

PERFORMANȚA ROTOARELOR EOLIENE CU AX ORIZONTAL CU PALE AERODINAMICE RĂSUCITE ȘI NERĂSUCITE LONGITUDINAL ÎN REGIM NOMINAL DE LUCRU

Autor: Radu CRUDU

Conducător științific: conf.univ.dr. Viorel BOSTAN

Universitatea Tehnică a Moldovei

Rezumat: Este cunoscut că rotoarele turbinelor eoliene cu ax orizontal cu pale aerodinamice răsucite longitudinal dezvoltă caracteristici de performanță mai bune decât cu pale nerăsucite. Din alt punct de vedere, o pală pregnant răsucită descrie o suprafață tridimensională mult mai complicată, care impune o procedură de fabricație dificilă. Acesta este motivul pentru care producătorii de turbine eoliene de putere mică de multe ori recurg la utilizarea paletelor cu răsucire longitudinală mică (începând cu răsucirea zero) în construcția rotoarelor sale.

Lucrarea prezintă un studiu comparativ a două rotoare similare, cu pale răsucite și nerăsucite longitudinal, ale unei turbine eoliene cu ax orizontal cu puterea nominală de 10 kW, în regim nominal de lucru. Pierderile de eficiență distincte paletelor simple nu sunt atât de mari, fapt care argumentează raționalitatea utilizării lor în construcția turbinelor eoliene de putere mică.

Cuvinte cheie: Rotor eolian, pală, profil aerodinamic, unghi de atac, eficiență de conversie.

Introducere

Eficiența turbinelor eoliene ca sisteme de conversie a energiei cinetice a vântului preponderent depinde de geometria paletelor, și anume: forma și dimensiunea profilelor aerodinamice, poziționarea lor de-a lungul palei, lungimea și rigiditatea palei, etc. Beneficiăm de-o eficiență de conversie maximă atunci când la crearea momentului tangențial (motor) dezvoltat de rotor participă concomitent și cu eficacitate maximă fiecare segment de pală în parte. Pentru aceasta profilul aerodinamic al fiecărei secțiuni transversale a palei trebuie să fie poziționat corect față de curentul de aer cu care interacționează. Viteza și direcția ultimului, datorită mișcării de rotație a palei, variază liniar de la ax spre vârf. În consecință, trebuie să varieze longitudinal și unghiul de instalare al profilelor aerodinamice. Acest fapt înseamnă că, pentru o eficiență de conversie maximă, pala trebuie să fie răsucită de-a lungul lungimii ei.

Lucrarea prezintă un studiu comparativ a eficienței de conversie a două rotoare similare, cu pale răsucite și nerăsucite longitudinal, ale unei turbine eoliene cu ax orizontal cu puterea nominală de 10 kW, în regim nominal de lucru. Raza R a rotoarelor este de 4 m, iar frecvența nominală a rotațiilor n_{rot} de 160 min^{-1} pentru viteza vântului V de 10 m/s. În zona de prindere a paletelor (zona butucului) este utilizat profilul aerodinamic NACA 4424, iar la vârf – NACA 2618 (fig. 1). În cazul paletelor nerăsucite longitudinal, unghiul setat β al profilelor aerodinamice este de 9° pentru toate secțiunile transversale ale palei, pe când pentru cele răsucite, unghiul setat β variază de la o secțiune la alta, având valori optime corespunzătoare regimului nominal de lucru.

Pentru estimarea eficienței de conversie a energiei cinetice a vântului de către rotorul eolian trebuie să determinăm eficiența de lucru a fiecărui segment de pală în parte, fapt care presupune studierea tabloului interacțiunii curentului de aer cu pala aerodinamică încât mai multe secțiuni transversale. În lucrare, pentru fiecare tip de pală ne vom limita la determinarea forțelor

aerodinamice aparente în doar două dintre secțiuni, prima situată la o distanță de 0.435 m de la centrul de rotație al rotorului ($0.1085 \cdot R$), iar a doua la 3.915 m ($0.9764 \cdot R$) (fig. 1). Acceptând datele obținute ca drept valabile pentru toate celelalte segmente de pală, vom putea conchide despre eficiența de lucru a palelor în întregime și, respectiv, a rotoarelor în ansamblu.

