

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ A MOLDOVEI**

Cu titlu de manuscris  
CZU: 620.9: (043.3)

**GUȚU MARIN**

**OPTIMIZAREA STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PALELOR  
AERODINAMICE PENTRU TURBINE EOLIENE**

**242.01 – TEORIA MAȘINILOR, MECATRONICĂ**

Autoreferatul tezei de doctor în științe tehnice

**CHIȘINĂU, 2017**

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

**Conducător științific:**

**BOSTAN Viorel**, prof. univ., dr. hab., specialitatea 242.01-Teoria Mașinilor, Mecatronică

**Consultant științific:**

**DULGHERU Valeriu**, prof. univ., dr. hab., specialitatea 242.01-Teoria Mașinilor, Mecatronică

**Referenți oficiali:**

**CHIRICĂ Ionel**, prof. univ., dr. ing., Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, România

**OPRUȚĂ Dan**, prof. univ., dr. ing., Universitatea Tehnică din Cluj Napoca, România

**Componența Consiliului Științific Specializat:**

**1. VIȘA Ion**, prof. univ., dr. ing., Univ. „Transilvania” din Brașov. – *președinte al CȘS*

**2. BODNARIUC Ion**, conf. univ., dr., U.T.M. – *secretar științific al CȘS*

**3. HĂBĂȘESCU Ion**, prof. univ., dr. hab., m. c. A.Ș.M. – *membru al CȘS*

**4. TOPALĂ Pavel**, prof. univ., dr. hab., U.S.A.R.B. – *membru al CȘS*

**5. BĂRSĂNESCU Paul**, prof. univ., dr. ing., Univ. Tehnică „Gh. Asachi” din Iași – *membru al CȘS*

**6. CIUPERCĂ Rodion**, conf. univ., dr., U.T.M. – *membru al CȘS*

Susținerea va avea loc la **07.04.2017, orele 14<sup>00</sup>** în ședința Consiliului Științific Specializat **D 31. 242.01-11 „Teoria Mașinilor, Mecatronică”** din cadrul Universității Tehnice a Moldovei, MD 2045, Republica Moldova, Chișinău, str. Studenților 9/8, blocul 6, aud. 6-415.

Teza de doctor, lucrările științifice, în baza cărora se susține teza, și autoreferatul pot fi consultate la Biblioteca Științifică a Universității Tehnice a Moldovei, precum și pe site-ul CNAA ([www.cnaa.md](http://www.cnaa.md)).

**Autoreferatul a fost expediat la 02 martie 2017**

Secretar științific al  
Consiliului Științific Specializat,  
conf. univ., dr.

**BODNARIUC Ion**

Conducător științific:  
prof. univ., dr. hab.

**BOSTAN Viorel**

Consultant științific:  
prof. univ., dr. hab.

**DULGHERU Valeriu**

Autor:

**GUȚU Marin**

## REPERE CONCEPTUALE ALE CERCETĂRII

**Actualitatea și gradul de studiere a temei investigate.** Valorificarea Surselor Regenerabile de Energie (SRE) reprezintă o prioritate de nivel mondial, condiționată și argumentată de securitatea energetică, de schimbările climatice și protecția mediului ambiant, de dezvoltarea industrială și economică.

Liderul absolut în domeniul valorificării SRE, la nivel mondial, este Uniunea Europeană (UE), care promovează o politică stabilă de susținere și utilizare a SRE. Conform directivelor UE, angajamentul Comunității Europene față de dezvoltarea la scară comunitară a energiei din surse regenerabile constă într-o pondere de 20% din întregul consum de energie la nivel comunitar până în anul 2020. Fiecare stat-membru își asumă obligația ca ponderea SRE să întrecă obiectivele naționale asumate.

Din anul 2010 Republica Moldova a aderat la Comunitatea Energetică care a fost lansată de Uniunea Europeană cu scopul de a stabili o piață energetică unică la nivel regional. Toate țările membre și-au asumat responsabilitatea de a implementa Pachetul III energetic ce presupune o liberalizare a pieței de energie electrică și a gazelor naturale. Între timp, Republica Moldova a semnat în 2014 și Acordul de Asociere (AA) cu Uniunea Europeană. Astfel, guvernul Republicii Moldova și-a asumat unele obligațiuni privind stabilirea unei piețe comune cu UE, totodată punând fundamentul unei restructurări a sectorului energetic. Conform prevederilor AA, Republica Moldova trebuie să întocmească un cadru de implementare și instituțional, ajustat la acquis comunitar. Ceea ce ține de utilizarea resurselor regenerabile, conform planului de acțiuni, a fost stabilit obiectivul de 20% de energie regenerabilă din consumul total de energie. Totodată, este prevăzută diversificarea surselor energetice, liberalizarea pieței energetice și funcționarea într-un mod concurențial ceea ce face acest domeniu mai atractiv pentru investitorii străini.

Tendința dezvoltării puterii electrice produse din SRE conform Planului Național de Acțiuni privind Energia Regenerabilă (PNAER) presupune că circa 90%, sau 360 MW, vor fi de natură eoliană, iar 40 MW vor fi produși din energie hidroelectrică, fotovoltaică și din biomasă. Atingerea acestor scopuri este posibilă, deoarece în Republica Moldova există potențial eolian, solar, hidroelectric și biomasă. Conform clasificării densității energiei eoliene pentru anumite înălțimi făcute de Asociația Americană a Energiei Eoliene (AWEA) R. Moldova se situează în Clasa a 4-a. Această clasă indică că: pentru înălțimea de 10 m densitatea energiei eoliene este de 200 – 250 W/m<sup>2</sup> (5,6 – 6 m/s viteza vântului), iar pentru înălțimea de 50 m densitatea energiei eoliene este de 400 – 500 W/m<sup>2</sup> (7 – 7,5 m/s viteza vântului).

Valorificarea potențialului eolian al Republicii Moldova poate fi realizată eficient prin instalarea turbinelor eoliene de mică putere în zonele izolate în câmp deschis pentru necesitățile

gospodăriilor agricole. Totodată este fezabilă și construirea parcurilor eoliene de putere mare care să furnizeze energie electrică în rețeaua de distribuție. Aceste inițiative se încadrează pe deplin în deciziile UE și ale Guvernului Republicii Moldova privind alimentarea parțială a consumatorilor dispersați (în special din zonele rurale) cu energie electrică, termică (pentru încălzirea spațiilor locative în perioada rece a anului), mecanică provenite din SRE fapt ce va asigura reducerea parțială a importului combustibililor fosili utilizați pentru producerea energiei electrice și, deci, a emisiei gazelor poluante.

**Scopul lucrării:** Argumentarea teoretică și experimentală a structurii de rezistență a palei aerodinamice sub aspectul sporirii eficienței de conversie a energiei pentru turbine eoliene de mică putere ( $P < 20$  kW).

**Obiectivele de bază ale lucrării.** Pentru realizarea scopului formulat este necesară soluționarea următoarelor probleme:

- Analiza construcției rotoarelor turbinelor eoliene, a materialelor și a tehnologiei de fabricare a palelor;
- Studiarea metodelor analitice și numerice de calcul a rezistenței plăcilor din materiale compozite stratificate;
- Fabricarea, testarea și determinarea proprietăților mecanice la tracțiune și forfecare a materialului compozit pentru construcția palei;
- Corelarea rezultatelor testelor cu rezultatele analizei cu elemente finite a epruvetelor din materiale compozite;
- Modelarea tridimensională a palei cu geometrie aerodinamică optimă prin utilizarea profilelor aerodinamice existente;
- Efectuarea simulărilor CFD pentru diferite viteze ale vântului, determinarea factorului de performanță a rotorului elaborat și a forțelor aerodinamice care acționează asupra palei;
- Elaborarea modelului structural al palei și modelarea ei din material compozit;
- Modelarea interacțiunii fluidului cu structura palei, verificarea rezistenței palei în statică și optimizarea stratificatului de material compozit;
- Simularea comportamentului dinamic al palei și verificarea formelor oscilațiilor armonice și a frecvențelor proprii;
- Formularea concluziilor și recomandărilor.

**Noutatea și originalitatea științifică a rezultatelor obținute.** Elaborarea structurii de rezistență a palei din materiale compozite pentru turbine eoliene de mică putere și argumentarea ei sub aspectul simplității constructive și al masei reduse obținute în rezultatul optimizării arhitecturii materialului compozit stratificat. Soluțiile tehnice elaborate sunt protejate cu 2 brevete

de invenție. Noutatea și originalitatea elaborărilor expuse în teză au fost apreciate de către Jurii Internaționale în cadrul a 8 Saloane Expoziționale Internaționale „*Inovații, Cercetare și Transfer Tehnologic*”.cu 10 medalii de aur și 3 de argint.

**Valoarea practică a lucrării.** În baza testelor efectuate au fost determinate principalele proprietățile de rezistență ale materialelor compozite și creată o bază de date. Totodată, au fost formulate recomandări privind fabricarea, pregătirea pentru teste și testarea epruvetelor din material compozit stratificat.

Rezultatele testelor au fost utilizate la modelarea structurii de rezistență a palei și simularea comportamentului ei sub acțiunea sarcinilor de lucru prin metoda de analiză numerică cu elemente finite. Astfel a fost elaborată și cercetată prin metode numerice structura de rezistență a palei pentru turbine eoliene de putere mică, care a oferit un rezultat foarte bun în timp scurt și la costuri mult mai mici decât prin cercetarea experimentală.

**Rezultatele științifice principale înaintate spre susținere.** A fost elaborată și aprobată metodologia simulărilor CFD a proceselor de curgere a fluidului prin rotorul aerodinamic și a interacțiunii fluidului cu structura palei, în baza căreia: a fost formată baza de date pentru proiectarea rotoarelor aerodinamice pentru turbine eoliene; au fost identificate soluții tehnice privind sporirea rezistenței mecanice și reducerea masei totale a palei prin optimizarea stratificatului de material compozit.

În baza testelor efectuate pe epruvete au fost determinate proprietățile de rezistență ale materialelor compozite stratificate din fibre de sticlă și creată o bază de date.

A fost validată metoda de analiză numerică cu elemente finite a materialelor compozite stratificate care este foarte necesară pentru dezvoltarea de noi concepte în cadrul Centrului „Elaborarea Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile” (CESCER) al departamentului „Bazele Proiectării Mașinilor”.

Au fost formulate recomandări privind tehnologia de fabricare a palelor aerodinamice din materiale compozite pentru turbine eoliene de putere mică.

