίσκονταν στην κορυφή της κατάταξης για την εγκατεστημένη αιολική ισχύ (35.159 MW – 22,1% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος παγκοσμίως) και ακολουθούνται από την Κίνα (26.010 MW – 16,3%) και τη Γερμανία (25.777 MW – 16,2%). Η Κίνα εμφανίζεται ως η ατμομηχανή της παγκόσμιας ανάπτυξης της αγοράς αιολικής ενέργειας με τη μεγαλύτερη ετήσια (2009) αύξηση νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος. Τέλος η Ασία είναι η ήπειρος με τη μεγαλύτερη ετήσια (2009) αύξηση νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος με ποσοστό 40,4% και ακολουθούν η Βόρεια Αμερική (28,4%) και η Ευρώπη (27,3%).

¹⁰ World Wind Energy Association, *World Wind Energy Report 2009*, σελ. 9.

Στην Ευρώπη (EU-27)¹¹ το 2009 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς για την ηλεκτροπαραγωγή ήταν 821.006 MW με την εγκατεστημένη αιολική ισχύ (74.767 MW) να αυξάνει το ποσοστιαίο μερίδιό της και να φτάνει το 9.1%¹². Τα τελευταία 15 χρόνια στην Ευρώπη η μέση ετήσια αύξηση της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είναι 23%¹³. Η Γερμανία είναι η χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη αιολική ισχύ (25.777 MW – 34% της συνολικής ευρωπαϊκής αιολικής ισχύος), ενώ ακολουθούν η Ισπανία (19.149 MW – 26%) και η Ιταλία (4.850 MW – 6%) με την Γαλλία (4.492 MW – 6%). Η Ελλάδα με εγκατεστημένη ισχύ 1087 MW έχει το 1,5% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην EU-27. Το 2009 η εγκατεστημένη αιολική ισχύς (1.087 MW) στην Ελλάδα αποτελούσε περίπου το 11% της εγκατεστημένης ισχύος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.¹⁴



Σχήμα 5.2 Η εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ευρώπη (EU-27) σύμφωνα με τα στοιχεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας το 2009 [European Wind Energy Association /EWEA]. (Πηγή: EWEA)

¹¹ Τα 27 κράτη της ΕΕ.

¹² EWEA – European Wind Energy Association, *Pure Power – Wind Energy targets for 2020 and 2030*, http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/100401_General_Stats_2009.pdf, (18/10/2010).

¹³ EWEA – European Wind Energy Association.

¹⁴ Για πιο πρόσφατα στοιχεία βλέπε την έκθεση της EWEA (European Wind Energy Association) για το 2011 http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/reports/EWEA_Annual_Report_2011.pdf.

Η ταχύτατη ανάπτυξη των Α/Γ στηρίχθηκε σε μια σειρά από πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η αιολική ενέργεια ως ΑΠΕ, αλλά και σε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της, τα οποία έγιναν φανερά βαθμιαία, ιδιαίτερα από το 1980 και μετά. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν:

- Ο άνεμος είναι διαθέσιμη ΑΠΕ (σε αξιοποιήσιμη ένταση) σε πάρα πολλές χώρες.
- Η λειτουργία των Α/Γ μειώνει τις εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου.
- Η τεχνολογία κατασκευής Α/Γ ωρίμασε γρήγορα και μπόρεσε να δημιουργήσει μεγάλης ισχύος Α/Γ που ενσωματώνονται σχετικά εύκολα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.
- Η αξιοπιστία των Α/Γ συνεχώς μεγαλώνει, ενώ βελτιώνονται και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά τους (όπως, π.χ., η παραγωγή λιγότερου θορύβου).
- Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ μειώνεται συνεχώς (ανταγωνίζεται ακόμα κι αυτό των συμβατικών καυσίμων).

Στις ενότητες που ακολουθούν¹⁵ παρουσιάζεται η αιολική ενέργεια και οι Α/Γ σε δύο βασικές ενότητες (5.2 Βασικές αρχές, 5.3 Τεχνική περιγραφή). Στο 5.2 παρουσιάζονται οι βασικές φυσικές και τεχνολογικές αρχές που συνδέονται με την αιολική ενέργεια. Αρχικά παρουσιάζεται το ίδιο το φαινόμενο του ανέμου και στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην αιολική ισχύ και την αξιοποίησή της από τις Α/Γ. Επίσης παρουσιάζονται βασικές αρχές της αεροδυναμικής που συνδέονται με τη λειτουργία των Α/Γ. Στο 5.3 γίνεται η τεχνική περιγραφή όλων των θεμάτων που αφορούν τις ξεχωριστές Α/Γ, στα αιολικά πάρκα, όπως και τα απομονωμένα και υβριδικά αιολικά συστήματα.

¹⁵ Σε εξειδικευμένα βιβλία που αφορούν μόνο την αιολική ενέργεια και τα συστήματα ενεργειακής μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια μπορεί ο αναγνώστης να βρει μεγαλύτερη και λεπτομερέστερη ανάλυση. Όπως γράφεται και στον πρόλογο, η πλήρης (όσο το δυνατόν) παρουσίαση όλων των κύριων μορφών ΑΠΕ μπορεί να γίνει, σε λογική έκταση, μόνο με αυτοπεριορισμό της έκτασης κάθε ξεχωριστού κεφαλαίου.

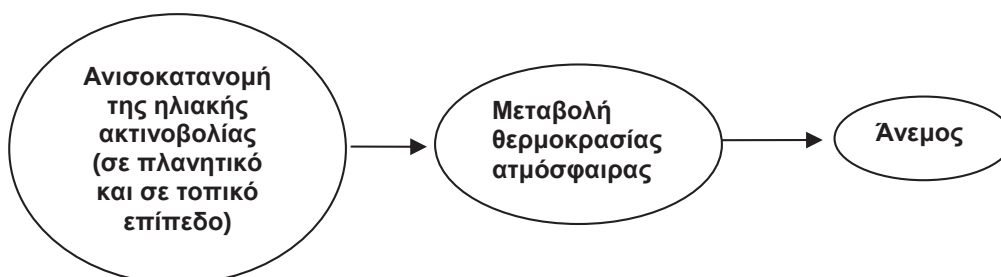
5.2 Βασικές Αρχές

Η ανεμογεννήτρια [wind turbine] είναι τεχνική διάταξη που αξιοποιεί μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου μετατρέποντάς την αρχικά σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Στις αμέσως επόμενες ενότητες θα περιγραφούν οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν αυτήν τη μετατροπή.

5.2.1 Φυσικές και μετεωρολογικές αρχές δημιουργίας των ανέμων

Άνεμος ονομάζεται η κίνηση αέριας μάζας σε σχέση με την επιφάνεια της Γης. Οι άνεμοι δημιουργούνται εξαιτίας μεταβολών στη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας. Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα μεταβάλλεται εξαιτίας της ανομοιόμορφης θέρμανσης από την ηλιακή ακτινοβολία των διαφόρων περιοχών της Γης, καθώς και των διαφορετικών ατμοσφαιρικών στρωμάτων. Συγκεκριμένα, επειδή οι περιοχές κοντά στον ισημερινό της Γης θερμαίνονται περισσότερο από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τις άλλες περιοχές μεγαλύτερου γεωγραφικού πλάτους, παρατηρείται μια μακροσκοπική συνεχή κίνηση αέριων μαζών μεταξύ ισημερινού και πόλων, η οποία επηρεάζεται ταυτόχρονα από την περιστροφή της Γης (γύρω από τον άξονά της) και τη συνεπαγόμενη δύναμη Coriolis. Αυτός είναι ο γενικός μηχανισμός της γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας. Σε τοπικό επίπεδο η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου (εκτός από τη γενικότερη ατμοσφαιρική κυκλοφορία) επηρεάζονται και από διάφορους τοπικούς παράγοντες (όπως το ανάγλυφο της ευρύτερης περιοχής, η γειτνίαση με θάλασσα ή μεγάλες υδάτινες επιφάνειες, όπως λίμνες ή ποτάμια κ.λπ.).

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τη σχέση που μόλις περιγράφηκε. Απ' αυτό φαίνεται ότι τελικά η δημιουργία των ανέμων προέρχεται πρωταρχικά από την ανισοκατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στη Γη¹⁶.



¹⁶ Μεγαλύτερη ανάλυση της γενικής ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας μπορεί να βρει ο αναγνώστης σε εξειδικευμένα βιβλία μετεωρολογίας ή αιολικής ενέργειας, όπως, π.χ., Boyle et al, 2004, σελ. 245-247, Manwell et al, 2002, σελ. 22-37.

Η γενική φυσική αρχή που ισχύει για την κίνηση (λόγω διαφοράς θερμοκρασίας) μιας αέριας μάζας μέσα στην ατμόσφαιρα είναι ότι ο αέρας που θερμαίνεται (θερμός αέρας) γίνεται αραιότερος ή ελαφρύτερος από τις ψυχρότερες γειτονικές μάζες αέρα (ψυχρός αέρας) και ανυψώνεται, ενώ οι γειτονικές ψυχρές αέριες μάζες παίρνουν τη θέση του. Συνεπώς (σε μια απλουστευτική διατύπωση) κινούνται ανοδικά οι θερμότερες αέριες μάζες και οριζόντια οι ψυχρότερες. Αυτός ο μηχανισμός ουσιαστικά εξηγεί τις οριζόντιες και τις κατακόρυφες κινήσεις των αέριων μαζών, όπως, για παράδειγμα, την κίνηση αέριων μαζών μεταξύ ξηράς και θάλασσας σε χαμηλά ύψη. Κατά τη διάρκεια της ημέρας το έδαφος θερμαίνεται περισσότερο από τον ήλιο σε σχέση με τη θάλασσα. Έτσι, ο αέρας πάνω από το έδαφος ανυψώνεται, ενώ ψυχρότερες αέριες μάζες έρχονται από τη θάλασσα (λόγω διαφοράς πίεσης) για να πάρουν τη θέση του¹⁷. Τις βραδινές ώρες έχουμε το αντίστροφο φαινόμενο, καθώς η ξηρά ψύχεται με ταχύτερο ρυθμό από τη θάλασσα¹⁸.

5.2.2 Τοπικοί παράγοντες επίδρασης στην κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου

Όπως ήδη προαναφέρθηκε, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου επηρεάζονται ισχυρά από τοπικές ιδιομορφίες (ιδιαίτερα στο αέριο στρώμα 0-100 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, που είναι κυρίως αυτό που ενδιαφέρει για την αξιοποίηση της αιολικής ισχύος από τις Α/Γ). Ενδεικτικά παραδείγματα που δείχνουν τη σημασία των τοπικών ιδιομορφιών κάθε περιοχής στη δημιουργία ανέμων και της επίδρασής τους στην ταχύτητα και τη διεύθυνση των ανέμων είναι τα παρακάτω:

- η δημιουργία ανέμου εξαιτίας της γειτνίασης μιας περιοχής με τη θάλασσα
- η δημιουργία ανέμου σε ορεινές κοιλάδες ή φαράγγια¹⁹
- η επιτάχυνση του ανέμου σε ορεινά διάσελα²⁰.

¹⁷ Αυτός ο άνεμος συνήθως ονομάζεται θαλάσσια αύρα.

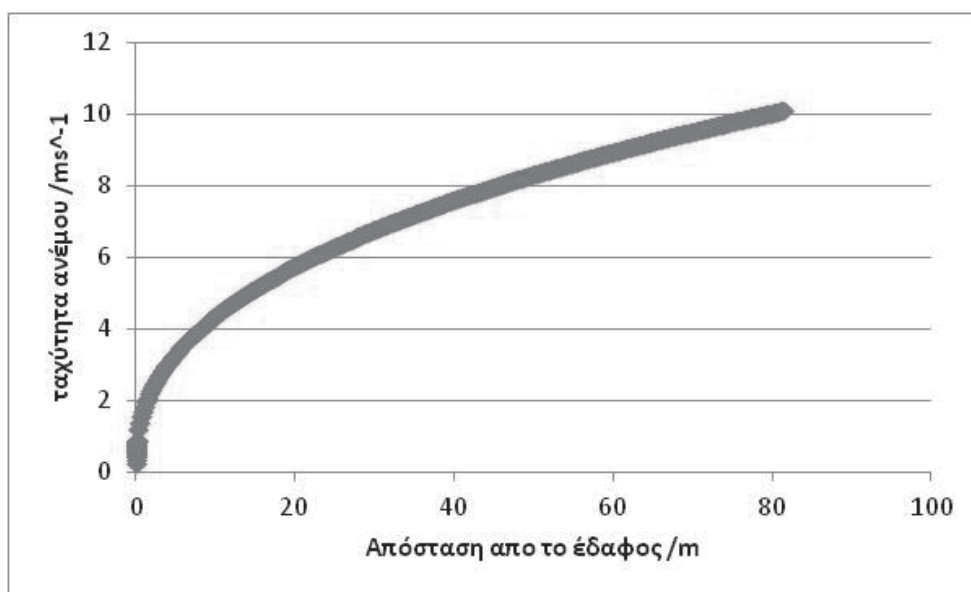
¹⁸ Απόγεια αύρα.

¹⁹ Ο άνεμος αυτός δημιουργείται εξαιτίας της μεγαλύτερης ημερήσιας θέρμανσης του αέρα που βρίσκεται μέσα στις κοιλάδες ακριβώς πάνω από το έδαφος σε σχέση με τον αέρα που βρίσκεται ψηλότερα. Έτσι κατά τη διάρκεια της ημέρας άνεμος ανεβαίνει από τις κοιλάδες προς τις πλαγιές των βουνών (θερμές μάζες αέρα ανυψώνονται και ψυχρές παίρνουν την θέση τους) ενώ την νύχτα που ο αέρας ψυχραίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό στα βουνά συμβαίνει το αντίστροφο φαινόμενο (καταβατικός άνεμος από το βουνό προς τις κοιλάδες).

²⁰ Για περισσότερα βλ. Sathyajith M., 2006, σελ. 51.