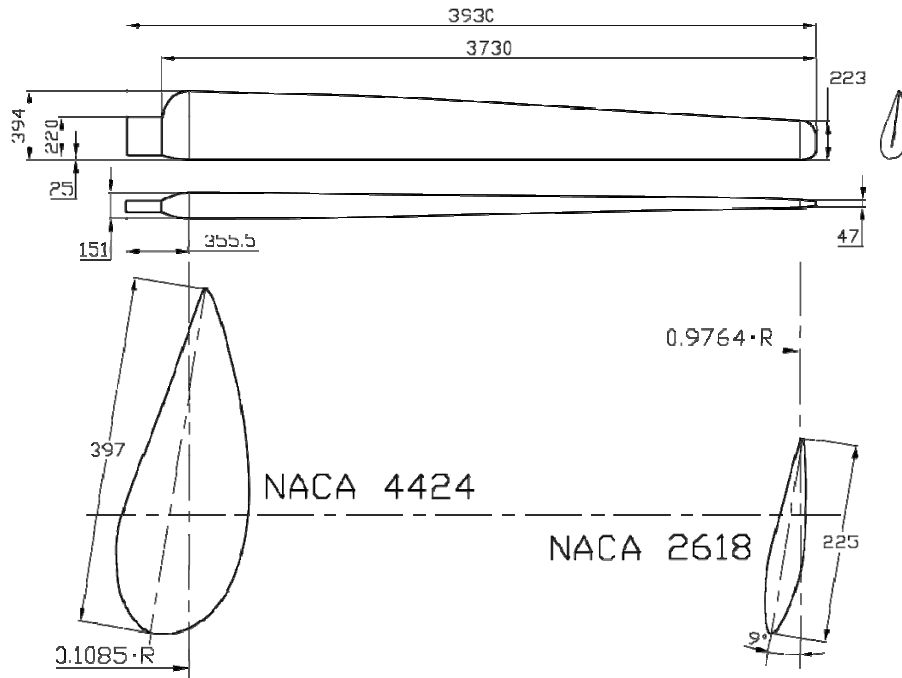


Fig. 1. Geometria palei eoliene profilate aerodinamic, nerăsucite longitudinal.

Despre eficiența de conversie a rotoarelor eoliene menționate se va conchide reieșind din raportul valorilor momentelor motoare dezvoltate în regim nominal de lucru. Momentul motor rezultă din suma forțelor tangențiale generate de fiecare pală raportate la brațul lor de aplicație. Forțele tangențiale reprezintă proiecția rezultatelor forțelor aerodinamice de lift și de drag pe planul de rotație al rotorului. Coeficienții de lift și de drag, necesari pentru calcularea valorilor forțelor aerodinamice corespunzătoare, vor fi determinate cu ajutorul softului specializat JavaFoil, prin simularea interacțiunii fluxului de aer cu profilele aerodinamice pentru unghiurile de atac și coeficienții Reynolds corespunzători. Unghiurile de atac reies din diferența dintre unghiul cuprins între planul de rotație și direcția curentului de aer și unghiul setat al palei. Direcția și viteza curentului de aer cu care interacționează profilul aerodinamic rezultă din suma vectorială a vitezei liniare a secțiunii transversale a palei cu $2/3$ (factorul de frânare $e = 2/3$) din viteza vântului.

Momentele tangențial și axial dezvoltate de rotorul eolian de 10 kW cu pale nerăsucite longitudinal în regim nominal de lucru

Viteza liniară (tangențială) U a palei se calculează cu relația:

$$U = \frac{n_{rot}}{60} r, [m / s], \quad (1)$$

unde $n_{rot} [min^{-1}]$ este frecvența rotațiilor rotorului, respectiv a palelor, iar r – raza pentru care se determină viteza tangențială U . Pentru cele două secțiuni transversale studiate, din (1) rezultă că $U_1 = 1.157\text{ m/s}$ și $U_2 = 10.415\text{ m/s}$.

