

UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI

Cu titlu de manuscris

C.Z.U.:621.833.6

RABEI IVAN

**OPTIMIZAREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A
ROTOARELOR ELICOIDALE CU AX VERTICAL ÎN
VEDEREA EFICIENTIZĂRII CONVERSIEI
ENERGIEI EOLIENE**

242.01 – TEORIA MAȘINILOR, MECATRONICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

CHIȘINĂU, 2022

Teza a fost elaborată la **departamentul „Bazele Proiectării Mașinilor”,**
Universitatea Tehnică a Moldovei.

Conducător științific:

CIUPERCĂ Rodion, conf. univ., dr.

Referenți oficiali:

VIȘA Ion, prof. univ., dr. ing., Universitatea „Transilvania” din Brașov, România;

SOBOR Ion, prof. univ., dr., Universitatea Tehnică a Moldovei.

Componenta Consiliului Științific Specializat:

BOSTAN Viorel, prof. univ., dr. hab.

TRIFAN Nicolae, conf. univ., dr.

DULGHERU Valeriu, prof. univ., dr. hab.

MARIAN Grigore, prof. univ., dr. hab.

TÎRȘU Mihai, conf. cercet., dr.

- **președinte CȘS;**

- **secretar științific CȘS;**

- **membru al CȘS;**

- **membru al CȘS;**

- **membru al CȘS.**

Susținerea va avea loc la 26 mai 2022, ora 14:00, în ședința Consiliului Științific Specializat D 242.01-22-2 din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, MD 2045, Republica Moldova, Chișinău, str. Studenților 9/8, blocul 6, aud. 210.

Teza de doctor și rezumatul pot fi consultate la biblioteca Universității Tehnice a Moldovei și pe pagina web a CNAA (www.cnaa.md).

Rezumatul a fost expediat la 22 aprilie 2022

Secretar științific al Consiliului Științific Specializat,

TRIFAN Nicolae, conf. univ., dr.

semnătura



Conducător științific,

CIUPERCĂ Rodion, conf. univ., dr.

semnătura



Autor

RABEI Ivan

semnătura



(© Rabei Ivan, 2022)

CUPRINS

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII.....	4
1. ASPECTE CONSTRUCTIVE ȘI TEHNOLOGICE ALE ROTOARELOR	
EOLIENE CU AX VERTICAL.....	8
Profilul aerodinamic.....	8
Unghiul elicoidal.....	8
Palele de tip J.....	9
Raportul de aspect.....	9
Fabricarea palelor.....	9
2. OPTIMIZAREA CONSTRUCTIVĂ A ROTOARELOR CU AX VERTICAL..	10
Standul experimental.....	10
Pale cu profil aerodinamic asimetric, curbura interior și exterior.....	11
Pale cu profil aerodinamic simetric și asimetric.....	11
Influența unghiului elicoidal al palelor asupra eficienței de conversie a turbinei cu ax vertical.....	12
Pale cu deschidere la bordul de fugă.....	13
Pale cu profil aerodinamic simetric NACA 0018, închis și cu deschidere la bordul de fugă.....	14
Pale cu profil aerodinamic asimetric FX 63-137, închis și cu deschidere la bordul de fugă.....	15
Influența raportului de aspect.....	16
Studiul CFD al profilului aerodinamic cu deschidere la bordul de fugă.....	18
3. ASPECTE DE FABRICAȚIE A PALELOR ROTOARELOR CU AX VERTICAL.....	20
Fabricarea palelor din material plastic reciclat.....	21
Calculul de rezistență al palei din material plastic.....	22
4. CONSIDERAȚII PRIVIND DEZVOLTAREA ROTOARELOR CU AX VERTICAL LA SCARĂ REALĂ.....	23
CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI.....	25
Direcții de cercetare pentru viitor.....	26
Bibliografie.....	26
Lista publicațiilor autorului la tema tezei.....	27
ADNOTARE.....	29

REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

Actualitatea temei: Republica Moldova importă aproximativ trei sferturi din necesarul de energie însă dispune de surse de energie regenerabilă, care pot acoperi cererea de energie, susținând în același timp economia națională. Dacă e să luăm resursele de vânt, Sobor ș. a. [1, p. 15-16] menționează că pe suprafața cu potențial eolian bun ($400 - 600 \text{ W/m}^2$) pot fi instalate turbine cu capacitatea totală de cel puțin 9000 MW. Aici autorii consideră înălțimi mari ($\sim 100 \text{ m}$) și turbine eoliene cu capacitate de ordinul megawaților. La înălțimi joase ($5 - 10 \text{ m}$), pentru cea mai mare parte a Republicii Moldova, viteza vântului este mică ($2 - 4 \text{ m/s}$). Afirmatia vine ca urmare a analizei datelor de la stațiile meteo prezentate în atlasul resurselor eoliene al RM publicat în anul 2017 [1]. Există însă regiuni și spații, pentru care viteza vântului este preponderent înaltă. Acestea se referă la locuri cu relief prielnic cum sunt dealurile, construcțiile sau turnurile înalte, aranjamentul urbanistic, care favorizează formarea curenților de aer etc. Lucrarea pornește de la premisa că trebuie exploatat întregul potențial eolian, inclusiv cel din regiunile cu densitate joasă de energie. Cele mai accesibile soluții tehnice în acest sens sunt turbinele eoliene mici. Acestea pot fi realizate și utilizate, în mod normal, fără a fi necesare aprobări și decizii din exterior, sau elemente de infrastructură, implementarea cărora depășește posibilitățile unui utilizator simplu.

Descrierea situației în domeniul de cercetare: Comparativ cu turbinele cu ax orizontal, cele cu ax vertical au fost mai puțin cercetate de-a lungul timpului. Avantajele și potențialul acestora sunt mai puțin exploatate. Lucrarea vine să elucideze o parte din necunoscutele și neclaritățile, care însoțesc turbinele cu ax vertical prin stabilirea parametrilor constructivi optimi, a posibilităților tehnologice de fabricare a palelor și a condițiilor, în care utilizarea acestora este eficientă.

Pentru ca o turbină eoliană să fie rentabilă, aceasta trebuie să întrunească trei condiții principale: eficiență de conversie maximă, cost minim și durată mare de viață. Eficiența de conversie a turbinei eoliene depinde de două surse. Prima este de natură externă și se referă la viteza vântului, o valoare ridicată implicând o productivitate ridicată. A doua sursă este de natură internă și ține de parametrii constructivi ai rotorului turbinei. Rotorul eolian poate fi caracterizat de patru parametri geometrici cheie: diametru, înălțime, profil aerodinamic al palei și lungime a corzii. Pornind de la aceștia, o nouă serie de parametri poate fi derivată: aria baleiată, raportul de aspect al rotorului, soliditatea, raportul de aspect al palei. Eficientizarea conversiei ține însă și de soluțiile tehnice legate de efectele aerodinamice de la capetele palelor (capace și aripioare), unghiul de înclinație, forma palelor (drepte, curbe, elicoidale), modificări ale structurii profilului aerodinamic al palei prin executarea de deschideri (pale de tip-J) etc. Stabilirea modului în care fiecare dintre acești parametri influențează eficiența, dar și armonizarea lor sinergică în cadrul sistemului, este premisa realizării unui produs eficient.

Identificarea rolului fiecărui parametru constructiv a început prin studiul literaturii de specialitate. Aici au fost identificate o serie de lipsuri, neclarități și, pe alocuri, contradicții între surse. Acestea se referă la: modul în care unghiul elicoidal al palelor influențează eficiența de conversie; rolul raportului de aspect al rotorului; stabilirea profilului aerodinamic optim; rolul deschiderii de la bordul de fugă al palei; orientarea

curburii profilurilor aerodinamice asimetrice etc. Aceste necunoscute au fost considerate la stabilirea obiectivelor tezei.

Pe lângă parametrii constructivi, teza abordează unele aspecte ale fabricării palelor turbinelor cu ax vertical. Materialele compozite în baza fibrelor de sticlă sunt alegerea numărul unu la realizarea de pale. Soluția este argumentată de proprietățile mecanice excelente, cu referință la rezistența mecanică înaltă și greutatea specifică joasă. O problemă legată de compozite este asigurarea unui ciclu de viață închis. Soluțiile de reprocesare/reciclare existente nu sunt pe deplin dezvoltate, astfel utilizarea materialului nu este în întregime sustenabilă. Pornind de aici, au fost urmărite soluții alternative de materiale și, implicit, posibilități de fabricare.

În baza considerentelor descrise au fost formulate scopul și obiectivele cercetării.

Scopul lucrării: Sporirea eficienței de conversie a rotoarelor elicoidale cu ax vertical prin optimizarea parametrilor geometrici.

Obiectivele cercetării:

- Cercetarea profilurilor aerodinamice recomandate pentru pale și stabilirea orientării profilului palei pentru asigurarea eficienței maxime de conversie a rotoarelor eoliene cu ax vertical;
- Determinarea gradului de influență a unghiului elicoidal al palei asupra performanței aerodinamice a rotorului eolian cu ax vertical;
- Cercetarea impactului palelor de tip J, utilizate la construcția rotoarelor eoliene cu ax vertical, asupra eficienței de conversie a energiei eoliene;
- La stabilirea raportului de aspect optim al rotorului eolian cu ax vertical este necesar de considerat cele două posibilități pentru rotoarele comparate, fie menținerea aceleiași lungimi a corzii, fie menținerea aceleiași solidități. Tendințele demonstrate depind de scenariul considerat;
- Studiul CFD al efectelor aerodinamice dezvoltate la suprafața palelor închise și cu deschidere la bordul de fugă;
- Identificarea materialelor și elaborarea metodelor de fabricație a palelor rotorului eolian prin prisma principiilor economiei circulare;
- Elaborarea algoritmului de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical.

Ipotezele de cercetare:

- Profilurile aerodinamice asimetrice sunt potrivite pentru palele rotorului eolian cu ax vertical în condițiile unui flux de aer cu viteză scăzută;
- Stabilirea raportului de aspect pentru rotoarele eoliene cu ax vertical trebuie efectuată fie prin prisma solidității constante a rotorului sau prin prisma lungimii constante a corzii profilului palei;
- Forma elicoidală a palei influențează performanța rotorului eolian cu ax vertical;
- Profilurile aerodinamice cu deschidere la bordul de fugă contribuie la sporirea eficienței de conversie a energiei eoliene;
- Palele rotorului eolian cu ax vertical pot fi fabricate din plastic HDPE, cu racordarea la principiile economiei circulare.

Metodologia de cercetare. Pentru cazul turbinelor eoliene cu ax vertical sunt adoptate două abordări în metodologia de cercetare. Prima se referă la aplicarea modelelor numerice, cel mai utilizat fiind calculul CFD (Computational Fluid Dynamics), dar și modelele tubului de flux SSTM, MSTM și DSTM, Modelele Vârtejurilor Libere (VTM) etc. A doua metodă se referă la cercetarea turbinelor suflate

în tuneluri aerodinamice sau aflate în aer liber. Metoda experimentală a fost adoptată în vederea abordării celor mai multe obiective ale lucrării, având, de asemenea, în vedere deficitul de date experimentale constat în studiul literaturii, dar și contradicțiile dintre rezultatele obținute în baza metodelor numerice.

Pentru cercetarea profilurilor aerodinamice, a poziției optime a profilurilor aerodinamice asimetrice, stabilirea raportului de aspect optim al rotorului, a rotoarelor cu pale de tip J, au fost realizate o serie de încercări experimentale în tunelul aerodinamic Gunt ET 220 din cadrul Laboratorului „Surse regenerabile de energie”, Departamentul „Inginerie Electrică”, UTM. Drept indicatori de performanță, luați în considerație pentru analiza comparativă a parametrilor funcționali, au servit puterea și numărul de turații dezvoltate de turbina eoliană la viteze ale fluxului cuprinse între 3 - 12 m/s.

Cât privește studiul raportului de aspect, întru asigurarea unor rezultate obiective au fost abordate două scenarii pentru încercările experimentale planificate:

1. Varierea raportului de aspect pentru rotoare cu aceeași arie baleiată și valoare a solidității;
2. Varierea raportului de aspect pentru rotoare cu aceeași arie baleiată și lungime a corzii profilului palei.

Cercetarea experimentală a parametrilor constructivi a avut drept rezultat colectarea unui volum mare de date, fapt care a permis identificarea gradului de influență a parametrilor stabiliți asupra eficienței rotorului eolian cu ax vertical.