α) Εξάρτηση ταχύτητας του ανέμου από το ύψος / Επίδραση τραχύτητας εδάφους

Η ροή του αέρα κοντά στο έδαφος επηρεάζεται από την τριβή που προκαλείται λόγω της επαφής του με αυτό (έδαφος), όπως και από εμπόδια που βρίσκει κατά τη διέλευσή του (βλάστηση, κτίρια κ.λπ.). Συνεπώς, η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από την τραχύτητα [roughness] του εδάφους. Θεωρητικά η ταχύτητα του ανέμου στο έδαφος είναι μηδέν και αυξάνεται σε συνάρτηση με το ύψος (μέχρι κάποια συγκεκριμένη απόσταση από το έδαφος). Η παρακάτω γραφική παράσταση (Σχήμα 5.3) δείχνει μια τυπική εκθετική συνάρτηση εξάρτησης της ταχύτητας v του ανέμου με το ύψος h (απόσταση από το έδαφος) σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται κυρίως απ' την τραχύτητα [roughness] του εδάφους.



Σχήμα 5.3 Εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου από την απόσταση απ' το έδαφος.

Η πιο συνηθισμένη μαθηματική σχέση που συνδέει την εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος²¹ είναι:²²

$$v(z) = v_r (z/z_r)^a$$

²¹ Συχνά στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται και άλλες μαθηματικές σχέσεις, όπως λογαριθμικές, π.χ., βλ. Sathyajith M., 2006 και Καλδέλλης, 1999.

²² Ackermann, 2012.

όπου

$v_{(z)}$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z^{23}

v_r : η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς z_r

a : συντελεστής τραχύτητας του εδάφους

Ο συντελεστής τραχύτητας του εδάφους είναι καθαρός αριθμός, που, όπως υποδηλώνει και η ονομασία του, προσδιορίζει την τραχύτητα του εδάφους και παίρνει τιμές από 0 (στην επιφάνεια της θάλασσας) έως 2 (στο κέντρο μιας πόλης). Μερικές τυπικές τιμές του a είναι 0,025-0,1 για ανοικτές επίπεδες περιοχές με γρασίδι-χόρτα, 0,2-0,3 για περιοχές με χαμηλά δέντρα κ.λπ.²⁴. Όσο μεγαλύτερος είναι ο a τόσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα του εδάφους και τόσο πιο ισχυρά εξαρτάται η ταχύτητα από το ύψος.

β) Στροβιλισμός [turbulence]

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του αέρα μεταβάλλονται με γρήγορο ρυθμό όταν διασχίζει ανώμαλες-τραχιές επιφάνειες ή συναντά εμπόδια (δέντρα, κτίρια κ.λπ.). Αυτό οφείλεται στη δημιουργία στροβίλων. Η δημιουργία στροβιλισμού στον άνεμο μειώνει τη διαθέσιμη χρήσιμη αιολική ισχύ και προσθέτει φορτία κόπωσης στις Α/Γ. Συνεπώς, πριν τη χωροθέτηση των Α/Γ χρειάζεται η προσεκτική μελέτη των εμποδίων και της επιφάνειας του εδάφους για να γίνει εκτίμηση των πιθανοτήτων δημιουργίας στροβιλισμού²⁵.

γ) Χρονικές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου μεταβάλλονται χρονικά (συχνά με γρήγορο ρυθμό ή συχνότητα), με συνέπεια τη μεταβολή της διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Οι μεταβολές της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου μπορεί να είναι στιγμιαίες, να είναι μεταβολές μεταξύ ημέρας και νύχτας, εποχιακές μεταβολές ή ακόμα και μεταβολές μέσα σε διαδοχικές χρονιές ή δεκαετίες. Ο βασικός λόγος στον οποίο αποδίδονται τέτοιες μεταβολές είναι το γενικότερο κλίμα, καθώς και το μικροκλίμα της περιοχής. Η γνώση των μεταβολών αυτών αποτελεί μια από τις προϋποθέσεις για την ορθή χωροθέτηση των Α/Γ, καθώς και των τεχνικών χαρακτηριστικών που θα έχουν.

²³ Στην περίπτωση υπολογισμού της ταχύτητας του ανέμου για την εγκατάσταση Α/Γ το ύψος z είναι το ύψος στο οποίο θα βρίσκεται ο ρότορας της Α/Γ (δηλαδή ουσιαστικά το κέντρο περιστροφής των πτερυγίων της) και z_r το ύψος στο οποίο έχουμε τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου από τα ανεμόμετρα (συνήθως 10 m).

²⁴ Περισσότερα βλ. Sathyajith M., 2006 και Καλδέλλης, 1999.

²⁵ Για περισσότερα βλ. Sathyajith M., 2006, Manwell J.F. et al, 2002, Burton T. et al, 2001, Καλδέλλης, 1999.

5.2.3 Μέτρηση ταχύτητας του ανέμου/Στατιστικά μοντέλα ανάλυσης δεδομένων

Όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, η (όσο το δυνατόν) ακριβέστερη γνώση των στοιχείων της ταχύτητας του ανέμου (μέτρο και κατεύθυνση) και η κατανομή τους στο χρόνο (σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα) είναι βασική προϋπόθεση για την πετυχημένη επιλογή του τόπου εγκατάστασης Α/Γ²⁶. Μια πρώτη ένδειξη μπορεί να ληφθεί από μέτρηση γειτονικών (ως προς τον πιθανό τόπο επιλογής) μετεωρολογικών σταθμών. Για την τελική απόφαση όμως χρειάζονται μετρήσεις ακριβώς στη συγκεκριμένη περιοχή (in situ), οι οποίες πρέπει να διεξαχθούν με ακριβή και αξιόπιστα όργανα μέτρησης. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου (μέτρο και κατεύθυνση) ονομάζονται ανεμόμετρα. Υπάρχουν πολλών τύπων ανεμόμετρα²⁷ (cup anemometer, propeller anemometer, pressure plate anemometer κ.λπ.) τα οποία μπορούν να εγκατασταθούν σε μια υποψήφια περιοχή. Το ιδανικό είναι να εγκατασταθούν στο ύψος των πιθανών Α/Γ έτσι ώστε τα δεδομένα να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην πραγματικότητα. Αυτό πολλές φορές δεν είναι δυνατόν. Η συνηθέστερη πρακτική είναι να εγκαθίστανται σε κάποιο ύψος (συνήθως 10 m) και στη συνέχεια μέσω μαθηματικών τύπων (όπως αυτού που αναφέρθηκε προηγουμένως) ή πιο πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων να αναχθούν τα δεδομένα στο επιθυμητό ύψος²⁸. Απαιτείται συγκέντρωση δεδομένων για περισσότερο από ένα έτος για να δημιουργηθεί το προφίλ του αιολικού δυναμικού της περιοχής και να προβληθεί στο μέλλον με μια ακρίβεια της τάξεως του 10%²⁹.

Από τα δεδομένα που συγκεντρώνονται μπορεί να υπολογιστεί η μέση ταχύτητα του ανέμου (καθώς και της τυπικής απόκλισης σ [standard deviation]) σε διάφορες χρονικές περιόδους (συνήθως ανά 10 min) και να δημιουργηθούν κατανομές ταχυτήτων σε ημερήσια, εβδομαδιαία και μηνιαία βάση.

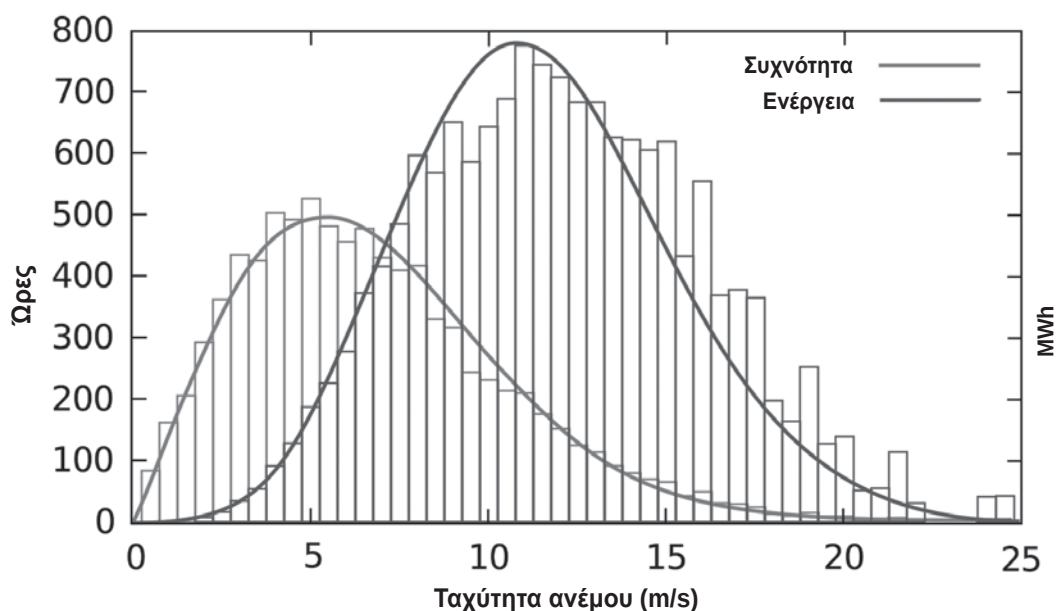
²⁶ Η εξάρτηση της αιολικής ισχύος από την ταχύτητα είναι στην τρίτη δύναμη ($P_a = \frac{1}{2} \rho_a A v^3$). Συνεπώς, υπάρχει εκθετική σύνδεση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της αναμενόμενης αιολικής ισχύος.

²⁷ Για λεπτομέρειες βλ. Sathyajith M., 2006, σελ. 55-61, Manwell J.F. et al, 2002, σελ. 68-78.

²⁸ Μετρήσεις που γίνονται σε επίπεδα, σχετικά ομοιόμορφα πεδία (όπως, π.χ., σε πεδιάδες της Γερμανίας, της Δανίας κ.λπ.) έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες να ανταποκρίνονται στα πραγματικά δεδομένα που «συναντούν» οι εγκατεστημένες Α/Γ. Αντίθετα σε σύνθετα πεδία (όπου υπάρχει έντονο ανάγλυφο και διαφοροποιήσεις, όπως σε ορισμένα μέρη της Ελλάδας) οι πιθανότητες απόκλισης από την πραγματικότητα μεγαλώνουν (βλ. Ackermann, 2012).

²⁹ Sathyajith M., 2006, σελ. 63.

Για τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων και την εισαγωγή τους σε λογισμικά επεξεργασίας χρειάζεται να γίνει προσαρμογή [fitting] με στατιστική κατανομή [statistical distribution]. Οι πιο συνηθισμένες στατιστικές κατανομές που χρησιμοποιούνται είναι η κατανομή Weibull και η κατανομή Rayleigh³⁰. Με βάση τα λογισμικά επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων [raw data] της κατανομής των ταχυτήτων του ανέμου σε μια περιοχή, υπολογίζεται το αιολικό δυναμικό της περιοχής και οι κατανομές των πιθανοτήτων για το εύρος της αιολικής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από τις Α/Γ.



Σχήμα 5.4 Κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (κόκκινο) και της ενέργειας που παράγεται (μπλε) για ολόκληρο το 2002 στις εγκαταστάσεις αιολικού πάρκου στο Ranch Lee (Κολοράντο, ΗΠΑ). Το ιστογράμμο δείχνει μετρούμενα δεδομένα, ενώ η καμπύλη είναι η κατανομή Rayleigh για την ίδια μέση ταχύτητα του ανέμου. Η συνολική ενέργεια για το έτος ήταν 15,4 GWh.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

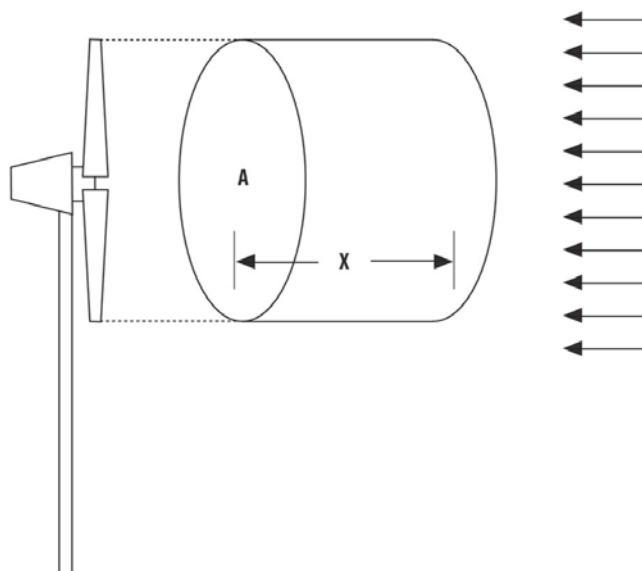
³⁰ Για λεπτομέρειες βλ. Sathyaajith M., 2006, σελ. 68-80.

5.2.4 Κινητική ενέργεια ανέμου/ιδανικός (μέγιστος) συντελεστής απόδοσης Α/Γ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της αιολικής ενέργειας, καθώς και του ποσοστού αυτής της ενέργειας που μπορεί να αξιοποιήσει μια Α/Γ μετατρέποντάς την αρχικά σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων της και στη συνέχεια (μέσω της γεννήτριας [generator]) σε ηλεκτρική ενέργεια.



Έστω μάζα αέρα m (ένα πακέτο αέρα όγκου V), η οποία κινείται με ταχύτητα v προς Α/Γ ενεργού διατομής A ³¹, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5 Μάζα αέρα m που κινείται με ταχύτητα v προς την Α/Γ.

³¹ Ουσιαστικά είναι η επιφάνεια που σαρώνουν τα πτερύγια της Α/Γ.

Η κινητική ενέργεια αυτής της μάζας αέρα δίνεται από τη γνωστή σχέση:

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \text{ (ή } E_k = \frac{1}{2} m v^2 \text{)}^{32}$$

Επειδή η μάζα του αέρα είναι:

$$m = \rho_a V$$

όπου

ρ_a = πυκνότητα αέρα και

V = ο όγκος της μάζας m .

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί:

$$K = \frac{1}{2} \rho_a V v^2$$

Όμως

$$V = A \cdot dx$$

όπου dx = η απόσταση που διανύει η μάζα m σε χρονικό διάστημα dt .

