

Κεφάλαιο 8

Αιολικές μηχανές

8.1 Εισαγωγή

Αιολικές μηχανές ονομάζονται οι μηχανές οι οποίες μπορούν να μετατρέψουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας. Οι ανεμογεννήτριες είναι αιολικές μηχανές που τη μετατρέπουν σε περιστροφική-μηχανική και μετά σε ηλεκτρική ενώ οι ανεμόμυλοι (Εικόνα 8.1) ή οι ανεμαντλίες χρησιμοποιούν την περιστροφική ενέργεια για την εκτέλεση ενός έργου (άλεση σιταριού, άντληση νερού).

Οι μοντέρνες ανεμογεννήτριες είναι πολύπλοκες ηλεκτρομηχανολογικές κατασκευές με αεροδυναμικά σχεδιασμένα πτερύγια, συστήματα μετάδοσης και υψηλής απόδοσης γεννήτριες. Η ισχύς τους μπορεί να είναι από λίγα Watt έως μερικά Megawatt, με την τάση να είναι συνεχώς αυξητική, αφού μειώνονται τα ειδικά κόστη λόγω οικονομιών κλίμακας. Οι περισσότερες μηχανές είναι οριζοντίου άξονα με δρομέα τριών πτερυγίων (Εικόνα 8.2). Αν και έχουν γίνει πολλές έρευνες και για ανεμογεννήτριες διαφορετικών τύπων (π.χ. καθέτου άξονα) δεν έχουν ακόμη αναπτυχθεί σε βαθμό που να αποτελούν αξιόπιστες εναλλακτικές λύσεις.

Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται πολλές μαζί σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό σχηματίζοντας αιολικά πάρκα και τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια το ηλεκτρικό δίκτυο. Η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε πάρκα (Κεφάλαιο 9) εξοικονομεί χρήματα σε μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς και υποσταθμούς ενώ τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται και θαλάσσια αιολικά πάρκα με μεγάλη επιτυχία. Ανεμογεννήτριες είναι δυνατόν να τροφοδοτούν με ενέργεια και αυτόνομα συστήματα από πολύ μικρά (π.χ. ιστιοφόρα σκάφη) έως μεγάλα νησιά με απομονωμένο δίκτυο.

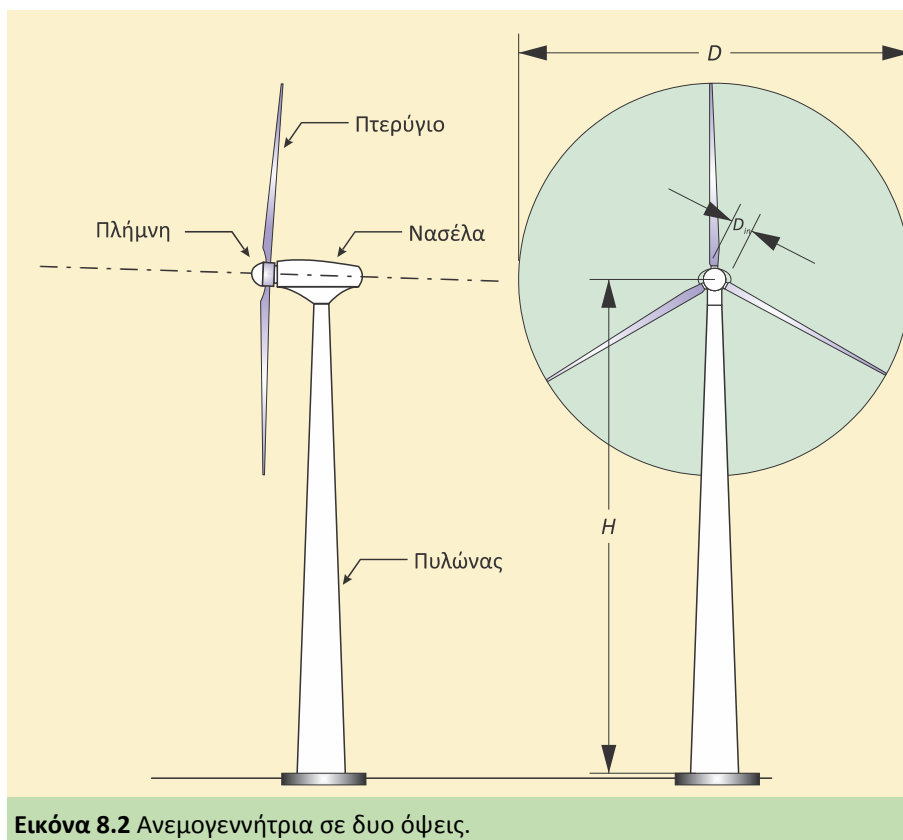


Εικόνα 8.1 Παραδοσιακός ανεμόμυλος ολλανδικού τύπου.

8.2 Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα

Τα κυρία μέρη μιας μηχανής οριζοντίου άξονα είναι:

- ▶ ο πυλώνας,
- ▶ ο δρομέας (ή πτερωτή, ρότορας, στροφέας),
- ▶ το σύστημα μετάδοσης,



Εικόνα 8.2 Ανεμογεννήτρια σε δυο όψεις.

- ▶ η γεννήτρια,
- ▶ οι αισθητήρες και ο μηχανισμός περιστροφής/προσανατολισμού, και
- ▶ τα συστήματα ελέγχου και ασφαλείας.

Πυλώνας

Ο πυλώνας αποτελεί τον κορμό της ανεμογεννήτριας και επάνω του στηρίζεται ο δρομέας και το κέλυφος (νασέλα) όπου εντός είναι τοποθετημένη η ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα μετάδοσης και άλλοι μηχανισμοί. Συνήθως ο πυλώνας είναι κατασκευασμένος από χαλύβδινο σωλήνα αλλά μπορεί να είναι από μεταλλικό δικτύωμα ή από σκυρόδεμα. Το ύψος του πυλώνα αποτελεί σημαντική παράμετρο αφού σε μεγαλύτερα ύψη η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη και έτσι μπορεί να αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας αλλά παράλληλα οδηγεί σε μεγαλύτερα κόστη θεμελίωσης και κατασκευής. Το ύψος μιας ανεμογεννήτριας ορίζεται από τον άξονα περιστροφής του δρομέα και ονομάζεται *ύψος κεφαλής* (H) (Εικόνα 8.2).

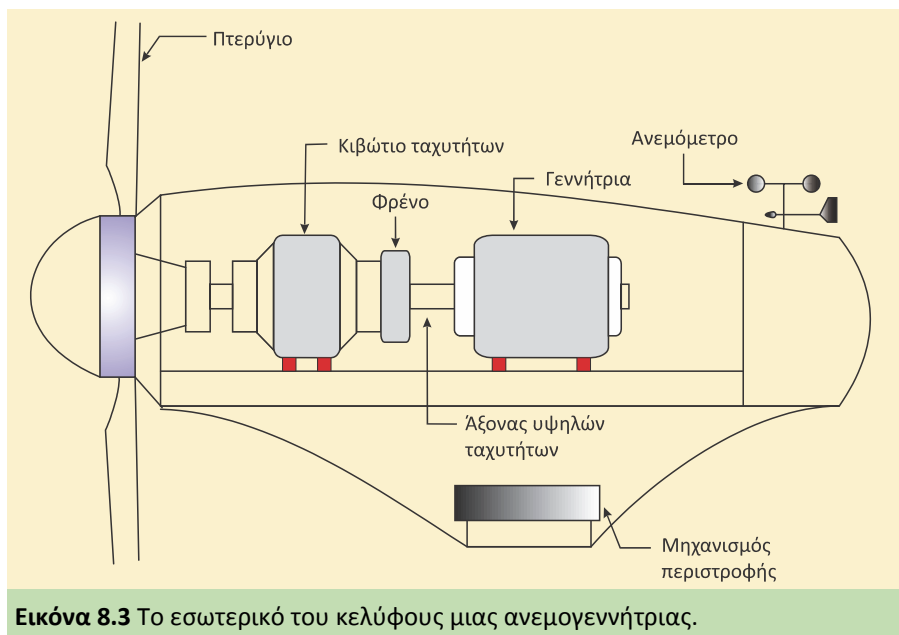
Δρομέας

Ο δρομέας αποτελεί το σημαντικότερο κομμάτι σε μια ανεμογεννήτρια αφού εκεί μετατρέπεται μέρος της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε περιστροφική-μηχανική στον άξονα. Ο δρομέας αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη. Τα πτερύγια είναι ειδικά σχεδιασμένες αεροτομές και κατά μήκος τους

παρουσιάζουν συστροφή (για λόγους αεροδυναμικής που θα εξηγηθούν παρακάτω) οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες διαθέτουν επίσης ρύθμιση βήματος, δηλαδή στρεφόμενα πτερύγια που βοηθούν στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Η διάμετρος του δρομέα (D) αποτελεί βασικό τεχνικό χαρακτηριστικό της ανεμογεννήτριας. Η απόσταση από τον άξονα έως τη βάση του πτερύγιου ονομάζεται ακτίνα ποδός και ορίζει την εσωτερική διάμετρο (D_{in}).