Noutatea științifică:

- Studiul comparativ prin cercetări experimentale ale rotoarelor eoliene cu ax vertical a permis stabilirea potențialului palelor de tip J și recomandarea acestora pentru proiectarea turbinelor eoliene cu ax vertical;
- Cercetările experimentale, realizate în cadrul lucrării, au demonstrat eficiența profilurilor aerodinamice asimetrice (FX 63-137), care dispun de o rezervă importantă de potențial privind sporirea coeficientului de conversie a energiei eoliene comparativ cu profilul NACA-0018, soluție clasică adoptată la proiectarea rotoarelor eoliene cu ax vertical;
- Cercetarea influenței formei elicoidale a palei rotorului eolian cu ax vertical asupra coeficientului de conversie a energiei eoliene, fiind demonstrat că există o interdependență dintre unghiul elicoidal și profilul ales al palei, și anume: performanța rotorului este influențată de unghiul elicoidal, însă direcția pozitivă sau negativă este dictată de profilul aerodinamic ales;
- A fost stabilit raportul de aspect optim necesar la proiectarea rotorului eolian cu ax vertical pentru cazul solidității constante și, respectiv, pentru cazul lungimii constante a corzii;
- Prin aplicarea metodei de studiu CFD a fost demonstrat faptul că prezența deschiderii la bordul de fugă, cu lungimea egală cu 1/3 din lungimea corzii, nu influențează puternic caracterul fluxului, care cuprinde pala;
- Au fost soluționate aspectele de fabricație a palelor rotorului eolian cu ax vertical, utilizând material plastic reciclat de tip HDPE, soluție axată pe principiile economiei circulare;
- Elaborarea unui algoritm ce facilitează etapa de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical de putere mică, care, în baza unor date inițiale existente, oferă recomandări

practice cu relații de calcul pentru stabilirea valorilor optime ale parametrilor constructivi.

Importanța practică și valoarea aplicativă a lucrării: lucrarea vine cu recomandări practice necesare la etapa de proiectare constructivă a rotoarelor eoliene cu ax vertical de putere mică (<1 kW), formulate în baza cercetărilor experimentale realizate. Recomandările se referă la utilizarea profilului asimetric FX 63-137, în condiții de viteze reduse ale vântului. În acest context a fost demonstrată sporirea eficienței de conversie prin orientarea profilului asimetric al palei cu curbura pe exterior, iar pentru sporirea suplimentară a performanței rotorului au fost propuse deschideri la bordul de fugă al palei. Pentru cazul alegerii palelor elicoidale este indicată identificarea unui profil aerodinamic, care să valorifice această formă constructivă. Recomandările formulate privind sporirea eficienței de conversie sunt indicate în condițiile unui număr Reynolds mic (~ 40.000). Plasticul de tip HDPE poate fi considerat ca material de bază la fabricarea palelor rotoarelor eoliene cu ax vertical de putere mică.

Implementarea rezultatelor cercetărilor: rezultatele cercetărilor au fost utilizate în procesul de studiu la ciclul II (masterat) ISCER la disciplina „Sisteme de conversie a energiei eoliene”. A fost elaborat un manual destinat studenților și un stand pentru lucrări de laborator, care permite cercetarea influenței mai multor parametri constructivi ai rotorului eolian cu ax vertical asupra randamentului turbinei.

Aprobarea rezultatelor științifice: rezultatele cercetărilor au fost prezentate și expuse la conferințe științifice și saloane de invenții între care: Proceedings of the 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (Sielmen) 2021 Conference for Sustainable Energy (CSE); Springer Proceedings in Energy 2020; IOP Conference Series: Innovative Manufacturing Engineering and Energy (IManEE 2019); Romanian Association for Alternative Technologies, Sibiu (20-22 martie, 2019); Inventics and Technology Transfer Center, Universitatea „Ștefan cel Mare”, Suceava (16-18 mai 2019); Innovation and Creative Education Fair for Youth ICE-USV, Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, ediția 3 (iunie, 2019), ediția 2 (iunie, 2018), ediția 1 (2-4 noiembrie, 2017); XXII International Exhibition of Inventics, Inventica, Iași (26-28 iunie, 2019) ș. a.

Publicații la tema tezei: rezultatele de bază obținute au fost publicate în 8 lucrări științifice: 1 articol la *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems*, 2 articole în *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* (2018 și 2019), 1 articol în *Journal of Engineering Sciences and Innovation* (2019), 2 articole în monografia *Solar Energy Conversion in Communities*, Springer Nature Switzerland (2020), 2 articole de unic autor în revista *Journal of Engineering Science* (2020). Au fost obținute 2 brevete de invenție și depusă 1 cerere pentru brevet de invenție. Rezultate ale cercetării sunt conținute într-o monografie.

Volumul și structura tezei: lucrarea este formată din introducere, patru capitole, concluzii și recomandări, bibliografie din 152 de titluri și 15 anexe, 144 pagini de text de bază, 136 figuri și 17 tabele.

Cuvinte cheie: turbină eoliană cu ax vertical, rotor eolian, pale elicoidale, pale drepte, profil aerodinamic, pale de tip-J, deschidere la bordul de fugă, raport de aspect, pale căuș, CFD, eficiență, economie circulară, pale din plastic, HDPE.

1. ASPECTE CONSTRUCTIVE ȘI TEHNOLOGICE ALE ROTOARELOR EOLIENE CU AX VERTICAL

Prima parte a lucrării este axată pe stabilirea exactă a modului, în care parametrii constructivi ai rotorului eolian influențează eficiența de conversie a energiei eoliene. Evaluarea este făcută în baza studiului literaturii de specialitate (monografii, brevete de invenție, articole, teze de doctor etc.). A fost, de asemenea, urmărită identificarea unor recomandări clare privind alegerea parametrilor optimi la etapa de proiectare, determinând, în același timp, nivelul actual de cunoaștere a tuturor particularităților domeniului. Constatările principale ale studiului sunt formulate în cele ce urmează.

Profilul aerodinamic este considerat unul dintre parametrii geometrici foarte importanți ai rotorului. Tangler [2, p. 3] afirmă că determinarea versiunilor optime este unul dintre cele mai puțin înțelese aspecte privind dezvoltarea unei pale eoliene.

Rezultatele, prezentate în literatura de specialitate și articolele științifice, care țin de eficiența profilurilor, sunt pestrițe și, pe alocuri, contradictorii. Spre exemplu, în studiul realizat de Islam ș. a. [3, p. 188], autorii recomandă profilurile asimetrice. Pe de altă parte, Hashem ș.a. [4] scriu despre eficiența superioară a profilelor aerodinamice simetrice, studiul fiind realizat prin simulări CFD. În acest context devine dificilă alegerea unei versiuni optime în scopuri practice.

Profilurile aerodinamice asimetrice pot fi orientate în două moduri în raport cu axa rotorului: cu curbura poziționată radial spre interior (figura 1.a) sau spre exterior (figura 1.b). Nu au fost identificate studii, care să abordeze acest aspect, subiectul fiind adoptat drept obiectiv de cercetare.

Unghiul elicoidal. Rotorul elicoidal este caracterizat de unghiul elicoidal Λ al palei, care poate lua diferite valori (figura 2). Au fost identificate două studii, care stabilesc performanța structurală și aerodinamică a rotoarelor în funcție de unghiul elicoidal. McIntosh ș. a. [5, p. 12] analizează rotoare cu pale definite de profilul aerodinamic NACA 0021, care iau diferite valori Λ . Autorii folosesc modelul vârtejurilor libere, pe care-l validează în baza unei turbine reale. Rezultatele arată că odată cu creșterea unghiului elicoidal, descrește coeficientul de putere C_p (eficiența de conversie), dar crește valoarea rapidității optime. Pentru valori $\Lambda \geq 30^\circ$ solicitările ciclice se reduc în mod considerabil.

Utilizând modelul de transport al vorticității, Scheurich [6, pag. 102] studiază rotoare cu pale drepte, curbe și elicoidale definite de profilul aerodinamic NACA 0015. În contradicție cu rezultatele lui McIntosh ș. a. [5], rotorul elicoidal a demonstrat coeficientul de putere cel mai ridicat, urmat de rotorul cu pale curbe, rotorul cu pale drepte fiind cel mai puțin eficient. Studiul lui Scheurich [6] infirmă

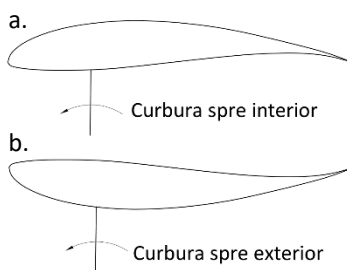


Fig. 1. Posibilități de orientare a profilurilor aerodinamice asimetrice

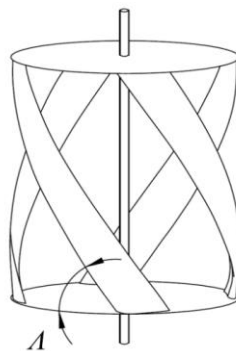


Fig. 2. Unghiul elicoidal Λ

astfel rezultatele precedente, care țin de performanță, însă confirmă tendințele manifestate de valorile rapidității, dar și aportul pozitiv al palelor elicoidale privind uniformizarea solicitărilor ciclice.

Palele de tip J. Există versiuni modificate ale profilurilor aerodinamice clasice, spre exemplu, modele care au o deschidere la bordul de fugă. Palele definite de astfel de profiluri se numesc pale de tip J. Configurațiile date au fost analizate de mai mulți autori. Utilizând simulări CFD, Chen ș. a. [7] au urmărit îmbunătățirea capacității de demarare a rotorului prin adoptarea palelor de tip J, profil aerodinamic NACA 0015. Rezultatele nu au indicat îmbunătățirea eficienței. Folosind aceeași metodă CFD, Zamani ș. a. [8] scriu despre creșterea momentului de torsiune și puterii prin adoptarea de pale tip J, profil aerodinamic NACA 0015. În baza studiului experimental efectuat, Siddiqui ș. a. [9] afirmă că turbina cu pale tip J profil NACA 2424 a manifestat un coeficient de putere cu 30 % mai ridicat decât versiunea cu pale închise. Mohamed [10] analizează cazul a trei turbine cu pale închise și cu deschidere la bordul de fugă definite de profilurile aerodinamice NACA 0015, NACA 0021 și S1046. Metoda adoptată a fost CFD și, având în vedere rezultatele obținute, autorul nu recomandă palele de tip-J.

Întrucât în baza studiilor enumerate nu pot fi formulate concluzii certe, subiectul dat a fost cercetat în cadrul acestei lucrări.

Raportul de aspect al rotorului (RA) este definit drept raportul dintre înălțimea h și diametrul D al acestuia. Studiul raportului de aspect poate fi făcut, având în vedere două posibilități: rotoarele comparate au fie aceeași soliditate, fie aceeași lungime a corzii palelor. În ambele cazuri aria baleiată rămâne constantă.

Definind raportul de aspect drept h/D , Brusca ș. a. [11] recomandă o valoare cât mai mică a acestuia. Aparent, analiza a fost îndreptată către rotoare cu aceeași soliditate (nefiind indicat explicit) și pale definite de profilul aerodinamic NACA 0018. Autorii și-au bazat studiul pe modelul impulsului MSTM dezvoltat de Strickland [12]. Utilizând aplicația QBlade, Ionescu ș. a. [13] analizează trei rotoare cu pale curbate și profil aerodinamic NACA 0012. Definind raportul de aspect drept D/h (invers definiției anterioare), autorii sugerează că o valoare RA mică implică un coeficient de putere superior. Aparent, rotoarele analizate au avut aria baleiată diferită (din nou nefiind indicat explicit). Clarke ș. a. [14, p. 18] au studiat subiectul adoptând programul QBlade. Autorii scriu că creșterea raportului de aspect a dus la mărirea eficienței. Palele considerate au fost definite de profilul aerodinamic DU06-W200, lungimea corzii fiind aceeași pentru toate cazurile. Scheurich ș. a. [15, p. 4] au studiat trei rotoare cu pale drepte, profil aerodinamic NACA 0015. Rezultatele, obținute cu ajutorul modelului numeric VTM, au indicat o dependență direct proporțională dintre eficiență și raportul de aspect. Aparent, aria baleiată a rotoarelor analizate a fost diferită.

Este dificil de luat decizii aplicative privind raportul de aspect potrivit în baza rezultatelor prezentate întrucât nu s-a ținut cont de cele două condiții importante, în care pot fi efectuate studiile: păstrarea lungimii corzii constante a palelor sau a solidității constante a rotorului. Clarificarea acestor lucruri a fost propusă drept obiectiv de cercetare.

