

## 6.4. AERODINAMICA TURBINELOR EOLIENE

### 6.4.1. Lucrul mecanic, energia cinetică și puterea vântului

Asemănător altor forme de energie și cea eoliană poate fi transformată în alte forme de energie, de exemplu mecanică, sau electrică. În condiții ideale, se poate considera că aceste transformări se produc fără pierderi, dar în situațiile reale, întotdeauna se poate defini un randament al transformării energiei dintr-o formă în alta. În continuare va fi determinat *potențialul energetic eolian*, respectiv *potențialul de putere*, care ar putea să fie dezvoltate în condiții ideale, de energia eoliană.

Pentru efectuarea acestui calcul, va fi analizat pentru început, cazul celebrului personaj Marry Poppins, care în romanul lui P. L. Travers, apare în zbor, deplasându-se cu ajutorul unei umbrele, datorită energiei dezvoltate de “vântul de primăvară”, fenomen prezentat în figura 6.27.

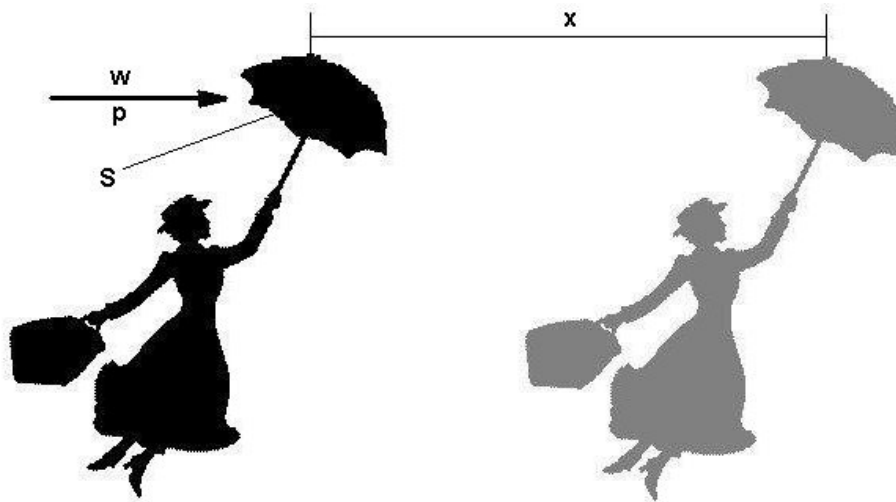


Fig. 6.27. Marry Poppins se deplasează sub acțiunea energiei eoliene

Considerând că viteza vântului este  $w$ , presiunea dinamică  $p$ , datorată deplasării aerului, poate fi calculată cu relația:

$$p = \rho \frac{w^2}{2}$$

unde  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] este densitatea aerului.

La rândul ei, densitatea aerului, depinde de presiunea atmosferică (deci de latitudine, longitudine, altitudine și condițiile meteorologice), respectiv de umiditatea aerului.

În contact cu suprațata umbrelei, presiunea vântului, produce forța care determină deplasarea lui Marry Poppins. Cu cât suprafața asupra căreia acționează vântul este mai mare, cu atât și forța produsă de vânt este mai mare. Aceasta este și explicația faptului că atât panzele corăbiilor, cât și paletele morilor de vânt aveau suprafețe foarte mari, necesare dezvoltării unor forțe cât mai mari.

În contact cu suprafețele asupra cărora acționează (umbrela, pânzele corăbiilor, paletele morilor de vânt, etc.), vântul este frânat, iar energia cinetică a acestuia, se transformă în energie potențială de presiune, respectiv în energie mecanică și este transferată suprafeței care realizează frânarea. Frânarea se produce pe orice suprafață normală (perpendiculară) la direcția vântului. În cazul în care suprafața nu este perpendiculară pe această direcție, vântul va acționa pe proiecția suprafeței, în planul normal la direcția vântului.

Notând cu  $S$ , proiecția suprafeței umbrelei lui Marry Poppins, în planul normal la direcția vântului, forța  $F$ , dezvoltată de vânt asupra umbrelei, se poate calcula cu relația:

$$F = p \cdot S = \rho \frac{w^2}{2} S$$

Considerând că deplasarea se produce pe distanța  $x$ , poate fi calculat lucrul mecanic  $L$ , produs de forța dezvoltată de vânt:

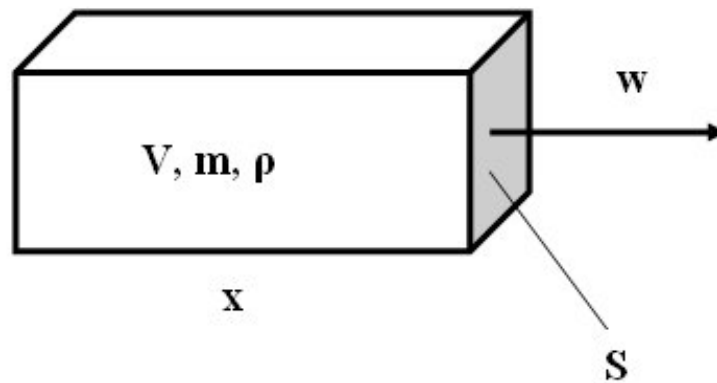
$$L = F \cdot x = \rho \frac{w^2}{2} S \cdot x$$

Puterea  $P$ , dezvoltată de vânt, pentru a produce deplasarea, în intervalul de timp  $\tau$ , poate fi determinată cu relația:

$$P = \frac{L}{\tau} = \rho \frac{w^2}{2} S \frac{x}{\tau} = \rho \frac{w^3}{2} S$$

deoarece  $\frac{x}{\tau} = w$ .