Sumând vectorial viteza liniară U a secțiunii transversale a palei cu $2/3$ (factorul de frânare $e = 2/3$) din viteza vântului V , putem determina unghiul φ cuprins între direcția curentului de aer și planul de rotație al rotorului:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{2/3 V}{U} = \frac{2V}{3U} \Rightarrow \varphi = \operatorname{arc\,tg} \frac{2V}{3U}. \quad (2)$$

Unghiul setat β al secțiunii transversale a palei este unghiul cuprins între coarda profilului ei aerodinamic și planul de rotație al rotorului. Prin urmare, unghiul de atac α – unghiul dintre coarda profilului aerodinamic și direcția curentului de aer cu care el interacționează, reiese din diferența unghiurilor φ și β :

$$\alpha = \varphi - \beta = \operatorname{arc\,tg} \frac{2V}{3U} - \beta. \quad (3)$$

În cazul palelor nerăsucite longitudinal, unghiul setat β al profilelor aerodinamice este de 9° pentru toate secțiunile ei transversale. Prin urmare, reieșind din (3), unghiurile de atac α_1 și α_2 ale celor două secțiuni studiate vor fi egale cu aprox. 71° și, respectiv, 23.5° .

Coeficientul Reynolds ia în considerație viteza de mișcare și mărimea profilului aerodinamic, fiind astfel un parametru cheie pentru demararea simulării interacțiunii curentului de aer cu profilele aerodinamice. Pentru cazul palelor turbinelor eoliene, coeficientul Reynolds se calculează cu relația:

$$\operatorname{Re} = 68500bV_a = 68500b\sqrt{\left(\frac{2}{3}V\right)^2 + U^2}, \quad (4)$$

unde V_a este viteza curentului de aer, [m/s], iar b – lungimea corzii profilului aerodinamic, [m].

Pentru secțiunile studiate, din (4) rezultă următorii coeficienți Reynolds: $\operatorname{Re}_1 \approx 184000$ și $\operatorname{Re}_2 \approx 191000$.

Simulările interacțiunii curentului de aer cu profilele aerodinamice studiate, realizate în mediul de modelare, simulare și calcul JavaFoil pentru unghiurile de atac și coeficienții Reynolds corespunzători, au arătat următoarele rezultate:

- Profilul aerodinamic NACA 4424 pentru coeficientul Reynolds $\operatorname{Re}_1 = 184000$ și unghiul de atac $\alpha_1 = 71^\circ$ dezvoltă eficiența aerodinamică C_{11}/C_{d1} de 0.397 ($C_{11}/C_{d1} = 0.705/1.77744$);
- Profilul aerodinamic NACA 2618 pentru coeficientul Reynolds $\operatorname{Re}_2 = 191000$ și unghiul de atac $\alpha_2 = 23.5^\circ$ dezvoltă eficiența aerodinamică C_{12}/C_{d2} de 5.936 ($C_{12}/C_{d2} = 1.526/0.25707$).

Dacă secționăm fictiv partea activă a palei în 18 segmente transversale egale ca lungime ($l = 0.204$ m), inițial putem determina forțele aerodinamice care acționează asupra primului (de la bază) și ultimului (de la vârf) segment de pală (fig. 2), după care, acceptând distribuția forțelor de-a lungul palei ca drept fiind liniară, și celelalte forțe corespunzătoare fiecărui segment de pală în parte (fig. 4). În modul acesta, sumând vectorial forțele obținute, putem determina momentele tangențial (motor) și axial dezvoltate de fiecare pală în parte, și întreg rotorul, respectiv.