Fabricarea palelor. Proprietățile mecanice excelente au propulsat materialele compozite drept soluție etalon pentru fabricarea de pale. Totuși există probleme care nu sunt pe deplin rezolvate atunci când este urmărită reutilizarea/reciclarea materialului la sfârșitul etapei de exploatare. În acest sens a fost analizată aplicabilitatea altor tipuri

de materiale pentru producerea de pale, soluții pentru care reciclarea este asigurată într-o măsură mai mare.

Concluziile rezultate din analiza studiilor și a ideilor expuse mai sus au servit drept fundament privind formularea scopului și a obiectivelor îndreptate către realizarea acestuia.

2. OPTIMIZAREA CONSTRUCTIVĂ A ROTOARELOR CU AX VERTICAL

Standul experimental este format din două componente principale: tunelul de vânt și turbina eoliană cu ax vertical.

Tunelul de vânt de tip Gunt ET 220 cu panou de comandă propriu este conceput pentru studiul turbinelor eoliene aflate în exterior (figura 3). În particular, tunelul este destinat studiului unei turbine eoliene cu ax orizontal atașată la tunel și înconjurată de o plasă de protecție. Gura tunelului, cu diametrul de 610 mm, limitează mărimea rotoarelor eoliene testate. Pentru a face posibil studiul turbinelor cu ax vertical, turbina atașată și plasa de protecție au fost înlăturate. Viteza fluxului de aer generat de tunel a fost determinată suplimentar cu ajutorul unui anemometru extern. Viteza maximă înregistrată de anemometru a variat în limitele 11 – 13 m/s.



Fig. 3. Tunelul de vânt Gunt ET 220

Turbina eoliană cu ax vertical (figura 4) a fost creată astfel încât să permită schimbarea cu ușurință a tipodimensiunilor de pale montate pe axul central cu ajutorul unor brațe, fără schimbarea generatorului electric și a turnului. De asemenea, a fost posibilă și schimbarea brațelor de suport. Palele au fost realizate prin imprimare 3D din segmente mici, lipite cap la cap, acoperite în final cu bandă adezivă și prinse de brațele de suport cu ajutorul unor elemente intermediare de fixare, de asemenea imprimate 3D.

În majoritatea cazurilor, drept parametru de interes a servit puterea electrică generată. Achiziționarea datelor a fost făcută în două moduri. Într-un caz curentul și tensiunea generată erau determinate cu ajutorul multimetrelor, circuitul fiind completat de o rezistență electrică egală cu 200 Ω . În alt caz a fost aplicat sistemul NI Elvis II cu modulul RLab creat pentru achiziționarea și afișarea curentului și tensiunii dezvoltate de turbinele eoliene de laborator.

Indicatorii de interes (intensitatea curentului, tensiunea și puterea electrică) au fost colectați la vitezele vântului de 7,2 m/s, 8,5 m/s, 10 m/s, 11 m/s și 12 m/s. Pentru fiecare valoare specificată a vitezei, o serie de încercări au fost efectuate iar punctele obținute au fost interpolate pentru a facilita identificarea tendințelor.



Fig. 4. Modelul experimental al turbinei eoliene cu ax vertical

Pale cu profil aerodinamic asimetric, curbura interior și exterior

Palele, definite de un profil aerodinamic asimetric, pot fi dispuse în două moduri în raport cu axa rotorului: cu curbura orientată radial fie spre interiorul rotorului, fie spre exterior (vezi figura 1). În calitate de subiect a fost ales profilul aerodinamic FX 63-137 (figura 5), model recomandat de Bostan ș. a. [16]. În baza acestuia a fost elaborat un set format din trei pale drepte. Structura adaptabilă a turbinei a permis utilizarea aceluiași set pentru studiul ambelor opțiuni. Astfel, într-un caz palele au fost poziționate în mod curbura interior, după care au fost fixate cu curbura pe exterior. Rotoarele au fost caracterizate de aceiași parametri cheie (tabelul 1) și testate în aceleași condiții de vânt. Generatorul turbinei a alimentat o sarcină de 200 Ω .

Rezultatele încercărilor sunt prezentate grafic în figura 6. Tendințele au fost confirmate prin încercări repetate. În toate cazurile valorile puterii produse de turbina cu pale curbură exterior au fost mult peste cele dezvoltate de versiunea curbura interior, pentru care performanța a fost neînsemnată. Spre exemplu la viteza vântului de 12 m/s turbina cu pale curbură exterior a generat o medie de 106 mW, iar modelul curbura interior a produs doar 0,3 mW [17].

Pale cu profil aerodinamic simetric și asimetric

Performanța aerodinamică a profilului aerodinamic asimetric FX 63-137 a fost comparată cu cea a profilului simetric NACA 0018 (figura 7). Au fost elaborate două turbine, fiecare având palele definite de unul din cele două profiluri. Palele asimetrice au fost orientate curbura exterior întrucât, în acest caz, eficiența de conversie este superioară. Rotoarele elaborate au fost caracterizate de aceiași parametri, indicați în



Fig. 5. Profilul aerodinamic asimetric FX 63-137

Tabelul 1. Parametrii constructivi ai rotoarelor cu pale asimetrice

Înălțimea rotorului (m)	h	0,4
Diametrul rotorului (m)	D	0,4
Lungimea palei (m)	L	0,4
Numărul de pale (buc.)	N	3
Lungimea corzii (m)	c	0,05
Aria baleiată (m ²)	A	0,16
Soliditatea (/)	σ	0,375
Raportul de aspect (/)	RA	1
Unghiul de înclinație (°)	β	0
Profilul aerodinamic (/)	PA	FX 63-137

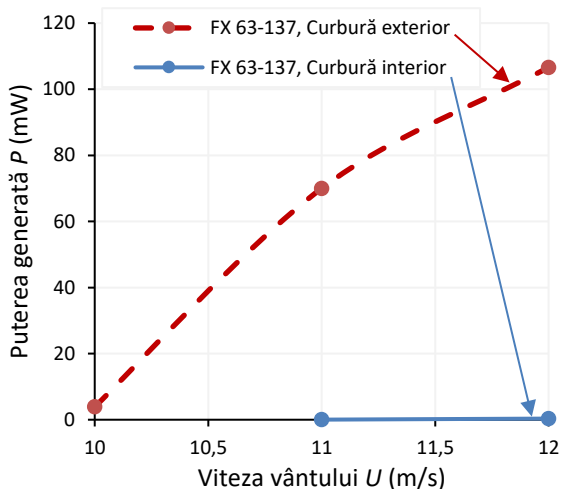


Fig. 6. Performanța rotoarelor cu pale curbură exterior și interior, profil aerodinamic FX 63-137

tabelul 1. Rezultatele încercărilor sunt afișate grafic în figura 8. Tendințele au evidențiat superioritatea clară a palelor asimetrice FX 63-137 curbura exterior. La viteza vântului de 11 m/s turbina cu pale FX 63-137 a generat 188 mW față de 14,3 mW, cât a generat turbina cu pale NACA 0018. Diferența semnificativă argumentează importanța alegerii profilului aerodinamic potrivit în faza de proiectare/dezvoltare a turbinei eoliene. Este de notat potențialul profilurilor aerodinamice asimetrice [18].

Influența unghiului elicoidal al palelor asupra eficienței de conversie a turbinei cu ax vertical

În scopul determinării influenței unghiului elicoidal asupra eficienței de conversie a turbinei au fost adoptate aceleași două profiluri aerodinamice: FX 63-137 și NACA 0018.

Pentru început a fost analizat cazul modelului NACA 0018. Două seturi de pale au fost elaborate, primul format din pale drepte, iar al doilea – din pale elicoidale. Unghiul elicoidal Λ al celor din urmă a constituit 67° , iar privită de sus pala acoperea un arc de cerc de 48° . Cu excepția unghiului Λ și, în consecință, a lungimii palei, rotoarele au fost caracterizate de aceiași parametri constructivi, afișați în tabelul 2. Caracterul tendințelor este prezentat în figura 9 și favorizează clar rotorul cu pale elicoidale față de rotorul cu pale drepte. Spre exemplu, la viteza fluxului de aer de 12 m/s turbina elicoidală a generat o putere cu un plus de 36 % față de turbina cu pale drepte.

Încercări au fost efectuate, utilizând profilul asimetric FX 63-137 curbura exterior. Rotoarele au avut aceiași parametri afișați în tabelul 2. Rezultatele au indicat un caracter diametral opus față de cazul palelor



Fig. 7. Profilurile aerodinamice FX 63-137 (a) și NACA 0018 (b)

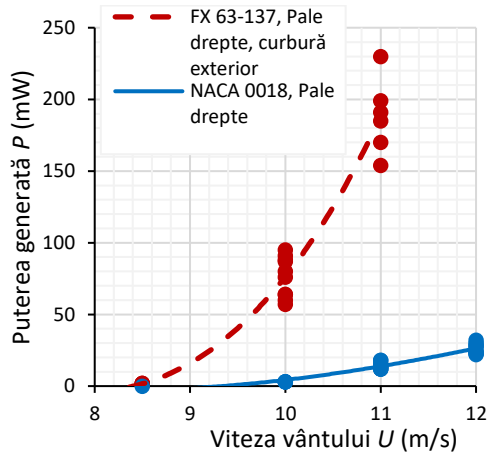


Fig. 8. Puterea generată de turbina cu pale FX 63-137 curbura exterior și turbina cu pale NACA 0018

Tabelul 2. Caracteristicile constructive ale rotoarelor elicoidal și de tip H analizate

Parametrii constructivi		Rotor pale drepte	Rotor pale elicoidale
Înălțimea rotorului (m)	h	0,4	0,4
Diametrul rotorului (m)	D	0,4	0,4
Numărul de pale (buc.)	N	3	3
Lungimea palei (m)	L	0,4	0,4345
Lungimea corzii (m)	c	0,05	0,05
Unghiul elicoidal (°)	Λ	0	67
Aria baleiată (m ²)	A	0,16	0,16
Soliditatea efectivă (/)	σ	0,375	0,375
Unghiul de înclinație (°)	β	0	0

NACA 0018. Aici turbina cu pale drepte a generat o putere mai ridicată decât turbina cu pale elicoidale (figura 10). Spre exemplu, la viteza vântului de 12 m/s, turbina cu pale drepte a generat o putere de 2,3 ori mai mare decât cea generată de turbina cu pale elicoidale.

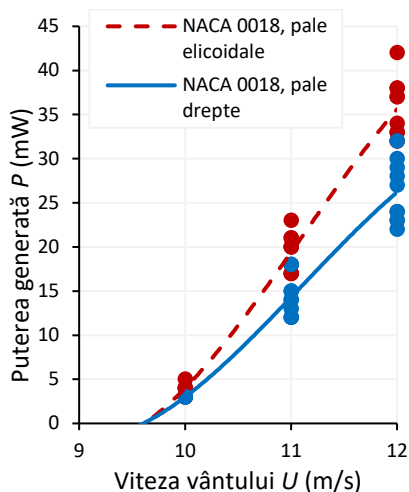


Fig. 9. Performanța turbinelor cu pale elicoidale și drepte, profil aerodinamic NACA 0018

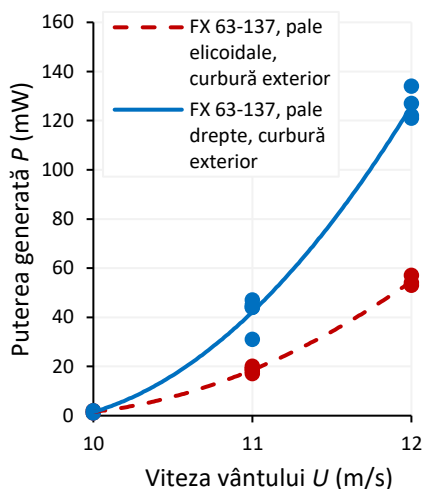


Fig. 10. Turbine cu pale elicoidale și drepte, profil aerodinamic FX 63-137

Reieșind din cele descrise, putem afirma că unghiul elicoidal al palelor influențează eficiența de conversie a rotorului, însă direcția pozitivă sau negativă, este dictată de profilul aerodinamic ales. Palele elicoidale pot fi o soluție eficientă de optimizare aerodinamică în cazul unui profil aerodinamic specific și o soluție deficentă pentru alt tip de profil [19].

Pale cu deschidere la bordul de fugă

Deschiderea la bordul de fugă al palei are la bază un contur incomplet sau o denaturare a formei originale a profilului aerodinamic. Acest lucru facilitează pătrunderea fluxului în interior, influențând astfel comportamentul aerodinamic al palei.