Aceeași relație de calcul pentru puterea dezvoltată de vânt, poate fi determinată considerând că energia cinetică a vântului, reprezintă tocmai potențialul energetic al acestuia.



**Fig. 6.28.** Schema de calcul pentru energia cinetică a vântului

Pentru a calcula energia cinetică a vântului, se va considera ca în figura 6.28, un volum oarecare de aer  $V$ , închis de o suprafață oarecare  $S$ , pe o lungime oarecare  $x$ . Lungimea  $x$  se consideră pe direcția vântului, iar suprafața  $S$ , este considerată normală la direcția vântului. În aceste condiții, volumul de aer se determină cu relația:

$$V = S \cdot x$$

Considerând că aerul are densitatea  $\rho$ , se poate calcula cantitatea (masa) de aer  $m$ , care se deplasează sub acțiunea vântului:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot S \cdot x$$

Energia cinetică  $E_c$ , a masei de aer  $m$ , se determină cu relația:

$$E_c = m \frac{w^2}{2} = \rho \cdot S \cdot x \frac{w^2}{2}$$

Puterea pe care o poate dezvolta vântul, datorită energiei sale cinetice, în intervalul de timp  $\tau$ , se calculează cu relația:

$$P = \frac{E_c}{\tau} = \rho \cdot S \cdot \frac{x}{\tau} \frac{w^2}{2} = \rho \frac{w^3}{2} S$$

adică aceeași relație determinată cu ajutorul lucrului mecanic pentru deplasarea lui Marry Poppins.

Atât în cazul lui Marry Poppins, cât și în cazul analizei energiei cinetice a vântului, au fost considerate situații ideale, fără pierderi fără și ireversibilități, astfel încât marimile calculate, reprezintă

*potențialul* de dezvoltare a lucrului mecanic, *potențialul* de dezvoltare a energiei cinetice, respectiv *potențialul* de dezvoltare a unei puteri de către vânt.

În cazul aplicațiilor reale, se va lua în considerare randamentul  $\eta$ , de conversie a energiei eoliene în energie mecanică, care depinde de performanțele tehnice ale echipamentului utilizat.

$$\eta = \frac{L_r}{L} = \frac{E_{cr}}{E_c} = \frac{P_r}{P}$$

unde indicele  $r$ , a fost utilizat pentru a desemna mărimile reale, față de mărimile fără acest indice, considerate mărimi teoretice, sau potențiale.

În cazul turbinelor eoliene, suprafața  $S$ , utilizată pentru conversia energiei eoliene, este suprafața rotorului turbinei, de rază  $r$ , respectiv de diametru  $d$ :

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \frac{d^2}{4}$$

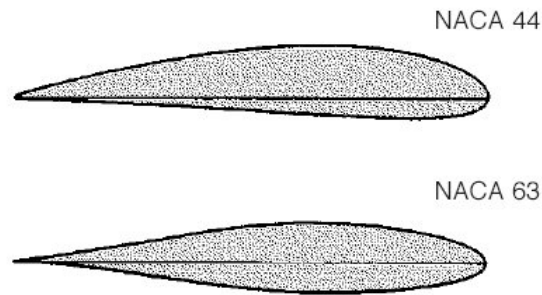
Analizând relațiile de calcul prezentate anterior, se observă că puterea pe care o pot dezvolta echipamentele eoliene, în particular turbinele eoliene, depinde în principal de viteza vântului  $w$ , proporțional cu puterea a treia a acestei mărimi, dar și de diametrul  $d$ , respectiv raza  $r$ , a rotorului, proporțional cu puterea a doua a acestor mărimi. Puterea pe care o pot dezvolta echipamentele eoliene, mai depinde și de densitatea  $\rho$ , a aerului în locul în care este amplasat echipamentul respectiv. La rândul ei, densitatea aerului depinde de presiunea atmosferică în locul pe care este amplasat echipamentul și de umiditatea absolută a aerului. Presiunea atmosferică a aerului, depinde de latitudine, longitudine, altitudine, temperatură și condițiile meteo, iar umiditatea aerului depinde de condițiile meteo.

#### 6.4.2. Noțiuni introductive de aerodinamică

*Aerodinamica* este o știință derivată din dinamica fluidelor, care studiază mișcarea, respectiv curgerea gazelor în general și a aerului în particular, precum și interacțiunea aerului, respectiv a gazelor în curgere, cu corpurile solide. Aplicațiile acestei științe în aeronautică sunt evidente, iar în continuare se va observa că și în cazul turbinelor eoliene, forma paletelor ca și funcționarea acestora, reprezintă tot consecințe ale aplicării legilor aerodinamicii, la procesele de curgere a aerului în jurul paletelor.

*Din punct de vedere geometric*, în secțiune longitudinală, paletele au forma relativ apropiată de a unor dreptunghiuri alungite, mărginite de muchiile frontală și posterioară (față de direcția de rotație a paletelor), respectiv de butucul și de vârful paletelor. Uneori, vârfurile paletelor sunt mobile, ceea ce permite funcționarea acestor părți ale paletelor ca regulator de turație, prin frânarea paletelor în cazul în care viteza vântului depășește anumite limite. Raza (sau lungime paletelor), este reprezentată de distanța dintre axa butucului și vârful paletelor. În secțiune transversală, forma paletelor este asimetrică, astfel încât aerul în curgere (datorită mișcării de rotație a paletelor), să atingă paletele mai întâi în zona îngroșată, care reprezintă zona frontală a paletelor. Aceste forme ale profilelor paletelor, poartă denumirea de *profile aerodinamice* datorită proprietăților particulare pe care le prezintă și care vor fi evidențiate în continuare.