Datorită manifestării legii lui Bernouli, la interacțiunea fluidului cu un profil aerodinamic pe direcția de curgere se produce forța aerodinamică de drag, iar perpendicular – forța aerodinamică de lift (portanța), care pot fi determinate cu relațiile:

$$F_l = C_l \frac{\rho S}{2} V_a^2, [N], \text{ și } F_d = C_d \frac{\rho S}{2} V_a^2, [N]. \quad (5)$$

unde ρ este densitatea aerului (pentru condiții normale de temperatură ($t = 15^\circ\text{C}$) și presiune ($p_{atm} = 101325$ Pa), $\rho = 1.225$ kg/m³), S – suprafața de referință, V_a – viteza curentului de aer.

Pentru cazul palelor turbinelor eolene cu ax orizontal, din (5) deducem că forțele aerodinamice de lift și de drag sunt egale cu:

$$F_l = C_l \frac{\rho l b}{2} \left(\left(\frac{2}{3} V \right)^2 + U^2 \right), [N], \text{ și } F_d = C_d \frac{\rho l b}{2} \left(\left(\frac{2}{3} V \right)^2 + U^2 \right), [N]. \quad (6)$$

Prin urmare, cele două secțiuni studiate dezvoltă următoarele foțe aerodinamice: $F_{l1} = 1.601 N$, $F_{d1} = 4.037 N$ și $F_{l2} = 6.56 N$, $F_{d2} = 1.105 N$.

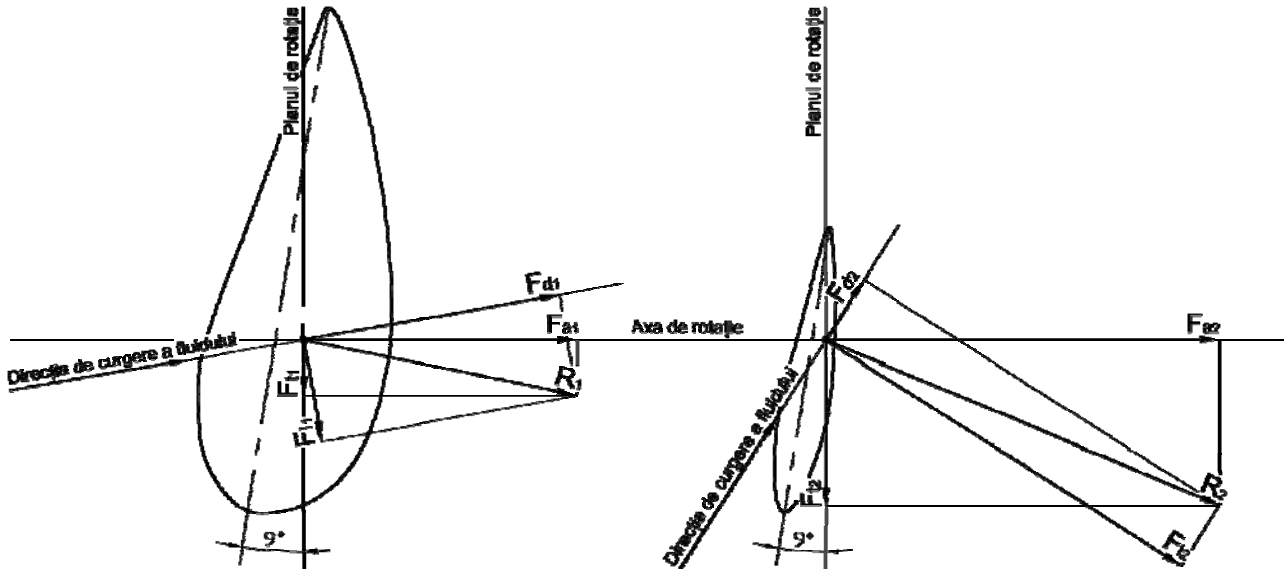


Fig. 2. Forțele aerodinamice de lift și de drag, rezultanta aerodinamică și proiecțiile ei pe axa și planul de rotație în două secțiuni transversale ale palei eoliene nerăscucite longitudinal.