Σύστημα μετάδοσης

Το σύστημα μετάδοσης περιλαμβάνει τους άξονες, τις εδράσεις και το κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιαστής στροφών). Συνήθως υπάρχουν δύο κύριοι άξονες, ο πρώτος είναι ο *άξονας χαμηλών ταχυτήτων* που περιστρέφεται με την ταχύτητα του δρομέα (30-60 RPM). Με τη βοήθεια του κιβωτίου ταχυτήτων, η ταχύτητα περιστροφής ανυψώνεται και μεταφέρεται με τη βοήθεια του *άξονα υψηλών ταχυτήτων* στη γεννήτρια (Εικόνα 8.3). Η ανύψωση αυτή πραγματοποιείται έτσι ώστε η ταχύτητα περιστροφής να είναι συμβατή με τον τύπο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας και της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου. Στους άξονες, υπάρχει και σύστημα πέδησης έτσι ώστε να εμποδίζεται η κίνηση του δρομέα σε περίπτωση μεγάλης ταχύτητας, συντήρησης, κτλ.



Εικόνα 8.3 Το εσωτερικό του κελύφους μιας ανεμογεννήτριας.

Γεννήτρια

Η γεννήτρια μετατρέπει την περιστροφική κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Στις ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως τρεις τύποι ηλεκτρικών μηχανών:

- ▶ επαγωγικοί κινητήρες σταθερών στροφών,
- ▶ επαγωγικοί κινητήρες μεταβλητών στροφών διπλής τροφοδοσίας, και
- ▶ σύγχρονοι κινητήρες μεταβλητών στροφών χωρίς κιβώτιο.

Η δεύτερη κατηγορία κινητήρων είναι αυτή που χρησιμοποιείται συνήθως στις ανεμογεννήτριες μεγάλου μεγέθους.

Αισθητήρες και μηχανισμός περιστροφής

Οι μεγάλες ανεμογεννήτριες έχουν μετρητικά όργανα ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου (Εικόνα 8.4), τα οποία βοηθούν στον έλεγχο ώστε οι μηχανές να αποδίδουν πάντα τη μέγιστη δυνατή ισχύ και να προστατεύεται ο εξοπλισμός από στις υψηλές ταχύτητες). Η μέτρηση της διεύθυνσης της ταχύτητας οδηγεί το μηχανισμό περιστροφής ώστε η ανεμογεννήτρια να είναι πάντα στραμμένη προς την πλευρά που έρχεται ο άνεμος. Στις μικρές ανεμογεννήτριες δεν υπάρχει μηχανισμός περιστροφής αλλά στρέφονται από τον ίδιο τον άνεμο με τη χρήση ενός ουριαίου πτερυγίου, κάθετου στο επίπεδο της πτερωτής. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται έτσι ώστε να ρυθμίζονται διάφορες παράμετροι λειτουργίας όπως η γωνία βήματος των πτερυγίων.



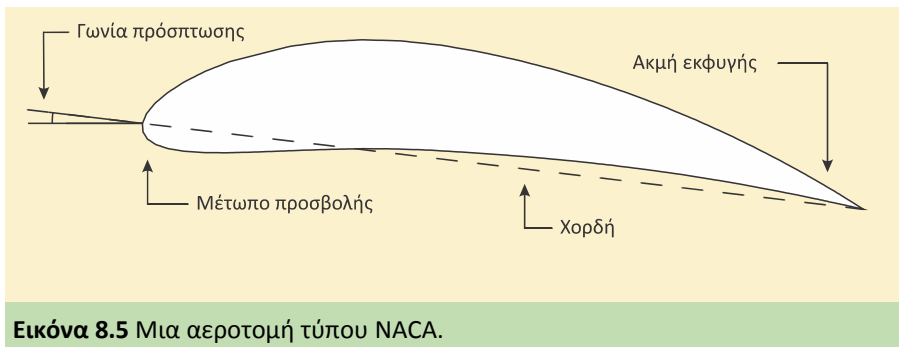
Εικόνα 8.4 Μετρητικό όργανο επάνω σε ανεμογεννήτρια.

Συστήματα ελέγχου και ασφαλείας

Με τον όρο συστήματα ελέγχου ονομάζονται όλα τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα που έχουν ως σκοπό την εύρυθμη λειτουργία της. Τέτοια συστήματα είναι όσα εκμεταλλεύονται τις πληροφορίες από τα ανεμόμετρα, εκείνα που σχετίζονται με την ηλεκτρική γεννήτρια και το ηλεκτρικό δίκτυο, τα καταγραφικά συστήματα ισχύος και ενέργειας και τα συστήματα επικοινωνίας.

8.3 Αεροδυναμική πτερυγίου

Η αεροδυναμική πραγματεύεται την αλληλεπίδραση της κίνησης του αέρα ή άλλων αέριων ρευστών γύρω από σώματα και μελετά τις δυνάμεις που δημιουργούνται. Κατά τη μελέτη των αιολικών μηχανών, έγιναν πολλές προσπάθειες για την κατανόηση και επεξήγηση των αρχών που διέπουν την αεροδυναμική τους έτσι ώστε να γίνει σωστός σχεδιασμός. Οι αεροδυναμικές θεωρίες που αναπτύχθηκαν για την αεροναυπηγική βιομηχανία εφαρμόστηκαν και για τις ανεμογεννήτριες σε συνδυασμό με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από μελέτες ετών.



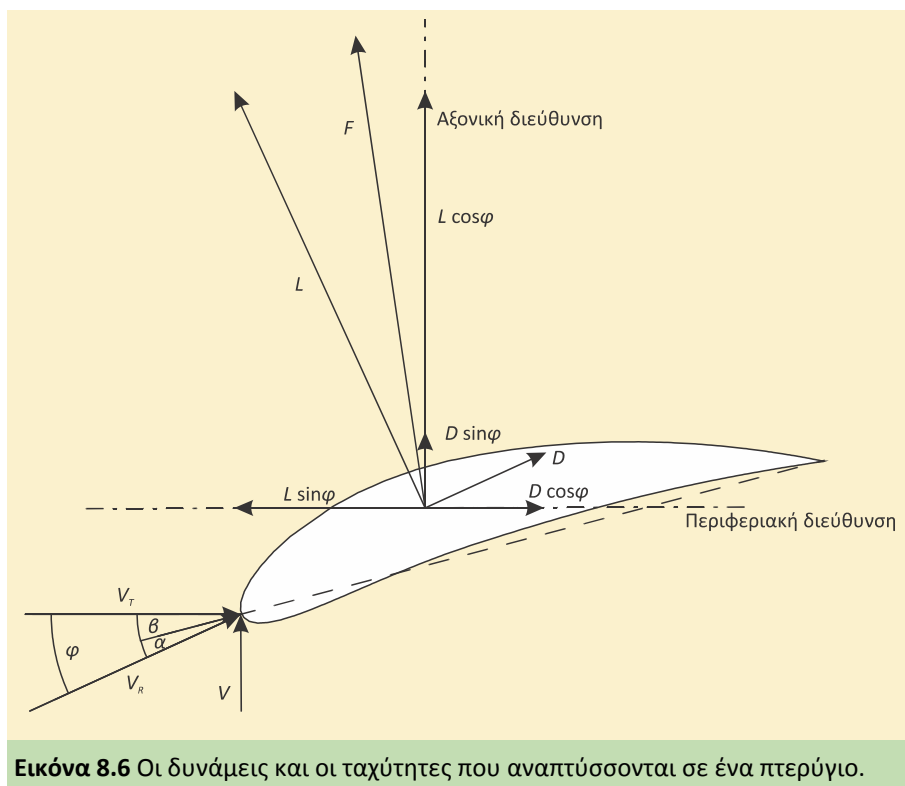
Εικόνα 8.5 Μια αεροτομή τύπου NACA.