În figura 6.29 sunt prezentate două profile aerodinamice.



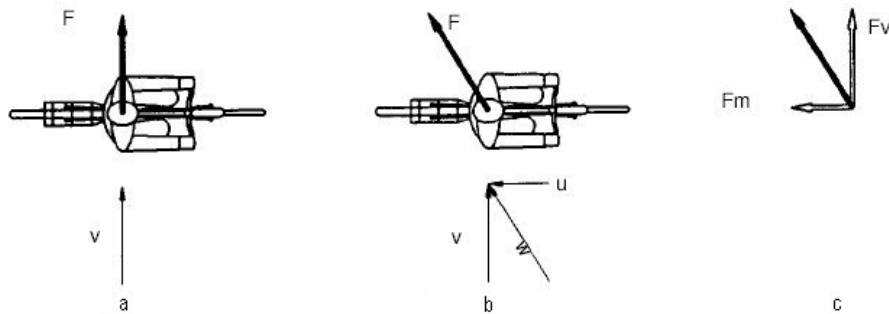
**Fig. 6.29.** Profile ale paletelor  
[www.bonus.dk](http://www.bonus.dk)

Forma profilelor aerodinamice ale paletelor este fundamentală pentru performanțele turbinelor eoliene, astfel încât chiar și cele mai mici abateri ale formei profilelor, pot genera atât alterarea considerabilă a performanțelor, cât și probleme legate de nivelul de zgomot care poate să crească semnificativ. Din aceste motive, forma profilelor paletelor este aleasă pe baza experienței anterioare considerabile, obținută în urma cercetărilor efectuate asupra formei aripilor și elicelor de avioane.

În cataloagele NACA (The United States National Advisory Committee for Aeronautics), cele două profile prezentate în figura 29, sunt denumite NACA44, respectiv NACA63 și reprezintă profilele folosite în mod uzual la paletele turbinelor eoliene de până la 95kW inclusiv (NACA44), respectiv de la turbinele peste 150kW (NACA63). Primul profil a fost elaborat în jurul anilor 1930 și are proprietăți globale foarte bune fiind și destul de tolerant la imperfecțiuni minore ale suprafețelor, cum sunt cele datorate depunerilor de impurități în timpul exploatarei. Al doilea profil a fost elaborat în jurul anilor 1940 și are proprietăți diferite. Astfel asigură puteri mai mari la viteze mici și medii ale vântului, dar nu este utilizabil la viteze mari ale vântului și este foarte sensibil la depunerile de impurități în timpul exploatarei. Pentru turbinele mai noi, cu puteri de peste 500kW, profilul aerodinamic al paletelor reprezintă rezultatul unor cercetări mai noi și diferă de cele două profile prezentate. Asemenea profile au fost cercetate și testate de exemplu în Suedia, Danemarca și SUA, țări cu tradiție în domeniul turbinelor eoliene.

### 6.4.3. Aerodinamica biciclistului

Pentru a descrie cât mai precis aspectele aerodinamice ale turbinelor eoliene, evitând deocamdată elementele complexe și pentru a asigura un cadru intuitiv de înțelegere a fenomenelor care se manifestă, se va descrie pentru început comportarea aerodinamică a unui biciclist, apelându-se la experiența mersului pe bicicletă care este foarte comună și ușor de înțeles. În figura 30 sunt prezentate foarte schematic și simplificat, câteva procese de curgere a aerului în jurul unui biciclist, direcția de deplasare a acestuia fiind de la stânga spre dreapta.



**Fig. 6.30.** Schema proceselor de curgere a aerului în jurul lunii biciclist  
www.bonus.dk

În figura 6.30.a, este prezentată situația în care biciclistul staționează, iar vântul suflă din lateral cu viteza  $v$ . În vederea prezentării unui exemplu numeric, se va considera valoarea vitezei vântului:

$$v = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h,}$$

ceea ce reprezintă o viteză apropiată de a unei brize marine răcoritoare.

Deoarece aerul curge (se deplasează) în jurul bicilcistului, asupra acestuia se va exercita presiunea dinamică a aerului:

$$p_d = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad [\text{Pa}]$$

unde  $\rho$  este densitatea aerului și pentru această mărime se va considera valoarea  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ .

Pentru viteza considerată a vântului se obține:

$$p_d = 1,2 \cdot 10^2 / 2 = 60 \text{ Pa.}$$

Atunci când “lovește” suprafața  $S$  a biciclistului și a bicicletei, vântul (aerul în curgere) exercită o forță datorată presiunii:

$$F = p_d \cdot S \quad [\text{N}]$$

Pentru exemplul analizat, considerând  $S = 0,6 \text{ m}^2$ , se obține

$$F = 60 \cdot 0,6 = 36 \text{ N,}$$

ceea ce considerând valoarea accelerației gravitaționale de  $10 \text{ m/s}^2$ , este echivalent cu greutatea unei mase de 3,6 kg.