**Obținerea rezultatelor lucrării.** Lucrarea a fost efectuată în cadrul direcției științifice departamentale „Elaborarea Sistemelor de Conversie a Energiilor Regenerabile” în corespundere cu planurile de cercetare a temelor de contract:

- Program de Stat:
  - „Cercetarea proceselor aero-hidrocinamice în turbinele eoliene și hidraulice și elaborarea palelor cu eficiența sporită a conversiei energiei” (Contract nr. 20/P din 02 ianuarie 2012).
- Program proiecte Tineri Cercetători:
  - „Elaborarea tehnologiei de fabricare din materiale compozite a palelor cu profil aero/hidrocinamic” (Contract nr. 01/ind din 20 decembrie 2012-2013).

- Program Internațional de Cercetare AUF – Ministerul Educației al Republicii Moldova:
- „Consolidation de la capacité de recherche du Laboratoire de l’Aérodynamique dans le cadre du Département "Bases de Projection des Machines" ” pour l'année 2017.

**Aprobarea lucrării.** Rezultatele principale, expuse în teză, au fost prezentate și puse în discuție la seminarele științifice ale departamentului „Bazele Proiectării Mașinilor” ale Facultății „Inginerie Mecanică, Industrială și Transporturi” a Universității Tehnice a Moldovei; la conferințe științifice și Expoziții Naționale și Internaționale, după cum urmează: Environmental Engineering and Management Journal, *The 3rd Conference on Sustainable Energy (CSE)*, Universitatea Transilvania din Brașov, România, 10-12 Noiembrie 2011; Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference – *ModTech 2012*, Sinaia, Romania; The 3rd International Conference on *Diagnosis and Prediction in Mechanical Engineering Systems (DIPRE 12)*, 31 may – 1 june, 2012, „DUNAREA DE JOS” University of Galati, Romania; *Innovative Manufacturing Engineering Conference*, May 29-30, 2014, „Periodical Mechanics and Materials”, Chișinău, Republic of Moldova; Conferința Internațională *Energetica Moldovei-2012*, 4-6 Octombrie, Chișinău; pe paginile revistelor „Meridian Ingineresc”, Chișinău: UTM nr. 3, 2010, nr. 4, 2012 și ale Revistei de Proprietate Intelectuală *INTELLECTUS* 1/2012.

Elaborări create în baza brevetelor de invenție au fost demonstrate la Expozițiile și Saloanele Internaționale de Inovații, Cercetare și Transfer Tehnologic: *EUROINVENT* 2010 – 2012, 2014, 2015 Iași, România; *INVENTICA* 2012, 2013, Iași, România; *PROINVENT* 2011 – 2016 Cluj Napoca, România; *ARCHIMEDES* 2010, 2016, Moscova, Rusia; *NEW TIME* 2012, 2013, Sevastopol, Ucraina; *IWIS* Varșovia, 2012; The 2012 International Innovation and Invention Conference, Taipei University of Technology, China; *INFOINVENT* 2011, 2013, Republica Moldova; Moldova Eco-Energetică, ediția 2013, 2016 etc.

Pentru realizări în domeniul cercetării autorul a fost apreciat cu:

- Premiul Municipal pentru Tineret în Domeniul Științei și Tehnicii, EDIȚIA 2011, concurs organizat de Direcția Generală Educație, Tineret și Sport a Primăriei mun. Chișinău;
- 10 medalii de aur, 3 medalii de argint și 3 premii speciale, acordate de Juriul Internațional al Saloanelor de Invenții Transfer Tehnologic.

**Publicații pe tema tezei.** Conținutul principal al tezei este reflectat în 13 lucrări științifice, 8 dintre care sunt de singur autor. Prioritatea elaborărilor este protejată cu 3 brevete de invenție.

**Structura și volumul tezei de doctorat.** Lucrarea constă din introducere, patru capitole, concluzii generale, recomandări și conține 140 pagini, 20 tabele, 99 figuri, 4 anexe și 121 surse bibliografice utilizate.

**Cuvinte-cheie:** pală aerodinamică; conversia energiei eoliene; structură de rezistență; materiale compozite; testare epruvete; simulare numerică CFD; simulare numerică FSI.

## CONȚINUTUL LUCRĂRII

*În introducere* este argumentată și prezentată actualitatea problemei de valorificare a Surselor Regenerabile de Energie prin elaborarea și cercetarea palelor aerodinamice cu eficiență sporită de conversie a energiei eoliene.

*În primul capitol* este efectuată analiza și descrierea evoluției rotoarelor turbinelor eoliene cu ax orizontal. De asemenea, au fost analizate conceptele și particularitățile constructive ale turbinelor eoliene de mică putere produse de diferite companii. A fost efectuat studiul materialelor și tehnologiilor de fabricare a palelor. Totodată, a fost analizată oportunitatea valorificării energiei eoliene în Republica Moldova și prezentate tendințele dezvoltării energeticii eoliene la nivel mondial [1]. În baza analizei efectuate au fost formulate scopul și obiectivele lucrării.



*În capitolul doi*, „Argumentarea metodelor analitice și numerice de calcul a rezistenței plăcilor din materiale compozite stratificate” este efectuată analiza macromecanicii materialului compozit la nivelul unui strat individual și al stratificatului de material în ansamblu.

În baza acestei analize s-a stabilit că rigiditatea stratificatului este o funcție de geometrie, de proprietățile materialului și de modul de aranjare a laminelor în stratificat. S-a stabilit că criteriile de rezistență principale necesare calculului de rezistență al plăcilor compozite stratificate prin metode analitice și numerice sunt empirice și sunt asemănătoare cu cele utilizate pentru calculul materialelor metalice. Totodată, s-a stabilit că criteriul de rezistență Puck este relativ mai simplu în aplicare și oferă o corelare bună cu experimentele. A fost identificată și argumentată metoda de analiză cu elemente finite a solicitărilor modelelor din materiale compozite.

*În capitolul trei* intitulat „Elaborarea structurii, fabricarea și testarea materialului compozit pentru construcția palei” au fost determinate caracteristicile elastice și mecanice principale ale materialelor compozite stratificate, care sunt utilizate în construcția palei. În acest scop au fost fabricate epruvete din material compozit (rășină poliesterică armată cu fibre de sticlă) care au fost apoi testate la întindere și forfecare. Au fost determinați modulii de elasticitate longitudinal, transversal și la forfecare și coeficienții lui Poisson folosind metoda tensometriei electrice rezistive. Totodată, în baza simulării numerice a testelor reale a fost validată metoda de analiză cu elemente finite a stratificatelor din materiale compozite, fiind utilizate constantele elastice obținute în rezultatul testelor.

**Fabricarea epruvetelor** a fost realizată în laboratorul „Tehnologii materiale compozite” din cadrul (CESCER) al departamentului „Bazele Proiectării Mașinilor”. Materialele utilizate sunt rășina poliesterică armată cu fibre de sticlă. Caracteristicile țesăturilor pentru epruvete este prezentată în tabelul 1.

Tabelul 1. Caracteristicile țesăturilor pentru epruvete.

Tip țesatura	Număr de fibre în mănunchi		Grosime țesătură, mm	Detalii
	Urzeală	Bătătură		
E glass woven roving (WR) 300 g/m <sup>2</sup> (țesătură bidirecțională)	Urzeală	600	0,25	
	Bătătură	600		
E glass unidirectional UD 600 g/m <sup>2</sup>	Urzeală	2400	0,48	
	Bătătură	300		

Stratificatele obținute prin suprapunerea țesăturilor sunt descrise prin tipul țesăturii, numărul de straturi și prin unghiul de orientare a fibrelor. Acești parametri alcătuiesc notarea stratificatului, tabelul 2.

Tabelul 2. Caracteristicile stratificatelelor pentru epruvete

Nr. set	Nr. de epruvete	Notare	Tipul de încercări	Grosime placă, mm
1	5	[0 <sub>2</sub> /CSM/0 <sub>2</sub> ]	tracțiune x	2,9
	5		tracțiune y	2,9
2	5	[WR 0-90 <sub>13</sub> /CSM/ WR 0-90 <sub>13</sub> ]	tracțiune x	7,2
	5		forfecare	7,2

Placa din țesătură bidirecțională a fost executată cu grosime sporită pentru a obține un stratificat cu parametri asemănători materialului care va fi utilizat în construcția palelor. Timpul necesar procesului de infuzie a rășinii în stratificat (20 – 40 min) a fost determinat de permeabilitatea țesăturii care depinde de diametrul fibrelor, orientarea lor față de direcția de curgere a rășinii, viscozitatea rășinii, densitatea țesăturii etc. Pentru a facilita pătrunderea uniformă a rășinii în mijlocul stratificatelelor a fost introdus un strat de material din fibre tocate aglomerate CSM (*chopped strand mat*) de grosime 0,9 mm.

Conținutul de fibre după masă s-a obținut de aproximativ 66 % pentru stratificatul din setul 1 și de 43 % pentru stratificatul din setul 2. Epruvetele au fost tăiate cu ajutorul unui dispozitiv de debitat cu disc, apoi finisate, ținându-se cont de standardul ASTM D3039, figura 1. Lățimea epruvetelor cu armare longitudinală (0°) este uzual de 12,7 mm, iar a celor cu armare transversală (90°) de 25,4



Fig. 1. Epruvete finisate.



mm. Pentru a avea spațiu suficient pentru lipirea traductorilor pe epruvetele cu armare longitudinală acestea au fost tăiate cu lățimea de peste 20 mm.

**Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice ale materialului compozit** obținut din diferite straturi de țesături cu fibre cu orientare bine stabilită s-a făcut prin încercări la mașina de testat. Cercetările experimentale au fost realizate în cadrul Laboratorului de Testări Mecanice și Tehnologice din cadrul Facultății de Mecanică a Universității Tehnice „Gheorghe Asachi” din Iași pe mașina universală de încercări controlată de computer „WDW-50” (figura 2). Mașina dispune de servocontrol digital și celulă de forță de 50 kN.

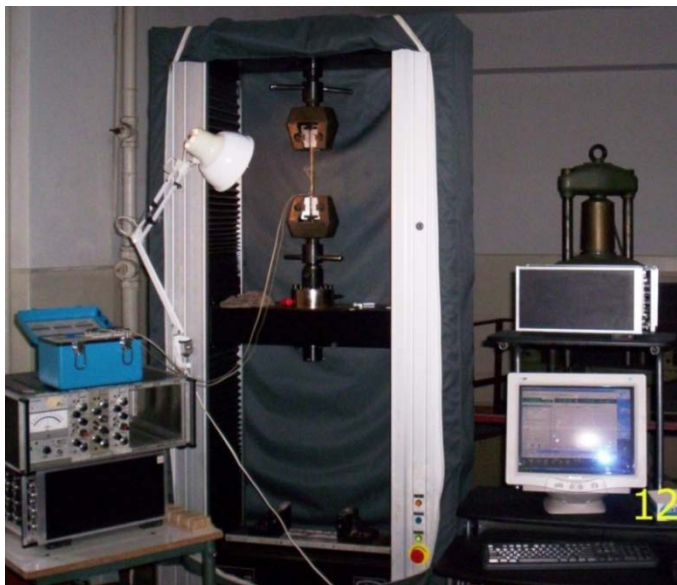


Fig. 2. Mașina universală de încercări WDW-50.