În figura 11 este prezentat un profil aerodinamic simetric cu deschidere la bordul de fugă și un profil închis. Aici dimensiunea deschiderii este egală cu o treime din valoarea lungimii corzii c .

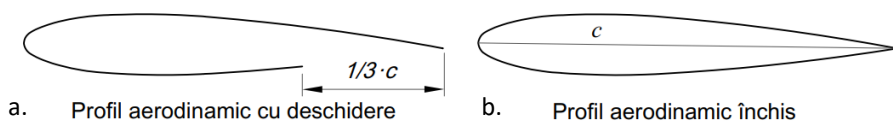


Fig. 11. Profil aerodinamic cu deschidere la bordul de fugă (a) și profil închis (b)

Palele prevăzute cu deschidere pot fi montate pe barele de suport în două moduri: fie cu deschiderea orientată radial spre interiorul rotorului sau spre exterior (figura 12). Ambele moduri au fost analizate și prezentate mai jos.

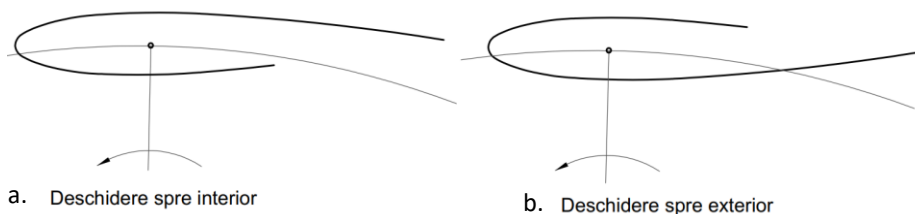


Fig. 12. Profiluri aerodinamice orientate radial spre interiorul (a) și exteriorul (b) rotorului

Pale cu profil aerodinamic simetric NACA 0018, închis și cu deschidere la bordul de fugă Rezultatele obținute pentru cazurile palelor drepte și elicoidale de tip NACA 0018 sunt afișate în figura 13. Parametrii constructivi ai turbinelor sunt listați în tabelele 1 și 2 (prezentate în paragrafele precedente). Dimensiunea deschiderii a fost egală cu 1/3 din lungimea corzii (adică 16,6 mm), stabilită în baza recomandărilor din literatura de specialitate.

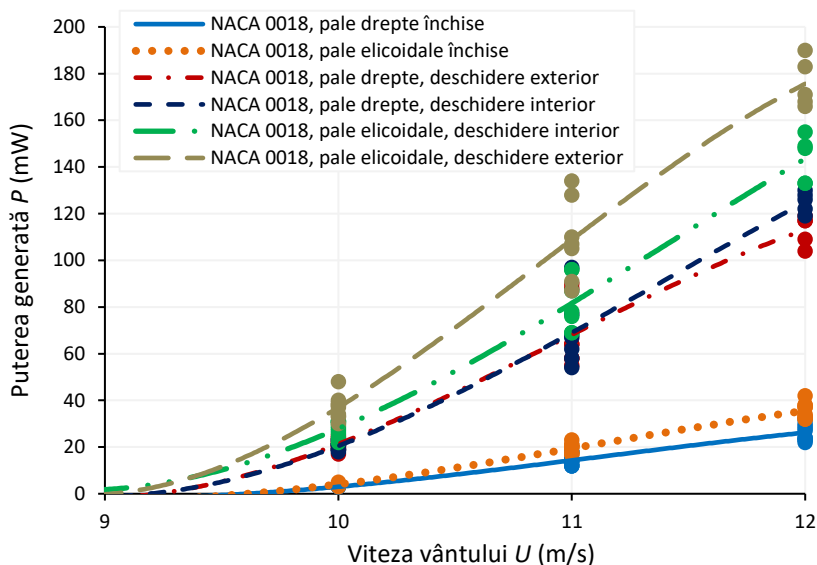


Fig. 13. Rotoare pale drepte și elicoidale, închise și cu deschidere la bordul de fugă al palelor, profil aerodinamic NACA 0018

Vom considera unghiul elicoidal și deschiderea la bordul de fugă drept soluții distincte de optimizare a performanței aerodinamice a rotorului. Urmărind figura 13, să utilizăm pe rând aceste soluții pentru cazul rotorului cu pale drepte, profil aerodinamic închis NACA 0018. Aplicând un unghi elicoidal de 67° pentru palele drepte, la viteza vântului de 12 m/s obținem o creștere a productivității de 26%. Pentru aceeași viteză a vântului, considerând doar deschiderea la bordul de fugă, avem o creștere de cel puțin 4,3 ori a puterii generate. Aici contează însă orientarea deschiderii, versiunea deschidere interior fiind ușor superioară versiunii deschidere exterior. Dacă aplicăm atât unghiul elicoidal cu valoarea menționată cât și deschiderea la bordul de fugă

obținem o creștere și mai mare a performanței. Devine din nou importantă orientarea deschiderii. Spre exemplu, la viteza vântului de 12 m/s versiunea elicoidală deschidere interior a generat o putere de ~ 5,5 ori mai ridicată față de versiunea pale drepte închise. Pentru versiunea elicoidală deschidere exterior, puterea generată a fost de ~ 6,7 mai mare față de aceeași referință. Valorile menționate au variat în dependență de experiment, însă tendințele generale au rămas aceleași.

Privind dintr-un unghi diferit, putem afirma că pentru acest profil aerodinamic, unghiul elicoidal este soluție de optimizare atât pentru cazul palelor drepte închise cât și pentru cazul palelor drepte cu deschidere. Studiul a implicat pale cu o singură valoare a lungimii deschiderii la bordul de fugă (1/3 din lungimea corzii). S-ar putea totuși ca pentru valori diferite eficiența să crească, acest lucru trebuie însă confirmat sau infirmat prin încercări experimentale adăugătoare.

Pale cu profil aerodinamic asimetric FX 63-137, închis și cu deschidere la bordul de fugă

Spre deosebire de profilul simetric, cel asimetric cu deschidere implică încă patru posibilități privind orientarea: curbura interior deschidere interior, curbura interior deschidere exterior, curbura exterior deschidere interior, curbura exterior deschidere exterior (figura 14).

Figura 15
afișează atât
performanța
rotoarelor cu pale
drepte cât și
elicoïdale. Cu
excepția formei palei,
rotoarele au avut
aceiași parametri
listați în tabelele 1 și
2. Dimensiunea
deschiderii la bordul
de fugă a fost egală cu
1/3 din lungimea corzii c sau 16,6 mm, valoare selectată în baza recomandărilor din literatura de specialitate.

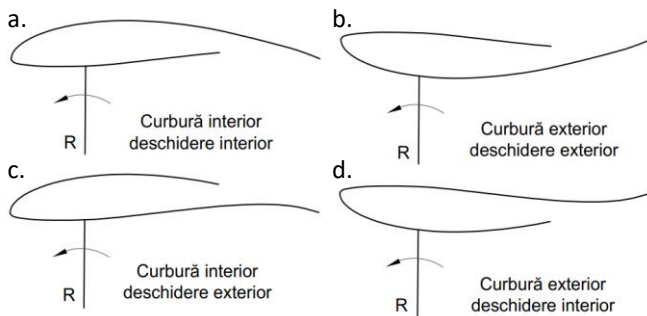


Fig. 14. Versiunile deschise ale profilului aerodinamic asimetric

În cazul palelor drepte, versiunile curbura interior au fost cele mai puțin eficiente. Luate pe rând, turbina cu pale închise a avut o productivitate neînsemnată de 1 mW la 12 m/s. Prezența deschiderii pe interior a dus la creșterea ușoară a performanței – 10,3 mW. Modul deschidere pe exterior s-a dovedit a fi cel mai eficient pentru cazul palelor curbura interior, generând 19,3 mW la aceeași viteză a vântului.

Turbinele cu pale curbura exterior au depășit cu mult productivitatea celor cu pale curbura interior. Astfel turbina cu pale închise a generat 152 mW la viteza de 12 m/s, turbina curbura exterior deschidere exterior a produs 234 mW la aceeași viteză, iar turbina curbura exterior deschidere interior a generat 250 mW la 11 m/s. Ultima nu a fost încercată la viteza vântului de 12 m/s întrucât exista riscul distrugerii palelor din cauza numărului ridicat de rotații pe minut. Este de notat că ultimele două turbine au început generarea energiei electrice de la viteze mai mici ale vântului (8,5 m/s).

Cât privește **palele elicoidale**, au fost elaborate două seturi a câte trei pale: primul format din pale închise și al doilea - din pale curbură exterior deschidere interior. Deoarece studiile descrise mai sus au indicat faptul că versiunea curbură interior este ineficientă, aceasta nu a fost aplicată pentru modelul elicoidal. Condițiile externe și parametrii constructivi principali ai rotoarelor au fost aceiași (tabelul 2). Ca și în cazul palelor drepte, deschiderea la bordul de fugă al palelor elicoidale a produs o creștere semnificativă a puterii generate. La viteza vântului de 12 m/s, versiunea închisă a produs 74 mW, iar versiunea cu deschidere – 197 mW, ceea ce înseamnă o creștere de 2,6 ori a puterii generate (figura 15). De asemenea, generarea puterii a început de la viteze mai mici ale vântului.

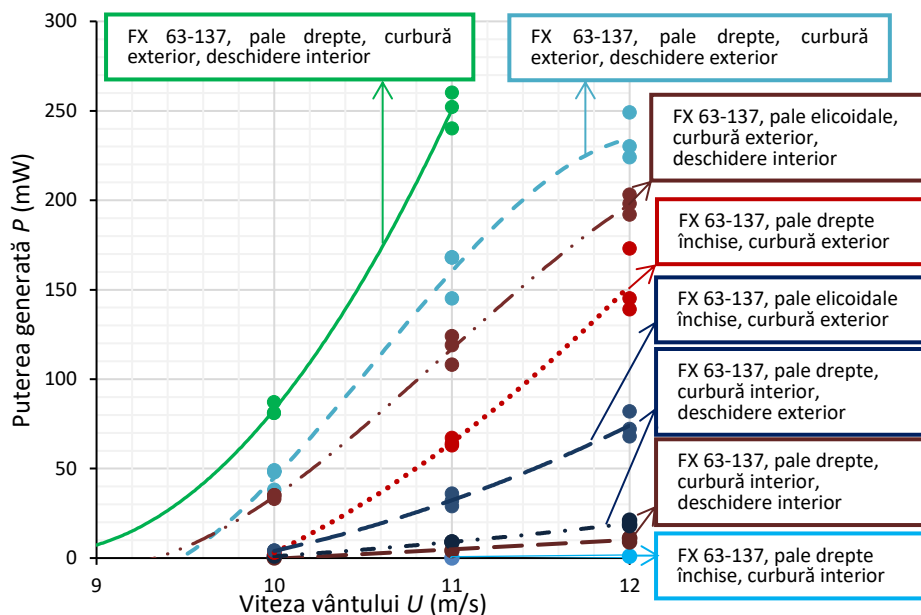


Fig. 15. Performanța palelor drepte, elicoidale, închise și deschise, profil aerodinamic FX 63-137

În concluzie, afirmăm că deschiderea la bordul de fugă este benefică pentru ambele profiluri și tipuri de pale analizate (NACA 0018 și FX 63-137) [20, 21].

Influența raportului de aspect

Cazul lungimii constante a corzii

Au fost elaborate trei rotoare de tip H cu aceeași arie baleiată, profil aerodinamic și lungime a corzii însă cu diferite lungimi ale palelor. În rezultat, raportul de aspect pentru fiecare rotor a fost diferit (figura 16). Modelele au fost caracterizate de o serie de parametri constructivi comuni și anume: aria baleiată, lungimea corzii, profil aerodinamic, număr de pale și unghi de înclinație a palelor. Parametrii, care le-a diferențiat, au fost: raportul de aspect, diametrul, înălțimea și soliditatea (tabelul 3).

Turbinele au fost suflate în tunelul de vânt, puterea generată servind drept indicator de interes. Rezultatele sunt prezentate în figura 17. Puterea a crescut proporțional cu valoarea raportului de aspect. Spre exemplu, la viteza vântului de 11 m/s turbina (1) cu raportul de aspect 0,64 a generat 1 mW, turbina (2) cu raportul de aspect 1 – 17 mW și turbina (3) cu raportul de aspect 1,78 – 114 mW. Tendințele au fost confirmate prin efectuarea de încercări repetate, inclusiv pentru rotoare cu lungimi diferite a corzii profilului palelor.