În figura 6.30.b, este prezentată situația în care biciclistul se deplasează cu viteza  $u$ , iar vântul suflă din lateral cu aceeași viteză  $v$ . Datorită propriei deplasări, biciclistul se simte ca și cum ar fi “lovit” din față de un vânt care suflă cu aceeași viteză  $u$  cu care se deplasează biciclistul. Se va considera că biciclistul se deplasează cu viteza:

$$u = 5 \text{ m/s} = 18 \text{ km/h.}$$

Cele două viteze de curgere a aerului se compun, iar viteza rezultantă de curgere a aerului  $w$ , se poate calcula astfel:

$$w = \sqrt{v^2 + u^2} \quad \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Astfel se obține

$$w = 11,18 \text{ m/s,}$$

iar această viteză de curgere a aerului care se va manifesta pe direcția  $w$  produce o presiune dinamică

$$p_d \approx 75 \text{ Pa,}$$

care produce pe suprafața biciclistului și a bicicletei, o forță

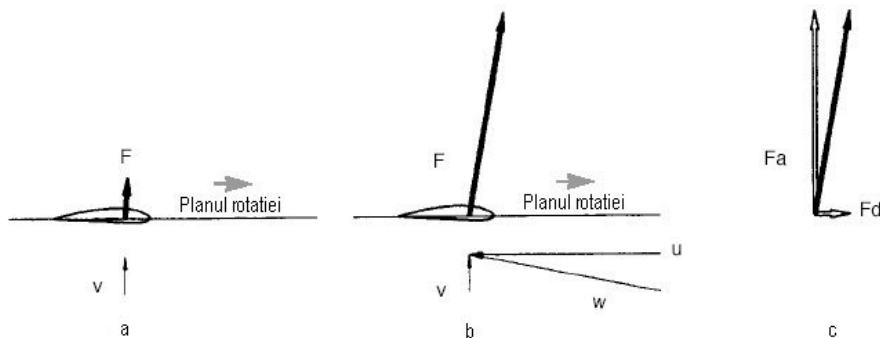
$$F \approx 45 \text{ N,}$$

echivalentă cu greutatea unei mase de 4,5kg.

În figura 6.30.c este prezentat modul în care se descompune forța  $F$  care acționează asupra biciclistului în situația prezentată anterior, în forța  $F_v$  datorată vântului și forța  $F_m$  datorată mișcării biciclistului. Practic biciclistul “resimte” acțiunea aceleiași forțe datorate vântului ca și în cazul 28.a, la care se adaugă forța  $F_m$  datorată propriei deplasări. Cu cât viteza de deplasare este mai mare, cu atât mai mare va fi și rezistența aerului, resimțită ca o forță  $F_m$ .

#### 6.4.4. Aerodinamica paletei turbinei

Modul de comportare al paletei turbinei eoliene, la curgerea aerului în jurul acesteia, va fi analizat cu ajutorul schemelor din figura 31, în care este prezentat profilul paletei într-o secțiune apropiată de vârful paletei. Se consideră paleta unei turbine de 450kW, având raza rotorului (lungimea paletei) de cca. 50m.



**Fig. 6.31.** Schema unor procese de curgere a aerului în jurul paletei turbinei  
www.bonus.dk

În figura 6.31.a este reprezentată situația în care se consideră că paleta este fixă, iar direcția vântului este perpendiculară pe suprafața planului de rotație, adică suprafața descrisă de rotor în timpul deplasării acestuia. Se consideră de asemenea că viteza vântului are aceeași valoare

$$v = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h.}$$

Această viteză a vântului produce asupra paletelor, o presiune dinamică având valoarea

$$p_d = 60 \text{ Pa}$$

exact ca în cazul bicilcistului, analizat anterior.

Direcția acestei presiuni este aceeași cu direcția vântului, adică perpendiculară pe planul de rotație al paletelor, respectiv pe fața laterală a acestora. Datorită formei particulare a profilului paletei, pe fața frontală a acesteia (față de direcția de curgere a aerului), presiunea dinamică a aerului produce două efecte diferite asupra paletei. Astfel, pe de-o parte paleta va fi supusă unei acțiuni care va tinde să flambeze (îndoiaie) paleta înspre pilon, iar pe de altă parte, paleta va fi supusă unei acțiuni motoare, care va tinde să rotească paleta. În consecință, datorită formei particulare a profilului paletei, forța rezultantă care acționează asupra paletei, are direcția ușor diferită de direcția vitezei vântului, așa cum se observă și în figura 6.31.a.

După ce începe să se producă rotația paletei, sub acțiunea motoare descrisă anterior, datorată formei particulare a profilului, paleta va fi supusă atât acțiunii datorate vitezei vântului, cât și acțiunii aerului, datorate propriei deplasări a paletei. Această acțiune este echivalentă cu cea care s-ar produce dacă paleta ar rămâne fixă și aerul s-ar deplasa spre aceasta, cu aceeași viteză, dar în sens contrar deplasării paletei. Această situație este reprezentată în figura 31.b, pe care s-a notat viteza relativă de deplasare a aerului în planul de rotație al paletei, cu  $u$ . Trebuie menționat faptul că viteza  $u$  de deplasare a aerului datorită rotației (având direcția tangențială la traiectoria circulară a paletei), este diferită în lungul paletei, fiind mai redusă înspre butuc și mai mare înspre vârful paletei.

Această viteză poate fi calculată cu relația:

$$u = \frac{n_r}{60} \cdot r \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

unde  $n_r$  [rot/min] este turația rotorului, respectiv a paletelor, iar  $r$  este raza pentru care se determină valoarea vitezei tangențiale  $u$ . Se observă că viteza  $u$ , prezintă o variație liniară între zona butucului, unde este minimă (deoarece valoarea razei  $r$  este minimă) și vârf, unde este maximă (deoarece și valoarea razei  $r$  este maximă).