Η παράγωγος της K δίνει την ισχύ P_a (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) της μάζας m (που είναι ουσιαστικά η αιολική ισχύς):

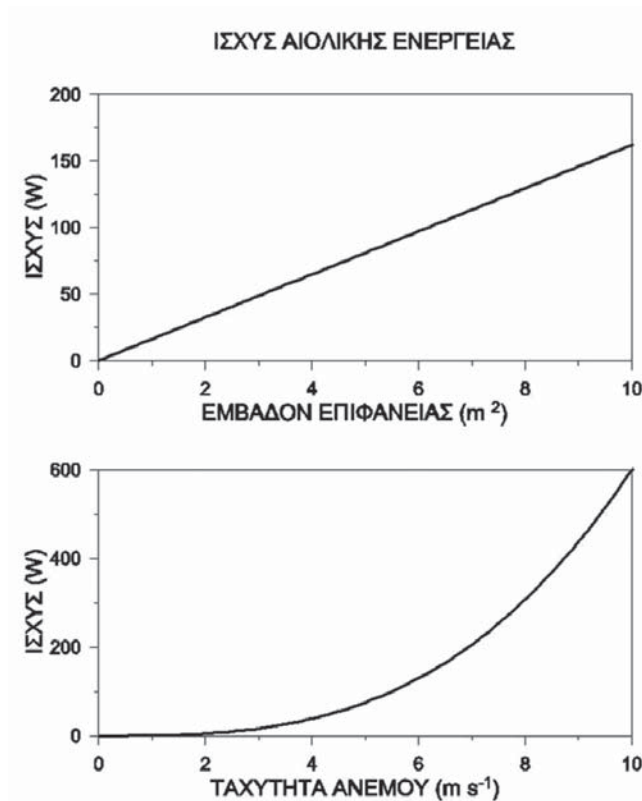
$$dK/dt = \frac{1}{2} \rho_a A dx/dt v^2$$

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A v v^2$$

$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A v^3 \quad (5.1)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου (αιολική ισχύ) είναι η πυκνότητά του ρ_a , η ενεργός διατομή A (επιφάνεια) της A/Γ και η ταχύτητα του ανέμου (που είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας, καθώς είναι υψωμένος στην τρίτη δύναμη).

³² Η κινητική ενέργεια στα περισσότερα ελληνικά βιβλία συμβολίζεται με E_k , ενώ στα περισσότερα ξενόγλωσσα με K . Σε όλους σχεδόν τους κλάδους της επιστήμης και τεχνολογίας υπάρχει μερικές φορές ασυμφωνία μεταξύ των συμβόλων που χρησιμοποιούνται για τις ίδιες έννοιες στην ελληνική και τη διεθνή βιβλιογραφία (το πιο κλασικό παράδειγμα είναι η έννοια της επιτάχυνσης που διεθνώς συμβολίζεται με a , ενώ στην Ελλάδα για πάρα πολλά χρόνια με γ). Αυτό συμβαίνει για μια σειρά λόγους που αναφέρονται στο παράρτημα ΜΟΡΦΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ / ΔΙΑΚΡΙΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-ΙΣΧΥΟΣ / ΜΟΝΑΔΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ, το οποίο υπάρχει στο τέλος του βιβλίου. Στο παρόν βιβλίο υιοθετούνται τα διεθνή σύμβολα (για να είναι ευκολότερη η επικοινωνία των αναγνωστών με τη διεθνή βιβλιογραφία), ενώ σε περιπτώσεις όπου και στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν διαφορετικά σύμβολα για το ίδιο φυσικό μέγεθος γίνεται η πιο κατάλληλη (όπως θεωρούμε) επιλογή συμβόλου.



Σχήμα 5.6 Η εξάρτηση της ισχύος του ανέμου από το εμβαδόν της επιφάνειας και την ταχύτητά του.

Η θερμοκρασία του αέρα, η ατμοσφαιρική πίεση, το υψόμετρο, όπως και η σύσταση του αέρα επηρεάζουν την πυκνότητά του και συνεπώς και την αιολική ισχύ³³.

Η παραπάνω αιολική ισχύς δεν είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί ολοκληρωτικά από την Α/Γ. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι ο αέρας, ο οποίος θα έφτανε με αρχική ταχύτητα v_i στα περύγια της Α/Γ, θα περνούσε και θα έφευγε με μηδενική ταχύτητα ($v_f = 0$). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβαίνει. Στην πραγματικότητα μετά το πέρασμά του από τα περύγια ο αέρας συνεχίζει να έχει μια ταχύτητα $v_f \neq 0$. Συνεπώς, στην ιδανική περίπτωση, η κινητική ενέργεια η οποία μεταφέρεται στα περύγια της Α/Γ από τον άνεμο (υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας περιστροφής των πτερυγίων) είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής κινητικής ενέργειας του ανέμου, δηλαδή:

$$\Delta K = K_i - K_f = \frac{1}{2} m v_i^2 - \frac{1}{2} m v_f^2 \quad ^{34}$$

³³ Η πυκνότητα είναι συνάρτηση της ατμοσφαιρικής πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα και τα δύο μεγέθη (πίεση, θερμοκρασία) είναι συνάρτηση του ύψους. Συνεπώς, και η ταχύτητα του αέρα εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση και τη θερμοκρασία του αέρα.

³⁴ Όπου οι δείκτες i , f σημαίνουν αντίστοιχα initial = αρχική και final = τελική.

Συνεπώς η μέγιστη αιολική ισχύ $P_{\text{mech(max)}}$ που μπορεί να αξιοποιηθεί από την Α/Γ θα είναι (στην ιδανική περίπτωση) η χρονική παράγωγος της παραπάνω σχέσης, δηλαδή:

$$P_{\text{mech(max)}} = d(\Delta K)/dt.$$

Στην πραγματικότητα η αιολική ισχύς P_{mech} που αξιοποιεί η Α/Γ (δηλαδή η μηχανική ισχύς περιστροφής των πτερυγίων) είναι μικρότερη από την $P_{\text{mech(max)}}$ εξαιτίας πολλών παραγόντων (π.χ., της θερμότητας που αναπτύσσεται στα πτερύγια της Α/Γ καθώς ο άνεμος περνάει από μέσα). Η αποτελεσματικότητα με την οποία η Α/Γ αξιοποιεί την αιολική ισχύ δίνεται από ένα καθαρό αριθμό που ονομάζεται *συντελεστής απόδοσης (ισχύος) της Α/Γ* c_p και είναι ίσος με το πηλίκο της μηχανικής³⁵ ισχύος P_{mech} της Α/Γ προς την αιολική ισχύ P_a .

$$c_p = P_{\text{mech}} / P_a \text{ και από (5.1)}$$

$$c_p = 2P_{\text{mech}} / \rho_a A v^3$$

Συνεπώς η ισχύς του αέρα που μπορεί να αξιοποιήσει μια Α/Γ και η οποία είναι ουσιαστικά ο ρυθμός παραγωγής μηχανικής ενέργειας περιστροφής πάνω στα πτερύγια της δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} P_{\text{mech}} &= c_p P_a \\ P_{\text{mech}} &= c_p \frac{1}{2} \rho_a A v^3 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Αποδεικνύεται³⁶ ότι ο μέγιστος (θεωρητικά) συντελεστής απόδοσης (ισχύος) μιας Α/Γ

$$c_{p(\text{max})} = P_{\text{mech(max)}} / P_a$$

είναι ίσος με

$$c_{p(\text{max})} = 16/27 = 0,593 \quad (5.3)$$

και επιτυγχάνεται όταν η σχέση ταχύτητας εισόδου του αέρα στην τουρμπίνα v_i προς την ταχύτητα εξόδου v_f είναι $3/1$ ³⁷. Ο συντελεστής αυτός λέγεται και συ-

³⁵ Η μηχανική ισχύς που παράγει η Α/Γ στη συνέχεια μετατρέπεται, με ένα ποσοστό μετατροπής, σε ηλεκτρική ενέργεια.

³⁶ Βλ., π.χ., Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 298-300.

³⁷ Δηλαδή η μέγιστη αιολική ισχύς που μπορεί μια Α/Γ να μετατρέψει σε μηχανική ισχύ περιστροφής των πτερυγίων είναι $P_{T(\text{max})} = \frac{1}{2} \rho_a A v^3 c_{p(\text{max})} = (\frac{1}{2} \rho_a A v^3) 0,593$. Δηλαδή μόνο το ~60% της διαθέσιμης αιολικής ισχύος μπορεί (θεωρητικά, καθώς πρακτικά η τιμή είναι μικρότερη) να μετατραπεί σε μηχανική ισχύ (αυτό το ποσοστό μικραίνει ακόμα περισσότερο για τη διαθέσιμη τελική ηλεκτρική ισχύ).

ντελεστής *Benz* προς τιμήν του Albert Benz που το 1920 δημοσίευσε³⁸ πρώτος τη θεωρητική απόδειξη αυτή της ιδανικής απόδοσης³⁹.

Ο c_p μιας Α/Γ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων, η διάταξη των πτερυγίων, η ταχύτητα του ανέμου κ.λπ. Επιδίωξη των σχεδιαστών-κατασκευαστών των Α/Γ είναι να μπορεί η Α/Γ να επιτυγχάνει μέγιστο c_p σε ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων του ανέμου.

Εκτός από το συντελεστή απόδοσης (ισχύος) c_p μπορεί να οριστεί κι ένας συντελεστής απόδοσης ροπής C_T που είναι μέτρο αξιοποίησης, από τη δεδομένη Α/Γ, της ροπής που αναπτύσσεται στα πτερύγιά της. Αυτός ορίζεται με την ίδια λογική που ορίστηκε ο συντελεστής απόδοσης (ισχύος), δηλαδή ως το πηλίκο της πραγματικής ροπής που αναπτύσσεται στα πτερύγια της Α/Γ προς τη μέγιστη (θεωρητικά) ροπή, δηλαδή:

$$\begin{aligned} C_T &= T / T_{\max} \\ C_T &= T / \frac{1}{2} \rho_a A v^2 R \\ C_T &= 2T / \rho_a A v^2 R \end{aligned} \quad (5.4)$$

όπου

- T : πραγματική ροπή,
- $T_{\max}$: μέγιστη (θεωρητικά) ροπή,
- R : ακτίνα του ρότορα (μήκος πτερυγίου).

Η πραγματική ισχύς που παράγει η Α/Γ εξαρτάται από την αριθμητική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων της Α/Γ. Ο (καθαρός) αριθμός που δίνει τη σχέση μεταξύ των δύο ταχυτήτων ονομάζεται παράμετρος περιστροφής (tip speed ratio) (λ) και είναι ίσος με το πηλίκο της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων της Α/Γ προς την ταχύτητα του ανέμου:

$$\lambda = \omega R / v \quad (5.5)$$

όπου

- ω : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων,
- R : το μήκος των πτερυγίων (ωR , η γνωστή σχέση που δίνει τη γραμμική ταχύτητα),
- v : η ταχύτητα του ανέμου.

³⁸ Betz, A., Das Maximum der theoretischen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren, Zeitschrift fur das gesamte Turbinenwesen, 20.9.1920).

³⁹ Στα περισσότερα βιβλία δεν αναφέρεται ότι στην ανάλυσή του ο A. Benz δεν έλαβε υπόψη του το στροβιλισμό του αέρα και τις αναπόφευκτες απώλειες ισχύος που δημιουργεί. Ο στροβιλισμός του αέρα μειώνει λίγο το $c_{p(\max)}$ για Α/Γ με μεγάλη παράμετρο περιστροφής [tip speed ratio] $\lambda > 3$, ενώ για Α/Γ με χαμηλό λ (~ 1) το $c_{p(\max)}$ γίνεται $\sim 0,42$ (Ackermann, 2012).

Τόσο ο συντελεστής απόδοσης (ισχύος) c_p όσο και ο συντελεστής απόδοσης ροπής C_T εξαρτώνται από το λ . Για κάθε A/Γ υπάρχει μια ιδανική τιμή για το λ^{40} όπου η μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο προς την A/Γ είναι μέγιστη και ο συντελεστής απόδοσης ισχύος c_p παίρνει τη μέγιστη τιμή του.

Η σχέση που συνδέει μεταξύ τους τα c_p , C_T και λ είναι η παρακάτω:

$$c_p / C_T = \omega R / v = \lambda \quad (5.6)$$

5.2.5 Βασικές αρχές αεροδυναμικής που αφορούν τις A/Γ

Οι μετατροπείς αιολικής ενέργειας (A/Γ) που έχουν κατασκευαστεί κατά τη διάρκεια των αιώνων μπορούν να διαχωριστούν σε μηχανές ανύψωσης [lift machines]⁴¹, που αξιοποιούν τις δυνάμεις ανύψωσης⁴² [lift forces] για την περιστροφή των πτερυγίων, και μηχανές αντίστασης [drag machines], που αξιοποιούν τις δυνάμεις αντίστασης⁴³ [drag forces] για την περιστροφή των πτερυγίων⁴⁴. Οι A/Γ οριζόντιου άξονα⁴⁵ που αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων A/Γ είναι μηχανές ανύψωσης, καθώς αυτές εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερους συντελεστές απόδοσης ισχύος από τις μηχανές αντίστασης. Γι' αυτό θα παρουσιαστεί (με συντομία) η βασική αρχή δημιουργίας και λειτουργίας των ανυψωτικών δυνάμεων χωρίς να γίνει προσφυγή σε μαθηματικές λεπτομέρειες⁴⁶.

Τα πτερύγια των A/Γ κατασκευάζονται σύμφωνα με τις αρχές της αεροδυναμικής, έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν τις δυνάμεις ανύψωσης που δημιουργούνται καθώς ο αέρας προσκρούει πάνω τους.

Οι δυνάμεις ανύψωσης δημιουργούν την απαραίτητη ροπή για την περιστροφή των πτερυγίων. Πώς όμως δημιουργούνται οι δυνάμεις ανύψωσης; Ένα απλό θεωρητικό υπόδειγμα παρουσιάζεται παρακάτω.

⁴⁰ Χαμηλές τιμές του λ σημαίνει ότι τμήμα του ανέμου εισέρχεται στην ενεργό διατομή (A) της A/Γ χωρίς τα πτερύγια να αλληλεπιδρούν μ' αυτόν (με αποτέλεσμα να μην αξιοποιούν την ισχύ του), ενώ υψηλές τιμές του λ σημαίνει ότι οι δυνάμεις αντίστασης που δημιουργούνται στα πτερύγια είναι μεγάλες, με αποτέλεσμα να χάνεται αιολική ισχύς που, διαφορετικά, θα μπορούσε να είναι αξιοποιήσιμη.

