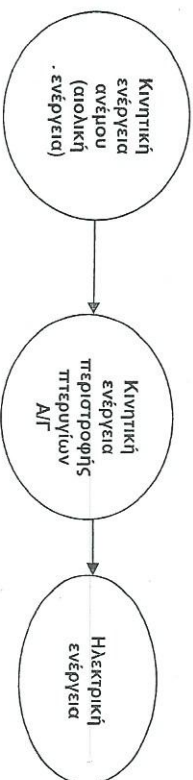
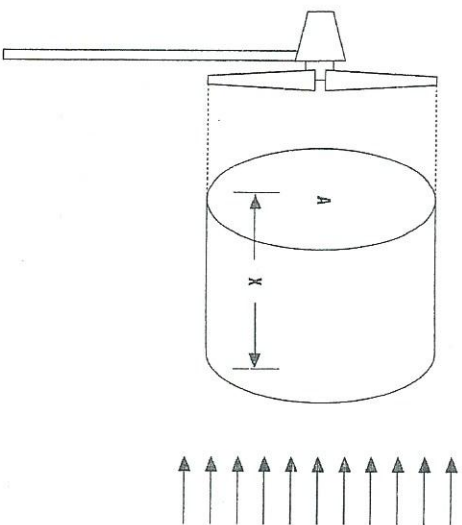


5.2.4 Κινητική ενέργεια ανέμου/ιδανικός (μέγιστος) συντελεστής απόδοσης A/T

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας τρόπος υπολογισμού της αιολικής ενέργειας, καθώς και του ποσοστού αυτής της ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί μια A/T 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 A/T ενεργού διατομής A³¹, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5 Μάζα αέρα m που κινείται με ταχύτητα v προς την A/T.

³¹ Ουσιαστικά είναι η επιφάνεια που ασκούνται τα πτερυγία της A/T.

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

$$\rho_a = \text{πυκνότητα αέρα και}$$

$$V = \text{ο όγκος της μάζας m.}$$

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):

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

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

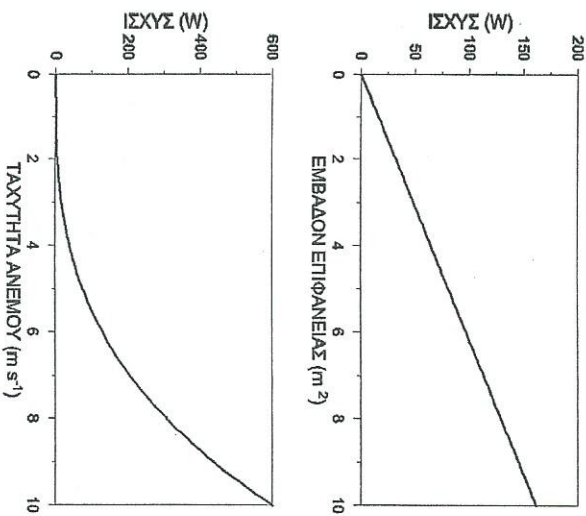
$$P_a = \frac{1}{2} \rho_a A v^3$$

(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/T και η ταχύτητα του ανέμου (που είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας, καθώς είναι υψωμένος στην τρίτη δύναμη).

³² Η κινητική ενέργεια στα περισσότερα ελλειπτικά βιβλία συμβολίζεται με E_k , ενώ στα περισσότερα ξενόγλωσσα με K . Σε όνους 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 ΕΛΛΑΔΑ 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.

ΙΣΧΥΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



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 A/G . Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι ο αέρας, ο οποίος θα έφτανε με αρχική ταχύτητα v_i στα πτερύγια της A/G , θα περνούσε και θα έφτανε με μηδενική ταχύτητα ($v_f = 0$). Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να συμβαίνει. Στην πραγματικότητα μετά το πέρασμά του από τα πτερύγια ο αέρας συνεχίζει να έχει μια ταχύτητα $v_f \neq 0$. Συνεπώς, στην ιδανική περίπτωση, η κινητική ενέργεια η οποία μεταφέρεται στα πτερύγια της A/G από τον άνεμο (υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας περιστροφής των πτερυνίων) 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 $P_{mech(max)}$ που μπορεί να αξιοποιηθεί από την A/G θα είναι (στην ιδανική περίπτωση) η χρονική παράγωγος της παραπάνω σχέσης, δηλαδή:

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

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

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

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

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

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

Αποδεικνύεται³⁶ ότι ο μέγιστος (θεωρητικά) συντελεστής απόδοσης (ισχύος) μιας A/G

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

είναι ίσος με

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

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 A/G στη συνέχεια μετατρέπεται, με ένα ποσοστό μετατροπής, σε ηλεκτρική ενέργεια.

³⁶ B.J., π.χ., Kalltschmitt et al, 2007, σελ. 298-300.

³⁷ Δηλαδή η μέγιστη αιολική ισχύς που μπορεί μια A/G να μετατρέψει σε μηχανική ισχύ περιστροφής των πτερυνίων είναι $P_{T(max)} = \frac{1}{2} \rho_a A v^3 c_{p(max)} = (\frac{1}{2} \rho_a A v^3) 0,593$. Δηλαδή μόνο το ~60% της διαθέσιμης αιολικής ισχύς 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 A/G εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το αεροδυναμικό σχήμα των πτερυγίων, η διάταξη των πτερυγίων, η ταχύτητα του ανέμου κ.λπ. Επιδιώξι των σχεδιαστών κατασκευαστών των A/G είναι να μπορεί η A/G 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 A/G , της ροπής που αναπτύσσεται στα πτερύγιά της. Αυτός ορίζεται με την ίδια λογική που ορίστηκε ο συντελεστής απόδοσης (ισχύος), δηλαδή ως το ηγλικό της πραγματικής ροπής που αναπτύσσεται στα πτερύγια της A/G προς τη μέγιστη (θεωρητικά) ροπή, δηλαδή:

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

όπου

T : πραγματική ροπή,

$T_{\max}$: μέγιστη (θεωρητικά) ροπή,

R : ακτίνα του ρότορα (μήκος πτερυγίου).

Η πραγματική ισχύς που παράγει η A/G εξαρτάται από την αριθμητική σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων της A/G . Ο (καθαρός) αριθμός που δίνει τη σχέση μεταξύ των δύο ταχυτήτων ονομάζεται παράμετρος περιστροφής (tip speed ratio) (λ) και είναι ίσος με το ηγλικό της γραμμικής ταχύτητας περιστροφής των πτερυγίων της A/G 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 γωνωστή σχέση που δίνει τη γραμμική ταχύτητα),

v : η ταχύτητα του ανέμου.

³⁸ Betz, A., *Das Maximum der theoretischen Ausnutzung des Windes durch Windmoleoren*, Zeitschrift für 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 A/G με μεγάλη παράμετρο περιστροφής [tip speed ratio] $\lambda > 3$, ενώ για A/G με χαμηλό λ (-1) το $C_{p(\max)}$ γίνεται -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/G υπάρχει μια ιδανική τιμή για το λ ⁴⁰ όπου η μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο προς την A/G 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/G

Οι μετατροπείς αιολικής ενέργειας (A/G) 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/G οριζόντιου άξονα⁴⁵ που αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων A/G 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 προσοχή σε μαθηματικές λεπτομέρειες⁴⁶.

Τα πτερύγια των A/G 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/G 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/G ανύψωσης.

⁴² Δυναμική άνωση.

⁴³ Ιξώδης αντίσταση.

⁴⁴ Οι κλασικοί-παράδοσιακοί ανεμόμυλοι κατακόρυφου άξονα είναι A/G αντίστασης.

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

⁴⁶ Η πραγματέυση αυτών των θεμάτων αποτελεί ουσιαστικά αντικείμενο της ρευστομηχανικής και ιδιότερα 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 Sahrajihi M., 2006, σελ. 23-34, Manwell et al., σελ. 95-105, Burton T. et al., σελ. 156-172.