Cazul solidității constante

Influența raportului de aspect asupra eficienței a fost studiată și pentru cazul rotoarelor caracterizate de aceeași valoare a solidității. Au fost elaborate trei rotoare de tip H cu o serie de parametri comuni: aria baleiată, soliditate, profil aerodinamic, număr de pale, unghi de înclinație a palelor. Parametrii proprii fiecărui rotor în parte au fost: raportul de aspect, diametrul rotorului, înălțimea și lungimea corzii (tabelul 4).

Turbinele au fost supuse acțiunii fluxului de aer, iar achiziționarea datelor a fost făcută cu ajutorul sistemului NI Elvis II. Rezultatele sunt afișate în figura 18. Tendințele au favorizat ușor rotorul

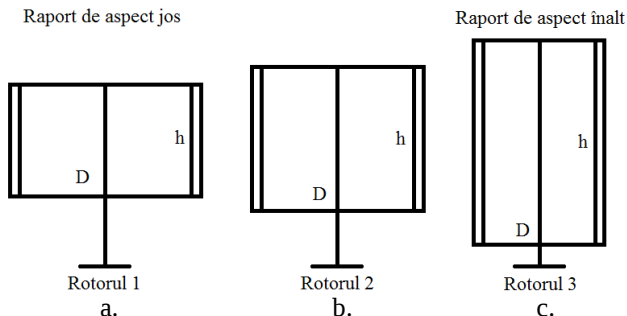


Fig. 16. Trei rotoare cu aceeași arie baleiată și diferite raporturi de aspect (D – diametrul, h – înălțimea)

Tabelul 3. Parametrii constructivi ai rotoarelor analizate

Parametrul		Numărul rotorului		
		1	2	3
Raport de aspect (/)	RA	0,64	1,00	1,78
Înălțime (m)	h	0,320	0,400	0,533
Diametru (m)	D	0,5	0,4	0,3
Soliditate (/)	σ	0,300	0,375	0,500
Arie baleiată (m²)	A	0,16	0,16	0,16
Lungime a corzii (m)	c	0,05	0,05	0,05
Profil aerodinamic (/)	PA	NACA 0018		
Unghi de înclinație (°)	β	0	0	0
Număr de pale (buc.)	N	3	3	3

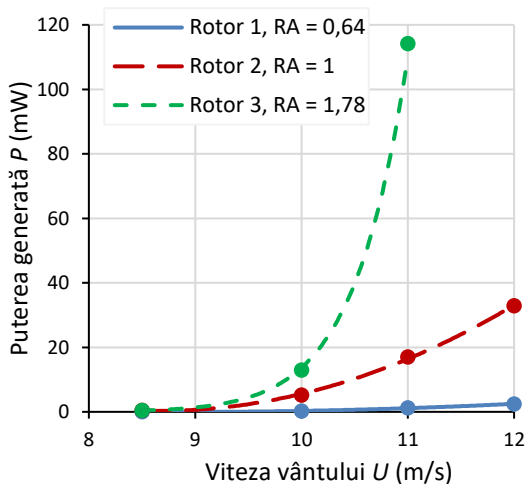


Fig. 17. Rotoare cu raportul de aspect 0,64, 1 și 1,78

cu raportul de aspect 1 (rotorul 2) față de rotorul cu raportul de aspect 0,64 (rotorul 1). Raportul de aspect cel mai mare s-a dovedit a fi cel mai puțin eficient.

Tabelul 4. Parametrii constructivi ai rotoarelor

Parametrul		Numărul rotorului		
		1	2	3
Raport de aspect (/)	<i>RA</i>	0,64	1,00	1,78
Înălțime (m)	<i>h</i>	0,320	0,400	0,533
Diametru (m)	<i>D</i>	0,5	0,4	0,3
Soliditate (/)	σ	0,375	0,375	0,375
Lungime a corzii (m)	<i>c</i>	0,0625	0,05	0,0375
Arie baleiată (m ²)	<i>A</i>	0,16	0,16	0,16
Profil aerodinamic (/)	<i>PA</i>	NACA 0018		
Unghi de înclinație (°)	β	0	0	0
Număr de pale (buc.)	<i>N</i>	3	3	3

Conform datelor colectate, la viteza vântului de 12 m/s turbina (1) cu raportul de aspect 0,64 a generat 22,2 mW, turbina (2) cu raportul de aspect 1 a generat 24,8 mW, iar turbina (3) cu raportul de aspect 1,78 – 9,6 mW. În timpul experimentelor rotorul 1 (*RA* = 0,64) a manifestat cele mai puține dificultăți la demarare. Pentru a formula concluzii generale, care descriu influența raportului de aspect pentru cazul solidității constante, sunt necesare noi încercări cu alte valori ale solidității, precum și alte profiluri aerodinamice [22].

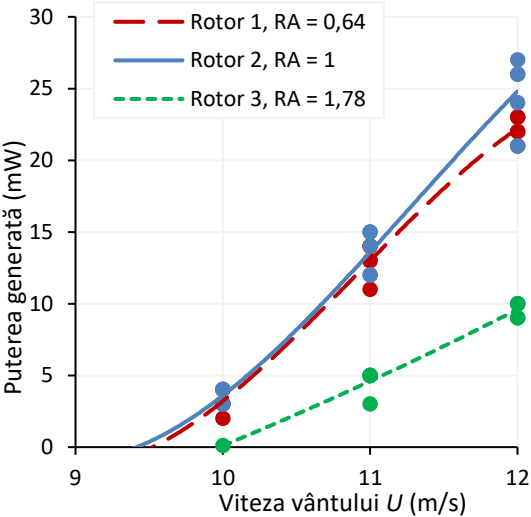


Fig. 18. Influența raportului de aspect pentru rotoarele cu soliditate constantă

Studiul CFD al profilului aerodinamic cu deschidere la bordul de fugă

Este de interes legătura dintre performanța aerodinamică a palei montate pe rotorul colian cu ax vertical și performanța unui segment de pală, definit de același profil aerodinamic, testat în tunelul de vânt. Pentru a identifica o astfel de relație, trei segmente de pală au fost elaborate și suflate în tunelul de vânt: unul în baza profilului NACA 0018, al doilea în baza aceluiași profil însă prevăzut cu deschidere la bordul de fugă egală cu 1/3 din lungimea corzii (adică 0,033 m), iar al treilea segment definit de profilul aerodinamic asimetric FX 63-137. Elementele au avut lungimea corzii și înălțimea egale cu 0,1 m, fiind echipate cu capace la capete. Testele au fost efectuate pentru viteze ale fluxului de 16 m/s. Având în vedere valoarea lungimii corzii, condițiile de curgere au fost caracterizate de un număr Reynolds de ~105.000. Drept criteriu de

performanță aerodinamică a servit raportul forțelor de portanță și rezistență aerodinamică $\varepsilon = F_L/F_D$. Rezultatele sunt afișate în figura 19.

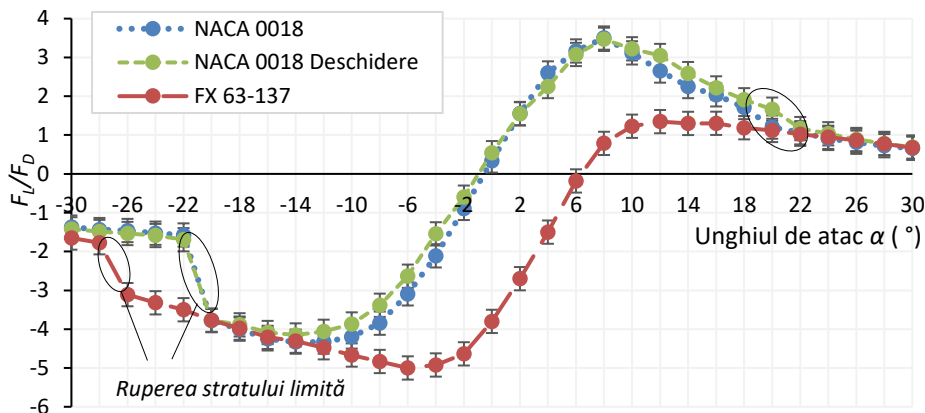


Fig. 19. Performanța aerodinamică a elementelor de pală la viteza fluxului de aer $U=16$ m/s

Elementele de pală, definite de profilul aerodinamic NACA 0018 închis și cu deschidere, au demonstrat o performanță aerodinamică apropiată, cu un maxim de $\varepsilon = 3,50$ pentru profilul NACA 0018 închis și $\varepsilon = 3,47$ pentru profilul NACA 0018 cu deschidere la unghiul de atac $\alpha = 8^\circ$. Profilul aerodinamic FX 63-137 a dezvoltat o performanță aerodinamică comparativ joasă pentru cea mai mare parte a spectrului pozitiv de valori α ($\alpha > 8^\circ$), însă valori ε comparativ mai mari pe spectrul de unghiuri de atac α negative ($\varepsilon_{\max} = -5,0$ la $\alpha = -6^\circ$ față de $\varepsilon_{\max} = -4,2$ la $\alpha = -12^\circ$ pentru profilul NACA 0018 închis).

Pentru a explica similaritatea tendințelor demonstrate de profilurile NACA 0018 închise și cu deschidere la bordul de fugă, au fost efectuate simulări ale curgerii fluxului de aer în jurul elementelor de pală, utilizând programul ANSYS Fluent. Rezultatele simulării, prezentate în figura 20, prezintă liniile de curent și distribuția vitezelor în jurul profilurilor de pală. Notăm faptul că liniile de curent nu sunt afectate puternic de deschiderea la bordul de fugă, aici fiind format un vârtej cu rolul unei perne de aer, care asigură o formă a profilului apropiată de cea a modelului închis. Viteza U a fluxului format în regiunea deschiderii este mai mică de 1 m/s, iar în interior viteza este apropiată de zero. Cu toate că sunt asemănătoare, liniile de curent pentru cele două profiluri nu sunt identice, acest aspect fiind reflectat de diferența ușoară dintre tendințele grafice demonstrate de acestea (figura 19).

Cu toate că performanța aerodinamică a segmentelor de pală NACA 0018 închise și cu deschidere, testate în tunelul de vânt, a fost apropiată, palele, definite de același profil aerodinamic, aplicate pe un rotor cu ax vertical, au demonstrat un comportament foarte diferit (figura 13). Având în vedere aspectul dat, cel puțin la această etapă, impactul, fie pozitiv sau negativ, al deschiderii palei asupra eficienței de conversie a TEAV, nu poate fi evaluat pe baza studiului segmentelor de pală în tunelul de vânt, ci doar aplicând modelul pe rotor [23].

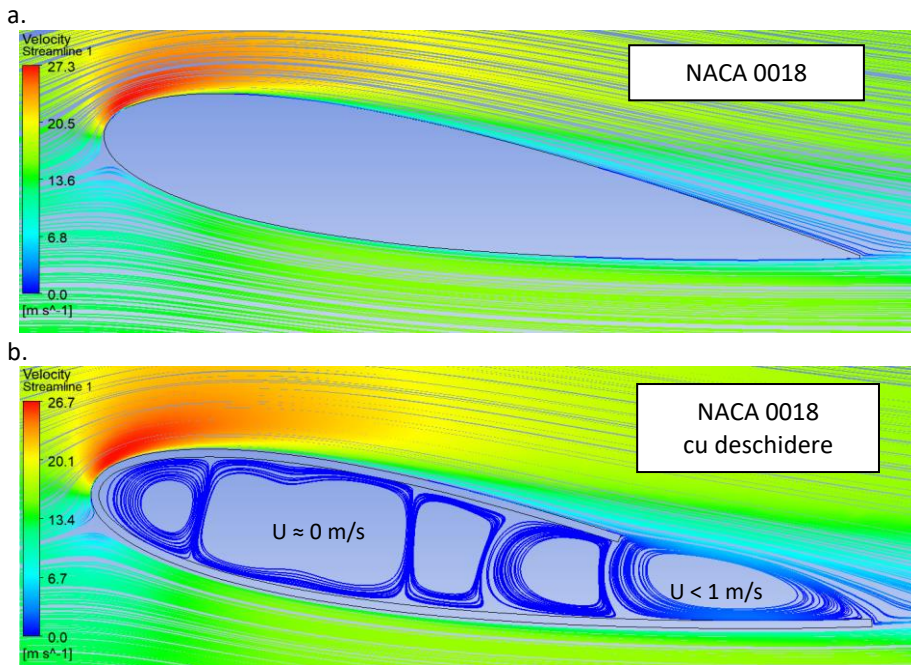


Fig. 20. Liniile de curent și distribuția vitezelor în jurul palelor NACA 0018 închise (a) și cu deschidere (b), unghiul de atac 10°

3. ASPECTE DE FABRICAȚIE A PALELOR ROTOARELOR CU AX VERTICAL

Crearea conținutului practic, procesele și componentele realizate în vederea atingerii obiectivelor propuse, au tins să fie susținute de câteva principii și anume: principiul sustenabilității, tendința către alinierea la modelul economic circular; concordanța cu obiectivele de dezvoltare durabilă propuse de Organizația Națiunilor Unite; adaptarea la condițiile și necesitățile Republicii Moldova.