⁴¹ A/Γ ανύψωσης.

⁴² Δυναμική άνοση.

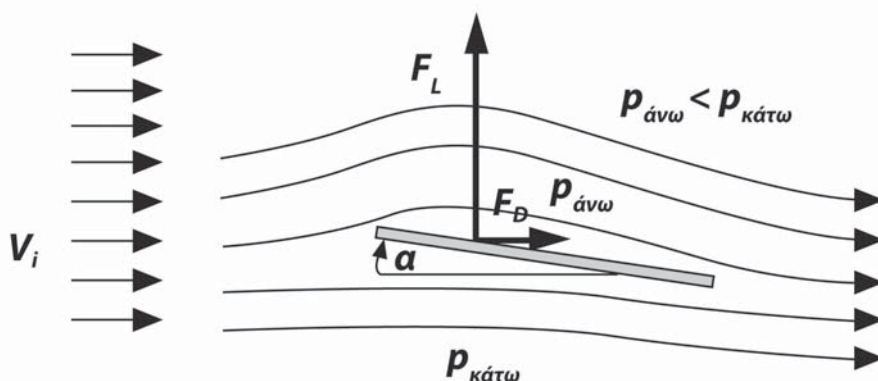
⁴³ Ιξώδης αντίσταση.

⁴⁴ Οι κλασικοί-παραδοσιακοί ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα είναι A/Γ αντίστασης.

⁴⁵ Για το βασικό διαχωρισμό μεταξύ A/Γ οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα βλέπε σελ. 199, 202.

⁴⁶ Η πραγμάτευση αυτών των θεμάτων αποτελεί ουσιαστικά αντικείμενο της ρευστομηχανικής και ιδιαίτερα της αεροδυναμικής. Σε περισσότερο εξειδικευμένα βιβλία μπορείτε να βρείτε αναλυτικότερες παρουσιάσεις τόσο των ανυψωτικών δυνάμεων όσο και των βασικών αρχών λειτουργίας των λεγόμενων drag machines. Ενδεικτικά αναφέρουμε Sathyajith M., 2006, σελ. 23-34, Manwell et al, σελ. 95-105, Burton T. et al, σελ. 156-172.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε την τομή ενός πτερυγίου Α/Γ, στο οποίο ο άνεμος προσκρούει με ταχύτητα v_i , υπό γωνία α , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7 Η εμφάνιση των δυνάμεων ανύψωσης F_L και αντίστασης F_D κατά τη διέλευση του ανέμου από το πτερύγιο μιας Α/Γ.

Ο άνεμος διαχωρίζεται σε δύο ρεύματα: το πάνω και το κάτω, τα οποία κατά το πέρασμά τους από το πτερύγιο διανύουν διαφορετικού μήκους διαδρομές (όπως φαίνεται στο σχήμα, το πάνω ρεύμα διανύει μεγαλύτερη απόσταση από το κάτω ρεύμα). Υποθέτοντας ότι η ροή του ανέμου είναι ομαλή (δεν υπάρχουν στροβιλισμοί κ.λπ.), τότε τα δύο ρεύματα θα ξανασυναντηθούν μετά το πέρασμά τους από το πτερύγιο. Για να γίνει αυτό θα πρέπει το πάνω ρεύμα (που διανύει μεγαλύτερη απόσταση) να κινείται γρηγορότερα από το κάτω. Αποδεικνύεται τότε ότι δημιουργείται μικρότερη πίεση ($p_{\text{άνω}}$) στα σωματίδια του αέρα που κινούνται γρηγορότερα (δηλαδή στο πάνω ρεύμα) και μεγαλύτερη πίεση ($p_{\text{κάτω}}$) στα σωματίδια του αέρα που κινούνται με μικρότερη ταχύτητα (κάτω ρεύμα)⁴⁷. Η διαφορά της πίεσης του αέρα μεταξύ των δύο πλευρών του πτερυγίου δημιουργεί μια δύναμη με κατεύθυνση προς τα πάνω, η οποία μπορεί να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες: την ανυψωτική δύναμη⁴⁸ F_L και τη δύναμη αντίστασης⁴⁹ F_D . Όπως έχει ήδη ειπωθεί, η ανυψωτική δύναμη (για την ακρίβεια, η συνιστώσα της που είναι εφαπτομενική στην κυκλική τροχιά που εκτελεί το πτερύγιο) προκαλεί την απαραίτητη ροπή για την περιστροφή του πτερυγίου.

⁴⁷ Ουσιαστικά η αρχή του Bernoulli (Daniel Bernoulli: Ελβετός μαθηματικός που διατύπωσε το ομώνυμο θεώρημα-αρχή).

⁴⁸ Η οποία είναι κάθετη στο αρχικό ρεύμα αέρα.

⁴⁹ Η οποία είναι παράλληλη στο αρχικό ρεύμα αέρα.

Η ανυψωτική δύναμη F_L δίνεται από τη σχέση:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho_a A v^2 \quad (5.7)$$

Ενώ η δύναμη αντίστασης F_D :

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho_a A v^2 \quad (5.8)$$

όπου

C_L και C_D είναι οι συντελεστές ανύψωσης και αντίστασης των πτερυγίων της Α/Γ.

Οι δυνάμεις ανύψωσης και αντίστασης εξαρτώνται ισχυρά από τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου πάνω στα πτερύγια α ⁵⁰. Για μικρές γωνίες η δύναμη ανύψωσης F_L αυξάνεται με τη γωνία α φτάνοντας στο μέγιστο για συγκεκριμένη τιμή της α που εξαρτάται από το συγκεκριμένο πτερύγιο (π.χ., $\sim 10^\circ$). Μετά απ' αυτή την τιμή η F_L μειώνεται απότομα με την αύξηση της α .

Οι τιμές των συντελεστών C_L και C_D για κάθε πτερύγιο Α/Γ είναι χαρακτηριστικές και υπολογίζονται με μετρήσεις που διεξάγονται σε αεροδυναμικές σήραγγες. Εκεί για δεδομένη ροή και ταχύτητα ανέμου υπολογίζονται οι τιμές των C_L και C_D για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης του ανέμου α . Επειδή ο αντικειμενικός σκοπός στο σχεδιασμό μιας Α/Γ (οριζόντιου άξονα) είναι η ελαχιστοποίηση της δύναμης αντίστασης F_D και η μεγιστοποίηση της δύναμης ανύψωσης F_L , χρειάζεται να γίνει ο υπολογισμός εκείνης της γωνίας α για την οποία ταυτόχρονα το C_L γίνεται μέγιστο και το C_D ελάχιστο (δηλαδή ο λόγος C_D / C_L ελάχιστος ή ο λόγος C_L / C_D μέγιστος).

Εκτός απ' τη γωνία α οι δυνάμεις αντίστασης και ανύψωσης εξαρτώνται (δευτερευόντως) κι από άλλους παράγοντες (όπως ο αριθμός Reynolds Re). Υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία διαφορετικές θεωρίες για την θεωρητική ανάλυση της αεροδυναμικής των Α/Γ (όπως, π.χ., η βασική θεωρία πτερυγίων [blade element theory] κ.λπ.). Η εξέτασή τους ξεφεύγει από τα πλαίσια αυτού του βιβλίου και ο αναγνώστης μπορεί να προσφύγει σε πιο εξειδικευμένα βιβλία που αφορούν την αιολική ενέργεια⁵¹.

⁵⁰ Οι δυνάμεις ανύψωσης και αντίστασης δεν εξαρτώνται μόνο από τη γωνία (α) αλλά κι από το σχήμα του πτερυγίου, όπως και την ταχύτητα του αέρα που προσκρούει στο πτερύγιο. Για να δειχθεί η ισχυρή εξάρτηση που έχουν οι συντελεστές C_L και C_D από τη γωνία α μερικές φορές γράφονται στη βιβλιογραφία ως $C_{L(\alpha)}$ και $C_{D(\alpha)}$.

⁵¹ Ενδεικτικά αναφέρονται Manwell J.F. et al, 2002, σελ. 105-139, Burton T. et al, 2001, σελ. 46-150, Sathyajith M., 2006, σελ. 27-34.

5.3 Τεχνική-τεχνολογική περιγραφή

Σ' αυτό το τμήμα του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν τα βασικά τεχνικά-τεχνολογικά στοιχεία που αφορούν τα συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας, δηλαδή τις ανεμογεννήτριες (Α/Γ). Αρχικά παρουσιάζονται οι δύο βασικές κατηγορίες Α/Γ: οριζόντιου άξονα ΗΑWΤ⁵² και κατακόρυφου άξονα VΑWΤ⁵³. Στη συνέχεια γίνεται επικέντρωση στις Α/Γ οριζόντιου άξονα και παρουσίαση των συστατικών τμημάτων τους. Ακολουθεί περιγραφή μεγαλύτερων εγκαταστάσεων (αιολικά πάρκα) που συνδέονται με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, και τέλος γίνεται αναφορά σε εφαρμογές εκτός ηλεκτρικού δικτύου [grid-independent applications].

5.3.1 Κατηγορίες Α/Γ - Α/Γ κατακόρυφου άξονα

Η πρώτη κατηγοριοποίηση των Α/Γ γίνεται ανάλογα με το είδος της συνιστώσας δύναμης του αέρα που αξιοποιούν και έτσι διαχωρίζονται σε μηχανές ανύψωσης και μηχανές αντίστασης⁵⁴.

Οι Α/Γ της κατηγορίας των μηχανών ανύψωσης [lift machines] μπορούν να διαχωριστούν παραπέρα ανάλογα με την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής των πτερυγίων τους σε Α/Γ κατακόρυφου άξονα [Vertical Axis Wind Turbines – VΑWΤ] και Α/Γ οριζόντιου άξονα [Horizontal Axis Wind Turbines – ΗΑWΤ]⁵⁵. Οι πρώτες που περιλαμβάνουν τις λεγόμενες μηχανές Darrieus (εξαιτίας του Γάλλου μηχανικού που τις εφηύρε στη δεκαετία του 1920)⁵⁶ και τις μηχανές Savonius, αναπτύχθηκαν εμπορικά από τη δεκαετία του 1970 έως το τέλος της δεκαετίας του 1980, όμως στη συνέχεια η ανάπτυξή τους σχεδόν σταμάτησε λόγω των μειονεκτημάτων που παρουσίαζαν (σε σχέση με τις Α/Γ οριζόντιου άξονα). Σοβαρά μειονεκτήματα, όπως η μεγάλη διακύμανση της ωφέλιμης ροπής σε κάθε περιστροφή ή η μικρή δυνατότητα επιλογών για τη ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων σε υψηλές ταχύτητες ανέμων, δημιουργούσαν προβλήματα στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των Α/Γ κυρίως σε μεγάλα αιολικά πάρκα που συνδέονται με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο.

⁵² Horizontal Axis Wind Turbines.

⁵³ Vertical Axis Wind Turbines.

⁵⁴ Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που αναπτύχθηκαν στην Περσία ήταν μηχανές αντίστασης. Οι σύγχρονες Α/Γ στη συντριπτική τους πλειοψηφία είναι μηχανές ανύψωσης.

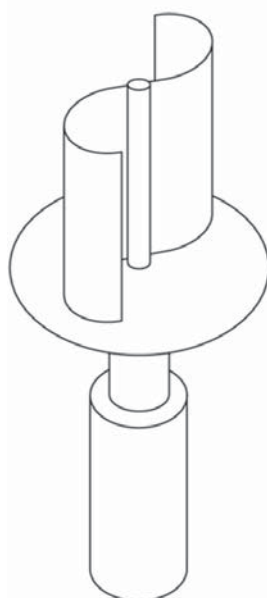
⁵⁵ Ο διαχωρισμός των Α/Γ μπορεί να γίνει ακόμα αναλυτικότερος ανάλογα με επιμέρους χαρακτηριστικά που διαθέτουν. Για παράδειγμα, οι Α/Γ μπορούν να διαχωριστούν σε ταχύστροφες και αργόστροφες ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου περιστροφής [tip speed ratio] (λ). Περισσότερα για ένα λεπτομερέστερο διαχωρισμό των Α/Γ βλ. Boyle et al, 2004, σελ. 308-309.

⁵⁶ Περισσότερα βλ. Boyle et al, 2004, σελ. 255-256, Καλδέλλης, 2005, σελ. 225-228.



Εικόνα 5.1 Α/Γ τύπου Darrieus στην περιοχή Heroldstatt (Γερμανία).
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Savonius-Rotor



Σχήμα 5.8 Σχηματικό διάγραμμα της μηχανής Α/Γ τύπου Savonius.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)



Εικόνα 5.2 Α/Γ τύπου Savonius στην Ταϊβάν.
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Οι Α/Γ *οριζόντιου άξονα* κυριάρχησαν τις τελευταίες δεκαετίες στις εμπορικές εφαρμογές και σήμερα η συντριπτική πλειοψηφία των Α/Γ που είναι εγκατεστημένες σε αιολικά πάρκα είναι αυτού του τύπου. Το ενδιαφέρον στην έρευνα και την ανάπτυξη της τεχνολογίας διεθνώς επικεντρώνεται στις Α/Γ οριζόντιου άξονα και έχει προκαλέσει σημαντική τεχνολογική ανάπτυξη στην κατασκευή και τα χαρακτηριστικά τους. Παρακάτω θα εξεταστούν αναλυτικότερα οι Α/Γ αυτού του είδους.