Pentru a înregistra alungirile specifice pe centrul epruvetelor au fost lipiți traductori speciali sub formă de rozetă tip T cu lungimea grilei de 6 mm (tabelul 3). Din motive economice au fost utilizați și traductori unidirecționali de uz general cu lungimea grilei de 10 mm care trebuie lipiți așa cum este indicat în figura 3 în care se prezintă și dimensiunile epruvetei pentru încercări la tracțiune, având capetele întărite cu taloane lipite conform ASTM D3039.

Taloanele sunt necesare pentru a preveni ruperea epruvetei din mandrină și pot fi executate din material compozit sau aluminiu. Pentru o aderență mai bună a taloanelor pe suprafața lor au fost create rugozități. Grosimea epruvetelor este indicată în tabelul 2.

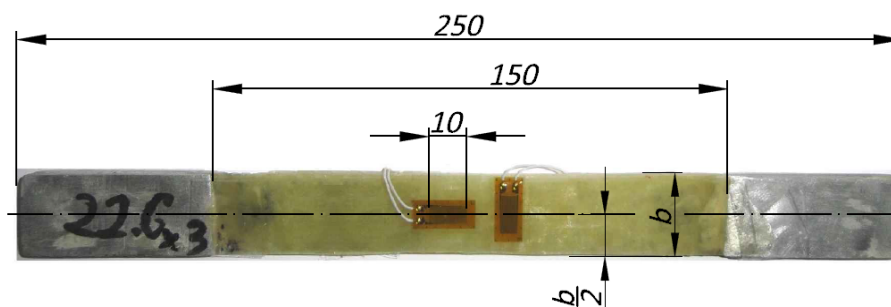
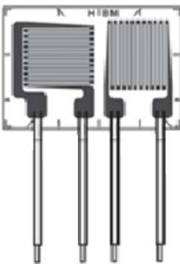

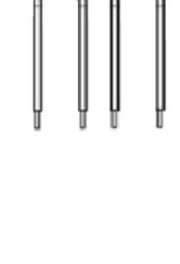
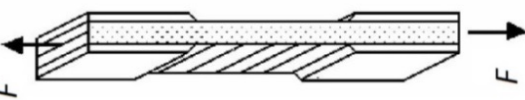
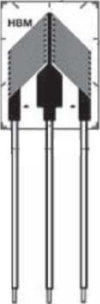
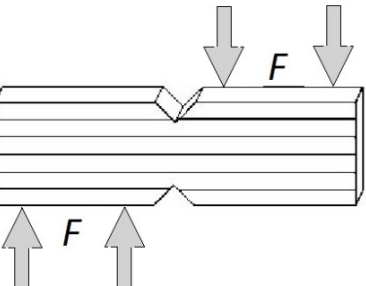


Fig. 3. Epruvetă pentru încercarea la tracțiune.

Epruvetele din fibre unidirecționale au fost încercate la tracțiune până la rupere cu viteza de deplasare a capului de prindere de 2 mm/min. Pe durata încercării s-a înregistrat continuu semnalul de ieșire al traductorilor cu ajutorul unui sistem de achiziție de date (punte tensometrică Vishay P3). Astfel s-au obținut alungirile specifice pe direcție longitudinală și transversală.

Tabelul 3. Geometria epruvetelor și traductorii utilizați

Caracteristici determinate	Notăție	Traductori necesari	Geometria epruvetei
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulul de elasticitate longitudinal</li> <li>▪ Coeficientul lui Poisson</li> <li>▪ Rezistența la rupere longitudinală</li> </ul>	$E_{11}$  $\nu_{12}$  $\sigma_r$		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modulul de elasticitate transversal</li> <li>▪ Coeficientul lui Poisson</li> <li>▪ Rezistența la rupere transversală</li> </ul>	$E_{12}$  $\nu_{21}$  $\sigma_r$		
Modulul de elasticitate la forfecare (metoda Iosipescu)	$G_{12}$		

Pentru caracteristicile mecanice și elastice ale materialului testat au fost determinate mediile aritmetice pentru cele 5 epruvete. Valorile minime sau maxime, care aveau o abatere prea mare față de media epruvetelor din aceeași placă, au fost eliminate [2].

În graficul din figura 4 este prezentată dependența dintre forță și cursa mandrinei pentru epruvetele din țesătură unidirecțională (UD) solícitate pe direcția fibrelor. Din cauza alunecării din mandrină a epruvetelor (UD1 și UD4) curbele acestora se întrerup la forțe de 23 și, respectiv, 21 kN, mai mici decât forțele de rupere. Pentru aceste epruvete n-au fost înregistrate tensiunile de rupere și deformațiile specifice maxime. Analiza rezultatelor testelor epruvetelor a arătat următoarele valori medii: tensiunea de rupere – 658 MPa; modulul de

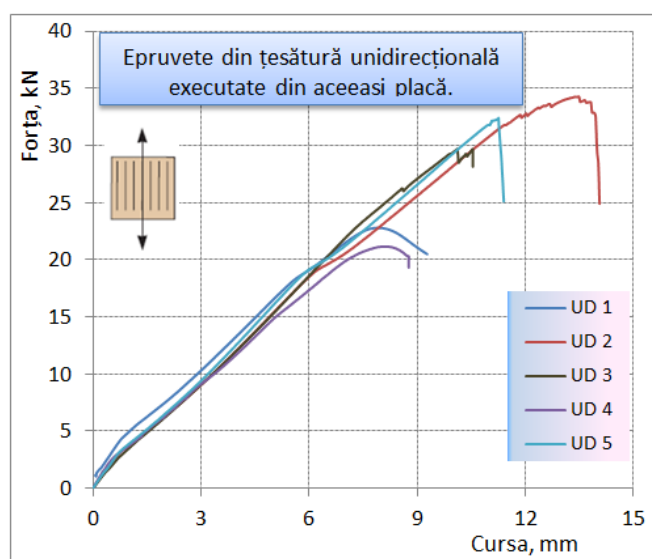


Fig. 4. Dependența dintre cursă și forță în cazul epruvetelor solícitate pe direcția fibrelor.

elasticitate – 36,78 GPa; modulul lui Poisson – 0,262. Analiza graficelor din figura 4 arată că valoarea maximă a forței de rupere de 34 kN este la epruveta (UD2).

În figura 5 este prezentată dependența dintre forță și cursa mandrinei pentru epruvetele din țesătură unidirecțională solícitate perpendicular pe direcția fibrelor. Viteza de deplasare a mandrinei a fost setată la 2 mm/min. În diagramă se observă că curbele epruvetelor (UDT1 și UDT4) au o abatere mai mare față de celelalte trei. Acest lucru este din cauza faptului că una din epruvete conține mai multe fibre pe direcția de solícitare, iar cealaltă conține mai puține fibre. Această distribuție neuniformă a fibrelor este din cauza pasului mare al bătăturii din țesătură în comparație cu lățimea epruvetei.

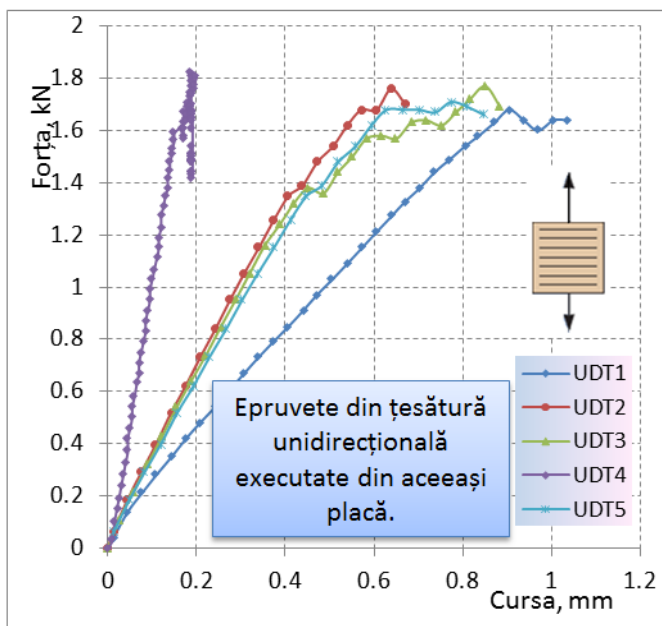


Fig. 5. Dependenta dintre cursă și forță în cazul epruvetelor solícitate perpendicular pe direcția fibrelor.

Măsurările cu traductori au fost făcute doar pentru trei epruvete. Analiza rezultatelor testelor epruvetelor a arătat următoarele valori medii: tensiunea de rupere – 14,5 MPa; modulul de elasticitate – 10,3 GPa; modulul lui Poisson – 0,092.

Analiza parametrilor obținuți arată că în cazul solícitărilor pe direcția fibrelor tensiunea de

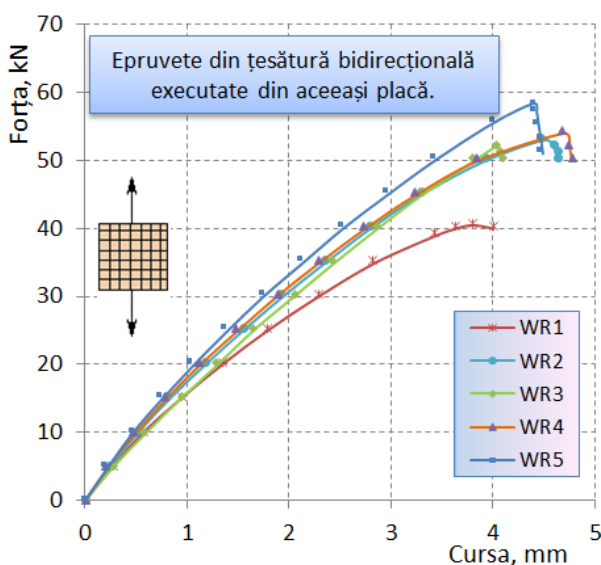


Fig. 6. Dependenta dintre cursă și forță în cazul epruvetelor formate din țesătură bidirecțională.

rupere este de aprox. 45 de ori mai mare, modulul de elasticitate - aprox. 4 ori, iar coeficientul Poisson – de aprox. 3 ori comparativ cu solícitățile pe direcția perpendiculară fibrelor. Analiza comparativă a graficelor din fig. 4 și 5 arată că forța maximă de rupere în cazul solícitării pe direcția fibrelor este de aprox. 20 de ori mai mare decât în cazul solícitării pe direcția perpendiculară fibrelor.