În continuare este abordată posibilitatea producerii palelor prin identificarea materialelor posibile, metodelor de fabricare și a elementelor de rigidizare, care să asigure performanța structurală. Drept subiect au fost considerate palele elicoidale mici, cu lungime < 2 m.

O soluție este combinarea tehnologiilor aditive cu materialul compozit. În mod obișnuit, realizarea palelor din material compozit necesită două matrițe ce asigură suportul și forma suprafețelor de intrados și extrados, care sunt ulterior lipite. Versatilitatea tehnologiilor aditive elimină necesitatea de matrițe, aspect benefic, în special, pentru producția în serie mică și de unicat. Este, de asemenea, eliminată necesitatea proceselor de îmbinare și lipire a părților de intrados și extrados precum și inserarea longeronului. În figura 21 este prezentat un segment de pală, realizat în asemenea mod, care constă din patru elemente: bordul de atac, două elemente de mijloc și bordul de fugă. Suprafața de intrados, extrados și cele două longeroane poziționate corespunzător sunt realizate dintr-o singură iterație. În caz de necesitate, în aceeași iterație pot fi adăugate și capacele de la capetele palei.

Fabricarea palelor prin procedeul descris vine și cu dezavantaje, în particular, privind sustenabilitatea. În condițiile mediului economic și a tehnologiilor curente este dificilă asigurarea unui ciclu de viață închis. Una din precondițiile reciclării este separarea componentelor obiectului de reciclat. În cazul prezentat, componentele de separat sunt: plasticul imprimat, fibrele de sticlă și rășina impregnată în fibre. Separarea fibrelor de sticlă de rășină este o problemă complexă.

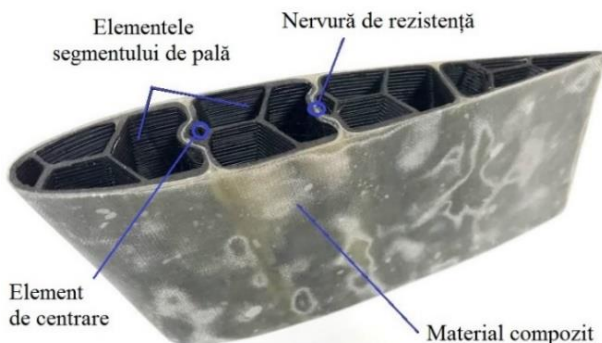


Fig. 21. Segment de pală elicoidal imprimat acoperit cu material compozit (NACA 0018)

Fabricarea palelor din material plastic reciclat

În vederea alinierii la principiile sustenabilității, în calitate de material pentru fabricarea palelor a fost considerat materialul plastic de tip HDPE. Materialul poate fi găsit cu ușurință, în special, în regiuni unde managementul deșeurilor este deficient, așa cum este cazul RM. Plasticul dat este ușor prelucrabil și posedă rezistență mecanică și rigiditate satisfăcătoare. Pornind de la aceste premise a fost studiată posibilitatea utilizării acestuia la fabricarea palelor pentru turbinele eoliene mici.

Solicitările asupra palei pot fi împărțite în două clase: solicitări structurale și aerodinamice. Plasticul de tip HDPE are o limită de curgere care variază între 23 și 29,5 MPa. Spectrul dat de valori este mai redus decât cel caracteristic lemnului (rezistența la întindere ~ 90 MPa, variind în funcție de specie, direcția aplicării forței și alți factori), aluminiului (> 200 MPa, în funcție de aliaj) sau materialelor compozite (în funcție de structură și direcția aplicării forței, comparativă cu cea a aluminiului). Solicitățile structurale, la care este supusă pala în timpul rotirii, sunt însemnate, astfel că sarcina materialului plastic a fost redusă la acoperirea rolului aerodinamic, adică asigurarea formei palei și păstrarea acesteia în timpul operării. Pentru acoperirea rolului structural a fost prevăzut un longeron din oțel.

Pentru început a fost elaborat un segment de pală din material plastic HDPE. Acțiunea a avut drept scop demonstrarea faptului că un asemenea produs poate fi realizat. Procesul de fabricație a segmentului de pală constă din trei operații: mărunțirea materialului care, în prealabil, este spălat și uscat; realizarea unei foi din plastic prin presare la cald; imprimarea formei finale cu ajutorul matrițelor prin presare la rece. Utilajele de procesare au fost construite de membrii organizației „Tinerii pentru Ecoplastic” în baza proiectului dezvoltat de organizația „Precious Plastic” și puse la dispoziție pentru încercări.

Până la tocare, plasticul trebuie curățat de eventuale hârtii, adezivi pe suprafață, resturi, substanțe sau murdărie. Nu este însă neapărată curățirea până la sterilizare așa cum se procedează în condiții industriale. Materialul curat (după necesitate spălat și uscat) poate fi tocat.

Au fost pregătite 1600 grame de material granulat, cantitate calculată fiind necesară pentru realizarea unei foi cu grosimea de 3 mm. Ulterior granulele au fost distribuite uniform pe masa mașinii de presat la cald cu dimensiunile de 1000×450 mm. Temperatura a fost ridicată treptat pe parcursul unei ore până la o valoare maximă de 170°. Procesul de încălzire a plasticului a durat 3,5 ore. Durata de timp necesară pentru încălzire și temperatura setată pot fi reduse semnificativ prin asigurarea unei izolații termice corespunzătoare a instalației. După presarea la rece în matrițe, a fost obținut segmentul de pală cu dimensiunile și calitatea suprafeței necesară (figura 22). În asemenea mod pot fi realizate și pale cu deschidere, înlăturând o fâșie în regiunea bordului de fugă.

Calculul de rezistență al palei din material plastic

Odată dovedită posibilitatea obținerii paletelor din material plastic HDPE a fost efectuată o analiză privind determinarea răspunsului structural al unui astfel de produs în condiții de operare simulate. În particular, au fost realizate simulări ale unui sistem, care include pala propriu-zisă, echipată pe interior cu un longeron în formă de țevă. Alegerea secțiunii transversale circulare a longeronului este argumentată de simplitatea realizării tehnologice.

Drept subiect de studiu a fost adoptat cazul palei elicoidale deschise, cu înălțimea de 1,5 m, lungimea – 1,59 m, lungimea corzii – 0,15 m, arcul de cerc, acoperit de pală privită de sus, este de 60° și grosimea de 3 mm. Modelul analizat are la bază profilul aerodinamic asimetric FX 63-137 cu curbura orientată pe exterior și lungimea deschiderii de 0,05 m ($1/3 \cdot c$).

După pregătirea modelului CAD a fost efectuată analiza CAE cu ajutorul programului Fusion 360. Sistemul a fost analizat în regim static, fiindu-i impuse solicitări sub forma vitezei unghiulare egale cu 38 rad/s sau ~2177 grade/s. Forțele generate, ca urmare a rotației specificate, depind de masa palei, pentru acest caz fiind calculată o valoare de 2,53 kg. În scopul simplificării modelului și, ignorând în același timp aspectele nerelevante studiului, pentru contactele dintre componentele sistemului a fost aleasă metoda „Bonded”. Opțiunea dată emulează lipirea între componente, în realitate legăturile fiind asigurate de buloane și piulițe. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în figura 23. Parametrii de interes sunt tensiunile von Mises. Imaginea din figura 23.a cuprinde sistemul împreună cu pala. Tensiunile dezvoltate pe suprafață sunt afișate în diferite puncte. Inspectarea amănunțită a arătat că tensiunile maxime nu trec de 3,5 MPa, valoare care este de 5,9 ori mai mică decât limita de curgere a materialului HDPE de 20,67 MPa (indicată în librăria materialelor programului Fusion 360). Tensiunile sunt mai pronunțate în apropiere imediată de longeron, aici fiind



Fig. 22. Segment de pală închis din material plastic HDPE

recomandate soluții tehnice sigure de prindere, care să împiedice în cât mai mare măsură apariția deformațiilor.

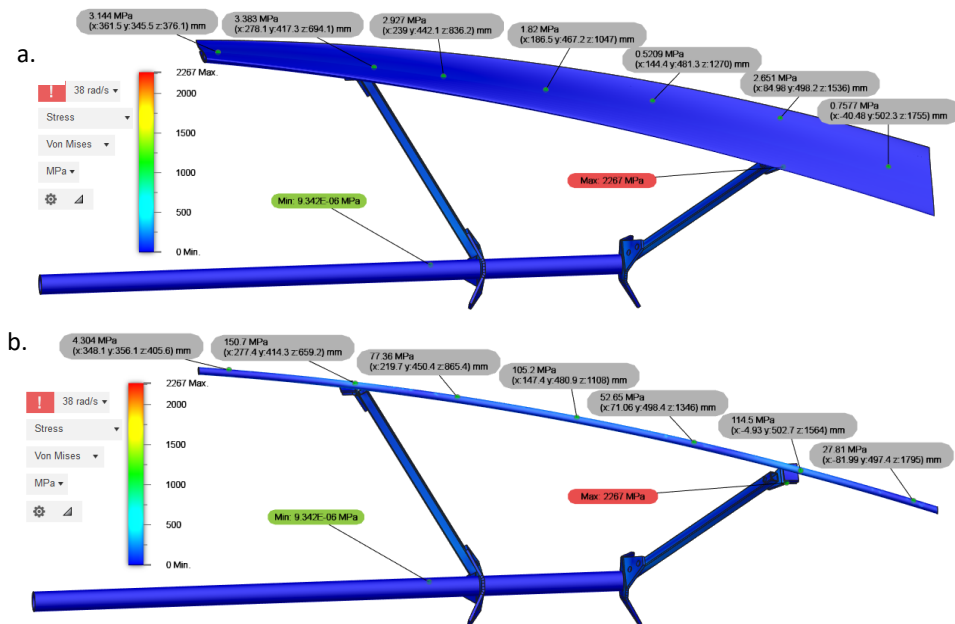


Fig. 23. Tensiunile von Mises dezvoltate de pală (a) și longeron (b)

În figura 23.b este prezentat același sistem, dar care exclude pala, în prim plan fiind longeronul. Valorile maxime ale tensiunilor von Mises rezultate depășesc 150 MPa, fiind astfel de peste 40 ori mai mari decât tensiunile maxime apărute pe pală. Studiul demonstrează că tensiunile maxime sunt preluate de longeron. Din punct de vedere structural, aceste rezultate încurajează utilizarea materialului HDPE la fabricarea palelor.

Această soluție de fabricație este argumentată de principiile sustenabilității, cu referire la reciclarea materialului utilizat. Al doilea argument ține de disponibilitatea materiei prime, iar un al treilea - de preț relativ scăzut al mașinilor de prelucrare.

Materialul plastic de tipul HDPE nu este o alternativă a materialelor compozite, ci o soluție complementară. Proprietățile mecanice ale compozitelor sunt greu de înlocuit, iar în prezent, la nivel mondial, se lucrează la soluțiile complete de reciclare [23].

4. CONSIDERAȚII PRIVIND DEZVOLTAREA ROTOARELOR CU AX VERTICAL LA SCARĂ REALĂ

Proiectarea unei turbine eoliene cu ax vertical poate fi realizată, având la bază următorul reper conceptual: este necesar un set de date de intrare, o serie de referințe și relații de calcul utilizate la determinarea unui set de date de ieșire. Considerăm exemplul cu datele de intrare prezentate în tabelul 5, relațiile de calcul în tabelul 6, iar datele de ieșire în tabelul 7 [24].