Pentru cele două secțiuni ale palei – de la bază și vârf, în fig. 2 este prezentată distribuția forțelor aerodinamice de lift și de drag, a rezultantei aerodinamice și a forțelor tangențiale și axiale aparente în regim nominal de lucru ($V = 10 \text{ m/s}$ și $n_{rot} = 160 \text{ min}^{-1}$). Rezultanta aerodinamică proiectată pe planul de rotație produce forța tangențială, care este forța motoare a rotorului eolian, iar pe axa de rotație – forța axială, care încovoiaie pala, solicitând-o axial. Forța tangențială și cea axială se calculează cu relațiile:

$$F_t = \sqrt{F_l^2 + F_d^2} \cdot \cos \left(90^\circ - \varphi + \arccos \frac{F_l}{\sqrt{F_l^2 + F_d^2}} \right), F_a = \sqrt{F_l^2 + F_d^2} \cdot \cos \left(\varphi - \arccos \frac{F_l}{\sqrt{F_l^2 + F_d^2}} \right). \quad (7)$$

Prin urmare, cele două secțiuni studiate dezvoltă următoarele foțe tangențiale și axiale: $F_{t1} = 0.876 N$, $F_{a1} = 4.254 N$ și $F_{t2} = 2.593 N$, $F_{a2} = 6.126 N$.

Momentul tangențial (motor) și momentul axial dezvoltate de fiecare pală în parterezultă din suma forțelor tangențiale și, respectiv, axiale generate de pală raportate la brațul lor de aplicație:

$$M_t = \sum F_t \cdot b_t, [N \cdot m], \text{ și } M_a = \sum F_a \cdot b_a, [N \cdot m], \quad (8)$$

unde b_t și b_a sunt brațele forțelor tangențiale și, respectiv, axiale (distanța dintre punctul de aplicare al forței și axa de rotație a palei). Prin urmare momentele tangențial și axial dezvoltate de pala studiată sunt $M_t = 119.84 N \cdot m$ și $M_a = 213.598 N \cdot m$.

Momentul tangențial (motor) și momentul axial dezvoltat de întreg rotorul eolian va fi egal cu suma momentelor respective dezvoltate de fiecare pală în parte:

$$M_{t_{rot}} = 3 \cdot M_t = 359.52 [N \cdot m] \text{ și } M_{a_{rot}} = 3 \cdot M_a = 640.794 [N \cdot m]. \quad (9)$$

Momentele tangențial și axial dezvoltate de rotorul eolian de 10 kW cu pale răsucite longitudinal sub unghiuri optime în regim nominal de lucru

Rotoarele comparate, primul fiind prevăzut cu pale nerăsucite, iar al doilea – răsucite longitudinal sub unghiuri optime corespunzătoare regimului nominal de lucru, sunt similare. Prin urmare, pentru ultimul tipul profilelor aerodinamice, valorile și direcția (unde este cazul) vitezelor liniare (tangențiale) U_1 și U_2 , a unghiurilor φ_1 și φ_2 și a coeficienților Reynolds Re_1 și Re_2 pentru cele două secțiuni studiate sunt aceleași.

Simulările interacțiunii curentului de aer cu profilele aerodinamice studiate sub diferite unghiuri de atac ($\alpha = 0-90^\circ$), realizate în JavaFoil pentru coeficienții Reynolds corespunzători, au arătat următoarele rezultate:

- Profilul aerodinamic NACA 4424 pentru coeficientul Reynolds $Re_1 = 184000$ dezvoltă eficiența aerodinamică maximă pentru unghiul de atac $\alpha_1 = 7.5^\circ$, ș.a. $C_{l1}/C_{d1} = 51.778$ ($C_{l1}/C_{d1} = 1.489/0.02875$);
- Profilul aerodinamic NACA 2618 pentru coeficientul Reynolds $Re_2 = 191000$ dezvoltă eficiența aerodinamică maximă, de asemenea, pentru unghiul de atac $\alpha_2 = 7.5^\circ$, ș.a. $C_{l2}/C_{d2} = 49.694$ ($C_{l2}/C_{d2} = 1.231/0.02477$).