Epruvetele din setul al doilea (tabelele 1 și 2), care sunt formate din țesătură cu același număr de fibre pe direcțiile  $x$  și  $y$

(bidirecțională), au fost testate doar pe o singură direcție. Solicitarea epruvetelor a fost efectuată la viteza de deplasare a mandrinei de 1,5 mm/min. Diagrama dependenței dintre forță și deplasarea mandrinei este prezentată în figura 6. Analiza graficelor din figura 6 arată că datorită uniformității țesăturii bidirecționale tensiunile de rupere au valori apropiate.

Testările au confirmat, într-o anumită măsură, respectarea tehnologiei de fabricare și corectitudinea efectuării experimentului. Valorile caracteristicilor mecanice și elastice obținute se încadrează în limitele prescrise de compania producătoare de țesături din fibre de sticlă.

**Încercarea la forfecare a epruvetelor din țesătură bidirecțională.** Pentru determinarea modulului de elasticitate la forfecare a fost utilizată metoda *Iosipescu* care este cea mai răspândită în prezent, datorită preciziei, versatilității și simplității. Metoda utilizează epruvete plate crestate (cu secțiune predeterminată de rupere), supuse la încovoiere cu sarcini antisimetrice. Epruvetele tipice au la mijloc două crestături la 90°, fiecare având adâncimea de 26% din lățimea epruvetei. În secțiunea slăbită se realizează un moment încovoietor nul și o forță tăietoare care se reduce la forfecare pură. Dimensiunile epruvetei și ale crestăturilor sunt astfel alese, încât tensiunea tangențială să fie cât mai uniformă în secțiunea slăbită. Dispozitivul Iosipescu, folosit pentru testarea materialelor compozite, este prezentat în figura 7.

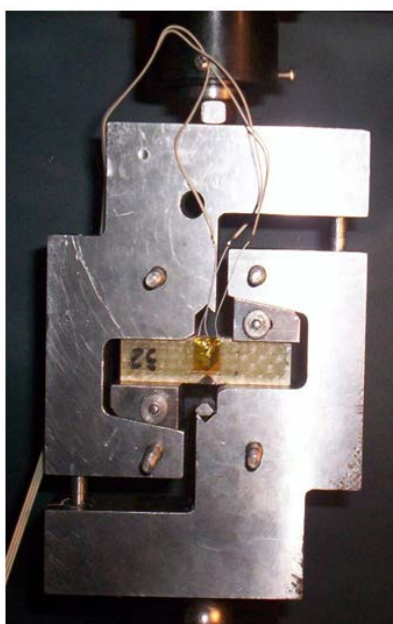


Fig. 7. Dispozitivul și epruveta Iosipescu montate pe mașina de încercări.

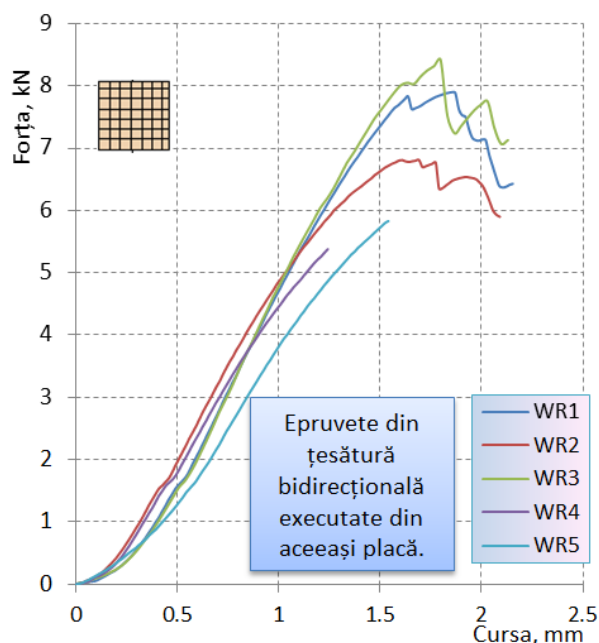


Fig. 8. Dependența dintre cursă și forță în cazul epruvetelor formate din țesătură bidirecțională.

În figura 8 este prezentată dependența dintre forță și cursa mandrinei care a fost setată la viteza de deplasare de 2 mm/min. Două epruvete, pe care au fost lipiți traductori, n-au fost solicitate până la cedare. În diagramă se observă că curbele lor se întrerup mai devreme. Pentru a determina rezistența la forfecare a stratificatului, trei epruvete au fost solicitate până la rupere care a avut loc la valoarea forței  $F = (6,8 - 8,5)$  kN.

### Corelarea rezultatelor testelor cu rezultatele analizei cu elemente finite a epruvetelor.

Simulările numerice ale testelor reale au fost efectuate în programul de analiză cu elemente finite ANSYS [3 – 7]. Această validare a programului este necesară pentru a avea încredere mai mare în rezultatele simulărilor ulterioare ale palei modelate din materialele compozite testate.

Toate constantele elastice determinate experimental au fost introduse în program ca date de intrare. Modelarea arhitecturii materialului compozit din epruvete a fost efectuată cu ajutorul programului special ANSYS Composite PrepPost (ACP).

Modelul discretizat cu elemente finite și modul de solicitare la tracțiune a epruvetei sunt prezentate în figura 9 *a*. Distribuția tensiunilor în epruvetă este prezentată în figura 9 *b*. Tensiunile echivalente Von Mises maxime apar în apropierea zonei de fixare a epruvetei în mandrină, unde există zonă de concentrator. În această zonă (zona de rupere), figura 9 *c*, tensiunile și deformațiile sunt cu 10% mai mari. Pentru majoritatea epruvetelor cedarea materialului are loc anume în acel loc. Rezultatele analizei cu elemente finite au fost introduse în diagramele construite în baza testelor reale, figura 10.

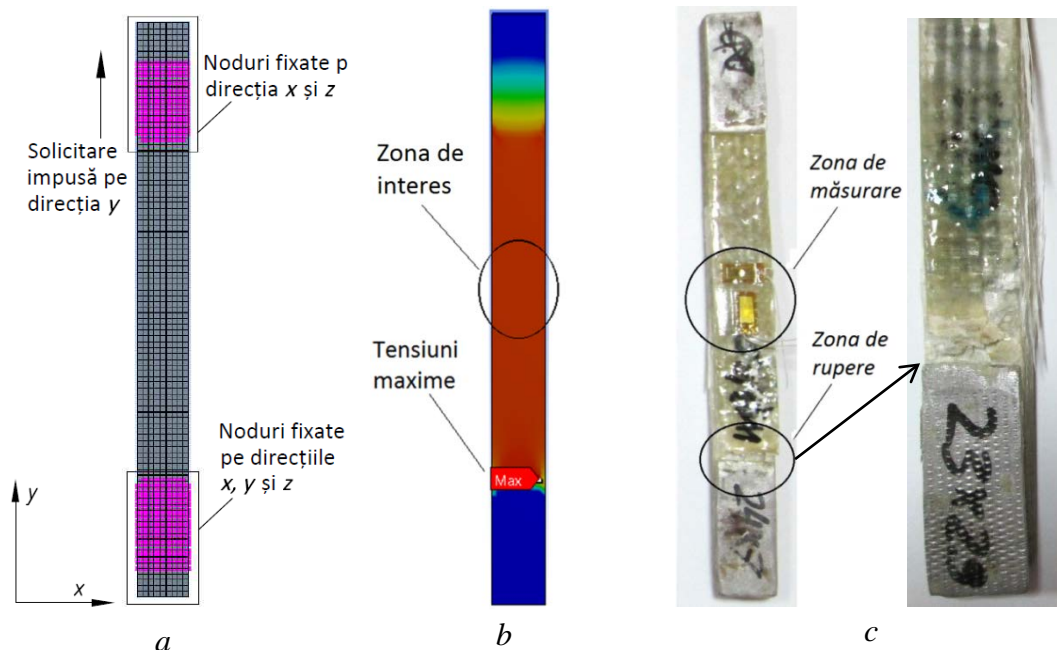


Fig. 9. Simularea solicitării la tracțiune a epruvetei: *a* – condițiile la limită ale modelului discretizat; *b* – distribuția tensiunilor; *c* – epruveta testată

Abaterile, care se observă în diagrama din figura 10 *a*, sunt legate de deosebirea dintre modul de fixare a epruvetei. În modelul experimental fixarea se face pe contur (în mandrină), iar în modelul numeric fixarea epruvetei este pe toată secțiunea.

Rezultatele analizei cu elemente finite a epruvetelor din țesătură bidirecțională sunt introduse în diagrama construită în baza testelor reale, figura 11. Din cauza faptului că în timpul experimentelor doi traductori s-au defectat și au înregistrat date eronate, în diagramă sunt afișate rezultatele doar pentru trei epruvete.