Având în vedere că domeniul uzual de valori pentru turația paletelor este de 20...400rot/min, în funcție de tipul paletelor, iar în cazul turbinelor cu diametrul mare al rotorului, această turație are valori reduse (20...40rot/min), se va considera o valoare a turației

$$n_r = 30 \text{ rot/min},$$

care reprezintă o valoare normală. În consecință, viteza tangențială datorată rotației paletelor, va avea valori între

$$u = 0,5 \text{ m/s} = 0,18 \text{ km/h}$$

în zona butucului, considerând că raza acestuia este de 1m și

$$u = 25 \text{ m/s} = 90 \text{ km/h}$$

la vârful paletei, considerând lungimea acesteia de 50m.

Cele două viteze de curgere a aerului se compun, iar viteza rezultantă de curgere a aerului  $w$ , se poate calcula:

$$w = \sqrt{v^2 + u^2} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Astfel se obține

$$w = 10,01 \text{ m/s},$$

la baza paletei, respectiv

$$w = 26,9 \text{ m/s}$$

la vârful paletei.

Viteza de curgere a aerului care se va manifesta pe direcția  $w$  produce o presiune dinamică

$$p_d \approx 60 \text{ Pa},$$

la baza paletei, respectiv

$$p_d \approx 466 \text{ Pa},$$

la vârful paletei.

Aceste presiuni dinamice, mai ales în zonele apropiate de vârful paletei, se manifestă sub forma unor forțe considerabile asupra paletei.

*Datorită formei particulare a profilului paletei, acțiunea forțelor de presiune asupra acesteia se manifestă diferit pe cele două fețe ale acesteia.* Astfel se produce fenomenul de portanță care va fi descris ulterior. Efectul complex al profilului paletei asupra forței rezultante, se concretizează, așa cum se observă în figura 6.31.b, în faptul că direcția după care se manifestă forța rezultantă  $F$ , diferă substanțial față de direcția vântului, fiind perpendiculară pe aceasta.

În figura 6.31.c se observă maniera în care forța rezultantă  $F$  se descompune după cele două direcții importante și anume după direcția vântului în componenta  $F_a$  (indicele  $a$ , provine din limba engleza, de la termenul "air" care înseamnă aer) și după direcția de rotație în componenta  $F_d$  (indicele  $d$ , provine din limba engleza, de la termenul "drag" care înseamnă tracțiune). Figura 31 prezintă atât vitezele cât și forțele, în zona de la vârful paletei. Forța  $F_a$  care acționează perpendicular pe planul de rotație, tinde să deformeze paleta prin flambare, spre pilonul de susținere a acesteia. Forța  $F_d$ , care

acționează pe direcția de rotație, va genera un moment motor, care asigură antrenarea paletei în mișcarea de rotație.

*Există două diferențe majore* între forțele care se manifestă asupra paletei turbinei și cele care se manifestă asupra biciclistului.

Prima diferență este aceea că forțele care acționează asupra paletei sunt mult mai mari decât cele care acționează asupra biciclistului, datorită vitezelor rezultante ale vântului, mult mai mari în cazul paletelor turbinei eoliene, decât în cazul biciclistului. În aceste condiții, acțiunea rezistentă a vântului, se manifestă în cazul paletei, mult mai puternic decât în cazul biciclistului.

A doua diferență este aceea că datorită formei particulare a profilului paletei, forța rezultantă, se manifestă asupra paletei, pe o direcție aproximativ perpendiculară pe direcția vântului. Acest efect este datorat fenomenului de portanță, care prezintă o importanță deosebită asupra funcționării turbinelor eoliene, pentru că asigură manifestarea forței de tracțiune asupra paletei. Față de cazul biciclistului, care resimte acțiunea vântului ca pe o rezistență care trebuie învinsă printr-un efort suplimentar, în cazul paletei, efectul vântului este favorabil, deoarece produce antrenarea paletei în mișcarea de rotație. Portanța este datorată formei particulare a paletei, care determină comportarea complet diferită, din punct de vedere aerodinamic, a paletei față de biciclist.

### 6.4.5. Portanța

*Portanța* este fenomenul aerodinamic de susținere a unui corp în aer (plutire), datorită deplasării corpului în aer sau a aerului în jurul corpului. Portanța se manifestă și în alte fluide decât în aer, dar cele mai numeroase aplicații tehnice sunt întâlnite pentru cazul în care fluidul considerat este aerul, iar în continuare va fi analizat exclusiv cazul aerului. Câteva dintre cele mai cunoscute aplicații ale fenomenului de portanță sunt: aripile de avion, paletele elicelor de avion, paletele rotoarelor de elicopter, paletele de ventilator, paletele turbinelor eoliene, dar și elicele de propulsie ale vaselor fluviale și maritime.

*Forța* de susținere a unui corp în aer, datorită deplasării acestuia în aer sau datorită deplasării aerului în jurul corpului, poartă tot denumirea de *portanță*. *Forța de portanță, sau simplu portanța, se manifestă pe direcție perpendiculară față de direcția de deplasare a corpului în aer, sau a aerului în jurul corpului.*

Manifestarea fenomenului de portanță, poate fi explicată prin aplicarea unei legi fundamentale a curgerii și anume *legea lui Bernouli*, cunoscută atât în mecanica fluidelor, unde este dedusă din considerente mecanice, cât și în termotehnică unde este dedusă din ecuația principiului întâi al termodinamicii. Din punct de vedere matematic, această lege se exprimă prin ecuația lui Bernouli, care poate fi scrisă sub forma:

$$p_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} + \rho gh_1 = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} + \rho gh_2$$

unde:

- $p$  reprezintă presiunea statică;
- $\rho$  reprezintă densitatea fluidului (în cazul considerat aer);
- $w$  reprezintă viteza de curgere a fluidului (în cazul considerat aer);
- $h$  reprezintă înălțimea față de poziția considerată de referință;
- indicii 1 respectiv 2, reprezintă pozițiile sau stările între care se aplică ecuația considerată.