Tabelul 5. Date de intrare

Parametrul (unitatea de măsură)	Valoarea parametrului
Diametrul rotorului (m)	1
Raza rotorului (m)	0,5
Înălțimea rotorului (m)	1,5
Aria baleiată (m ²)	1,5
Viteza de calcul a vântului (m/s)	10
Coeficientul de putere presupus (/)	0,15
Densitatea aerului (kg/m ³)	1,225
Profilul aerodinamic (/)	FX 63-137
Numărul de pale (buc.)	3
Soliditatea (/)	0,45

Tabelul 6. Relațiile necesare pentru proiectarea rotor cu ax vertical

Relația	Legenda
$P = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$ (4.1)	P – puterea turbinei (W); C_p – coeficientul de putere; ρ – densitatea aerului (kg/m ³); A – aria baleiată (m ²); U – viteza vântului (m/s).
$RA = h/D$ (4.2)	RA – raportul de aspect al rotorului; h – înălțimea rotorului (m); D – diametrul rotorului (m).
$\sigma = (N \cdot c \cdot h)/A$ $= (N \cdot c)/D$ (4.3)	σ – soliditatea; N – numărul de pale; c – lungimea corzii (m);
$\lambda_{opt} = 2.693\sigma^{-0.329} - 1.605$ (4.4)	λ_{opt} – rapiditatea optimă.
$V_t = \lambda_{opt} \cdot U$ (4.5)	V_t – viteza tangențială a palei (m/s).
$\omega = V_t/R$ (4.6)	ω – viteza unghiulară a palei (rad/s); R – raza rotorului (m).
$RPM = \omega \cdot 30/\pi$ (4.7)	RPM – numărul de rotații pe minut.
$a_c = \omega^2 \cdot R$ (4.8)	a_c – accelerația centripetă a palei (m/s ²).
$G = a_c/9,81$ (4.9)	G – raportul dintre accelerația centripetă a palei și accelerația gravitațională.
$T = P/\omega$ (4.10)	T – momentul de torsiune dezvoltat de rotor (N·m).

Tabelul 7. Date de ieșire

Parametrul de ieșire	Valoarea obținută	Relația aplicată
Puterea turbinei (W)	137	(4.1)
Raportul de aspect al rotorului	1,5	(4.2)
Lungimea corzii (m)	0,15	(4.3)
Rapiditatea optimă	1,9	(4.4)
Viteza tangențială a palei (m/s)	18,97	(4.5)
Viteza unghiulară a palei (rad/s)	37,94	(4.6)
Numărul de rotații pe minut a rotorului	362	(4.7)
Accelerația centripetă a palei (m/s ²)	719,8	(4.8)
Raportul dintre accelerația centripetă și accelerația gravitațională	73,3	(4.9)
Momentul de torsiune (N·m)	3,63	(4.10)

Fiecare dintre aceste date și relații pot fi schimbate în funcție cerințele față de produs sau de experiența proiectanților privind parametrii constructivi optimi. Acest calcul poate fi completat de analize CFD precum în sursele [25, 26].

CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Concluziile generale sunt prezentate în succesiunea formulării obiectivelor:

1. Orientarea curbării profilului aerodinamic asimetric, fie pe exterior sau interior, influențează considerabil productivitatea turbinei. La viteza vântului de 12 m/s, turbina cu pale FX 63-137 curbură exterior a generat 106 mW, iar modelul curbură interior a generat 0,3 mW. Performanța aerodinamică a turbinei cu pale definite de profilul aerodinamic FX 63-137 curbură exterior a fost comparată cu cea demonstrată de turbina cu pale NACA 0018. Prima a fost mai eficientă, cu o putere generată de 151 mW față de 16,3 mW la 12 m/s. Rezultatele confirmă potențialul profilurilor aerodinamice asimetrice și importanța orientării curbării [17, 18].
2. Unghiul elicoidal influențează eficiența de conversie a turbinei însă caracterul influenței este dictat de profilul aerodinamic ales. În cazul profilului aerodinamic simetric NACA 0018, turbina cu pale elicoidale a generat o putere cu 36 % mai ridicată decât turbina cu pale drepte. În cazul profilului aerodinamic asimetric FX 63-137 curbură exterior tendințele s-au inversat, turbina cu pale drepte a fost mai eficientă decât modelul elicoidal, generând de 2,3 ori mai multă putere [19].
3. Deschiderea la bordul de fugă al paletelor a venit cu efecte benefice asupra performanței turbinei, indiferent de profil aerodinamic sau formă a palei. Unul dintre modele încercate, rotorul cu pale drepte NACA 0018 cu deschidere pe exterior, a generat o putere de 4,3 ori mai ridicată decât rotorul cu pale închise. Cercetarea a fost axată pe pale cu o valoare particulară a deschiderii de 1/3 din lungimea corzii [20, 21]. Studiul unor valori diferite ale deschiderii rămâne un subiect deschis pentru cercetare.
4. Raportul de aspect al rotorului influențează eficiența turbinei, fapt demonstrat pentru rotoarele cu pale NACA 0018. În cazul păstrării corzii constante, eficiența de conversie crește proporțional cu valoarea raportului de aspect [22]. În cazul solidității constante, raportul de aspect optim a tins către valoarea 1, rotorul cu raportul de aspect cel mai mare fiind cel mai puțin eficient.
5. Impactul, fie pozitiv sau negativ, al deschiderii palei asupra eficienței de conversie a rotorului cu ax vertical nu poate fi evaluat pe baza studiului segmentelor de pală în tunelul de vânt, ci aplicând modelul pe rotor. Efectele aerodinamice, care favorizează palele cu deschidere aplicate pe rotor, se dezvoltă în timpul mișcării de rotație [23].
6. Studiul efectuat confirmă că plasticul de tip HDPE poate asigura funcția aerodinamică a palei (cu lungime < 2 m), rolul structural urmând să fie asigurat de un longeron din metal. Fabricarea paletelor include din trei pași: tocarea materialului, presarea la cald cu obținerea unei foi din plastic și presarea la rece a foi plasate într-o matriță, care imprimă forma necesară. Soluția paletelor din material plastic nu este o alternativă a materialelor compozite, ci o soluție complementară [23].
7. Algoritmul de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical propus constă dintr-o serie de date de intrare, relații și recomandări și date de ieșire [24]. Datele de intrare se stabilesc în dependență de caz. Metoda prezentată este îndreptată spre îngustarea spectrului de căutare a versiunii performante de rotor. Pentru îngustarea și mai mult a câmpului, sunt binevenite acțiuni continue de optimizare/validare completare prin aplicarea corespunzătoare a metodelor de simulare numerică CFD [25, 26]. Setul de pași a fost aplicat pentru proiectarea unei turbine de putere mică și propuse recomandări practice privind soluțiile tehnice [27, 28].

Direcții de cercetare pentru viitor:

- Stabilirea mărimii optime a deschiderii la bordul de fugă al palelor. De determinat dacă valoarea optimă depinde de profilul aerodinamic ales sau există o mărime generală.
- Stabilirea influenței formei palei (dreaptă, curbată, elicoidală) asupra capacității de demarare a rotorului.
- Poziționarea optimă a curburii pentru diferite profiluri aerodinamice asimetrice. De determinat dacă poziționarea curbură exterior este benefică pentru toate profilurile aerodinamice asimetrice sau depinde de fiecare profil în parte.
- Studiul extensiv al influenței raportului de aspect asupra eficienței de conversie a rotoarelor cu ax vertical în vederea identificării unor tendințe generale, dacă există. Analiza include diferite forme ale palelor cu diferite profiluri aerodinamice și valori ale solidității.
- Influența brațelor de suport a palelor asupra eficienței TEAV. Studiul brațelor de suport cu secțiunea transversală în formă de profil aerodinamic de diferit tip: simetric, asimetric, căuș, cu deschidere la bordul de fugă pe interior și exterior etc.

Bibliografie

1. SOBOR, I., CHICIUC, A., RACHIER, V. *Atlasul resurselor energetice eoliene al Republicii Moldova*. Chișinău, 2017. 176 p. ISBN 978-9975-87-215-7.
2. TANGLER, J. L. *The Evolution of Rotor and Blade Design*. NREL report (NREL/CP-500-28410) presented at American Wind Energy Association, (2000). 11 p.
3. ISLAM, M., FARTAJ, A., CARRIVEAU, R. Design analysis of a smaller-capacity straight-bladed VAWT with an asymmetric airfoil. *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 30, No. 3, 2011, pp. 179–192. 15 p.
4. HASHEM, I., MOHAMED, M. H. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. *Energy*, 142 (2018), 531–545. doi:10.1016/j.energy.2017.10.036. 32 p.
5. MCINTOSH, S. C., BABINSKY, H., BERTENYI, T. *Aerodynamic modeling of swept bladed vertical axis wind turbines*. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition 5 – 8 January 2009, Florida, US. 15 p.
6. SCHEURICH, F. *Modeling the aerodynamics of vertical-axis wind turbines*. PhD thesis, 2011, University of Glasgow, UK. 191 p. Disponibil: <http://theses.gla.ac.uk/2897/> [citată 15.05.2020].
7. CHEN, J., YANG, H., YANG, M., XU, H. The effect of the opening ratio and location on the performance of a novel vertical axis Darrieus turbine. *Energy* 89, (2015), 819-834. 16 p. doi:10.1016/j.energy.2015.05.136.
8. ZAMANI, M. NAZARI, S., MOSHIZI, S. A., MAGHREBI, M. J. Three dimensional simulation of J-shaped Darrieus vertical axis wind turbine. *Energy* 116, (2016), 1243-1255. doi:10.1016/j.energy.2016.10.031. 13 p.
9. SIDDIQUI A. S. ș. a. *Performance evaluation of H-type Darrieus VAWT with J-shaped blade geometry at variable pitch angles*. AIP Conference Proceedings 2119, (2019), 020010. doi.org/10.1063/1.5115369. 10 p.

10. MOHAMED M. H. Criticism study of J-Shaped Darrieus wind turbine: Performance evaluation and noise generation assessment. *Energy* 177, (2019), 367–385. doi.org/10.1016/J.energy.2019.04.102. 19 p.
11. BRUSCA, S., LANZAFAME, R., MESSINA, M. Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* (2014) 5:333–340, doi:10.1007/s40095-014-0129-x. 8 p.
12. STRICKLAND, J. H. *The Darrieus turbine, a performance prediction model using multiple streamtubes*. Energy report, Sandia Laboratories, 1975. 36 p.
13. IONESCU, R. D., VLASE, S., IVANOIU, M. Rotor design for vertical axis wind turbines, suitable for urban seashore environment or naval industry implementation (numerical methods and analytical calculus). Special issue of *JIDEG* Volume 9, International Conference ISTM 2014 papers. 4 p.
14. CLARKE, J., HANCOX, L., MACKENZIE, D., WHELAN, M. *Design of a vertical axis wind turbine*. Final report, 2014. 100 p. Disponibil: https://munvawtdesign.weebly.com/uploads/2/5/9/4/25940231/final_report.pdf [citat 28.03.20].
15. SCHEURICH, F., BROWN, R. E. *Vertical-axis wind turbines in oblique flow: sensitivity to rotor geometry*. University of Glasgow, Glasgow, UK. 8 p. Disponibil: <https://bit.ly/3bka8Mx> [citat 28.03.202].
16. BOSTAN, I., DULGHERU, V., CIUPERCA, R. Theoretical aerodynamic analyses of airfoils for use on small wind turbines and selection of optimal profiles for the wing of helical wind turbine functional model (Part I). *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Machine Building section LII (LVI), Fasc. 5D*, 2006. Pp. 1280 - 1284. 4p.