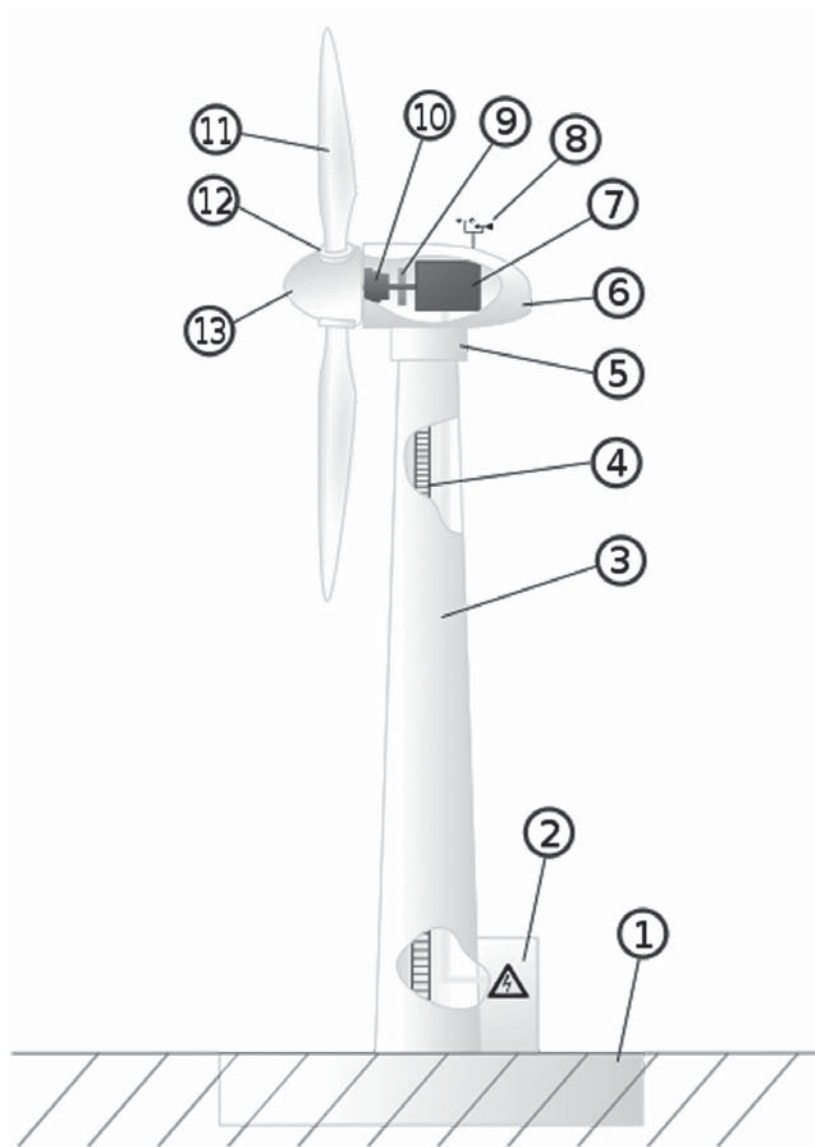


Εικόνα 5.3 Μικρό αιολικό πάρκο με Α/Γ οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων σε περιοχή κοντά στην Caen, Normandie (Γαλλία).
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

5.3.2 Α/Γ οριζόντιου άξονα

Μια Α/Γ οριζόντιου άξονα αποτελείται ουσιαστικά από τον πύργο [tower] και την πλήμνη [nacelle] η οποία τοποθετείται στην κορυφή του πύργου. Η πλήμνη βασικά αποτελείται από το ρότορα [rotor] (με τα πτερύγια), τη γεννήτρια [generator] (που παράγει το ηλεκτρικό ρεύμα) και το κιβώτιο ταχυτήτων [gear-box] (όταν αυτό υπάρχει). Στο Σχήμα 5.9 φαίνονται τα βασικά τμήματα μιας τυπικής Α/Γ.





Σχήμα 5.9 Τα βασικά μέρη μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα 1. Θεμελίωση, 2. Σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο, 3. Πύργος, 4. Σκάλα πρόσβασης στο ανώτερο τμήμα της Α/Γ, 5. Μηχανισμός ρύθμισης διεύθυνσης της πλήμνης, 6. Πλήμνη, 7. Γεννήτρια, 8. Ανεμόμετρο, 9. Φρένα, 10. Κιβώτιο ταχυτήτων, 11. Πτερύγια ρότορα, 12. Μηχανισμός ρύθμισης πτερυγίων, 13. Κεφαλή ρότορα. (Πηγή: *commons.wikimedia.org*)

Υπάρχουν διαφορετικοί μηχανισμοί, έτσι ώστε να κατευθύνουν την πλήμνη προς τη ροή του αέρα ή να την απομακρύνουν σε περίπτωση ισχυρών ανέμων. Ο αριθμός πτερυγίων του ρότορα εξαρτάται από τον εξειδικευμένο σκοπό που υπηρετεί

η εγκατάσταση της Α/Γ και από το συνολικό σχεδιασμό της εγκατάστασης⁵⁷. Για την ηλεκτροπαραγωγή συνήθως χρησιμοποιούνται φτερωτές με δύο ή τρία πτερύγια. Αντίθετα σε περιπτώσεις που οι Α/Γ χρησιμοποιούνται για άντληση νερών και αρδευτικούς σκοπούς χρησιμοποιούνται συνήθως φτερωτές με 20 ή περισσότερα πτερύγια⁵⁸ (Σχήμα 5.10).



Εικόνα 5.4 Α/Γ με φτερωτή (πολλά πτερύγια).
(Πηγή: National Renewable Energy Laboratory (NREL))

Σε μια Α/Γ η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων (πάνω στο ρότορα) και στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια πάνω στη γεννήτρια.

Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των βασικών συστατικών μερών μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα⁵⁹.

⁵⁷ Στόχος είναι να εγκατασταθεί μια Α/Γ που τα τεχνικά χαρακτηριστικά της να αξιοποιούν με τον καλύτερο τρόπο τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής έτσι ώστε να έχει το μεγαλύτερο δυνατό συντελεστή απόδοσης για τη συγκεκριμένη εργασία.

⁵⁸ Ackermann, 2012.

⁵⁹ Αναλυτικότερες περιγραφές μπορείτε να βρείτε στους Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 309-322, Burton T. et al, 2001, σελ. 377-468, Manwell J.F. et al, 2002, σελ. 247-314, Καλδέλλης, 2005, σελ. 232-236.

5.3.3 Συστατικά μέρη Α/Γ

α) Ρότορας [rotor]

Ρότορας ονομάζεται το τμήμα της Α/Γ όπου η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων⁶⁰. Αποτελείται από την κεφαλή του ρότορα [rotor hub] και τα πτερύγια [blades]. Περισσότερο από το 95% των εγκατεστημένων Α/Γ διαθέτουν τρία πτερύγια⁶¹ εξαιτίας των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν σε σχέση με Α/Γ ενός ή δύο πτερυγίων (λιγότερα προβλήματα δυναμικής ταλάντωσης, μικρότερος αεροδυναμικός θόρυβος κ.λπ.)⁶².

Τα πτερύγια συνήθως κατασκευάζονται από πλαστικά υψηλής ποιότητας ενδυναμωμένα με ίνες γυαλιού, άνθρακα κ.λπ. για να αντέχουν στις υψηλές καταπονήσεις του ανέμου κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της Α/Γ. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων, καθώς και το κόστος κατασκευής αποτελούν τους αποφασιστικούς παράγοντες για την επιλογή των υλικών και της σχεδιάσής τους.

Η κεφαλή του ρότορα είναι εξοπλισμένη με μηχανισμό ρύθμισης των πτερυγίων. Αυτός ο μηχανισμός μετακινεί τα πτερύγια ανάλογα με την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου με σκοπό τη μέγιστη απόδοση της Α/Γ και την προστασία της σε περίπτωση μεγάλης ταχύτητας ανέμων. Ανάλογα με τον αριθμό των πτερυγίων και το συνολικό σχεδιασμό της Α/Γ μπορούν να σχεδιαστούν διάφοροι τύποι κεφαλών, από τους οποίους τρεις είναι οι κυριότεροι (rigid or hingeless hub, teetered hub, flap and/or lag hinge hub)⁶³.

β) Κιβώτιο ταχυτήτων [gear-box]

Η συχνότητα περιστροφής του ρότορα μιας τυπικής Α/Γ είναι περίπου 30-50 r/min⁶⁴. Στις περισσότερες Α/Γ όμως η συχνότητα στην οποία λειτουργεί η γεννήτρια είναι 1.000-1.500 r/min. Συνεπώς, χρειάζεται διάταξη (το κιβώτιο ταχυτήτων⁶⁵), η οποία να συγχρονίζει τις δύο διαφορετικές συχνότητες, έτσι ώστε να γίνεται ομαλά η μεταφορά της μηχανικής ισχύος από το ρότορα στη γεννήτρια. Η απόδοση του κιβωτίου βρίσκεται μεταξύ 95-98%⁶⁶ όσον αφορά τη μετάδοση της ενέργειας (εξαι-

⁶⁰ Το ποσοστό της κινητικής ενέργειας του ανέμου που μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων κυμαίνεται μεταξύ 40-50% για τις καλύτερες Α/Γ (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 309).

⁶¹ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 311.

⁶² Για λεπτομέρειες βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 310-311.

⁶³ Burton T. et al, 2001.

⁶⁴ Revolutions/minute (περιστροφές ανά λεπτό).

⁶⁵ Ουσιαστικά το κιβώτιο ταχυτήτων επιτελεί την ίδια λειτουργία που εκτελεί και σε ένα τυπικό αυτοκίνητο.

⁶⁶ Burton T. et al, 2001, σελ. 438.

τίας κυρίως των απωλειών θερμότητας λόγω τριβής). Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται, ολοένα και περισσότερο, Α/Γ χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, ώστε να αυξηθεί η απόδοση και να μειωθούν προβλήματα θορύβου που συνδέονται με την παρουσία του κιβωτίου. Αυτές οι Α/Γ χρησιμοποιούν γεννήτριες νέου σχεδιασμού [multi-pole ring generator] οι οποίες μπορούν να λειτουργούν σε πολλαπλές συχνότητες περιστροφής⁶⁷.

γ) Γεννήτρια [generator]

Η γεννήτρια είναι από τα πιο σημαντικά τμήματα της Α/Γ, καθώς μετατρέπει την κινητική-μηχανική ενέργεια περιστροφής του ρότορα σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε μικρές γεννήτριες (της τάξεως των kW) χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (DC generators). Σε μεγαλύτερες Α/Γ που συνδέονται στο ηλεκτρικό δίκτυο οι γεννήτριες είναι τριφασικές εναλλασσόμενου ρεύματος [3phase AC generators]. Αυτές οι γεννήτριες στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής⁶⁸, για αυτό και ονομάζονται επαγωγικές γεννήτριες [induction generators]. Οι δύο βασικότερες κατηγορίες επαγωγικών γεννητριών είναι οι συγχρονικές γεννήτριες [synchronous generators] και οι ασύγχρονες γεννήτριες [asynchronous generators]⁶⁹.

δ) Μηχανισμός ρύθμισης διεύθυνσης της πλήμνης [wind direction yaw mechanism]

Η πλήμη της Α/Γ συνδέεται στον πύργο μέσω μηχανισμού που επιτρέπει τη μετακίνηση της πλήμνης ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να είναι υδραυλικός ή ηλεκτρομηχανικός και διαθέτει σύστημα πέδησης (φρένα) σε περίπτωση που χρειάζεται η σταθεροποίηση της πλήμνης.

ε) Πύργος [tower]

Η κύρια λειτουργία του πύργου είναι η στήριξη της πλήμνης στο ιδανικό ύψος από το έδαφος, καθώς και η απορρόφηση της πίεσης και των κραδασμών που δέχεται το σύστημα από τον άνεμο. Η κατασκευή και η στήριξη του πύργου είναι θεμελιώδους σημασίας γιατί από την ορθή λειτουργία του πύργου εξαρτάται όλη η

⁶⁷ Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 313-324, Burton T. et al, 2001, σελ. 424-438.

⁶⁸ Βλέπε οποιοδήποτε βιβλίο Φυσικής, π.χ., Serway R, Jewett J., 2009, *Physics for Scientists and Engineers (8 edition)*, Thomson Brooks/Cole, (Halliday D., Resnik R., Walker J., 2010, *Principles of Physics (9th Edition)*, John Wiley & Sons.

⁶⁹ Για περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 314-316, Sathyaajith M., 2006, σελ. 107-114.

εγκατάσταση. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται τόσο στο σχεδιασμό του πύργου όσο και στη θεμελίωσή (αγκύρωσή) του έτσι ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα συντονισμού εξαιτίας του ανέμου που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην ομαλή απόδοση της Α/Γ ή ακόμα και να την καταστρέψουν.

Οι περισσότεροι πύργοι κατασκευάζονται από χάλυβα ή/και σκυρόδεμα. Όσον αφορά το είδος της κατασκευής οι δύο κυριότεροι τύποι είναι ο σωληνοειδής [tubular] και ο πλεγματικός-δικτυωτός [lattice]. Το ελάχιστο ύψος του πύργου καθορίζεται από την ακτίνα των πτερυγίων του ρότορα. Συμπληρωματικά για το μέγιστο ύψος του πύργου συνυπολογίζονται τόσο ο παράγοντας της μέγιστης ενεργειακής απόδοσης του συστήματος όσο και ο παράγοντας κόστους⁷⁰ και λαμβάνεται η βέλτιστη απόφαση. Αυτός είναι ο βασικός λόγος που το ύψος του πύργου μιας Α/Γ ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία της εγκατάστασης και το κόστος του σχεδίου. Οι τιμές του ύψους των πύργων κυμαίνονται μεταξύ 40 και 80 m⁷¹, όμως, καθώς η ισχύς των Α/Γ μεγαλώνει συνεχώς, πύργοι ύψους 90-100 m και μεγαλύτεροι δεν είναι πια ασυνήθιστο φαινόμενο⁷².

στ) Θεμελίωσεις [foundations] του πύργου

Ο τύπος της θεμελίωσης του πύργου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως οι τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες, ο τύπος του εδάφους, το κόστος, το μέγεθος της εγκατάστασης κ.λπ. Ο βασικός διαχωρισμός μιας θεμελίωσης είναι μεταξύ ρηχής [shallow] και βαθιάς [deep] θεμελίωσης. Και οι δύο τύποι θεμελίωσης είναι τεχνολογικά αναπτυγμένοι αλλά διαφέρουν στο κόστος. Στις Α/Γ που εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα μέσα στην θάλασσα [off-shore installations – υπεράκτιες εγκαταστάσεις] η θεμελίωση-αγκύρωση των πύργων είναι πολύ πιο κοστοβόρα και μπορεί να είναι πλωτή [float support]⁷³ ή σε βάθη της θάλασσας μικρότερα από 50 m (όπου βρίσκονται σήμερα όλα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα) να είναι σταθερή στον πυθμένα [floor-mounted support]⁷⁴.