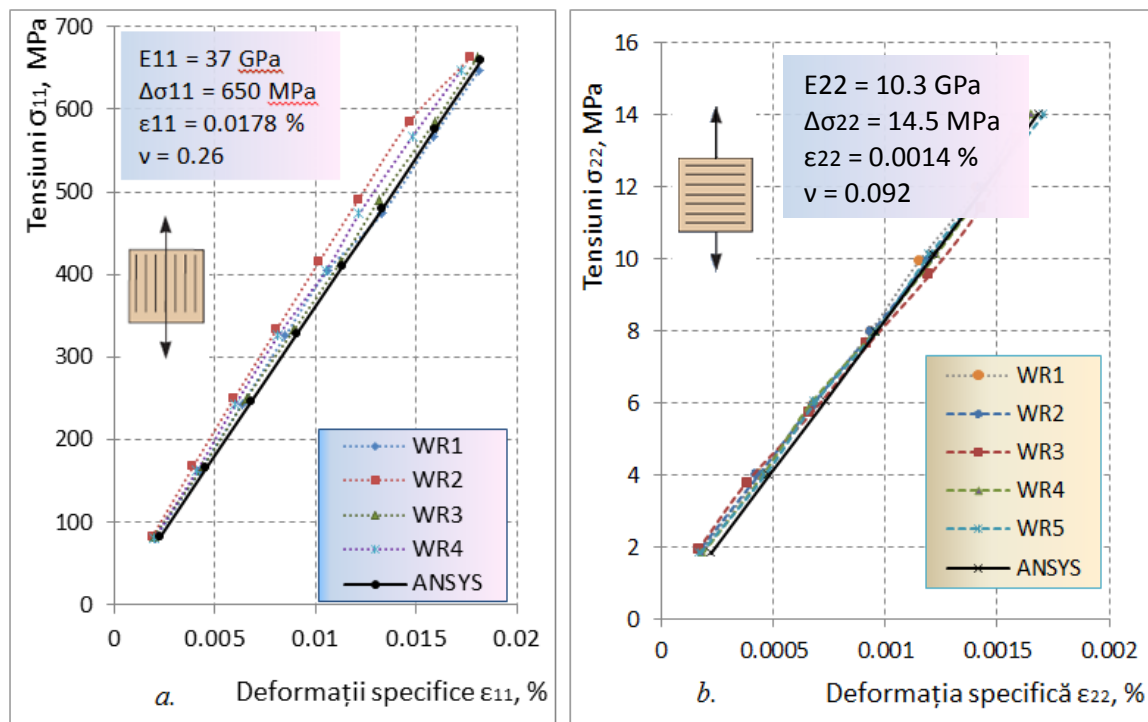


Fig. 10. Diagramele „tensiuni – deformații”:  
*a – solicitarea epruvetelor pe direcția fibrelor;*  
*b – solicitarea pe direcția perpendiculară fibrelor.*

Modelul discretizat în elemente finite și modul de solicitare la forfecare a epruvetei sunt prezentate în figura 12 *a*. Condițiile la limită ale modelului epruvetei au fost setate ținându-se cont și de recomandările din literatura de specialitate. Distribuția tensiunilor în epruvetă este prezentată în figura 12, *b*, fiind considerate tensiunile de forfecare și deformațiile de alunecare din cadrul zonei de măsurare a traductorului. Diagrama comparativă cu rezultatele suprapuse ale analizei cu elemente finite și cele ale testelor este ilustrată în figura 13. Dat fiind faptul că epruvetele solicitate la forfecare au un comportament neliniar după aproximativ 10 – 12 % din deformația specifică (alunecare) este firesc faptul ca curbele să nu coreleze pe tot domeniul de solicitare.

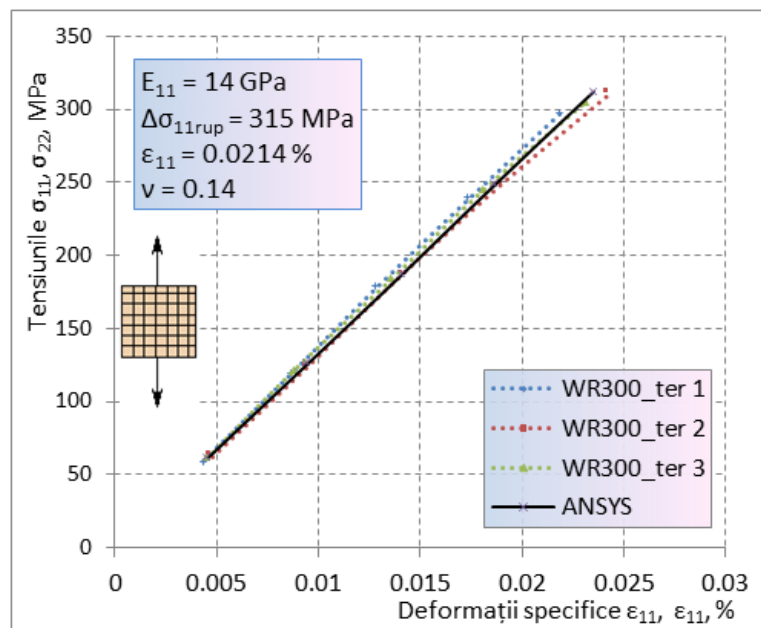


Fig. 11. Diagrama „tensiuni – deformații” pentru epruvetele formate din țesătură bidirecțională.

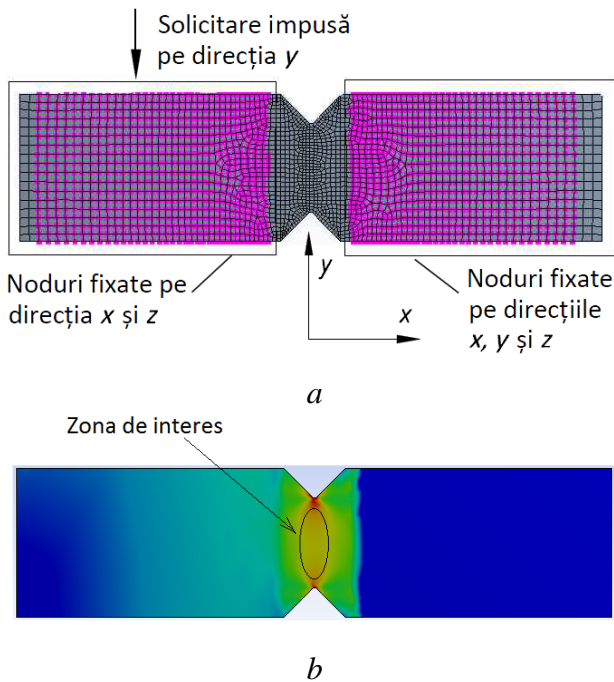


Fig. 12. Simularea solicitării la forfecare a epruvetei: *a* – condițiile la limită ale modelului discretizat; *b* – distribuția tensiunilor.

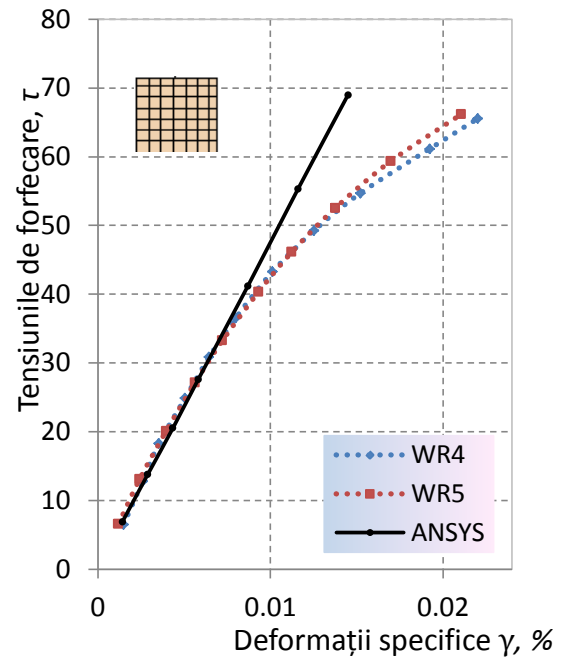


Fig. 13. Diagrama „tensiuni – deformații” obținută la solicitarea epruvetelor la forfecare.

**Capitolul patru** intitulat "Argumentarea structurii de rezistență a palei aerodinamice pentru turbina eoliană de 10 kW" este dedicat elaborării palei aerodinamice cu eficiență sporită pentru turbinele eoliene cu puterea de 10 kW elaborate la UTM [8, 9], și simulării comportamentului ei sub acțiunea sarcinilor de lucru în scopul optimizării structurii de rezistență [10].

Pala cu un design de succes trebuie să satisfacă o gamă largă de condiții, dintre care unele se află în conflict. Aceste condiții pot fi rezumate după cum urmează:

- maximizarea producției anuale de energie pentru viteza specificată a vântului;
- rezistența la oboseală și la sarcini extreme;
- limitarea încovoierii palei pentru evitarea coliziunii cu turnul;
- evitarea rezonanței;
- minimizarea masei și costului.

Procesul de proiectare a palei a fost împărțit în două etape: designul aerodinamic, în care condițiile *a* și *b* sunt îndeplinite, și designul structural. Designul aerodinamic presupune determinarea geometriei optime a suprafeței exterioare a palei sub aspectul eficienței de conversie a energiei vântului. Aici se determină geometria palei, definită de un profil aerodinamic și coardă, care sunt dimensionate și poziționate conform anumitor calcule. Designul structural include determinarea secțiunii transversale structurale sau a lonjeronului și alegerea materialului palei, care satisfac condițiile *c* – *e*. Etapele de elaborare a modelului palei sunt prezentate schematic în figura 14.

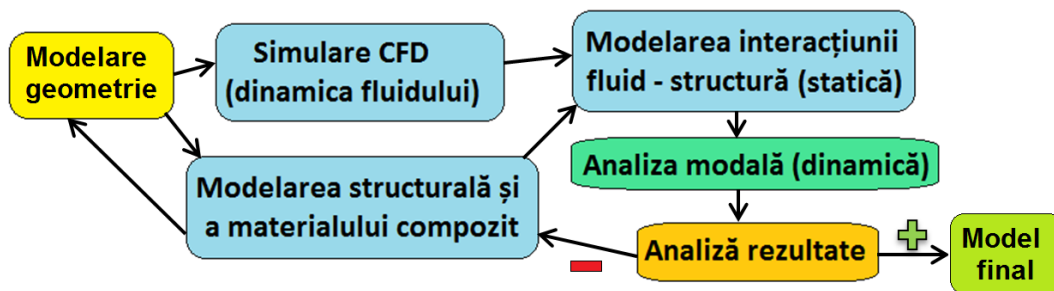


Fig. 14. Schema de elaborare a modelului palei

În baza acestor simulări a fost elaborată o arhitectură optimă a materialului compozit care să asigure rezistența palei conform anumitor criterii. Totodată, a fost efectuată analiza modală a palei pentru verificarea formelor oscilațiilor armonice și a frecvențelor proprii și construită diagrama Campbell pentru rotor.

**Modelarea numerică a interacțiunii forțelor generate de fluid asupra suprafeței palei cu design aerodinamic optimizat.** Pentru determinarea forțelor generate de fluid care acționează asupra palei în condiții extreme de funcționare se propune efectuarea simulărilor numerice din cadrul dinamicii fluidelor asistate de calculator (CFD). Simulările din cadrul CFD ale palei aerodinamice s-au efectuat, utilizând platforma Workbench care unifică produsele pachetului software ANSYS.

**Modelarea 3D a geometriei palei.** Pentru modelarea tridimensională a unei palei cu profil aerodinamic pentru turbine eoliene cu ax orizontal este necesară, mai întâi, determinarea anumitor parametri geometrici. În primul rând împărțim pala în 5 – 6 secțiuni echidistante (pentru o precizie mai mare pot fi utilizate și mai multe secțiuni). Fiecare secțiune a palei reprezintă un profil aerodinamic care are anumiți parametri geometrici cum ar fi tipul profilului, coarda profilului și unghiul de poziționare față de planul de rotație. Acești parametri sunt dictați de eficiența aerodinamică a rotorului eolian.