Αεροτομή

Για την αποδοτική μετατροπή της ενέργειας από κινητική του ανέμου σε περιστροφική του δρομέα, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών έχουν τη μορφή αεροτομών. Οι αεροτομές που χρησιμοποίησαν οι πρώτες ανεμογεννήτριες ήταν οι αεροτομές της NACA (National Advisory Committee for Aeronautics, Εικόνα 8.5), φτιαγμένες για την αεροναυπηγική βιομηχανία. Όταν μια αεροτομή τοποθετηθεί σε ρεύμα αέρα, τότε ο αέρας διέρχεται από την άνω και από την κάτω πλευρά. Λόγω της καμπυλότητας των αεροτομών, ο αέρας που διέρχεται από την άνω πλευρά πρέπει να διανύσει περισσότερη απόσταση στη μονάδα του χρόνου απ' ότι ο αέρας που περνά από την κάτω την πλευρά. Έτσι ο αέρας στην πάνω πλευρά ταξιδεύει με μεγαλύτερη ταχύτητα και σύμφωνα με το θεώρημα του Bernoulli (8.1) αυτό θα οδηγήσει σε χαμηλότερη πίεση στην άνω πλευρά της αεροτομής.

$$p + \frac{1}{2} \rho V^2 = \text{const} \quad (8.1)$$

Η διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δυο επιφάνειες της αεροτομής έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δύναμης F (Εικόνα 8.6). Η συνιστώσα της δύναμης που αναπτύσσεται κάθετα στη κατεύθυνση της ροής ονομάζεται άνωση (L) ενώ η συνιστώσα, παράλληλη της ροής, ονομάζεται αντίσταση (D). Η δύναμη της άνωσης είναι αυτή που εκμεταλλεύονται οι ανεμογεννήτριες για να παράξουν έργο και ο στόχος για το σχεδιασμό της είναι η μεγιστοποίησή της.



Εικόνα 8.6 Οι δυνάμεις και οι ταχύτητες που αναπτύσσονται σε ένα πτερύγιο.

Η δύναμη άνωσης δίνεται από τη σχέση:

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho A_f V^2 \quad (8.2)$$

ενώ η δύναμη αντίστασης από τη σχέση:

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho A_f V^2 \quad (8.3)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A_f η επιφάνεια του πτερυγίου και C_L και C_D οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης αντίστοιχα.

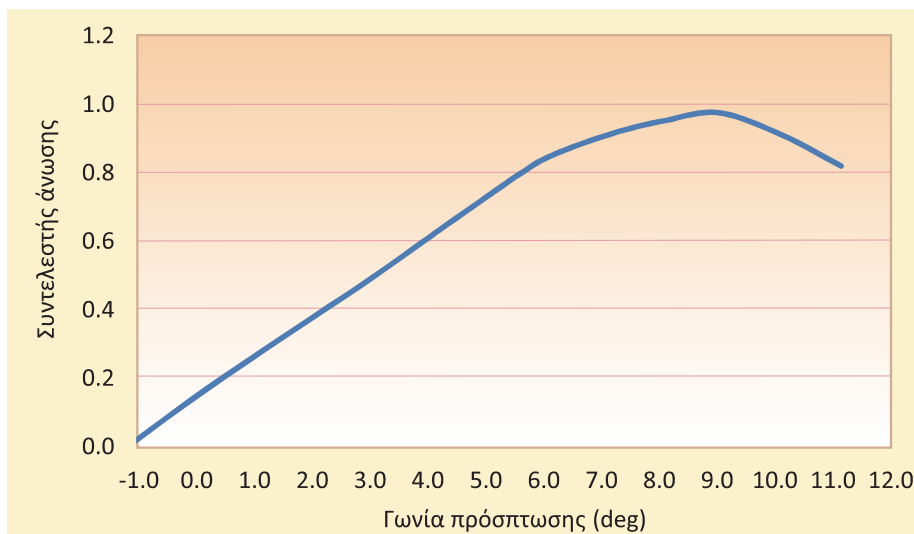
Η γωνία ανάμεσα στη ροή και στη χορδή της αεροτομής ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης και συμβολίζεται με α . Οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης εξαρτώνται από τη γωνία πρόσπτωσης. Υπάρχει μια βέλτιστη γωνία για την οποία ο συντελεστής άνωσης μεγιστοποιείται, ενώ μόλις ξεπεραστεί, ο συντελεστής άνωσης μειώνεται απότομα (Εικόνα 8.7). Αυτό συμβαίνει επειδή σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης η ροή εισέρχεται σε έντονα τυρβώδη περιοχή με αποτέλεσμα να υπάρχει αποκόλληση από το οριακό στρώμα.

Η συμπεριφορά των συντελεστών C_D και C_L μιας αεροτομής μπορεί να καθοριστεί από πειράματα σε αεροδυναμικές σήραγγες. Σε μια αεροτομή είναι πολύ σημαντικό να τοποθετηθεί το πτερύγιο στη βέλτιστη γωνία όπου ο λόγος C_D/C_L είναι ο ελάχιστος.

Εάν θεωρηθεί μια κινούμενη αεροτομή σε ρεύμα αέρα, τότε σύμφωνα με την Εικόνα 8.6, εκτός από την ταχύτητα ανέμου V υπάρχει και η περιφερειακή

ταχύτητα περιστροφής V_T και η σύνθεση τους σχηματίζει την σχετική ταχύτητα V_R με την οποία η αεροτομή "βλέπει" τον άνεμο. Η γωνία β ονομάζεται γωνία βήματος και η φ σχετική γωνία πρόσπτωσης. Ισχύει η σχέση $\varphi = \alpha + \beta$.

Στις ανεμογεννήτριες, το πτερύγιο (το οποίο έχει σχήμα αεροτομής) περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω με αποτέλεσμα η περιφερειακή ταχύτητα V_T να είναι διαφορετική σε κάθε σημείο κατά μήκος του πτερυγίου σύμφωνα με τη σχέση $V_T = \omega r$, όπου r η απόσταση του πτερυγίου από τον άξονα περιστροφής. Έτσι και η συνισταμένη ταχύτητα V_R θα είναι διαφορετική κατά μήκος του πτερυγίου και αυτό κατασκευαστικά οδηγεί σε πτερύγια με συστροφή έτσι ώστε η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης να διατηρείται σε όλο το μήκος τους.



Εικόνα 8.7 Ο συντελεστής άνωσης σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης.

Επειδή η διεύθυνση του ανέμου αλλάζει συνεχώς, δεν είναι εφικτό να εισέρχεται στη βέλτιστη γωνία. Για να διατηρηθεί η βέλτιστη γωνία κατασκευάζονται περιστρεφόμενα πτερύγια (για τη ρύθμιση του βήματος) έτσι ώστε κάθε φορά το σύστημα ελέγχου να εντοπίζει την βέλτιστη γωνία.

Εάν αναλυθούν οι δυνάμεις L και D στις συνιστώσες τους ως προς το επίπεδο περιστροφής και την κάθετη του, τότε προκύπτουν δύο νέες σύνθετες δυνάμεις. Αυτές είναι η περιφερειακή δύναμη F_{tan} και η αξονική F_{ax} και είναι ίσες με:

$$F_{tan} = L \sin \varphi - D \cos \varphi \quad (8.4)$$

$$F_{ax} = L \cos \varphi + D \sin \varphi \quad (8.5)$$

Σκοπός της ανάλυσης που θα ακολουθήσει είναι να γίνει σύνδεση της μορφής του πτερυγίου με τις τιμές των C_D και C_L και με το συντελεστή ισχύος C_p της ανεμογεννήτριας. Μια προσπάθεια για να επεκταθεί το όριο του Betz (βλ. κεφάλαιο 7) σε πραγματικές ανεμογεννήτριες μπορεί να γίνει αν ληφθεί

υπόψη ο αριθμός των πτερυγίων, οι αεροδυναμικές απώλειες αντίστασης, η μορφή της ροής η οποία δεν είναι τελείως αξονική και η περιστροφική κίνηση του ανέμου μετά την έξοδο του από τον δρομέα.