⁷⁰ Όπως και περιβαλλοντικά κριτήρια, καθώς και κριτήρια ασφάλειας (ιδιαίτερα σε περιοχές με αεροδρόμια κ.λπ.).

⁷¹ Στις εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων κοντά στη θάλασσα (ή ακόμα μέσα στη θάλασσα off-shore installations), όπου η ταχύτητα των ανέμων είναι μεγαλύτερη από τη στεριά, τα ύψη των πύργων μπορεί να είναι περίπου 25% μικρότερα σε σύγκριση με Α/Γ που εγκαθίστανται σε ηπειρωτικά μέρη (on-shore installations) (Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 318).

⁷² Περισσότερα για το θέμα των πύργων βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 317-318.

⁷³ Η πλωτή αγκύρωση δεν είναι μέχρι σήμερα εμπορικά εφαρμόσιμη. Για περισσότερα (και σχετικές εικόνες βλ. http://offshorewind.net/Other_Pages/Turbine-Foundations.html (5/11/2010)).

⁷⁴ Περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 318-320.

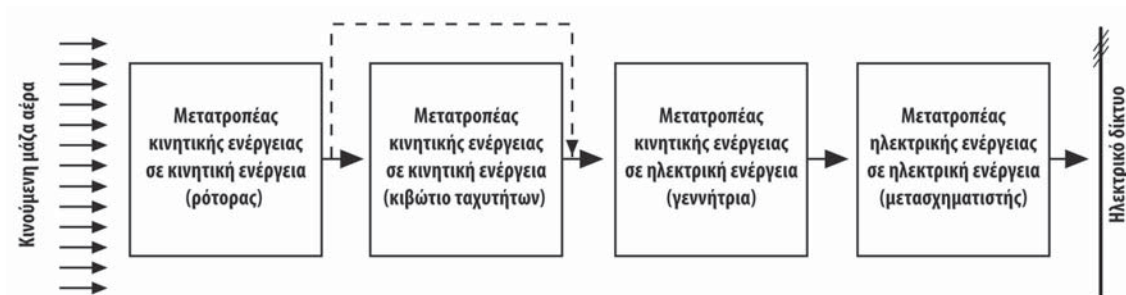
ζ) Σύνδεση στο δίκτυο [grid connection]

Η σύνδεση των Α/Γ στο ηλεκτρικό δίκτυο (κεντρικό ή τοπικό) μπορεί να γίνει είτε με άμεση⁷⁵ [direct connection] είτε με έμμεση σύνδεση⁷⁶ [indirect connection]. Το είδος της σύνδεσης εξαρτάται από το είδος των γεννητριών που έχει το σύστημα (σύγχρονες ή ασύγχρονες) και το γενικό σχεδιασμό της εγκατάστασης. Και τα δύο είδη σύνδεσης έχουν μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα (για παράδειγμα στην έμμεση σύνδεση η αεροδυναμική απόδοση του ρότορα της Α/Γ είναι ιδανική για εύρος περιστροφών που αντιστοιχεί στο 50-120% του ονομαστικού αριθμού περιστροφών, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει μεγαλύτερο κόστος και περισσότερες ηλεκτρικές απώλειες ενέργειας).

5.3.4 Ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών, απώλειες, χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ

α) Ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών

Κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική, πραγματοποιούνται σταδιακές ενεργειακές μετατροπές που συμβαίνουν στα επιμέρους τμήματα (μέρη) της Α/Γ. Στο Σχήμα 5.10 εμφανίζεται αυτή η ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών.



Σχήμα 5.10 Η ενεργειακή αλυσίδα μετατροπών σε μια Α/Γ.

⁷⁵ Σ' αυτό το είδος της σύνδεσης οι γεννήτριες των Α/Γ συνδέονται απευθείας στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και για αυτόν το λόγο ρυθμίζονται σε ένα σταθερό (ή σχεδόν σταθερό) αριθμό περιστροφών/λεπτό (συχνότητας) ανάλογα με τη συχνότητα του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου (στην Ευρώπη 50 Hz). Αυτή η σύνδεση είναι η πιο συνηθισμένη στο κεντρικό ηλεκτρικό ευρωπαϊκό δίκτυο οικιακής κατανάλωσης.

⁷⁶ Οι γεννήτριες των Α/Γ δε συνδέονται απευθείας στο κεντρικό δίκτυο αλλά μέσω ενός ενδιάμεσου ηλεκτρικού κυκλώματος συνεχούς ρεύματος που επιτρέπει στις γεννήτριες να περιστρέφονται σε διαφορετικές συχνότητες κι όχι σε προκαθορισμένες.

Όπως φαίνεται, η κινητική ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται πάνω στα πτερύγια του ρότορα σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων. Στη συνέχεια, μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων (όταν υπάρχει), μεταφέρεται η κινητική ενέργεια περιστροφής από το ρότορα στη γεννήτρια⁷⁷, που μετατρέπει την κινητική ενέργεια περιστροφής σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος από τη γεννήτρια μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τις περισσότερες φορές αυτό γίνεται μέσω ηλεκτρικού μετατροπέα (μετασχηματιστή), καθώς τα χαρακτηριστικά (ένταση, τάση και συχνότητα ρεύματος) της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η γεννήτρια δεν είναι τα ίδια μ' αυτά του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου.

Β) Ενεργειακές απώλειες

Κατά τη διάρκεια των ενεργειακών μετατροπών που συμβαίνουν στην Α/Γ, εμφανίζονται διάφοροι (αναπόφευκτοι) μηχανισμοί απώλειας ενέργειας. Οι απώλειες ενέργειας που προκαλούνται απ' αυτούς τους μηχανισμούς μπορούν να καταταχθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: *αεροδυναμικές απώλειες*⁷⁸, *μηχανικές απώλειες*⁷⁹ και *ηλεκτρικές απώλειες*⁸⁰. Ο συνδυασμός αυτών των τριών κατηγοριών απωλειών μειώνει πολύ περισσότερο την απόδοση μιας Α/Γ (δηλαδή το ποσοστό της αιολικής ενέργειας που τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική) από το μέγιστο συντελεστή απόδοσης ισχύος Betz (59,3%)⁸¹. Το 2009 οι εμπορικές Α/Γ είχαν (γενικά) συνολική απόδοση μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική μεταξύ 30-45%. Το παρακάτω διάγραμμα δίνει κατά προσέγγιση το ποσοστό απωλειών που συμβαίνει στα διαφορετικά μέρη μιας Α/Γ (ή ακριβέστερα ενός συστήματος μετατροπής της αιολικής ενέργειας [Wind Energy Conversion Systems – WECS]).

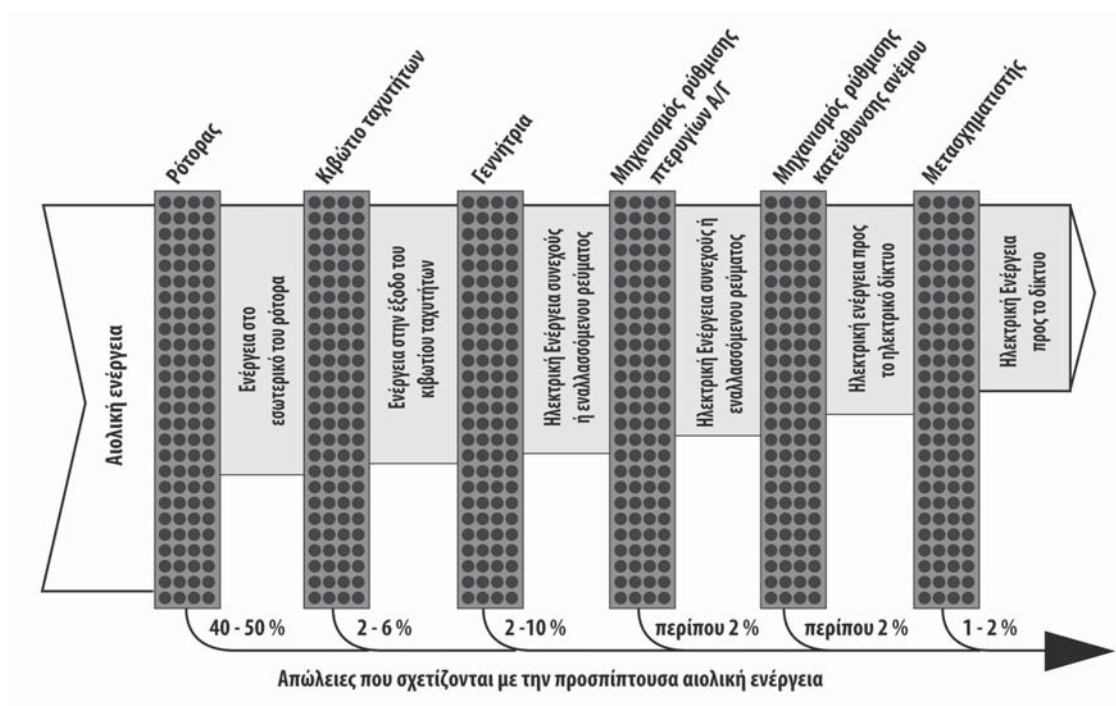
⁷⁷ Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, η συχνότητα περιστροφής των πτερυγίων (περιστροφές/λεπτό) είναι μικρότερη από τη συχνότητα περιστροφής των μαγνητών στο γεννήτορα. Η προσαρμογή από τη μια συχνότητα στην άλλη γίνεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων.

⁷⁸ Οφείλονται σε παράγοντες που αφορούν στον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων, τον πιθανό στροβιλισμό του ανέμου κ.λπ. και εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση του ανέμου με τα πτερύγια της Α/Γ.

⁷⁹ Οφείλονται κυρίως στις τριβές που εμφανίζονται σε όλα τα μηχανικά κινούμενα μέρη της Α/Γ (πτερύγια, κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια, μηχανισμοί κατεύθυνσης κ.λπ.) και οι οποίες μετατρέπουν ένα μέρος της ενέργειας σε θερμότητα.

⁸⁰ Οφείλονται στις μετατροπές της ηλεκτρικής ενέργειας που συμβαίνουν είτε στη γεννήτρια είτε στους μετατροπείς (μετασχηματιστές) μεταξύ της γεννήτριας και του δικτύου.

⁸¹ Που αφορά μόνο στη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων του ρότορα.



Σχήμα 5.11 Οι απώλειες στα διάφορα στάδια των ενεργειακών μετατροπών σε μια Α/Γ.

γ) Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ

Η ηλεκτρική ισχύς P_{el} που παράγει μια Α/Γ είναι, θεωρητικά, ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου, όπως φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$P_{el} = n c_p \frac{1}{2} \rho A V^3$$

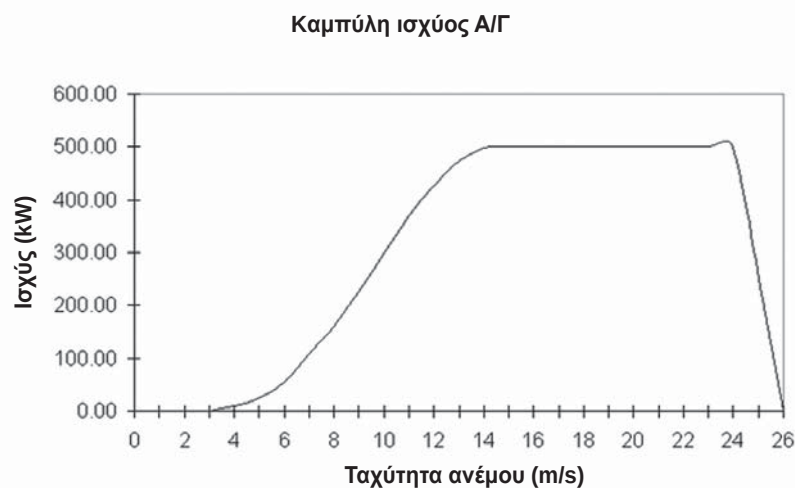
ή

$$P_{el} = \eta_{\text{mech-elec}} c_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (5.9)$$

όπου

n : ηλεκτρομηχανικός συντελεστής απόδοσης της Α/Γ (συμβολίζεται επίσης $\eta_{\text{mech-elec}}$) και συνήθως έχει τιμή γύρω στο 0,9 (εκφράζει το ποσοστό της μηχανικής ισχύος ($c_p \frac{1}{2} \rho A V^3$) που μπορεί να μετατρέψει σε ηλεκτρική ισχύ η Α/Γ).

Σε κάθε Α/Γ αντιστοιχεί καμπύλη $P_{el} = f(v)$ που εκφράζει την πραγματική εξάρτηση της ηλεκτρικής ισχύος που παράγει η Α/Γ από την ταχύτητα v του ανέμου. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ και μια τυπική μορφή της φαίνεται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12 Η παραγόμενη ισχύ από μία ανεμογεννήτρια σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του ρότορα (χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ).

Στην καμπύλη αυτή διακρίνονται τέσσερις (4) φάσεις:

Στην πρώτη φάση (I) οι ταχύτητες του ανέμου είναι αρκετά μικρές (στο συγκεκριμένο παράδειγμα 0-3m/s) για να μπορέσουν να θέσουν σε κίνηση τα πτερύγια του ρότορα⁸². Συνεπώς, δεν παράγεται καθόλου ηλεκτρική ισχύ από την Α/Γ. Η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για την οποία η Α/Γ αρχίζει να παράγει ηλεκτρική ισχύ ονομάζεται *ταχύτητα έναρξης λειτουργίας [cut-in velocity]* (εδώ ~3m/s).

Στη δεύτερη φάση (II) η γεννήτρια αρχίζει να παράγει ηλεκτρική ισχύ, η οποία, όπως έχει αναφερθεί, είναι ανάλογη (θεωρητικά) της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου. Στην πραγματικότητα όμως η μαθηματική σχέση είναι λίγο πιο πολύπλοκη, καθώς οι απώλειες που υπάρχουν δεν είναι ανάλογες με την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρή απόκλιση της πραγματικής καμπύλης από τη θεωρητική καμπύλη. Όπως φαίνεται στη γραφική παράσταση, η ηλεκτρική

⁸² Οι (ανυψωτικές) δυνάμεις που αναπτύσσονται στα πτερύγια δεν είναι ικανές να «υπερνικήσουν» τις δυνάμεις τριβής και την αδράνεια που υπάρχει λόγω της μάζας του ρότορα.