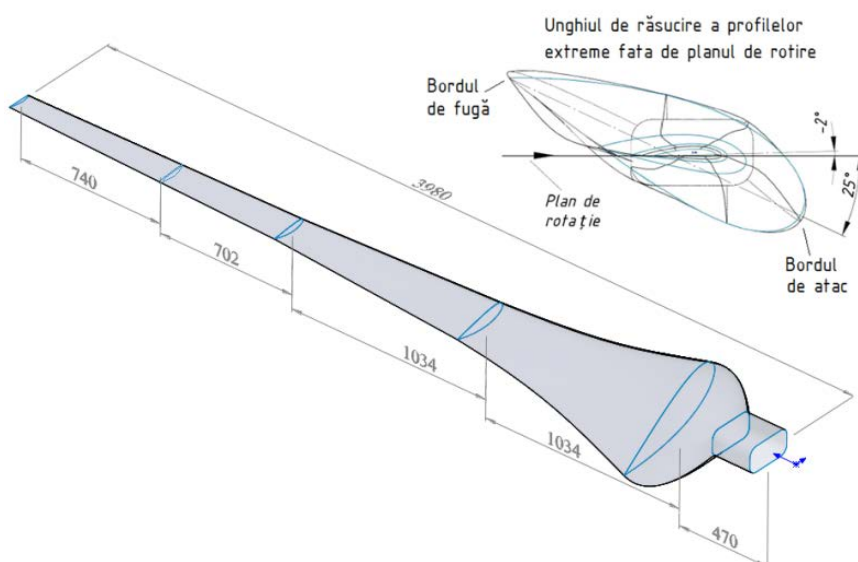


Fig. 15. Geometria optimizată a palei.

Profilele aerodinamice au fost reproduse cu ajutorul programului AutoCAD prin trasare directă peste imaginea scanată apoi salvate în formatul *.dwg* compatibil cu programul de proiectare asistată de calculator *SolidWorks*, în care s-a efectuat modelarea tridimensională propriu zisă, figura 15 [11-14].



**Modelarea domeniului fluid și generarea rețelei de calcul.** Geometria rotorului a fost realizată în programul de proiectare asistată de calculator *SolidWorks 2014* și exportată ulterior în programul *DesignModeler* din mediul *Workbench*.

Pentru a simplifica analiza CFD și reduce timpul de calcul a fost creat un domeniu care cuprinde 120° din rotor cu o singură pală asumându-se condiții de simetrie. Totodată, prezența turnului și a solului au fost neglijate. Dimensiunile domeniului computațional al fluidului au fost alese ținând cont de

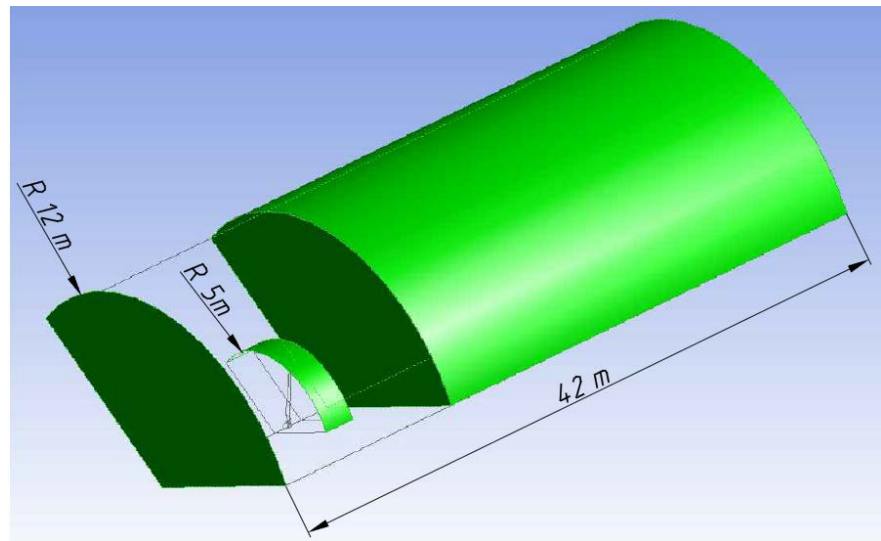


Fig. 16. Domeniul fluid de calcul.

bunele practici și recomandările din literatura de specialitate astfel încât să fie asigurată curgerea liberă fără influențarea frontierelor domeniului. Suprafața cavă a palei din cadrul subdomeniului *Rotor* a fost obținută prin comanda *Subtract*. Pentru a simula rotația palei domeniul fluid a fost divizat în două subdomenii: subdomeniul (static) *Stator* și subdomeniul (mobil) *Rotor*. Figura 16 prezintă domeniul fluid considerat.

Rețeaua de discretizare a fost generată în programul *ANSYS Meshing* integrat în mediul *Workbench* care oferă diverse strategii pentru generarea rețelei de elemente (volum) finite, figura 17. După importul modelului geometric au fost definite regiunile de intrare în domeniul de calcul (*Inlet*), ieșire (*Outlet*), laterale (*Walls*) și regiunile comune dintre suprafețele *Stator* și *Rotor* (*Fluid-Fluid*). Suprafața palei a fost discretizată cu elemente dreptunghiulare regulate prin intermediul metodei *Mapped Face Meshing*. Domeniul fluid a fost discretizat cu elemente de tip tetraedru

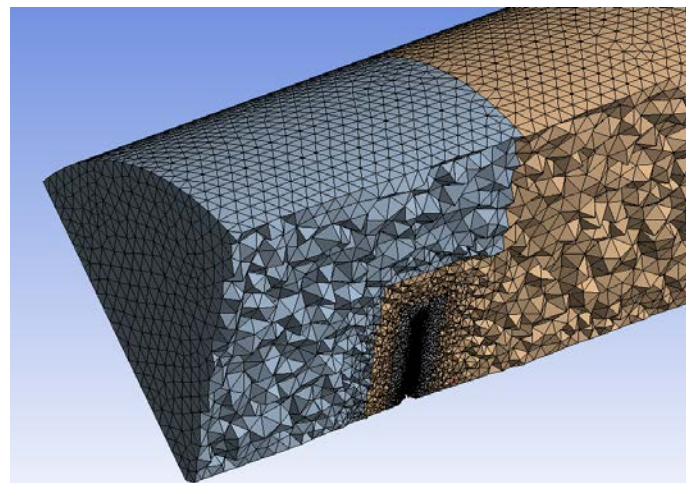


Fig. 17. Rețeaua de calcul pentru domeniul fluid

*Tetra Dominant Meshing*. Dimensiunile de baza ale rețelei sunt specificate prin intermediul dimensiunii minime caracteristice  $Min\ Size=4\text{ mm}$  și a dimensiunilor maxime caracteristice  $Max\ Face\ Size=500\text{ mm}$ ,  $Max\ Size=500\text{ mm}$  ale fețelor elementelor și ale volumelor adiacente.

**Etapa Setup.** Pentru verificarea eficienței de conversie și a solicitărilor rotorului turbinei cu pale cu geometria aerodinamică optimizată au fost simulate mai multe regimuri de funcționare. În tabelul 4 sunt indicați parametrii și condițiile de solicitare a rotorului.

Tabelul 4. Condițiile de solicitare a rotorului

Stare rotor	Oprit	În rotire				
Viteza vântului $v$ , m/s	8, 16	6	8	10	12	16
Numărul de turații $n$ , $\text{min}^{-1}$	-	92	122	153	183.3	244.5
Viteza specifică (rapiditatea) $\lambda$	-	6.4				

Conform rezultatelor din lucrarea [15], pentru estimarea cu o precizie bună a momentelor dezvoltate la axul rotorului au fost considerate 30 de iterații pentru simularea staționară, apoi rezultatele acesteia au fost transferate pentru inițializarea simulărilor rotorului în rotație la 80 de iterații.

**Etapa de soluționare și rezultatele CFD.** Soluționarea ecuațiilor discretizate s-a efectuat în paralel utilizând toate cele 8 nuclee logice disponibile. Convergența rezultatelor a fost atestată prin monitorizarea variabilelor de interes. În figura 18 sunt prezentate rezultatele monitorizării

forței axiale și a momentelor de torsiune dezvoltate la axul turbinei de o pală pentru cazurile când rotorul staționează și când se rotește cu viteza vântului de 8 m/s.

În figura 19 este reprezentat prin linii (generate pe suprafața

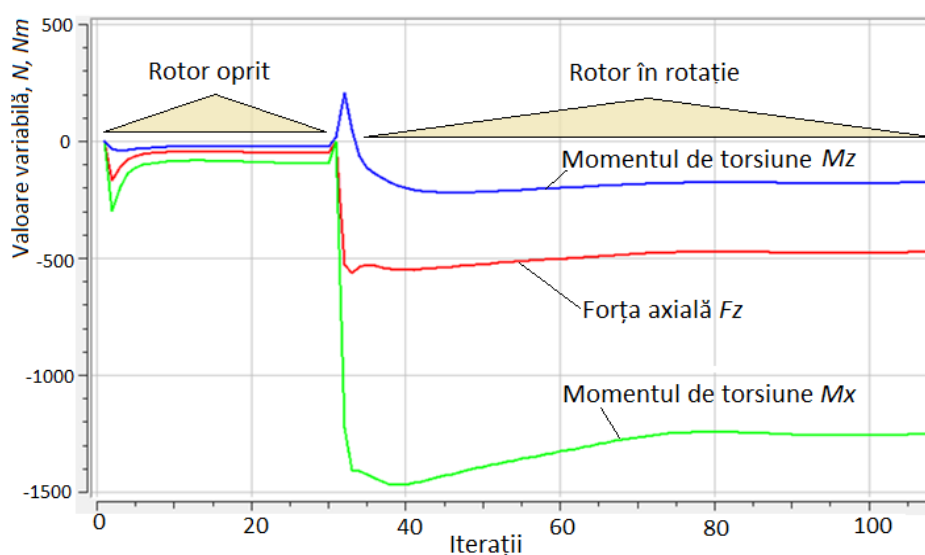


Fig. 18. Monitorizarea momentelor de torsiune dezvoltate la axul rotorului.

palelor) curentul de aer care străbate rotorul în stare de rotație. Pentru a face o analiză comparativă a capacității de conversie a turbinei cu rotor optimizat a fost calculată curba de putere (figura 20), fără a considera pierderile mecanice, și comparată cu rezultatele cercetărilor efectuate pentru această turbină în lucrarea [15]. Datorită geometriei palei, în care se respectă răsucirea profilului aerodinamic din fiecare secțiune transversală potrivită cu viteza fluxului de aer, s-a obținut o creștere a puterii cu  $\approx 10\%$ .