Lista publicațiilor autorului la tema tezei

17. BOSTAN, V., BOSTAN, I., **RABEI, I.**, GUTU, M., DULGHERU, V. Vertical Axis Wind Turbines. Optimal Positioning of the Blades Defined by Asymmetrical Airfoils. In: Visa I., Duta A. (eds) *Solar Energy Conversion in Communities*. Springer Proceedings in Energy (2020). Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-55757-7_15. 7p.
18. BOSTAN, V., BOSTAN, I., **RABEI, I.**, DULGHERU, V., CIUPERCA, R. Vertical Axis Wind Turbines: The Behavior of Lift and Drag Airfoils. In: Visa I., Duta A. (eds) *Solar Energy Conversion in Communities*. Springer Proceedings in Energy (2020). Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-030-55757-7_14. 12 p.
19. **RABEI, I.** Experimental observations on efficiency difference between helical and straight bladed vertical axis wind turbines. *Journal of Engineering Science*, XXVII (4), 37–44. (2020) doi.org/10.5281/zenodo.4288258. 8 p.
20. **RABEI, I.** The performance of different vertical axis wind turbines with J-shaped blades. *Journal of Engineering Science*, XXVIII (2), (2020) 24–36. doi.org/10.5281/zenodo.3784283. 13 p.
21. CIUPERCĂ R., **RABEI I.** *Pală pentru rotorul turbinei eoliene cu ax vertical*. Brevet de invenție nr. 1544Y, acordat la 29.04.2021. Int.Cl. F03D 3/00 (2006.01); F03D 3/06 (2006.01);. Nr depozit: s 2019 0098, Data depozit: 2019.09.16.
22. **RABEI, I.**, GUȚU M. Analysis of the influence of the aspect ratio on the vertical axis wind rotor performance. *IOP Conference Series: Materials Science and*

- Engineering*, Volume 564, Innovative Manufacturing Engineering and Energy (IManEE 2019). doi: 10.1088/1757-899X/564/1/012076. 6 p.
23. **RABEI, I.** Vertical Axis Wind Turbines: Open Airfoils and Plastic Blades. *2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, 2021, pp. 051-056, doi: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600333, ISBN: 978-1-6654-0078-7, 550 p.
 24. DULGHERU, V., BODNARIUC, I., GUȚU, M., **RABEI, I.**, CIOBANU, O., ODAINĂI, V. Sisteme de conversie a energiilor regenerabile: fundamente teoretice și aspecte practice. UTM, Chișinău 2021, 224 p., ISBN 978-9975-87-881-4.
 25. BOSTAN, V., GUȚU, M., **RABEI, I.** Development and validation of a CFD model used for vertical axis wind turbines simulations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (2018), 444, 022002. DOI:10.1088/1757-899x/444/2/022002. 6 p.
 26. BOSTAN, V., GUȚU, M., **RABEI, I.** Numerical simulation of transient aerodynamic processes in the vertical axis wind turbine rotor. *Journal of Engineering Sciences and Innovation*, Volume 4, Issue 2/2019, pp. 145 – 154, ISSN-L2537 – 320X. 10 p. Disponibil https://jesi.astr.ro/wp-content/uploads/2019/06/3_Bostan-Viorel.pdf [citât 25.01.2021].
 27. BOSTAN, V., DULGHERU, V., **RABEI, I.** *Turbină eoliană cu ax verticală*. Brevet de invenție nr.1519Y, acordat la 2021.02.11, Int.Cl: F03D 3/02 (2006.01), Nr. depozit: s 2020 0021, Data depozit: 2020.03.06.
 28. DULGHERU V., **RABEI I.**, GUȚU M. *Turbină eoliană cu ax verticală*. Cerere de brevet de invenție, Nr. depozit s 2021 0047, Data depozit: 2021.06.08.

ADNOTARE

Ivan Rabei „Optimizarea constructiv-funcțională a rotoarelor elicoidale cu ax vertical în vederea eficientizării conversiei energiei eoliene”. Teză de doctor în științe ingineresti, Chișinău, 2022.

Structura tezei: lucrarea este formată din introducere, patru capitole, concluzii și recomandări, bibliografie din 152 de titluri și 15 anexe, 144 pagini de text de bază, 136 figuri și 17 tabele. În baza rezultatelor studiului au fost publicate în 8 articole științifice, dintre care 3 de unic autor, și 1 monografie. Au fost, de asemenea, obținute 2 brevete de invenție și depusă 1 cerere de brevet de invenție.

Cuvinte-cheie: turbină eoliană cu ax vertical, rotor eolian, pale elicoidale, pale drepte, profil aerodinamic, pale de tip-J, deschidere la bordul de fugă, raport de aspect, pale căuș, CFD, eficiență, economie circulară, pale din plastic, HDPE.

Scopul lucrării: Sporirea eficienței de conversie a rotoarelor elicoidale cu ax vertical prin optimizarea parametrilor geometrici.

Obiectivele cercetării: cercetarea profilurilor aerodinamice recomandate pentru palele turbinelor eoliene cu ax vertical; determinarea gradului de influență a unghiului elicoidal al palei asupra performanței aerodinamice a rotorului; cercetarea impactului palelor de tip J asupra eficienței de conversie a energiei eoliene; stabilirea raportului de aspect optim pentru rotorul eolian cu ax vertical; studiul CFD al efectelor aerodinamice dezvoltate la suprafața palelor; identificarea materialelor și soluțiilor de fabricație pentru palele rotorului eolian prin prisma principiilor economiei circulare; elaborarea algoritmului de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical.

Noutatea și originalitatea științifică rezidă în: argumentarea și confirmarea experimentală a potențialului palelor cu profiluri aerodinamice asimetrice, în particular, FX 63-137, precum și a palelor cu deschidere la bordul de fugă (tip J); identificarea interdependenței dintre unghiul elicoidal și profilul palei ales, care presupune că nu pentru toate profilurile forma elicoidală va contribui semnificativ la sporirea performanței rotorului eolian comparativ cu palele drepte; stabilirea raportului de aspect optim necesar la proiectarea rotorului eolian cu ax vertical; soluțiile tehnice brevetate; elaborarea algoritmului de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical.

Rezultatul obținut care contribuie la soluționarea unei probleme științifice importante constă în *fundamentarea științifică* a parametrilor constructivi ai rotoarelor eoliene cu ax vertical, *fapt ce a condus la elaborarea recomandărilor* aplicative pentru practicienii din domeniul proiectării și fabricării turbinelor eoliene de putere mică în vederea asigurării eficienței de conversie sporite a energiei eoliene.

Semnificația teoretică: elaborarea modelului CAD și analiza CAE a rotoarelor cu ax vertical; analiza CFD a profilurilor aerodinamice; elaborarea algoritmului de proiectare a rotoarelor eoliene cu ax vertical.

Valoarea aplicativă: lucrarea vine cu recomandări practice necesare la etapa de proiectare constructivă a rotoarelor eoliene cu ax vertical, cu referință la profilul palelor, raportul de aspect, soliditate, material și procedee de fabricare a palelor.

Implementarea rezultatelor științifice: Rezultatele cercetărilor au fost utilizate în procesul de studii la ciclul II (masterat) IS CER. A fost elaborat un manual destinat studenților și un stand pentru lucrări de laborator, care permite cercetarea influenței mai multor parametri constructivi ai rotorului eolian cu ax vertical asupra randamentului turbinei, utilizând tunelul de vânt din Laboratorul de Aerodinamică.

АННОТАЦИЯ

Иван Рабей „Конструктивно-функциональная оптимизация винтовых вертикальных роторов с целью повышения эффективности преобразования энергии ветра“. Диссертация на соискание учёной степени доктора (кандидата) технических наук, Кишинёв, 2022.

Содержание диссертации: работа состоит из введения, четырех глав, выводов и рекомендаций, библиографии из 152 источников, 15 приложений, 144 страниц основного текста, включая 136 рисунков и 17 таблиц. Результаты диссертации опубликованы в 8 научных статьях, 3 из которых без соавторов, защищены 2 патентами и подана 1 заявка на патент.

Ключевые слова: Ветроурубина с вертикальной осью вращения; вертикальный ротор; винтовые лопасти; прямые лопасти; аэродинамический профиль; лопасти типа J; открытие на задней кромке лопасти; соотношение высота/диаметр; лопасти в виде полуцилиндров; CFD, эффективность; экономика замкнутого цикла; пластиковые лопасти; ПЭВП.

Цели диссертации: повышение эффективности конверсии винтовых ветровых роторов с вертикальной осью вращения за счет оптимизации геометрических параметров.

Задачи исследования: исследование аэродинамических профилей, рекомендуемых для лопастей ветряных турбин с вертикальной осью вращения; определение степени влияния винтового угла лопасти на производительность ветряного ротора; исследование влияния лопастей типа J на эффективность конверсии ветровой энергии; определение оптимального соотношения высота/диаметр ротора с вертикальной осью; CFD-исследование аэродинамических эффектов, возникающих на поверхности лопастей; идентификация материалов и разработка способов производства лопастей ветряных турбин с учетом принципов экономики замкнутого цикла; разработка алгоритма проектирования ветряных турбин с вертикальной осью.

Научная новизна и оригинальность заключается в: экспериментальном подтверждении потенциала лопастей с асимметричным аэродинамическим профилем, в частности, FX 63-137, а также лопастей с открытием на задней кромке (типа J); определение взаимозависимости между винтовым углом и выбранным профилем лопасти, которая предполагает что не для всех профилей винтовая форма будет вносить значительный вклад на повышение производительности ветряного ротора по сравнению с прямыми лопастями; установление оптимального соотношения высота/диаметр, необходимо на стадии проектирования роторов с вертикальной осью вращения; патентованные технические решения; разработка алгоритма проектирования ветряных роторов с вертикальной осью вращения.

Решение важной научной проблемы заключается в научном обосновании конструктивных параметров турбин с вертикальной осью, что привело к разработке прикладных рекомендаций, необходимых на этапе проектирования и изготовления ветротурбин малой мощности, для обеспечения более высокой эффективности преобразования энергии ветра.

Теоретическая значимость: разработка компьютерной модели проектирования и компьютерного инженерного анализа ротора с вертикальной осью; CFD-анализ аэродинамических профилей; разработка алгоритма проектирования ветровых роторов.

Практическая ценность: в диссертационной работе даются рекомендации, необходимые на стадии проектирования ветряных роторов относительно аэродинамического профиля, соотношения высота/диаметр, солидности, материала и процесса изготовления лопастей.

Внедрение научных результатов: Результаты исследований были использованы в учебном процессе на втором цикле (мастерат). Разработан учебник и стенд для лабораторных работ, который позволяет студентам исследовать влияние ряда конструктивных параметров роторов на эффективность преобразования энергии ветра с использованием аэродинамического туннеля из лаборатории аэродинамики.

ANNOTATION

Ivan Rabei „Constructive and functional optimization of helical vertical axis wind rotors with the aim of increasing the wind energy conversion efficiency”.

PhD thesis, Chişinău, 2022.

Thesis content: The thesis consists of the introduction, four main chapters, conclusions and recommendations, 152 references, 15 appendixes, 144 text pages including 136 figures and 17 tables. The thesis results have been published in 1 monography, 8 scientific papers, of which 3 are sole authored. 2 patents were obtained and 1 patent application was filled.

Keywords: Vertical axis wind turbine; wind rotor, helical blades; straight blades; airfoil; J-type blades; opening at the blade's trailing edge; aspect ratio; drag type blades, CFD, efficiency; circular economy; plastic blades; HDPE.

Purpose of the paper: increasing the conversion efficiency of the helically bladed vertical axis wind turbines by optimizing the geometric parameters.

Research objectives: research of the recommended airfoils for vertical axis wind turbines; determining the influence of the blade's helical angle on the rotor's conversion efficiency; determining the influence of the opened blades (J-type) on the rotor conversion efficiency; determining the optimum rotor aspect ratio; CFD analysis of the airfoils; identifying the materials and elaboration of manufacturing technology for wind rotor blades taking into account the circular economy principles; elaboration of a design algorithm for the vertical axis wind turbines.

Scientific novelty and originality consist of: the experimental confirmation of the asymmetrical airfoils potential, particularly FX 63-137, as well as the potential of the opened blades (J type blades); identifying the interdependence between the helical angle and the chosen airfoil. Here it can be asserted that the helical angle can be an aerodynamically efficient configuration compared to straight blades but not for airfoils; establishing the optimal rotor aspect ratio; patented technical solutions; elaboration of an algorithm that facilitates the vertical axis wind turbines design.

The obtained result that contributes to solving an important scientific problem consists in the *scientific substantiation* of the vertical axis wind rotor parameters, *which led to the elaboration of recommendations* necessary at the designing and fabrication stage, *in order to ensure* higher energy conversion efficiency.

Theoretical implication: elaboration of the CAD model and CAE analysis of vertical axis rotors; CFD analysis of the airfoils; elaboration of an algorithm for vertical axis wind rotors design.

Practical value: the paper comes with recommendations necessary at the designing stage of the vertical axis wind rotors. The recommendations refer to the use of the asymmetrical airfoils, particularly FX 63-137 oriented with the concave side out; the use of the J type blades; in case of choosing helical blades, it is necessary to identify the proper airfoil which capitalizes on this specific blade shape. The HDPE plastic can be considered for manufacturing low power vertical axis wind turbine blades.

Application of the scientific results: The research results were used for teaching for the graduate program. A textbook and a laboratory stand for learning and research purposes was developed. This allows the investigation of the influence of several geometrical parameters of the vertical axis wind rotor on the conversion efficiency using the wind tunnel in the Aerodynamics Laboratory

RABEI IVAN

**OPTIMIZAREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A ROTOARELOR
ELICOIDALE CU AX VERTICAL ÎN VEDEREA EFICIENTIZĂRII
CONVERSIEI ENERGIEI EOLIENE**

242.01 – TEORIA MAȘINILOR, MECATRONICĂ

Rezumatul tezei de doctor în științe ingineresti

Aprobat spre tipar: *19 aprilie 2022*
Hârtie ofset. Tipar ofset.
Coli de tipar: 2.0

Formatul hârtiei 60x84 1/16
Tiraj 50 ex
Comanda nr. 34

Universitatea Tehnică a Moldovei, Stefan cel Mare, 168, MD2004 Chișinău,
Republica Moldova