Εάν υποτεθεί μια ροή η οποία είναι εφαπτομενική μπροστά από τον δρομέα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής εφαπτομενικής εισαγωγής a'

$$a' = \frac{\omega_{tan}}{2\omega} \quad (8.6)$$

όπου ω_{tan} είναι η εφαπτομενική γωνιακή ταχύτητα της ροής. Εάν υποτεθεί ένας λεπτός περιφερειακός ροϊκός σωλήνας πάχους dr σε απόσταση r από το κέντρο περιστροφής τότε η επιφάνεια αυτή έχει εμβαδόν:

$$dA = 2\pi r dr \quad (8.7)$$

Έτσι η στοιχειώδης δύναμη dF που προκύπτει από το κομμάτι dA είναι:

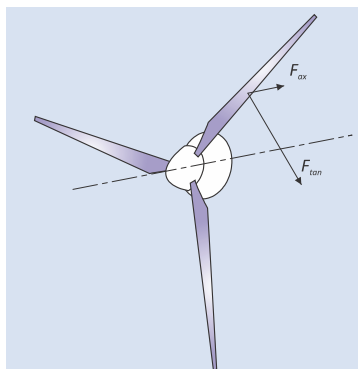
$$dF = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho V^2 2\pi r dr \quad (8.8)$$

Όμοια, η ροπή στο dA είναι:

$$dM = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V 2\pi r^3 dr \quad (8.9)$$

Επειδή η ισχύς είναι γενικά $P = \omega M$, με ολοκλήρωση από την ακτίνα ποδός (R_h) έως την ακτίνα ακροπτερυγίου (R_t) λαμβάνεται:

$$P = \int_{R_h}^{R_t} \omega^2 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho V 2\pi r^3 dr \quad (8.10)$$



Εικόνα 8.8 Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας.

8.4 Επιδόσεις ανεμογεννήτριας

Η βασική σχέση που χρειάζεται για την ανάλυση των επιδόσεων μιας ανεμογεννήτριας είναι ο λόγος (λ) της γραμμικής ταχύτητας στο άκρο του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου (Tip speed ratio):

$$\lambda = \frac{\omega R_t}{V} \quad (8.11)$$

Ο λόγος αυτός είναι από τις βασικότερες παραμέτρους στη λειτουργία των ανεμογεννητριών καθώς χαρακτηρίζει την απόδοση της μετατροπής της ενέργειας (αλλά και το επίπεδο θορύβου). Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο συντελεστής ισχύος εκφράζει το λόγο της ενέργειας που δεσμεύει η ανεμογεννήτρια προς την ενέργεια του ανέμου και εξαρτάται από τα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων.

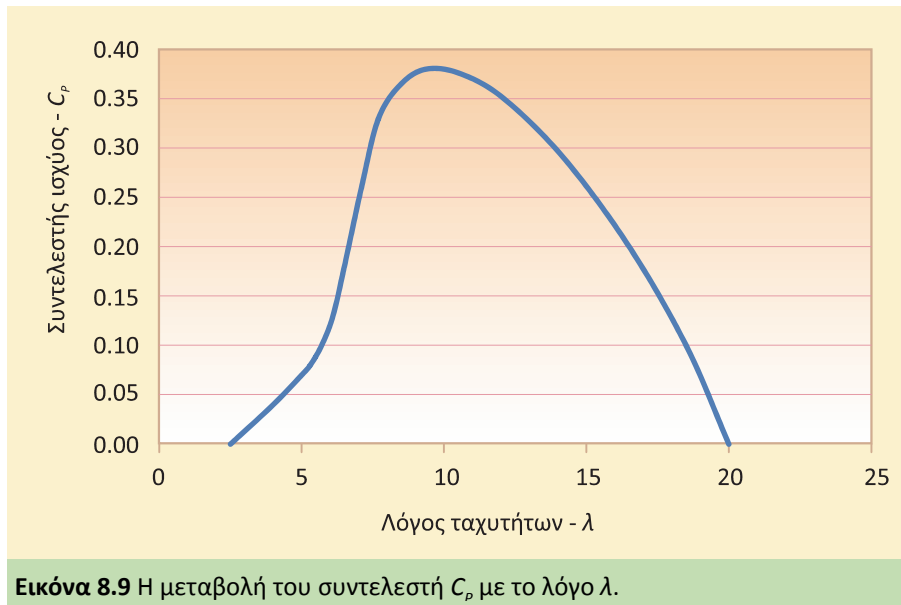
Μπορεί να γίνει κατανοητό πως η μέγιστη τιμή του C_p θα δίνεται στο σημείο για το οποίο η ταχύτητα του ανέμου βελτιστοποιεί τη γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή.

Επειδή η ταχύτητα του ανέμου αλλάζει (αλλά και η ταχύτητα περιστροφής), ο συντελεστής C_p δίνεται ως συνάρτηση του συντελεστή λ (Εικόνα 8.9) αλλά και



Εφαρμογή 8.1

της γωνίας βήματος (θ) για τις ανεμογεννήτριες με ρύθμιση βήματος. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει ρύθμιση βήματος τότε ο συντελεστής ισχύος είναι συνάρτηση μόνο του λ ($C_p(\lambda)$).



Εικόνα 8.9 Η μεταβολή του συντελεστή C_p με το λόγο λ .

Με εφαρμογή της, σχέσης (7.18), η ισχύς που δίνει μια ανεμογεννήτρια είναι:

$$P = \eta_{tot} \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) \rho A V^3 \quad (8.12)$$

Ο η_{tot} είναι ένας συνολικός βαθμός απόδοσης των μερών της μηχανής που συμπεριλαμβάνει μηχανικές απώλειες στο κιβώτιο ταχυτήτων και στις εδράσεις και ηλεκτρικές απώλειες στη γεννήτρια.

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης της παραγόμενης ισχύος ονομάζεται καμπύλη ισχύος και δίνεται από τον κατασκευαστή για κάθε ανεμογεννήτρια μετρημένη σε συγκεκριμένες συνθήκες. Στην Εικόνα 8.11 παρουσιάζονται δύο καμπύλες ισχύος για μια ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 800 kW με έλεγχο βήματος (Pitch Control) και μια 600 kW χωρίς (Stall Control). Σε ένα τέτοιο διάγραμμα ορίζονται τα εξής χαρακτηριστικά μεγέθη:

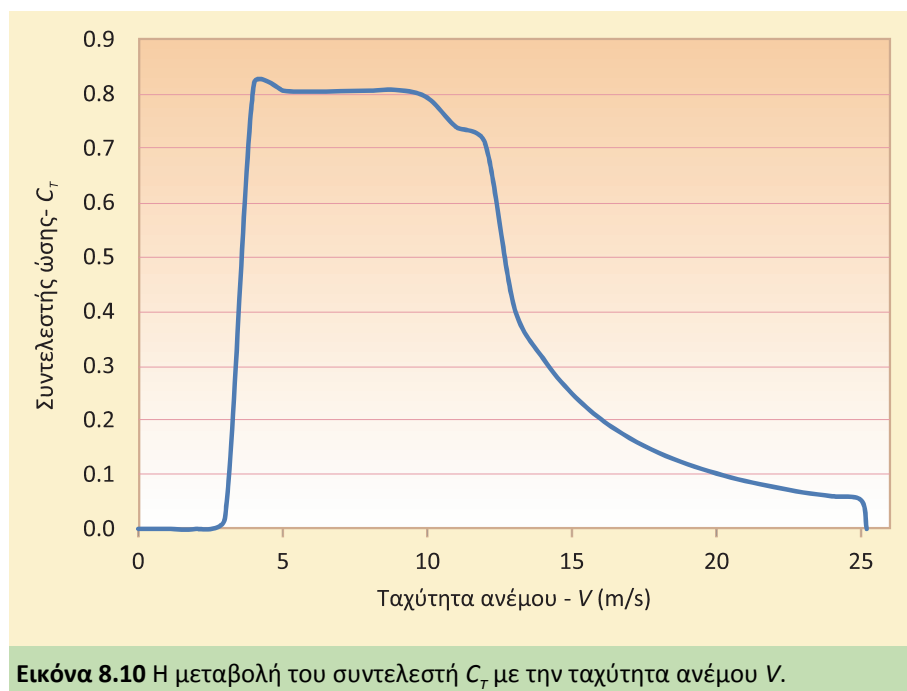
1. Η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας (P_R).
2. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_{cutin}), κάτω από την οποία δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια στον άνεμο ικανή να υπερνικήσει τις μηχανικές απώλειες και τις τριβές στην ανεμογεννήτρια.
3. Η ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας (V_R), στην οποία η ανεμογεννήτρια αποδίδει τη μέγιστη ισχύ της.
4. Η ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (V_{cutout}), πάνω από την οποία η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να λειτουργήσει για λόγους προστασίας της από τους ισχυρούς ανέμους.