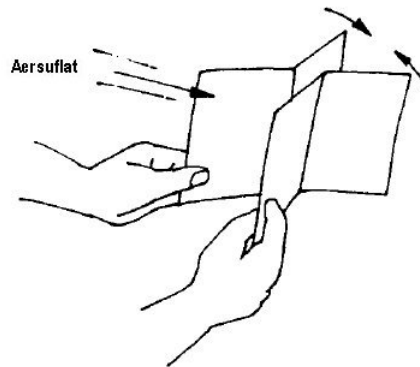
În cazul tuturor aplicațiilor fenomenului de portanță menționate anterior, deci și în cazul turbinelor eoliene, înălțimea poate fi considerată constantă, deci ecuația lui Bernouli se va scrie sub forma:

$$p_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} = p_2 + \rho \frac{w_2^2}{2}$$

Termenul  $\rho \frac{w^2}{2}$  are semnificația de presiune dinamică, așa cum s-a mai arătat anterior în cadrul acestui capitol.



Analizând ecuația lui Bernouli, scrisă sub ultima forma prezentată, se constată că suma dintre presiunea statică și dinamică este constantă, ceea ce înseamnă că pe măsură ce crește presiunea dinamică, deci viteza de curgere a aerului în jurul corpului, scade presiunea statică. Presiunea dinamică se manifestă pe direcția de curgere, iar presiunea statică se manifestă cu egală intensitate în toate direcțiile. Astfel, la curgerea cu viteză a unui fluid, se va manifesta creșterea presiunii pe direcția curgerii, datorită componentei dinamicii a presiunii, dar și scăderea presiunii pe direcție perpendiculară față de direcția curgerii. Fenomenul scăderii presiunii statice, care însoțește curgerea aerului cu viteză, în lungul unor suprafețe, este evidențiat de experimentul simplu ilustrat în figura 6.30.

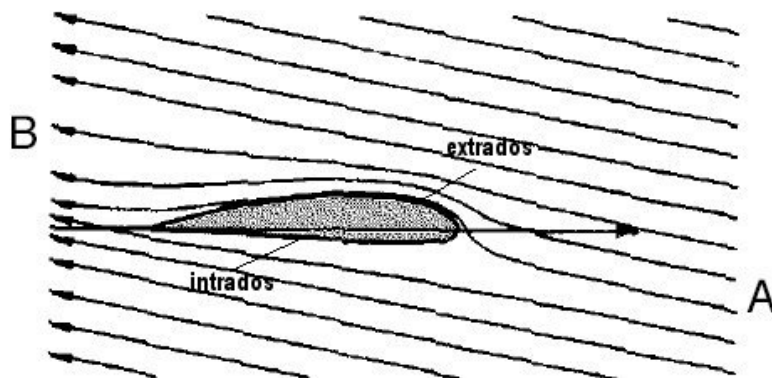


**Fig. 6.32.** Experiență pentru evidențierea manifestării legii lui Bernouli  
[www.bonus.dk](http://www.bonus.dk)

Dacă se apropie una de alta, două foi de hârtie îndoite, ca în figura 6.32 și se suflă aer printre acestea, în zona de ieșire a aerului dintre foi, datorită vitezei ridicate de curgere a aerului, crește presiunea dinamică (manifestată pe direcția de curgere), dar scade presiunea statică (manifestată perpendicular pe direcția de curgere). Astfel, asupra celor două foi de hârtie, pe fețele exterioare și interioare se vor manifesta forțe de presiune diferite. Pe fețele exterioare va acționa presiunea atmosferică (neafectată de curgerea aerului în spațiul dintre foi), iar pe fețele interioare va acționa presiunea statică (micșorată datorită curgerii aerului). Efectul vizibil, va fi că cele două foi de hârtie se vor apropia așa cum este sugerat în figura 6.30.

Analizând cu atenție acest fenomen se constată că forțele care determină apropierea celor două foi de hârtie, se manifestă asupra unor corpuri (cele două foi de hârtie) în jurul cărora se deplasează aerul, iar direcția pe care se manifestă aceste forțe este perpendiculară pe direcția curgerii. În consecință se poate spune că forțele care determină apropierea celor două foi de hârtie prezintă caracteristicile forței de portanță, iar fenomenul care se manifestă este tocmai cel de portanță. Analizând separat fiecare foaie de hârtie în parte, se poate considera că pentru fiecare din acestea, fenomenul de portanță este determinat de deplasarea aerului cu viteze diferite pe cele două fețe. Pe fața unde viteza de curgere este mai mare, presiunea statică scade în conformitate cu legea lui Bernouli, iar diferența de presiune dintre cele două fețe dă naștere fenomenului de portanță. Forța de portanță se manifestă, așa cum s-a enunțat deja, perpendicular pe direcția de curgere.

În cazul unui profil aerodinamic, așa cum sunt profilele după care sunt construite paletelile turbinelor eoliene, dar și aripile de avion, elicele de avion, paletelile rotorului de elicopter, etc., modul în care se manifestă fenomenul de portanță va fi analizat cu ajutorul figurii 6.33.