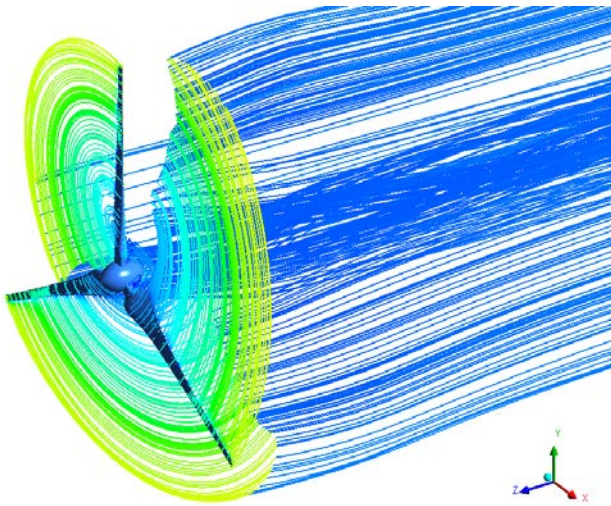


Fig. 19. Liniile de curent care străbat rotorul.

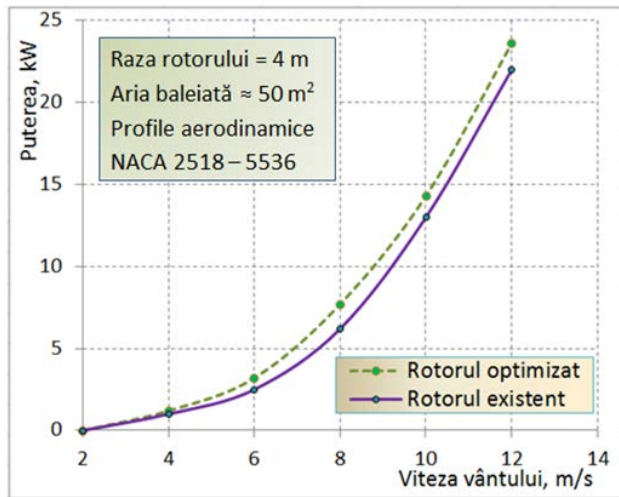


Fig. 20. Curba de putere a turbinei funcție de viteza vântului fără considerarea pierderilor.

**Elaborarea designului structural al palei.** Pentru dimensiunile palei modelate cea mai indicată metodă de rigidizare ar fi umplerea cavității palei cu spumă polimerică însă calculele preliminare au indicat că este necesar un lonjeron pentru a limita riscul coliziunii palei cu turnul. Cele mai utilizate elemente de rezistență a unei pale sunt lonjeroanele de tip profil I și cele de tip boxă și învelișul care formează bordul de atac și bordul de fugă. Aceste soluții constructive și-au demonstrat de-a lungul timpului avantajul privind rigidizarea palei și minimizarea masei. Pentru rigidizarea palei a fost acceptat lonjeronul de tip profil I, datorită simplității sale.

Pentru a facilita crearea structurii de rezistență a palei din materiale compozite a fost modelată pala cu aceiași parametri însă geometria ei a fost generată din suprafețe. În programul de modelare *SolidWorks* a fost utilizată funcția *Surface Loft*. Astfel s-a obținut o pală cavă definită de secțiunea profilului aerodinamic, figura 21. Din punct de vedere al rezistenței o astfel de pală, dacă va fi fabricată din materiale compozite, nu va suporta sarcini de forfecare și va avea elasticitate sporită. Rigidizarea ei poate fi asigurată prin includerea unui lonjeron orientat perpendicular pe coardă sau prin umplerea cavității palei cu spumă polimerică.

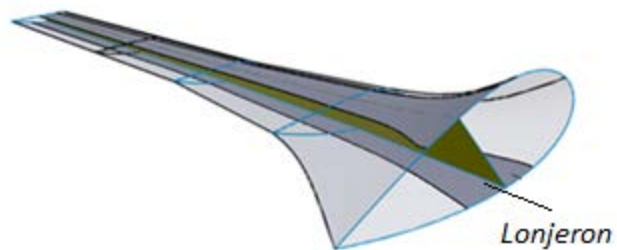


Fig. 21. Modelul structural al palei.

Din punct de vedere al rezistenței o astfel de pală, dacă va fi fabricată din materiale compozite, nu va suporta sarcini de forfecare și va avea elasticitate sporită. Rigidizarea ei poate fi asigurată prin includerea unui lonjeron orientat perpendicular pe coardă sau prin umplerea cavității palei cu spumă polimerică.

**Discretizarea geometriei palei și modelarea ei preliminară din material compozit.** În timpul funcționării rotorul turbinei eoliene este solicitat la viteze variabile ale vântului care provoacă forțe centrifugale și forțe de rezistență în pale care conduc la încovoierea vârfului palei. Prin urmare, pentru proiectarea și optimizarea palei cu o anumită geometrie aerodinamică se impun unele constrângeri:

- deplasare axială maximă a vârfului palei - 300 mm;
- masa totală a palei nu trebuie să depășească 30 kg (masa palei existente);
- tensiuni de întindere și de compresiune admisibile  $[\sigma] = 300$  MPa.

Pentru modelarea numerică a fost utilizată platforma ANSYS *Workbench*. Geometria palei modelată în programul SolidWorks și salvată în formatul *.iges*, a fost importată ulterior în programul *Design-Modeler* din mediul *Workbench*. În programul *Design-Modeler* a fost verificată calitatea modelului geometric și au fost corectate anumite erori care apar la importare.

Pala a fost modelată în întregime din materialele compozite testate. Constantele elastice ale materialului la nivelul țesăturilor, care nu au fost determinate experimental, au fost înlocuite cu caracteristicile materialelor similare, care sunt incluse în biblioteca platformei *Workbench*. Aranjamentul straturilor de țesătură în structura palei este prezentat în tabelul 5.

Tabelul 5. Aranjamentul straturilor de țesătură în structura palei

Componenta		Raza [mm]	Arhitectura stratificatului	Grosime [mm]
	Bază	200 - 400	$[\pm 45/0_2/\pm 45_7]_s$	4,5
		400 - 750	$[\pm 45/0_2/\pm 45_6]_s$	4,25
	Talpă	750-2500	$[\pm 45/0_6/]_s$	3,76
		2500 - 3500	$[\pm 45/0_5/]_s$	3,2
		3500 - 4000	$[\pm 45/0_2/]_s$	2,2
	Nervură	750 - 4000	$[\pm 45/0_2/\pm 45_3]_s$	3,9
	Înveliș	750-2500	$[\pm 45]_{12}$	3
		2500 - 3500	$[\pm 45]_8$	2
		3500 - 4000	$[\pm 45]_6$	1,5

**Analiza cvasistatică a palei.** Conform datelor Serviciul Hidrometeorologic de Stat în Republica Moldova există de la 5 până la 50 de zile într-un an cu vânturi puternice care depășesc 15 m/s. Intensificări ale vântului până la viteza de 25 m/s și mai mult sunt rare, în medie 1 – 2 cazuri într-un an.

Pentru a menține regimul optim de funcționare a generatorului electric al turbinei, de regulă, la viteze ale vântului mai mari de 15 m/s rotorul turbinei este scos de sub acțiunea curenților de aer prin intermediul unui dispozitiv special. Conform literaturii de specialitate, pentru turbinele eoliene cu diametrul rotorului  $< 10$  m forțele gravitaționale și centrifugale sunt neglijabile.

Pentru a verifica rezistența palei au fost determinate forțele aerodinamice maxime pentru viteza vântului de 16 m/s cu ajutorul modulului CFX. Apoi, aceste forțe au fost transferate în modulul de analiză statică *Static Structural*, cu ajutorul căruia a fost efectuată analiza structurală a

palei. Pala a fost fixată la bază asemănător unei grinzi încastrate și solicitată cu forțe aerodinamice distribuite pe toată suprafața ei. Componenta axială a forțelor aerodinamice a fost obținută de aproximativ 2 kN. În figura 22 *a* este ilustrată presiunea distribuită pe întreaga suprafață a palei sub formă de vectori. După rularea simulării palei cu designul structural preliminar s-a constatat că deplasarea vârfului ei este peste limitele admisibile. Dat fiind faptul că rigiditatea palei este asigurată de lonjeron, pentru el a fost determinată grosimea optimă a stratificatelor de compozit.

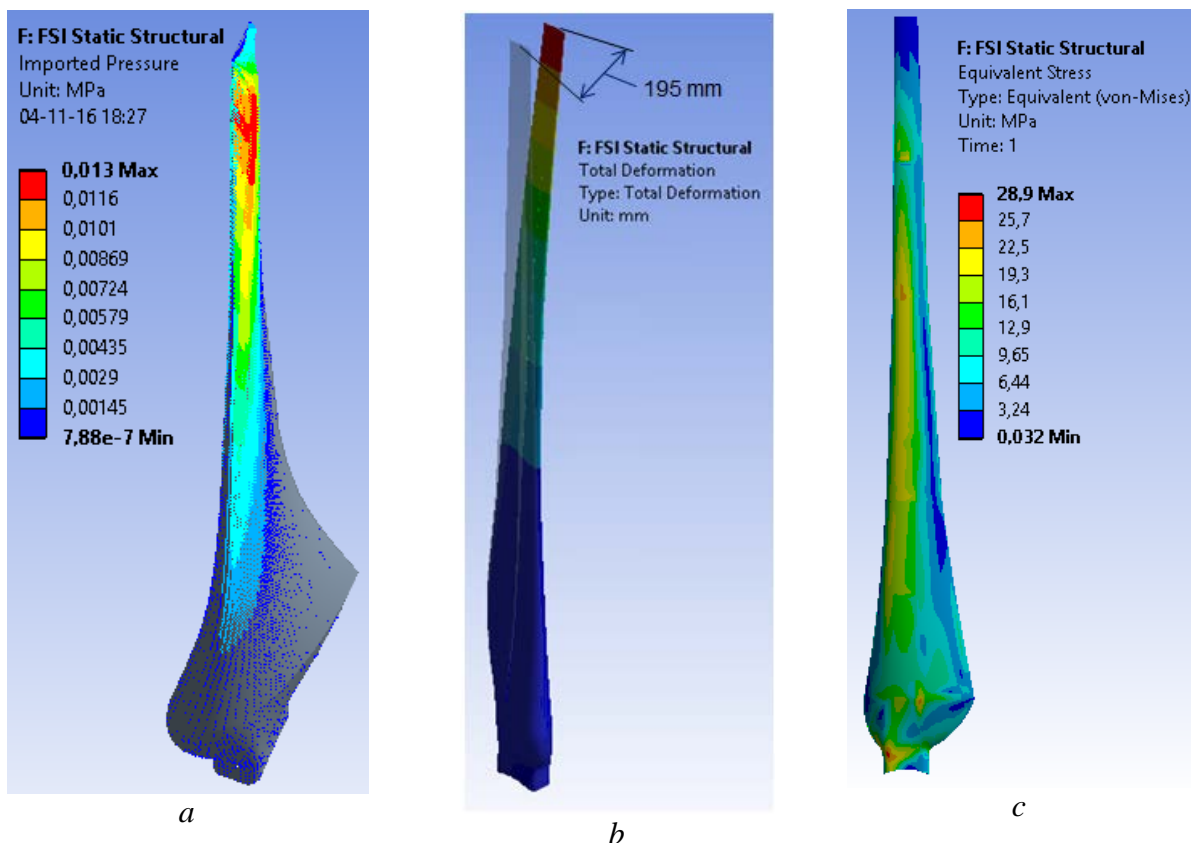


Fig. 22. Rezultatele analizei statice a palei:  
*a* – solicitare axială; *b* – încovoiere maximă;  
*c* – distribuția tensiunilor echivalente.