Η περιοχή μεταξύ της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας έως την ονομαστική ταχύτητα χαρακτηρίζεται και ως περιοχή λειτουργίας σταθερής απόδοσης. Αντίστοιχα, η περιοχή μεταξύ της ονομαστικής ταχύτητας και της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως περιοχή σταθερής αποδιδόμενης ισχύος.

Σημαντικό τεχνικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών αποτελεί και ο *συντελεστής ώσης* C_T (Thrust Coefficient). Ο συντελεστής ώσης δείχνει κατά πόσο η μεταβολή της ορμής του ανέμου (πριν και μετά τον δρομέα) γίνεται ωφέλιμη δύναμη για την παραγωγή ισχύος. Ορίζεται από τη σχέση:

$$C_T = \frac{F_T}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V^2} \quad (8.13)$$

Όπου F_T η δύναμη ώσης της μηχανής για κάθε ταχύτητα. Στην Εικόνα 8.10 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη συντελεστή ώσης ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου.



8.5 Εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας



Εφαρμογή 8.4

Για τον εκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής απαιτούνται:

- ▶ Μια αναλυτική εξίσωση (8.12) για την παραγωγή ενέργειας σε σχέση με την ταχύτητα ανέμου (ή η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας).

- Η στατιστική κατανομή του ανέμου $f(V)$ στη θέση εγκατάστασης (π.χ σχέση 7.3 για κατανομή Weibull) για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα ή χρονοσειρά ταχυτήτων από μετρήσεις.

Αν συνδυαστεί η καμπύλη ισχύος $P(V)$ της ανεμογεννήτριας και η κατανομή των ταχυτήτων $f(V)$ για μια περιοχή τότε προκύπτει η παραγόμενη ενέργεια στο χρονικό διάστημα δt :

$$E_{turb} = \delta t \int_0^{\infty} f(V) P(V) dV = \delta t \int_{V_{cutin}}^{V_{cutout}} f(V) P(V) dV \quad (8.14)$$

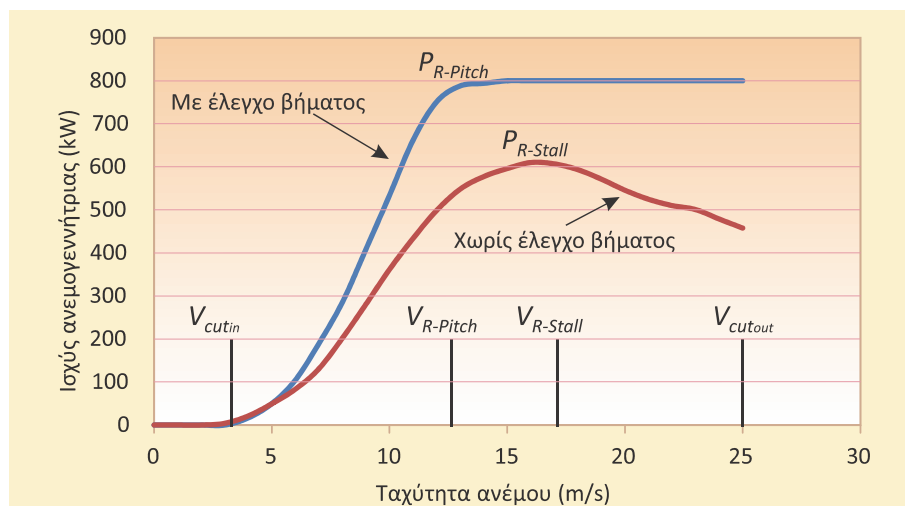
Με δεδομένη την ετήσια ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας, ορίζεται ο *συντελεστής εκμετάλλευσης* (Capacity Factor) ως το πηλίκο της ενέργειας που παράγεται προς αυτή που θα μπορούσε να παράγει η μηχανή αν λειτουργούσε για το ίδιο χρονικό διάστημα συνεχώς υπό ονομαστική ισχύ (Το χρονικό διάστημα συνήθως αφορά περίοδο ενός έτους).

$$CF = \frac{E}{\delta t P_R} \quad (8.15)$$

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς σχετίζεται άμεσα με τη βιωσιμότητα μιας ενεργειακής επένδυσης. Συνήθεις τιμές του είναι μεταξύ του 0.25 και του 0.35, χωρίς να αποκλείονται και υψηλότερες τιμές. Σε πραγματικά προβλήματα δεν είναι διαθέσιμη η ακριβής μαθηματική έκφραση της συνάρτησης ισχύος $P(V)$ της ανεμογεννήτριας αλλά τιμές της παραγόμενης ισχύος σε συγκεκριμένες ταχύτητες από φυλλάδιο τεχνικών χαρακτηριστικών του κατασκευαστή. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διακριτή μορφή της εξίσωσης (8.14):

$$E_{turb} = \delta t \sum_i (f_{V_i} P_i) \quad (8.16)$$

όπου f_{V_i} είναι η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας V_i και P_i η αντίστοιχη ισχύς της ανεμογεννήτριας. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί πως οι ταχύτητες θα πρέπει να έχουν αναχθεί στο ύψος κεφαλής της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 8.11 Τυπικές καμπύλες ισχύος για Α/Γ με και χωρίς έλεγχο βήματος.

8.6 Βιβλιογραφία

Ackermann T., "Wind Power in Power Systems", Wiley & Sons, 2005.

Boyle G., "Renewable Energy Power for a Sustainable Future", Third Edition, Oxford University Press, 2012.

Burton T., Jenkins N., Sharpe D., Bossanyi E., "Wind Energy Handbook", Wiley & Sons, 2011.

Eldridge, F. R., "Wind Machines", Mitre Corporation, 1975.

Hunter R., Elliot G., "Wind - Diesel Systems", Cambridge University Press, 1999.

Jha A. R., "Wind Turbine Technology", CRC Press, 2011.

Johnson L. G., "Wind Energy Systems", Electronic Edition, 2001.

Sathyajith M., "Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics", Springer, 2006.

Καλδέλλης Ι., "Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας", Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, 1999.

8.7 Υπολογιστικές εφαρμογές

Εφαρμογή 8.1 - Υπολογισμός χαρακτηριστικής καμπύλης ανεμογεννήτριας

Ανεμογεννήτρια με διάμετρο δρομέα $D := 34\text{m}$ και εσωτερική διάμετρο $D_{in} := 1.5\text{m}$ λειτουργεί με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Με δεδομένη τη χαρακτηριστική καμπύλη του συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda)$ που δίνεται στο γράφημα, να κατασκευαστεί η καμπύλη ισχύος - ταχύτητας $P(V)$.