**Fig. 6.33.** Curgerea aerului în jurul unui profil aerodinamic  
www.bonus.dk

Corpurile care prezintă profile aerodinamice sunt compuse din două suprafețe, una denumită *extrados*, reprezentată în figura 6.33 prin partea superioară a profilului și una denumită *intrados*, reprezentată în figura 6.33 prin partea inferioară a profilului. Pentru a se manifesta fenomenul de portanță, profilul aerodinamic trebuie să fie amplasat în curentul de aer, aproximativ ca în figura 6.33. Aerul curge cu un debit constant, pe direcția A-B, dinspre A spre B. După ce întâlnesc profilul aerodinamic, moleculele care compun curentul de aer se distribuie pe cele două fețe ale profilului. Deoarece *extradosul prezintă o curbură mult mai mare decât intradosul*, moleculele de aer care înconjoară profilul aerodinamic prin zona în zona extradosului au de parcurs un traseu mai lung decât cele care înconjoară profilul aerodinamic prin zona intradosului. Din acest motiv, *viteza curentului de aer din zona extradosului este mai mare decât viteza curentului de aer din zona intradosului*. Așa cum s-a arătat în experiența anterioară, datorită manifestării legii lui Bernoulli, asupra extradosului profilului, unde viteza de curgere este mai mare, va acționa o presiune statică mai mică decât asupra intradosului, unde viteza de curgere este mai mică. În consecință, datorită diferenței dintre presiunile statice, care se manifestă pe cele două fețe ale profilului aerodinamic, asupra acestui profil se va manifesta, perpendicular pe direcția de curgere a aerului o forță, denumită portanță, care va acționa puternic asupra profilului aerodinamic.

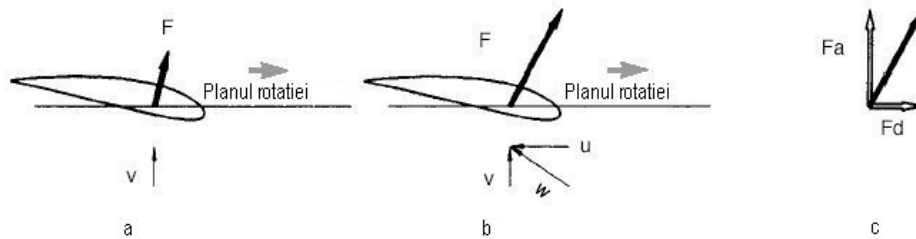
Datorită manifestării fenomenului de portanță, este posibil zborul avionelor având greutate mai mare decât a aerului. În cazul paletelor turbinelor eoliene, fenomenul de portanță determină rotirea paletelor sub acțiunea vântului, într-un plan perpendicular pe direcția acestuia, așa cum s-a arătat și în paragraful referitor la aerodinamica paletelor de turbină.

În exploatarea turbinelor eoliene, se constată că la pornire, paletelile se rotesc încet, dar pe măsură ce intră în regim normal de funcționare, viteza de rotație crește substanțial fiind evidentă accelerația la care sunt supuse paletelile. Această comportare poate fi explicată tocmai prin faptul că pe măsură ce viteza de rotație crește, comportarea aerodinamică a paletelor, determină manifestarea tot mai accentuată a fenomenului de portanță.

### 6.4.6. Modificarea forțelor în lungul paletii

Aerodinamica paletii și portanța, așa cum au fost prezentate în paragrafele anterioare, se referă în principal la fenomenele care se manifestă în zona de la vârful paletii. În continuare va fi analizată și aerodinamica zonei de la baza paletii (în zona butucului). Comportarea acestei zone este ușor diferită de cea de la vârf, deoarece atât geometria cât și dimensiunile profilului sunt diferite.

În figura 6.34, este prezentat schematic, efectul comportării aerodinamice a paletii turbinei în zona, din apropierea butucului.



**Fig. 6.34.** Schema efectului curgerii a aerului în zona de la baza paletii turbinei  
www.bonus.dk

O primă observație care trebuie menționată, este aceea că în zona de la baza paletii, profilul acesteia este ușor răsucit față de zona de la vârf, așa cum se observă și în figura 6.34, față de figura 6.31. În plus, dimensiunile paletii în zona de la bază sunt mult mai mari decât în zona de la vârf, deoarece în această zonă rezistența mecanică a paletii trebuie să fie mult mai mare decât la vârf, pentru ca aici trebuie preluate forțele care acționează asupra paletii și care tind să producă deformații ale acesteia.

Când paleta turbinei este în repaus, ca în fig. 6.34.a, sub acțiunea vântului care suflă cu viteza  $v$ , se manifestă forța  $F$ . Direcția acestei forțe este diferită față de direcția vântului, deoarece profilul aerodinamic al paletii este răsucit, astfel încât chiar și în absența rotației paletii, se manifestă într-o oarecare măsură, efectul de portanță. Chiar dacă viteza vântului este relativ redusă (în situațiile analizate a fost considerată o viteză a vântului de 10m/s, ceea ce corespunde unei brize marine răcoroase), forța care se manifestă asupra profilului paletii în această zonă este destul de importantă, deoarece dimensiunile profilului paletii sunt mult mai mari în această zonă, decât la vârf. Datorită răsucirii profilului paletii, în zona de la bază și datorită dimensiunilor considerabile ale profilului în această zonă a paletii, este posibilă manifestarea unei forțe de portanță, capabile să antreneze paleta în mișcare de rotație, deci să scoată paleta din starea de repaus. Antrenarea paletii în mișcarea de rotație devine posibilă la viteze ale vântului de peste 4...5m/s.