Prin urmare, pentru ca profilele aerodinamice din secțiunile studiate să interacționeze cu fluxul de aer sub unghiurile de atac corespunzătoare celor de eficiență aerodinamică maximă, în prima secțiune (zona butucului) unghiul setat al profilului aerodinamic trebuie să fie egal cu $\beta_1 = \varphi_1 - \alpha_1 = 80^\circ - 7.5^\circ = 72.5^\circ$ (cu 63.5° mai mult decât în cazul palelor nerăsucite longitudinal), iar în secțiunea a doua: $\beta_2 = \varphi_2 - \alpha_2 = 32.5^\circ - 7.5^\circ = 25^\circ$ (cu 16° mai mult).

Odată având valorile coeficienților de lift și de drag, similar procedurii (6), determinăm forțele aerodinamice de lift și de drag, corespunzătoare secțiunilor transversale studiate: $F_{l1} = 3.382 \text{ N}$, $F_{d1} = 0.065 \text{ N}$ și $F_{l2} = 5.292 \text{ N}$, $F_{d2} = 0.106 \text{ N}$.

Pentru cele două secțiuni ale palei, de la bază și vârf, în fig. 3 este prezentată distribuția forțelor aerodinamice de lift și de drag, a rezultantei aerodinamice și a forțelor tangențiale și axiale aparente în regim nominal de lucru ($V = 10 \text{ m/s}$ și $n_{rot} = 160 \text{ min}^{-1}$).

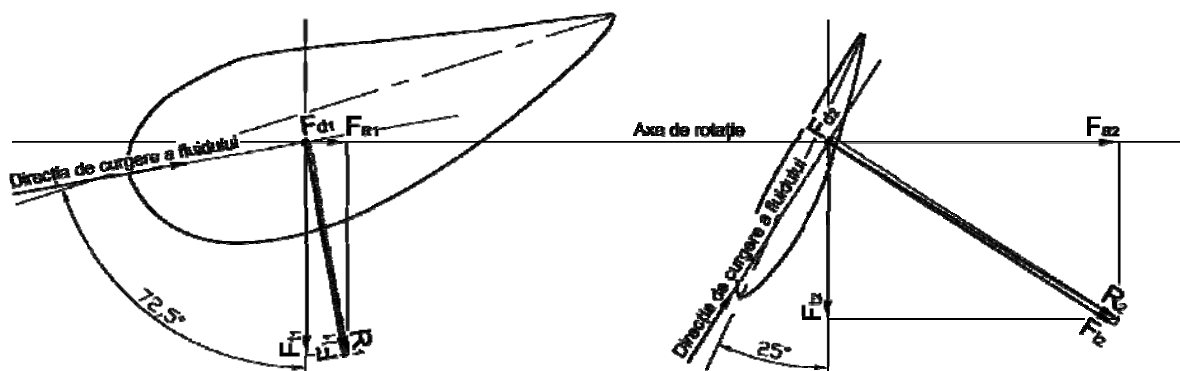


Fig. 3. Forțele aerodinamice de lift și de drag, rezultanta aerodinamică și proiecțiile ei pe axa și planul de rotație în două secțiuni transversale ale palei eoliene răsucite longitudinal sub unghiuri optime.

Forța tangențială și cea axială, reieșind (7), sunt $F_{t1} = 3.319 \text{ N}$, $F_{a1} = 0.651 \text{ N}$ și $F_{t2} = 2.754 \text{ N}$, $F_{a2} = 4.52 \text{ N}$.

Momentul tangențial (motor) și momentul axial dezvoltate de pala în cauză, reieșind din (8), sunt $M_t = 143.95 \text{ N} \cdot m$ și $M_a = 123.498 \text{ N} \cdot m$.