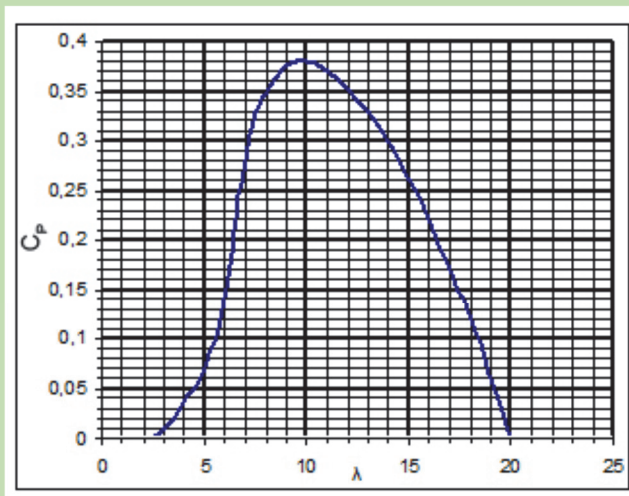
Δεδομένα

Γωνιακή ταχύτητα

$$\omega := 47.75\text{RPM}$$

Πυκνότητα αέρα

$$\rho := 1.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



$$\text{RPM} \equiv \frac{2 \cdot \pi}{60\text{s}}$$

Η καμπύλη του συντελεστή ισχύος $C_p(\lambda)$

ΛΥΣΗ

Αρχικά, από το γράφημα, λαμβάνονται τα ζεύγη τιμών για τα C_p και λ

$$C_p := (0.07 \ 0.08 \ 0.1 \ 0.13 \ 0.18 \ 0.26 \ 0.33 \ 0.36 \ 0.38 \ 0.37 \ 0.35 \ 0.3)$$

$$\lambda := (5 \ 5.3 \ 5.7 \ 6.1 \ 6.5 \ 7.1 \ 7.7 \ 8.5 \ 9.4 \ 10.6 \ 12.1 \ 14.2)$$

Από τις παραπάνω τιμές μπορεί να γίνει γραμμική παρεμβολή ανάμεσα σε δύο τιμές. Έτσι με χρήση της συνάρτησης `linterp`

$$C_p(x) := \text{linterp} \left(\lambda^T, C_p^T, x \right)$$

Το σύμβολο $\blacksquare^T$ δίνει τον ανάστροφο πίνακα (ή διάνυσμα). Η συνάρτηση `linterp` δέχεται διανύσματα - στήλες. Η επιφάνεια του δίσκου είναι:

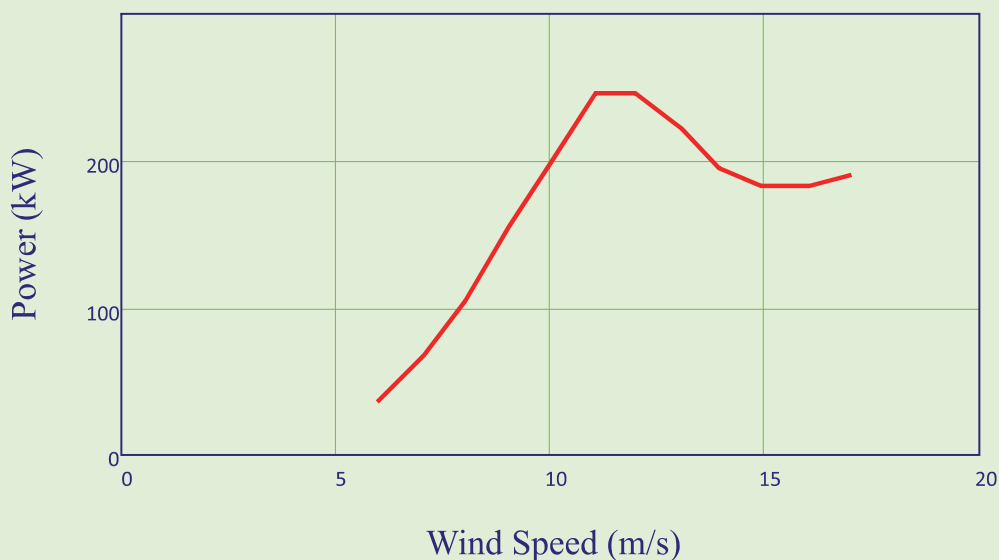
$$A_{\text{disc}} := \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{in}}{2} \right)^2 \right] \pi = 906.153\text{m}^2$$

Η σχέση που συνδέει την ταχύτητα του ανέμου (V) με την ταχύτητα περιστροφής (ω) και το λόγο της γραμμικής ταχύτητας στο άκρο πτερυγίου προς την ταχύτητα ανέμου (λ) είναι:

$$V := \frac{\omega \cdot \frac{D}{2}}{\lambda}$$

Η σχέση που δίνει την ισχύ ως συνάρτηση της ταχύτητας είναι:

$$P := \left[\frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda^T) \cdot \rho \cdot A \cdot (V^T)^3 \right]$$



Εφαρμογή 8.2 - Μείωση διαμέτρου ανεμογεννήτριας

Οι μηχανικοί μιας εταιρίας κατασκευής μικρών ανεμογεννητριών αποφάσισαν για άγνωστους λόγους να κόψουν τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας κατά $\delta r := 65\text{cm}$. Εάν ο συντελεστής C_p δεν μεταβάλλεται σημαντικά από αυτή την αλλαγή τότε να υπολογιστεί η ποσοστιαία μείωση της ισχύος καθώς και η νέα ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας εάν αρχικά είχε ονομαστική ισχύ $P_{old} := 15\text{kW}$. Η ανεμογεννήτρια έχει διάμετρο δρομέα $D_{old} := 9\text{m}$ και εσωτερική διάμετρο $D_{in} := 1\text{m}$.



Το ένα από τα τρία κομμένα πτερύγια

ΛΥΣΗ

Η εξίσωση που δίνει την ισχύ ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου είναι:

$$P(V) = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Η νέα διαμετρος είναι:

$$D_{\text{new}} := D_{\text{old}} - 2\delta r = 7.7 \text{ m}$$

Η ποσοστιαία διαφορά στην ονομαστική DP_p ισχύ είναι:

$$DP_p = \frac{P_{\text{new}} - P_{\text{old}}}{P_{\text{old}}} = \frac{\frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi}{4} \cdot (D_{\text{new}}^2 - D_{\text{old}}^2)}{\frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi}{4} \cdot (D_{\text{old}}^2 - D_{\text{in}}^2)}$$

και με τη χρήση συμβολικών πράξεων απλοποίησης (Μενου Symbolics και Simplify)

$$DP_p := \frac{D_{\text{old}}^2 - D_{\text{new}}^2}{D_{\text{in}}^2 - D_{\text{old}}^2} = -27.137\%$$

Ενώ η νέα ονομαστική ισχύς είναι:

$$P_{\text{new}} := P_{\text{old}} \cdot (1 + DP_p) = 10.929 \cdot \text{kW}$$

Εφαρμογή 8.3 - Επίδραση υψομέτρου και θερμοκρασίας στην απόδοση ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας αναφέρεται σε θερμοκρασία $T_{\text{ref}} := 15^\circ\text{C}$ και πίεσης $p_{\text{ref}} := 1\text{atm}$ στην επιφάνεια της θάλασσας. Εάν η μέση θερμοκρασία στην περιοχή που πρόκειται να εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια είναι $T_{\text{inst}} := 10^\circ\text{C}$ και βρίσκεται σε υψόμετρο $h := 1500\text{m}$ να υπολογίσετε την αναμενόμενη απόκλιση στην ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τις συνθήκες αναφοράς.