ισχύς αυξάνεται μέχρι μια τιμή της ταχύτητας του ανέμου και στη συνέχεια παραμένει σταθερή. Αυτή η τιμή της ταχύτητας του ανέμου ονομάζεται *ονομαστική ταχύτητα* [*nominal wind speed*] και αντιστοιχεί στη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να μας δώσει η Α/Γ, η οποία ονομάζεται και *ονομαστική ισχύς* [*nominal or rated power*⁸³] P_n ή P_R . Στις συνηθισμένες εμπορικές Α/Γ η δεύτερη φάση αρχίζει από ταχύτητες ανέμου 3-4 m/s (*ταχύτητα έναρξης λειτουργίας*) και φτάνει μέχρι 12-14 m/s (*ονομαστική ταχύτητα*).

Στην τρίτη φάση (III) η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς παραμένει σταθερή παρ' όλη την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό γίνεται καθώς η Α/Γ έχει φτάσει στο ανώτατο όριο της ισχύος που μπορεί να παράξει (*ονομαστική ισχύς*) σύμφωνα με το σχεδιασμό της και τις προδιαγραφές της γεννήτριάς της. Καθώς λοιπόν η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται, ενεργοποιείται ηλεκτρονικός μηχανισμός ελέγχου της ισχύος της Α/Γ, που ελέγχει την περιστροφή του ρότορα και τη μεταφορά μηχανικής ενέργειας από τον ρότορα στη γεννήτρια, έτσι ώστε η ηλεκτρική ισχύς να παραμένει σταθερή. Η φάση III διαρκεί μέχρι μια ταχύτητα ανέμου που ονομάζεται *ταχύτητα αποκοπής* [*cut-out wind speed*] και στην οποία η Α/Γ παύει να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Η ταχύτητα αποκοπής στις εμπορικές Α/Γ είναι της τάξης του 24-26 m/s.

Στην τέταρτη φάση (IV) (πάνω από την *ταχύτητα αποκοπής*) η Α/Γ σταματάει να παράγει ηλεκτρική ισχύ, καθώς σ' αυτές τις ταχύτητες του ανέμου τα μηχανικά μέρη της καταπονούνται τόσο που δημιουργούνται προβλήματα λειτουργίας στην Α/Γ.

Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας Α/Γ που μόλις περιγράφηκε δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστεί η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παράξει η συγκεκριμένη Α/Γ σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα Δt , αρκεί να είναι γνωστή η συνάρτηση πιθανότητας κατανομής των ταχυτήτων (h). Τότε η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση⁸⁴:

$$E_{el} = \sum_{i=1}^n h_i P_{el,i} \Delta t \quad (5.10)$$

όπου $P_{el,i}$ είναι η ισχύς που αντιστοιχεί σε διάστημα ταχυτήτων i και πλάτος πιθανότητας h_i για το συγκεκριμένο διάστημα ταχυτήτων.

⁸³ Στη βιβλιογραφία μπορεί να συναντηθεί και ο όρος *rated power* P_R .

⁸⁴ Οι υπολογισμοί σε πραγματικές εφαρμογές γίνονται μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων (software) στους Η/Υ.

δ) Συντελεστής χρησιμοποίησης Α/Γ C_f [capacity factor]

Η αποτελεσματικότητα με την οποία λειτουργεί μια Α/Γ σε μια γεωγραφική περιοχή καθορίζεται από το *συντελεστή χρησιμοποίησης Α/Γ C_f* . Ο συντελεστής αυτός δείχνει την αποτελεσματικότητα με την οποία μια συγκεκριμένη Α/Γ (που είναι εγκατεστημένη σε συγκεκριμένη περιοχή) μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική, δηλαδή πόσο αποτελεσματικά έχει ενσωματωθεί η Α/Γ στο συγκεκριμένο αιολικό δυναμικό και τις ιδιομορφίες της περιοχής.

Ο *συντελεστής χρησιμοποίησης C_f* ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που πραγματικά παρήγαγε μια Α/Γ (ή σύνολο Α/Γ, αν πρόκειται για αιολικό πάρκο) σε χρονική περίοδο Δt ⁸⁵, προς το ποσό της ενέργειας που θα παρήγαγε αν λειτουργούσε συνεχώς στην ονομαστική της ισχύ P_n .

$$C_f = \frac{E_t}{P_n * \Delta t} \quad (5.11)$$

όπου E_t είναι η ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε η Α/Γ σε χρονικό διάστημα Δt και P_n (ή P_R) η ονομαστική ισχύς της Α/Γ.

Οι τυπικές τιμές για τους συντελεστές χρησιμοποίησης βρίσκονται μεταξύ 0,25-0,40. Συντελεστής χρησιμοποίησης πάνω από 0,4 δείχνει μεγάλη αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης Α/Γ και πολύ καλή αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού της περιοχής.

ε) Έλεγχος ισχύος

Σε κάθε Α/Γ υπάρχει μηχανισμός ελέγχου ισχύος. Η βασική λειτουργία αυτού του μηχανισμού είναι να σταθεροποιεί την ηλεκτρική ισχύ της γεννήτριας από τη στιγμή που η ταχύτητα του ανέμου θα φτάσει στην ονομαστική τιμή της. Έτσι, αφενός μεν αποφεύγονται μηχανολογικά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν στη λειτουργία του ρότορα και αφετέρου προστατεύεται η λειτουργία της γεννήτριας η οποία έχει προδιαγραφές λειτουργίας μέχρι τη μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ισχύος (ονομαστική ισχύ). Στην παρούσα φάση ανάπτυξης της τεχνολογίας οι δύο κυριότεροι μηχανισμοί ελέγχου ισχύος είναι αυτοί που αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως *έλεγχος απώλειας στήριξης* [stall control] και *έλεγχος βήματος πτερυγίου* [pitch control]. Στην πρώτη περίπτωση η ηλεκτρική ισχύς ελέγχεται μέσω του προκαθορισμού ενός σταθερού αριθμού περιστροφών ανά λεπτό⁸⁶ που πρέπει να εκτελεί

⁸⁵ Συνήθως είναι η διάρκεια ενός έτους, δηλαδή 8.760 h.

⁸⁶ Δηλαδή σταθερή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων του ρότορα.

ο ρότορας ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Στη δεύτερη περίπτωση η ηλεκτρική ισχύς ελέγχεται μέσω του διπλώματος⁸⁷ των πτερυγίων. Έτσι, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου αυξομειώνεται η ενεργή επιφάνεια περιστροφής των πτερυγίων έτσι ώστε η ηλεκτρική ισχύς της Α/Γ να παραμένει σταθερή⁸⁸.

5.3.5 Αιολικά πάρκα

Οι Α/Γ μπορούν να εγκατασταθούν είτε μόνες τους σε μια περιοχή είτε κατά ομάδες (μερικών Α/Γ έως και δεκάδων Α/Γ), δημιουργώντας έτσι συστοιχίες Α/Γ που ονομάζονται *αιολικά πάρκα* [wind parks ή wind farms]. Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του 1970 στις ΗΠΑ και στη συνέχεια στην Ευρώπη. Η ισχύς των σύγχρονων αιολικών πάρκων ποικίλλει από μερικά MW έως εκατοντάδες MW. Η δημιουργία αιολικού πάρκου σε μια συγκεκριμένη περιοχή, πέρα από τα προφανή πλεονεκτήματα που έχει (καθώς αξιοποιεί μεγάλο ποσοστό της αιολικής ισχύος παράγοντας μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας), ελαττώνει επίσης και το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς δημιουργεί οικονομίες κλίμακας⁸⁹.

Οι Α/Γ στο αιολικό πάρκο τοποθετούνται σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους και με συγκεκριμένη διάταξη (ανάλογα με τα ανεμολογικά δεδομένα και το ανάγλυφο της περιοχής), έτσι ώστε κάθε Α/Γ να μην επηρεάζει με την παρουσία της τις διπλανές της και να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή απόδοση για το σύνολο των Α/Γ. Με την κατάλληλη τοποθέτηση των Α/Γ γίνεται προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο που στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως πρόβλημα σκίασης [shadowing] των Α/Γ. Σκίαση μιας Α/Γ από τις άλλες σημαίνει ότι εξαιτίας της παρουσίας των άλλων Α/Γ η συγκεκριμένη Α/Γ δε δέχεται τη μέγιστη αιολική ισχύ (καθώς η ταχύτητα του ανέμου έχει υποβαθμιστεί από την αξιοποίηση του ανέμου προηγουμένως από τις υπόλοιπες Α/Γ) ή ότι προκαλείται μεγαλύτερος στροβιλισμός [turbulence] του ανέμου, με αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση της γεννήτριας και τη μεγαλύτερη καταπόνησή της. Τόσο η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των Α/Γ όσο και η διάταξή τους στο αιολικό πάρκο εξαρτώνται αφενός από τα τεχνικά

⁸⁷ Δηλαδή τα πτερύγια αλλάζουν γωνία πρόσπτωσης πάνω στον άνεμο και συνεπώς συνολική ενεργή επιφάνεια (δηλαδή επιφάνεια περιστροφής που αξιοποιεί τον άνεμο).

⁸⁸ Περισσότερα βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 328-330, Sathyajith M., 2006, σελ. 101-107, Ackermann, 2012, σελ. 88-91.

⁸⁹ Δηλαδή μειώνει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά Α/Γ, καθώς όλες οι υποδομές που χρειάζονται (δρόμοι, σύνδεση με το κεντρικό ηλεκτρικό σύστημα κ.λπ.) και οι διαδικασίες συντήρησης, επισκευών και επιτήρησης κατανέμονται οικονομικότερα όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των γεννητριών.

χαρακτηριστικά των Α/Γ (π.χ., διάμετρος πτερυγίων ρότορα) και αφετέρου από τα μετεωρολογικά δεδομένα και το ανάγλυφο της περιοχής⁹⁰.



Εικόνα 5.5 Αιολικό πάρκο στο Albany (Δυτική Αυστραλία).
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

Το πρόβλημα της σκίασης δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ολοκληρωτικά στα αιολικά πάρκα. Οι απώλειες σε ηλεκτρική ισχύ των Α/Γ του αιολικού πάρκου είναι της τάξης του 2-10% συγκρινόμενες με την ισχύ που θα παρήγαγε κάθε Α/Γ αν ήταν μόνη της εγκατεστημένη στη συγκεκριμένη περιοχή. Οι απώλειες όμως στην ηλεκτρική ισχύ αντισταθμίζονται από τα κέρδη (κυρίως οικονομίες κλίμακας) στους υπόλοιπους παράγοντες που καθορίζουν την οικονομικο-τεχνική βιωσιμότητα της εγκατάστασης (όπως σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο, δρόμοι πρόσβασης και συνολικό ετήσιο κόστος συντήρησης, επισκευών και παρακολούθησης της εγκατάστασης).

⁹⁰ Επίσης σε ένα συγκεκριμένο χώρο μπορεί να υπάρχουν περιβαλλοντικοί ή νομοθετικοί ή άλλους είδους περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι οποίοι ορισμένες φορές δυσκολεύουν την ιδανική (από πλευράς ενεργειακής απόδοσης) χωροθέτηση των Α/Γ.

Η σύνδεση των αιολικών πάρκων με το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να γίνει είτε μέσω διαύλου συνεχούς ρεύματος είτε μέσω διαύλου εναλλασσόμενου ρεύματος ανάλογα με τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε αιολικού πάρκου⁹¹.

5.3.6 Υπεράκτια αιολικά πάρκα [Offshore wind parks (farms)]

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα δημιουργούνται σε απόσταση από τις ακτές μέσα στη θάλασσα. Αν και η δυνατότητα δημιουργίας υπεράκτιων αιολικών πάρκων είχε διερευνηθεί από τη δεκαετία του 1970, ρεαλιστικά σχέδια και εγκαταστάσεις αναπτύχθηκαν στη Γερμανία το 1989, στη Σουηδία το 1990 και στη Δανία το 1991⁹². Τα τελευταία χρόνια υπεράκτια αιολικά πάρκα αναπτύσσονται με ολοένα και αυξανόμενο ρυθμό. Το 2009 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς υπεράκτιων αιολικών πάρκων ήταν ~2 GW, δηλαδή το ~1,2% της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος⁹³.



Εικόνα 5.6 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στο Sound κοντά στην Κοπεγχάγη (Δανία).
(Πηγή: commons.wikimedia.org)

⁹¹ Για περισσότερα πάνω στο θέμα των αιολικών πάρκων βλ. Twidell et al, 2006, σελ. 331-335, Manwell J.F. et al, 2002, σελ. 381-394, Burton T. et al, 2001, σελ. 511-557, Sathyajith M., 2006, σελ. 117-124. Ειδικότερα για τη διαδικασία επιλογής, σχεδιασμού και ανάπτυξης ενός αιολικού πάρκου βλ. Sathyajith M., 2006, σελ. 117-119.

⁹² Sathyajith M., 2006, σελ. 121.

⁹³ Οι χώρες με τη μεγαλύτερη ποσότητα υπεράκτιας αιολικής ισχύος είναι το Ηνωμένο Βασίλειο (Μ. Βρετανία) (688,0 MW), η Δανία (663,6 MW) και η Σουηδία (247,0 MW) World Wind Energy Association, *World Wind Energy Report 2009*, σελ. 9.