Simultan cu antrenarea paletii în mișcarea de rotație, față de paletă, aerul se va deplasa cu viteza relativă  $u$ , reprezentată în figura 6.34.b, egală și de sens contrar cu viteza tangențială a paletii în zona de la baza acesteia. Evident, în această zonă viteza tangențială a paletii, este mult mai mică decât la vârful acesteia. Prin compunerea celor două viteze,  $v$  și  $u$ , se va obține viteza rezultantă  $w$ , a aerului care curge în jurul profilului aerodinamic al paletii. Viteza vântului  $u$ , este aceeași atât la vârf cât și la bază, dar deoarece  $u$  este mult mai mică la bază decât la vârf, viteza rezultantă  $w$ , are la bază o direcție mai apropiată de  $v$ , decât în zona de la vârf. Deoarece direcția rezultantă a aerului în zona bazei paletii, este diferită de direcția vitezei rezultante a aerului la vârf, este evident că pentru a obține o comportare aerodinamică favorabilă și în zona de la baza paletii, este necesar ca aceasta să fie răsucită, aproximativ după direcția rezultantă a vântului.

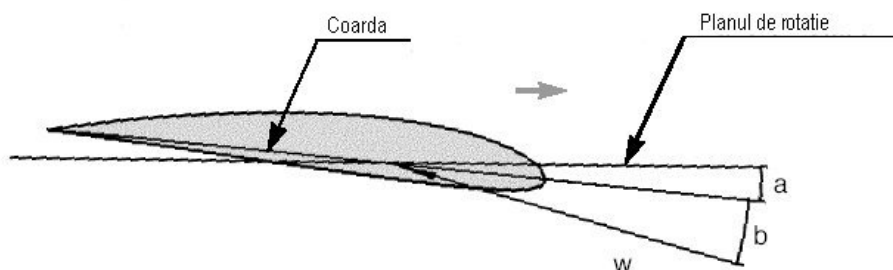
Analizând cele prezentate anterior, este evident că pentru a fi posibilă scoaterea paletii din repaus și antrenarea acesteia în mișcarea de rotație, necesară conversiei energiei eoliene în energie electrică, paleta trebuie să fie mai răsucită în zona bazei, decât în zona vârfului. Pentru ca și comportarea aerodinamică a paletii în zona de la bază să fie cât mai corectă, unghiul de răsucire al paletii trebuie să corespundă cu viteza rezultantă a aerului în jurul profilului paletii în această zonă.

În figura 6.34.b, se observă că forța de portanță rezultată la baza paletii turbinei eoliene este perpendiculară pe direcția rezultantă de curgere a aerului.

În figura 6.34.c, forța de portanță  $F$ , este descompusă după direcția vântului (spre pilonul turbinei eoliene)  $F_a$  și după direcția de rotație  $F_d$ , această componentă fiind denumită forță de tracțiune “drag force” în limba engleză. Cu toate că vitezarezultantă a aerului în jurul paletei este mai redusă decât la vârf, dimensiunile paletei în zona de la baza acesteia sunt considerabil mai mari decât în zona de la vârf și din acest motiv, forțele rezultate în zona de la bază, sunt comparabile cu cele manifestate la vârful paletei. În consecință, datorită răsucirii continue a paletei, pe toată lunginea acesteia se manifestă forțe de tracțiune, care contribuie la rotirea paletei. Momentul motor, determinat de manifestarea aceste forțe, este cu atât mai mare cu cât zona de acțiune a forțelor este mai apropiată de vârful paletei, deoarece spre vârf crește brațul forței.

#### 6.4.7. Geometria profilului paletei

Câteva elemente ale geometriei profilului paletei sunt prezentate în figura 6.35. Astfel, unghiul dintre direcția dată de planul de rotație și coarda profilului, notat cu  $a$ , este denumit unghi de atac.



**Fig. 6.35.** Geometria profilului paletei  
www.bonus.dk

Valoarea acestui unghi are o importanță deosebită asupra comportării aerodinamice a profilului. În cazul paletelor turbinelor eoliene, valoarea unghiului de atac este mult mai mare în zona de la baza paletei, decât în zona de la vârf. Modificarea acestui unghi în lungul paletei, crează aspectul răsucit al paletelor turbinelor eoliene.

Unghiul dintre coardă și viteza rezultantă  $w$ , a aerului în jurul profilului paletei, notat cu  $b$ , în figura 6.35, are o valoare relativ constantă în lungul paletei, purtând denumirea de unghi setat (“seted angle” în limba engleză).

Paleta este răsucită în lungul acesteia, prin modificarea continuă a unghiului de atac, tocmai pentru a se asigura o valoare constantă a unghiului  $b$ , deci pentru a se asigura aceleași caracteristici ale curgerii aerului în jurul profilului aerodinamic, prin valoarea constantă a unghiului  $b$ .

Faptul că paletele turbinelor eoliene sunt răsucute, reprezintă doar una din particularitățile geometrice ale acestora. Pentru a avea o comportare aerodinamică, mai bine adaptată la vitezele variabile ale vântului, paletele turbinelor eoliene prezintă posibilitatea de a pivota în jurul locașului de fixare în butuc, ceea ce permite ajustarea unghiului de atac în funcție de viteza vântului, în timpul funcționării turbinei eoliene.