Δεδομένα

Σταθερά αερίου για ξηρό αέρα

$$R_{\text{air}} := 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

ΛΥΣΗ

Σε κάθε σημείο της ατμόσφαιρας ισχύει γενικά η υδροστατική ισορροπία:

$$\frac{d}{dz} p = -\rho(z) \cdot g$$

Η καταστατική εξίσωση είναι:

$$p = \rho(z) \cdot R \cdot T$$

Ο συνδυασμός των παραπάνω εξισώσεων δίνει τη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d}{dz} \rho(z) = -\frac{\rho(z) \cdot g}{R \cdot T}$$

Η πυκνότητα του αέρα στις συνθήκες αναφοράς δίνει την οριακή συνθήκη ($\rho(0) = \rho_0$):

$$\rho_0 := \frac{p_{ref}}{R_{air} \cdot T_{ref}} = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Η διαφορική εξίσωση μπορεί να λυθεί με τη χρήση της συνάρτησης Odesolve αφού πρώτα αδιαστατοποιηθούν τοπικά οι μεταβλητές

Given

$$\rho(0) = \rho_0 \leftarrow \frac{\rho_0}{\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$\frac{d}{dz} \rho(z) = -\frac{\rho(z) \cdot \left(g \leftarrow \frac{g}{\text{m} \cdot \text{s}^{-2}} \right)}{\left(R_{air} \leftarrow \frac{R_{air}}{\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}} \right) \cdot \left(T_{inst} \leftarrow \frac{T_{inst}}{\text{K}} \right)}$$

AirDens := Odesolve (z, 1500) και επαναφέροντας τις μονάδες

$$\rho(z) := \text{AirDens} \left(\frac{z}{\text{m}} \right) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Έτσι η πυκνότητα του αέρα στο ζητούμενο υψόμετρο είναι:

$$\rho(h) = 1.022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Όμοια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η αναλυτική λύση:

$$\rho_{an}(z) := \rho_0 \cdot \exp \left(-\frac{g}{R_{air} \cdot T_{inst}} \cdot z \right), \quad \rho_{an}(h) = 1.022 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

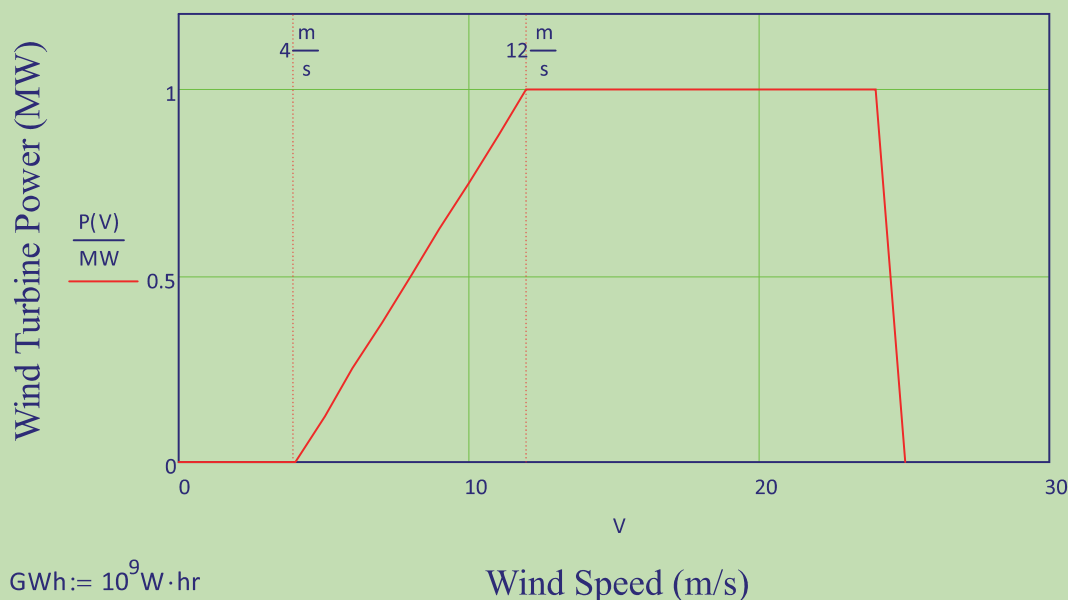
Αφού η σχέση που συνδέει την ισχύ με την πυκνότητα είναι γραμμική ($P = \eta_{tot} \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$) άρα και η

σχέση που συνδέει την ενέργεια με την πυκνότητα θα είναι γραμμική τότε $DE_p = DP_p = D\rho_p$

$$DE_p := \frac{\rho(h) - \rho_0}{\rho_0} = -16.558\%$$

Εφαρμογή 8.4 - Υπολογισμός ετήσιας ενέργειας από ανεμογεννήτρια

Για ανεμογεννήτρια ονομαστικής ισχύος $P_R := 1\text{MW}$ και χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος αυτή της παρακάτω εικόνας, να υπολογιστεί η ετήσια παραγομένη ενέργεια και ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας σε μια περιοχή όπου ο άνεμος περιγράφεται από κατανομή Weibull με συντελεστή μορφής $k := 1.8$ και μέση ταχύτητα στο ύψος κεφαλής $V_{\text{mean}} := 5.7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$



ΛΥΣΗ

Η παράμετρος c της κατανομής Weibull είναι:

$$c := V_{\text{mean}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)^{-1} = 6.41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

ενώ η κατανομή Weibull είναι:

$$f(V) := \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

Από την μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας εξάγεται το συμπέρασμα πως η ετήσια παραγόμενη ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με τη χρήση ολοκληρώματος (αφού είναι εύκολο να εξαχθεί αναλυτική σχέση για τη σχέση ισχύος - ταχύτητας) είτε λαμβάνοντας διακριτές τιμές.

Α. Διακριτές τιμές

Αρχικά χωρίζεται η περιοχή ταχυτήτων σε $n := 8$ ($i := 0..n$) διαστήματα εύρους $\delta := 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$V_i := i \cdot \delta$$

Από το διάγραμμα της εικόνας υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύ από την ανεμογεννήτρια για τη μεσαία τιμή των n διαστημάτων ($j := 0..n-1$)

$$V_{m_j} := \frac{V_j + V_{j+1}}{2}$$

$$V_m^T = (1.5 \quad 4.5 \quad 7.5 \quad 10.5 \quad 13.5 \quad 16.5 \quad 19.5 \quad 22.5) \frac{m}{s}$$

$$P_g := (0 \quad 62.5 \quad 437.5 \quad 812.5 \quad 1000 \quad 1000 \quad 1000 \quad 1000) \text{ kW}$$

Η πιθανότητα ο άνεμος να βρίσκεται σε κάποια από τις παραπάνω κλάσεις ταχυτήτων είναι:

$$F(V_j < V < V_{j+1}) = F(V < V_{j+1}) - F(V < V_j)$$

Η πιθανότητα η ταχύτητα V να είναι μικρότερη από μια ταχύτητα V_i ($F(V < V_i)$) δίνεται από την αθροιστική κατανομή της Weibull.

$$F_i := \int_0^{V_i} f(V) dV$$

Έτσι η πιθανότητα η ταχύτητα V να βρίσκεται σε κάποια κλάση θα δίνεται από τη σχέση:

$$DF_j := F_{j+1} - F_j$$

Άρα η ετήσια ενέργεια θα είναι:

$$E_1 := 8760 \text{ hr} \cdot \left[\sum_{j=0}^{n-1} \left[(P_g^T)_j \cdot DF_j \right] \right] = 2.371 \cdot \text{GWh}$$

Προσοχή!

1. Με τον δείκτη i συμβολίζονται τα όρια των κλάσεων και με j ο αριθμός της κλάσης.
2. Ο αριθμός των κλάσεων πρέπει να είναι μεγάλος και το εύρος μικρό για να υπάρχει ακρίβεια στα αποτελέσματα.

B. Συνάρτηση

Η χαρακτηριστική καμπύλη της ισχύος μπορεί να γραφτεί ως κλαδική συνάρτηση ισχύος - ταχύτητας

$$P(V) := \begin{cases} \left[\left(V \cdot \frac{s}{m} - 4 \right) \cdot \frac{1}{8} \cdot \text{MW} \right] & \text{if } 4 \frac{m}{s} < V < 12 \frac{m}{s} \\ 1 \text{ MW} & \text{if } 12 \frac{m}{s} \leq V < 24 \frac{m}{s} \\ 0 \text{ W} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Η ετήσια ενέργεια θα είναι:

$$E_2 := 8760 \text{ hr} \cdot \int_0^{\infty \cdot \frac{m}{s}} P(V) \cdot f(V) dV = 2.356 \cdot \text{GWh}$$

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης θα είναι σε κάθε περίπτωση:

$$CF_1 := \frac{E_1}{8760 \text{ hr} \cdot P_R} = 0.271 \quad \text{και} \quad CF_2 := \frac{E_2}{8760 \text{ hr} \cdot P_R} = 0.269$$

Εφαρμογή 8.5 - Ανάλυση κύκλου ζωής ρύπων και ενέργειας για μια ανεμογεννήτρια

Ανεμογεννήτρια με ονομαστική ισχύ $P_R := 600\text{kW}$ είναι διασυνδεδεμένη στο ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας και μετά από μετρήσεις ο συντελεστής εκμετάλλευσης προέκυψε ίσος με $CF := 31.2\%$. Στον πίνακα 1 δίνονται κατασκευαστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας ενώ στον πίνακα 2 δίνεται το ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας.