Momentul tangențial (motor) și momentul axial dezvoltat de întreg rotorul eolian va fi egal cu suma momentelor respective dezvoltate de fiecare pală în parte:

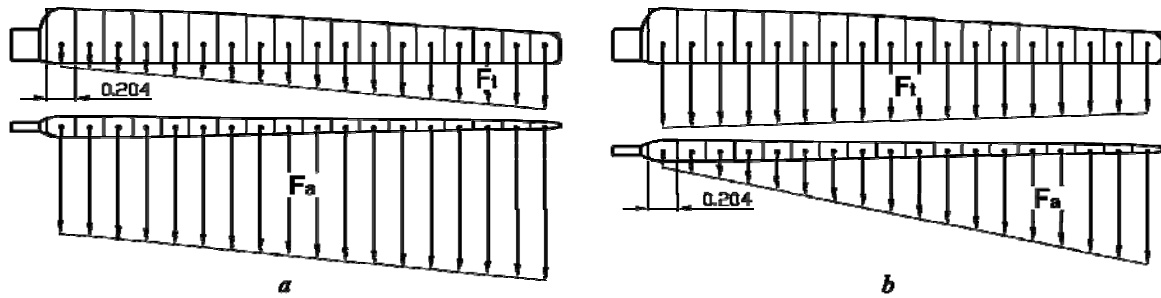


Fig. 4. Distribuția forțelor tangențiale și axiale de-a lungul paletelor: *a* – nerăsucite și *b* – răsucite longitudinal sub unghiuri optime corespunzătoare regimului nominal de lucru.

$$\begin{aligned} M_{t\ rot} &= 3 \cdot M_t = 431.85 \text{ [N} \cdot \text{m]} \text{ (cu 20\% mai mult decât în cazul paletelor nerăsucite longitudinal);} \\ M_{a\ rot} &= 3 \cdot M_a = 370.494 \text{ [N} \cdot \text{m]} \text{ (cu 42\% mai puțin).} \end{aligned} \quad (10)$$

Concluzii

- În cazul paletelor aerodinamice nerăsucite longitudinal, la crearea momentului motor niciodată nu participă cu eficiență maximă toată suprafața paletelor concomitent, ci doar câte un segment îngust ale lor. Astfel, în regim nominal de lucru rotoarele eoliene cu asemenea pale dezvoltă cu circa 20% eficiență mai puțin decât în caz că palele ar fi fost răsucite longitudinal sub unghiuri optime corespunzătoare regimului nominal de lucru. Necătând la aceasta, odată ce procedura de fabricație a primelor este net mai simplă și mai ieftină, utilizarea lor în construcția rotoarelor turbinelor eoliene de putere mică rămâne a fi preferențială pentru mulți producători, pierderile de eficiență fiind relativ ușor compensate prin fabricarea paletelor cu 12% mai lungi.
- De asemenea, în cazul paletelor aerodinamice nerăsucite longitudinal, în regim nominal de lucru, din cauza poziționării nepotrivite a profilelor aerodinamice de-a lungul întregii pale, palele, generatorul, nacela și turnul sunt solicitați axial cu aproximativ 42% forță mai mult decât în cazul rotoarelor eoliene cu pale pregnant răsucite. Necătând la aceasta, valorile forțelor axiale oricum rămân a fi foarte mici, fapt care face ca sporirea solicitărilor axiale să nu reprezinte un dezavantaj în utilizarea paletelor cu geometrie simplificată, nerăsucite longitudinal.

Bibliografie

- I. Bostan, V. Dulgheru, I. Sobor, V. Bostan, A. Sochirean *Sisteme de Conversie a Energiilor Regenerabile*, Editura TEHNICA-INFO, Chișinău, 2007.
- Erich Hau *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd edition, Editura SPRINGER, Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- Martin O. L. Hansen *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2nd edition, Editura EARTHSCAN, London – Sterling, VA, 2008.
- Betz A. *Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren / Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, Heft 26, 20. September 1920. pp. 307-309.
- <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm> – aplicația JavaFoil.