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα έχουν ορισμένα *πλεονεκτήματα* συγκρινόμενα με τα ηπειρωτικά:

- Οι υπεράκτιοι άνεμοι έχουν λιγότερες διακυμάνσεις από τους ηπειρωτικούς ανέμους, αλλά και μεγαλύτερες ταχύτητες κατά 20-25%. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά συνεπάγονται αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.
- Σε σύγκριση με τους ηπειρωτικούς ανέμους οι υπεράκτιοι είναι λιγότερο στροβιλώδεις εξαιτίας του ομαλότερου ανάγλυφου. Αυτό συνεπάγεται λιγότερα φορτία κόπωσης στις Α/Γ, μείωση της συχνότητας συντήρησης, αύξηση του χρόνου ζωής της εγκατάστασης και μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους⁹⁴.
- Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι, γενικά, περισσότερο αποδεκτά από τις τοπικές και ευρύτερες κοινωνίες, καθώς εμφανίζουν λιγότερη *οπτική* και *ακουστική* όχληση. Οι Α/Γ που εγκαθίστανται σε ηπειρωτικές περιοχές ρυθμίζονται να λειτουργούν σε χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου περιστροφής [tip speed ratio] λ από τη βέλτιστη τιμή της κι έτσι είναι μειωμένη η απόδοσή τους. Αυτό συμβαίνει για να μειώνεται η ακουστική όχληση. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα δεν υπάρχει τέτοιο πρόβλημα και οι Α/Γ μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να έχουν τη μέγιστη απόδοση ανεξάρτητα με το επίπεδο θορύβου. Από την άλλη πλευρά ο σχεδιασμός και η δημιουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου έχουν ορισμένες ιδιαιτερότητες και δυσκολίες που ανεβάζουν το κόστος της επένδυσης⁹⁵, καθώς οι Α/Γ και ο υπόλοιπος τεχνικός εξοπλισμός χρειάζεται να έχουν κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Πρωταρχικά θα πρέπει οι Α/Γ και ο υπόλοιπος τεχνικός εξοπλισμός να προστατευτούν από τη διάβρωση και την υγρασία του αλμυρού νερού της θάλασσας για όσο χρονικό διάστημα λειτουργεί το πάρκο. Γι' αυτό η πλήμνη και ο πύργος της Α/Γ είναι ερμητικά κλειστά έτσι ώστε να προστατεύονται από την αλμύρα και την υγρασία. Ειδική προστασία χρειάζονται και τα υπόλοιπα εξαρτήματα

⁹⁴ Βέβαια, όπως θα αναφερθεί παρακάτω, υπάρχουν και παράγοντες που συνεπάγονται αύξηση του αρχικού κόστους της επένδυσης και χρειάζεται συνολική οικονομοτεχνική αποτίμηση για να ληφθεί η απόφαση για τη δημιουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

⁹⁵ Η συνεκτίμηση του αυξημένου κόστους της αρχικής επένδυσης με την αυξημένη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας (σε σύγκριση με αντίστοιχα ηπειρωτικά αιολικά πάρκα) κατά τη λειτουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι ένας συνδυασμός που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην απόφαση για την κατασκευή του. Το παράδειγμα του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου στον κόσμο που κατασκευάστηκε στο Vindeby της Δανίας το 1991 (ισχύος ~5 MW) είναι ενδεικτικό. Το κόστος δημιουργίας του αιολικού πάρκου ήταν 85% μεγαλύτερο από το κόστος ενός αντίστοιχου ηπειρωτικού πάρκου, αλλά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι κατά 20% μεγαλύτερη από ένα αντίστοιχο ηπειρωτικό πάρκο στην περιοχή. (Boyle et al, 2004, σελ. 287 και <http://www.climateactionmap.org/project/399> (5/11/2010)).

(καλώδια κ.λπ.). Στη συνέχεια χρειάζεται τα χαρακτηριστικά των Α/Γ και γενικά του αιολικού πάρκου να είναι τέτοια που όλο το σύστημα να χρειάζεται συντήρηση σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα (σε σύγκριση με τα ηπειρωτικά αιολικά πάρκα), καθώς η δυνατότητα πρόσβασης στις Α/Γ (και γενικά η εργασία συντήρησης) μέσα στη θάλασσα δεν είναι εύκολη. Επίσης ο συνολικός σχεδιασμός, πέρα από τις μετεωρολογικές συνθήκες που αφορούν τους ανέμους, πρέπει να λάβει υπόψη του το θαλάσσιο περιβάλλον (και ό,τι αυτό περιλαμβάνει) για την ασφάλεια των πύργων και γενικότερα της εγκατάστασης. Θα πρέπει να μελετηθούν το βάθος και ο κυματισμός της θάλασσας, η μορφολογία του βυθού κ.λπ. Με τη δεδομένη τεχνολογία το μέγιστο βάθος της θάλασσας στην οποία μπορεί να εγκατασταθεί ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο είναι γύρω στα 40 m⁹⁶. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που πολλά αιολικά πάρκα έχουν εγκατασταθεί στις ακτές της Βαλτικής (Δανία, Σουηδία, Γερμανία), στις ακτές της Ολλανδίας ή σε κάποιες ακτές της Μ. Βρετανίας⁹⁷ όπου τα βάθη της θάλασσας (ακόμα και σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων από την ακτή) είναι μικρά. Οι αποστάσεις από τις ακτές μπορεί να αρχίζουν από κάποια εκατοντάδες m και να φτάνουν ορισμένα km⁹⁸.

Μια βασική ιδιαιτερότητα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι η θεμελίωση των πύργων η οποία χρειάζεται να γίνει μέσα στη θάλασσα. Οι δύο κυριότεροι τύποι θεμελίωσης είναι η βαρυτική θεμελίωση [gravity foundation] και οι θεμελιώσεις σωρού [piled foundations (mono-pile ή tripod-type)]⁹⁹.

5.3.7 Α/Γ σε εφαρμογές εκτός ηλεκτρικού δικτύου [grid-independent applications]

Αν και η πλειοψηφία των Α/Γ (σε αριθμό και τιμές εγκατεστημένης ισχύος) διεθνώς ανήκει σε συστήματα συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο, υπάρχει και αριθμός Α/Γ που είναι εγκατεστημένες σε σχετικά απομονωμένες περιοχές και

⁹⁶ Sathyajith M., 2006, σελ. 23-34.

⁹⁷ Για την κατάσταση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη Μ. Βρετανία βλ. Boyle et al, 2004, σελ. 288-292.

⁹⁸ Για παράδειγμα, σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο (Middelgrunden wind park) που ολοκληρώθηκε το 2001 έξω από την Κοπεγχάγη (Δανία), οι αρχικές δέκα Α/Γ των 2 MW (η καθεμία) εγκαταστάθηκαν σε μια καμπύλη διάταξη που έφτανε τα 3,4 km σε μήκος και σε απόσταση 2 km από την ακτή (Boyle et al, 2004, σελ. 287). Επίσης το υπεράκτιο αιολικό πάρκο Horns Rev που αποτελείται από 80 Α/Γ των 2MW (η καθεμία) αναπτύσσεται σε απόσταση 14-20 km από τις ακτές της Γιουτλάνδης (Jutland) στη Δανία (<http://guidedtour.windpower.org/en/pictures/offshore.htm> (5/11/2010)).

⁹⁹ Άρθρο με τίτλο «Development of a Gravity Foundation System for Offshore Wind Farm Applications» που υπάρχει στο URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4302413> (12/3/2011).

(συνήθως) χρησιμοποιούνται μαζί με άλλες ανανεώσιμες και συμβατικές πηγές για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μικρών αυτόνομων δικτύων ή ξεχωριστών κατοικιών. Παρακάτω θα παρουσιαστούν με συντομία ορισμένες τέτοιες περιπτώσεις ενεργειακών εγκαταστάσεων αιολικής ισχύος.

α) Α/Γ με αποθήκευση ενέργειας σε συσσωρευτές [wind-battery systems]¹⁰⁰

Συνήθως αυτά τα συστήματα είναι μικρής ισχύος (από μερικά 100 W έως μερικά 100 kW) και περιλαμβάνουν Α/Γ, συσσωρευτές και ρυθμιστή φόρτισης συσσωρευτών. Σε ορισμένες περιοχές όπου ο άνεμος συνδυάζεται με υψηλή ηλιοφάνεια (π.χ., ελληνικά νησιά Αιγαίου Πελάγους) οι Α/Γ μπορούν να συνδυαστούν και με Φ/Β πλαίσια [wind-battery-photovoltaic systems]¹⁰¹. Οι Α/Γ έχουν συνήθως ισχύ που κυμαίνεται από 10-20 kW (διάμετρος ρότορα μέχρι 6 m) έως 100 kW (διάμετρος ρότορα μέχρι 16 m). Μπορεί να είναι οριζόντιου αλλά και κατακόρυφου άξονα (π.χ., Α/Γ Savonius). Το ύψος των πύργων κυμαίνεται από λίγα μέτρα έως ~30m. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το φωτισμό χωριών ή περιοχών, δρόμων κ.λπ. ή για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών ξεχωριστών σπιτιών, ορεινών καταφυγίων κ.λπ.

β) Α/Γ που τροφοδοτούν αντλίες νερού [wind pumps]

Σε απομονωμένες περιοχές ή περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο δεν είναι εύκολη ή είναι κοστοβόρα, οι Α/Γ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροφοδοτήσουν αντλίες ύδρευσης ή άρδευσης που διαφορετικά θα χρησιμοποιούσαν συμβατικό καύσιμο (βενζίνη, πετρέλαιο-diesel κ.λπ.). Τέτοιες εφαρμογές είναι οικονομικά ανταγωνιστικές και υπάρχουν τόσο σε απομονωμένα μέρη του ανεπτυγμένου βιομηχανικού κόσμου (ΗΠΑ, Αυστραλία, Ευρώπη κ.λπ.) όσο και σε μεγάλες περιοχές του αναπτυσσόμενου κόσμου. Αυτά τα συστήματα (αιολικές αντλίες [wind pumps]) μπορούν να διαχωριστούν σε μηχανικά και ηλεκτρικά συστήματα. Στα πρώτα η κινητική ενέργεια περιστροφής των πτερυγίων μιας Α/Γ μεταφέρεται απευθείας στην αντλία χωρίς να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στα δεύτερα συστήματα έχουμε αρχικά μετατροπή της περιστροφικής κινητικής ενέργειας των πτερυγίων της Α/Γ σε ηλεκτρική ενέργεια και στη συνέχεια μετατροπή (από την αντλία) της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική¹⁰².

¹⁰⁰ Περισσότερα βλ. Kaldellis (ed), 2010, σελ. 323-363.

¹⁰¹ βλ. Kaldellis (ed), 2010, σελ. 216-251.

¹⁰² Περισσότερα για Α/Γ που τροφοδοτούν αντλίες νερού μπορείτε να βρείτε στη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά βλ. Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 336-337, Sathyajith M., 2006, σελ. 124-142.

γ) Υβριδικά συστήματα Α/Γ-γεννητριών ντίζελ [Wind-diesel systems¹⁰³]

Τέτοιου είδους συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως για απαιτούμενη ισχύ που κυμαίνεται από 100 kW έως 10 MW¹⁰⁴. Συχνά εγκαθίστανται σε απομονωμένες περιοχές αναπτυσσόμενων χωρών ή απομακρυσμένα νησιά ακόμα και ανεπτυγμένων χωρών¹⁰⁵. Μπορούν να τροφοδοτήσουν ξεχωριστά οικήματα, μικρούς οικισμούς ή ακόμα και ολόκληρα νησιά. Περιλαμβάνουν μία ή περισσότερες Α/Γ και ως *βασική πηγή φορτίου βάση*¹⁰⁶ ηλεκτρογεννήτριες ντίζελ. Επίσης ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες μπορεί το σύστημα να περιλαμβάνει Φ/Β πλαίσια, καθώς και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (συσσωρευτές ή άλλο)¹⁰⁷.

δ) Α/Γ που τροφοδοτούν συστήματα αφαλάτωσης [Wind-sea water desalination¹⁰⁸]

Τα συστήματα αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους για να απομακρύνουν το αλάτι από το θαλασσινό νερό. Οι συνηθέστερες είναι η *απόσταξη* και η *αντίστροφη* όσμωση. Και στις δύο περιπτώσεις χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτήσει τα συστήματα αφαλάτωσης. Αυτή την ενέργεια σε απομονωμένες περιοχές (όπως νησιά κ.λπ.) ή σε περιοχές όπου υπάρχουν οι κατάλληλες μετεωρολογικές συνθήκες (ισχυροί άνεμοι) μπορεί να την προσφέρουν οι Α/Γ. Τέτοιες εγκαταστάσεις έχουν αναπτυχθεί σε νησιωτικές περιοχές, όπως τα Κανάρια νησιά ή κάποια νησιά του Αιγαίου Πελάγους όπου η παρουσία ισχυρών ανέμων συνοδεύεται από την αυξανόμενη (λόγω τουρισμού) ζήτηση «γλυκού» νερού, το οποίο βρίσκεται σε μικρές ποσότητες σε αυτά τα νησιά.

¹⁰³ Για περισσότερα βλ. Kaldellis (ed), 2010, σελ. 191-214.

¹⁰⁴ Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 337.

¹⁰⁵ Επίσης μπορεί να αναπτυχθούν σε απομονωμένες ή ορεινές περιοχές ακόμα και ανεπτυγμένων χωρών, μερικές φορές σε υβριδικά συστήματα που περιλαμβάνουν και Φ/Β πλαίσια. Ένα τέτοιο γνωστό (από τη βιβλιογραφία) παράδειγμα είναι το ορεινό καταφύγιο Rotwandhaus στις γερμανικές Άλπεις, το οποίο τροφοδοτείται από υβριδικό σύστημα που περιλαμβάνει Α/Γ, Φ/Β πλαίσια και ηλεκτρογεννήτρια diesel (Luque et al, 2003, σελ. 764-765, Kaltschmitt et al, 2007, σελ. 282 και http://www.smallwindindustry.org/fileadmin/ewea_documents/documents/projects/swiis/technology/050406TALCOWIND2000.pdf / (04/10/2010)).

¹⁰⁶ Επειδή ο άνεμος είναι στοχαστικό φαινόμενο, δεν μπορεί η ηλεκτροδότηση ενός οικισμού ή ξεχωριστού οικήματος να βασίζεται αποκλειστικά σε Α/Γ. Χρειάζεται να υπάρχει μια πηγή ενέργειας που θα μπορεί να προσφέρει σε σταθερή 24ωρη βάση και με τον απαιτούμενο ρυθμό την απαραίτητη ηλεκτρική ενέργεια. Η παρουσία αυτής της πηγής ενέργειας είναι επίσης απαραίτητη και για τη σταθεροποίηση του συστήματος, καθώς η εισαγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας των Α/Γ στο τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο (οικισμού ή ξεχωριστού οικήματος) δεν είναι πάντοτε ομαλή.

¹⁰⁷ Για σύστημα αποθήκευσης με υδρογόνο βλ. Kaldellis (ed), 2010, σελ. 254-281.

¹⁰⁸ Για περισσότερα βλ. Kaldellis (ed), 2010, σελ. 506-533.