Να υπολογιστούν:

1. Η μείωση ρύπων από την εισαγωγή της ανεμογεννήτριας στο δίκτυο.
2. Ο λόγος ενεργειακής αποπληρωμής και η περίοδος ενεργειακής αποπληρωμής.
3. Η τιμή για το συντελεστή εκπομπής CO_2 στον κύκλο ζωής της ανεμογεννήτριας.

Δεδομένα

Διάρκεια ζωής επένδυσης

$$L_w := 25\text{yr}$$

Απώλειες ηλεκτρικού δικτύου

$$\eta_{\text{dist}} := 8\%$$

Ενέργεια αποσυναρμολόγησης

$$E_R(E_p) := 2.5\% \cdot E_p$$

(όπου E_p η ενέργεια συναρμολόγησης)

$$\left(\begin{array}{c} \text{Quantity} \\ \text{ProcessEn} \\ \text{EF}_{\text{Cons}} \end{array} \right) :=$$

Υλικό	Ποσότητα (kg)	Ειδική Ενέργεια Επεξεργασίας (MJ/kg)	Συντελεστής Εκπομπής CO_2 ($\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{GJ}$)
Χάλυβας	63460	25.7	89.75
Αλουμίνιο	1780	39.2	87.59
Χαλκός	740	78.2	83.58
Άμμος	2520	3.68	0.00
Γυαλί	1320	9.3	62.47
Πολυεστέρας	2400	45.7	86.23
Ενισχυμένος Σίδηρος	14400	36.3	85.78
Μπετόν	339000	3.68	191.03
Άλλα Υλικά	840	46.7	0.00

Πίνακας 1

$$\begin{pmatrix} \text{Mixture} \\ EF_{\text{Fuel}} \\ \text{Efficiency} \end{pmatrix} :=$$

Ενεργειακή Πηγή	Ποσοστό Συμμετοχής στο Ενεργειακό Μείγμα	Συντελεστής Εκπομπής CO ₂ (kg _{CO2} /GJ)	Μέσος Βαθμός Απόδοσης
Λιγνίτης	49%	122	32%
ΑΠΕ	17%	0	100%
Φυσικό Αέριο	17%	49	42%
Πετρέλαιο	9%	73	36%
Εισαγωγές	8%	0	100%

Πίνακας 2

$$\text{GJ} := 10^9 \text{ J}$$

$$\text{MJ} := 10^6 \text{ J}$$

$$EF_{\text{Fuel}} := EF_{\text{Fuel}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{GJ}}$$

$$\text{Quantity} := \text{Quantity} \cdot \text{kg}$$

$$\text{kWh} := \text{kW} \cdot \text{hr}$$

$$\text{MWh} := \text{MW} \cdot \text{hr}$$

$$EF_{\text{Cons}} := EF_{\text{Cons}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{GJ}}$$

$$\text{ProcessEn} := \text{ProcessEn} \cdot \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

ΛΥΣΗ

Ερώτημα 1

Για κάθε τύπο μονάδας παραγωγής ενέργειας i του πίνακα 2, οι εκπομπές CO₂ ανά μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$EF_{\text{Elec}} := \frac{EF_{\text{Fuel}}}{\text{Efficiency}}$$

όπου Efficiency ο μέσος βαθμός απόδοσης της τεχνολογίας και EF_{Fuel} είναι ο συντελεστής εκπομπής CO₂ ανά μονάδα θερμογόνου δύναμης του καυσίμου (Πίνακας 2). Ο συνολικός συντελεστής εκπομπής για το ηλεκτρικό σύστημα της Ελλάδας θα είναι:

$$\text{Coef}_{\text{CO}_2} := \frac{\sum_{i=0}^4 (EF_{\text{Elec}_i} \cdot \text{Mixture}_i)}{1 - \eta_{\text{dist}}} = 0.881 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

όπου Mixture είναι το ποσοστό συμμετοχής κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδας. Η ενέργεια που διοχετεύεται σε ένα έτος από την ανεμογεννήτρια στο σύστημα είναι:

$$E_{\text{togrid}} := (1 - \eta_{\text{dist}}) \cdot CF \cdot P_R = 1509.7 \cdot \frac{\text{MWh}}{\text{yr}}$$

Εάν θεωρηθεί πως όση ενέργεια παράγεται από την ανεμογεννήτρια, θα παραγόταν σε διαφορετική περίπτωση από συμβατικές πηγές, τότε η ποσότητα CO₂ που θα εξοικονομούνται ανά έτος είναι:

$$\text{AnnualReduction} := E_{\text{togrid}} \cdot \text{Coef}_{\text{CO}_2} = 1331 \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{yr}}$$

Ερώτημα 2

Για την κατασκευή της ανεμογεννήτριας θα δαπανηθούν ποσά ενέργειας για την επεξεργασία των υλικών, τη μεταφορά κτλ. Ο πίνακας 2 παρουσιάζει τα ειδικά ποσά ενέργειας καθώς και τις ποσότητες του κάθε υλικού. Ως λόγος ενεργειακής αποπληρωμής (**EPR**) ορίζεται ο λόγος της ενέργειας που θα δώσει η ανεμογεννήτρια σε όλη τη διάρκεια της ζωής της ως προς την ενέργεια που θα ξοδευθεί για την κατασκευή και την αποσυναρμολόγηση της.

Η ενέργεια που θα καταναλωθεί για την παραγωγή ανεμογεννήτριας είναι:

$$E_P := \sum_{i=0}^8 (\text{Quantity}_i \cdot \text{ProcessEn}_i) = 1.028 \times 10^3 \cdot \text{MWh}$$

Ενώ η ενέργεια που χρειαστεί τελικά η ανεμογεννήτρια σε όλο τον κύκλο ζωής της θα είναι:

$$E_C := E_P + E_R(E_P)$$

Άρα ο λόγος ενεργειακής αποπληρωμής είναι:

$$\text{EPR} := \frac{E_{\text{tograd}} \cdot L}{E_C} = 35.8$$

Όμοια, μπορεί να οριστεί ο χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής. Ο χρόνος ενεργειακής αποπληρωμής (**EPP**) είναι ο χρόνος που χρειάζεται έτσι ώστε η ανεμογεννήτρια να δώσει ενέργεια ίση με την ενέργεια που απαιτεί στον κύκλο ζωής της. Άρα:

$$\text{EPP} := \frac{E_C}{E_{\text{tograd}}} = 0.7 \cdot \text{yr}$$

Ερώτημα 3

Η ανεμογεννήτρια κατά τη λειτουργία της δεν παράγει CO₂ όμως κατά τη διάρκεια ζωής της έχει παράξει στα στάδια παραγωγής και αποκομιδής. Η ενέργεια που παράχθηκε κατά την κατασκευή της ανεμογεννήτριας είναι:

$$\text{LCE}_{\text{CO}_2} := \sum_{i=0}^8 (\text{Quantity}_i \cdot \text{ProcessEn}_i \cdot \text{EF}_{\text{Cons}_i})$$

Άρα οι ισοδύναμες εκπομπές CO₂ ανά μονάδα ενέργειας είναι:

$$\text{EF}_{\text{WEC}} := \frac{\text{LCE}_{\text{CO}_2}}{E_{\text{tograd}} \cdot L} = 0.012 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$$

Παρατηρήσεις

Παρατήρηση 1: Αντίστοιχοι υπολογισμοί μπορούν να γίνουν για καυσάερια όπως: SO₂, NO_x, N₂O, CH₄, CO και για διάφορα άλλα αέρια ή και σωματίδια.

Παρατήρηση 2: Η εισαγωγή του συντελεστή εκπομπής των ανεμογεννητριών για τον υπολογισμό του συνολικού συντελεστή εκπομπής στο σύστημα θα είχε νόημα εάν οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται στην χώρα προς μελέτη. Με τον ίδιο τρόπο αντιμετωπίζονται και οι εισαγωγές.