Au fost efectuate mai multe simulări cu ajutorul aplicației *DesignXplorer* dedicate analizei diferitor parametri și optimizării lor în cadrul platformei *Workbench*. Tensiunile echivalente maxime și deplasarea maximă a vârfului palei, care au fost obținute după simularea prealabilă, au fost fixate ca parametri de ieșire. Numărul de straturi de material compozit din componența lonjeronului palei a fost setat ca parametru de intrare cu cinci valori discrete. După efectuarea șirului de simulări experimentale, pentru fiecare din cele cinci valori ale numărului de straturi au fost obținute tensiunile echivalente maxime și deplasarea maximă a vârfului palei, figura 23.

A fost acceptat cazul în care tălpile lonjeronului palei vor avea 10 straturi de țesătură armată unidirecțional (grosimea 5 mm), nervura - 10 straturi armate bidirecțional la  $\pm 45^\circ$  și masa totală a palei va fi 23 kg. Pentru acest caz, în figura 22 *b* și *c* este ilustrată deplasarea maximă a vârfului palei (195 mm) care se încadrează în limitele admisibile (distanța de la vârful palei până la turn

este de 480 mm) și distribuția tensiunilor echivalente în pală (maxim 29 MPa). După cum se observă din figura 22 c, concentrările de tensiuni apar la baza palei în zonele unde sunt schimbări bruște ale secțiunii transversale. Acest lucru poate fi evitat prin realizarea unor treceri mai line între secțiuni și includerea în acea zonă a materialului compozit din țesături din fibre de carbon.

De regulă, pala se montează în rotorul turbinei la un anumit unghi față de axa de rotație, care să compenseze deplasarea vârfului ei din cauza forțelor aerodinamice. Acest lucru este necesar pentru a reduce pierderile de putere din cauza schimbării geometriei palei.

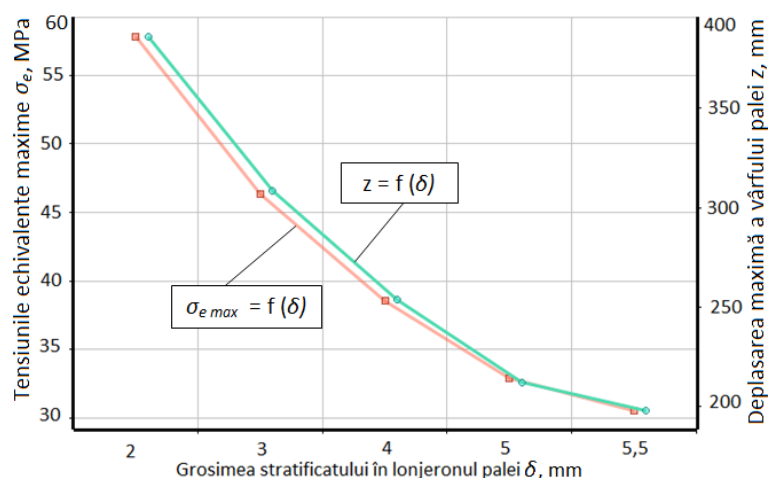


Fig. 23. Rezultatul analizei parametrice a palei.

Verificarea rigidității modelului final al palei a fost efectuată și pentru diapazonul de viteze ale vântului până la 12 m/s. După efectuarea unui șir de simulări au fost determinate valorile deplasării vârfului palei, care sunt prezentate în figura 24.

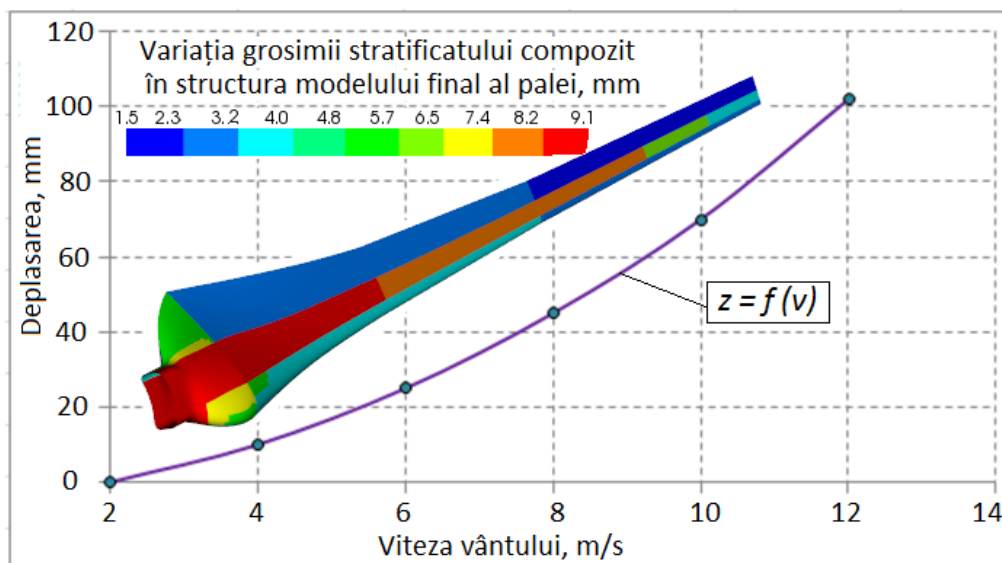


Fig. 24. Deplasarea vârfului palei funcție de viteza vântului.

Pentru a avea o informație mai clară în privința tensiunilor maxime care apar la baza palei a fost efectuată o analiză de verificare a cedării materialului după unele criterii de cedare. Cu ajutorul modulului de postprocesare ACP (Post) au fost considerate cele mai utilizate criterii de cedare a materialului compozit: criteriul tensiunilor maxime, criteriul Tsai-Wu, Tsai-Hill și criteriul Puck. În setările programului ACP (Post) a fost selectată opțiunea care permite vizualizarea pe suprafața palei a următoarei informații: stratul care cedează, criteriul de cedare și modul de cedare (întindere, compresiune și forfecare). În figura 25 este ilustrată pala cu

evidențierea straturilor de material compozit concrete în care apar concentrări de tensiuni.

Conform criteriilor de rezistență menționate, tabelul 4.4, tensiunile din straturile cele mai solicitate au valori de  $\approx 0,5$  din tensiunile limită, adică coeficientul de siguranță este aprox. 2. Conform criteriului de rezistență Puck, figura 25 tensiunile din straturile cele mai solicitate, care apar între fibre (adică în rășină) sunt la nivelul de 0,87 din valoarea tensiunilor limită. Aceste valori pot fi considerate admisibile ținând cont că este utilizată rășina poliesterică, care în comparație cu rășina epoxidică este mai fragilă dar și mai ieftină.

Tabelul 4.4. Coeficientul de siguranță inversat conform diferitor criterii de rezistență

Criteriul	Deformații maxime	Tensiuni maxime	<i>Tsai Wu</i>	<i>Tsai Hill</i>	<i>Puck</i>
<b>Coeficientul de siguranță</b>	0,45	0,53	0,49	0,47	0,87

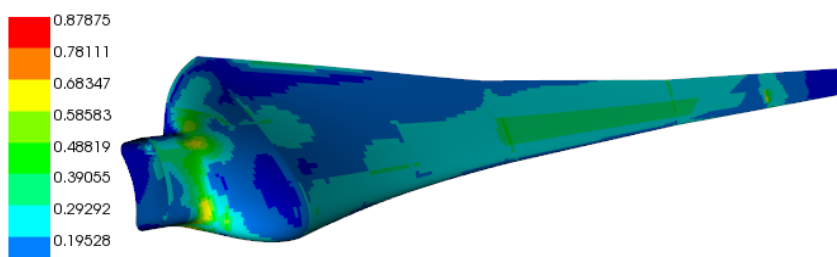


Fig. 25. Rezistența materialului în interiorul stratificatului compozit conform criteriului *Puck*.

**Analiza modală a palei.** Comportamentul dinamic al palei va fi analizat prin verificarea oscilațiilor armonice [16]. Aceste verificări sunt necesare pentru a depista apariția fenomenului de rezonanță. Verificarea formelor oscilațiilor armonice și a frecvențelor proprii a fost efectuată cu ajutorul aplicației de analiză modală *Modal* din platforma *Workbench*. A fost efectuată analiza modală pentru cazul când rotorul staționează și pentru cazul când se rotește. Pala a fost supusă la vibrații cu frecvențe cuprinse între 0 și 500 Hz pentru densitatea materialului, din care este fabricată, egală cu  $1850 \text{ kg/m}^3$ .

Frecvențele proprii ale palei în stare de repaus sunt comparate cu frecvențele proprii ale palei în rotație și sunt prezentate în tabelul 6.

În timpul funcționării turbinei pala este supusă unor excitații periodice care pot fi generate de câteva surse. O sursă de periodicitate este legată de viteza de rotație constantă a rotorului turbinei.

Această viteză constantă transformă orice variații spațiale ale vântului din anvergura rotorului în

Tabelul 6. Frecvențele proprii ale palelor modelate

Forma oscilațiilor	Frecvența [Hz]		Deplasarea vârfului, mm
	<i>Rotor în funcție</i>	<i>Rotor oprit</i>	
Prima formă, frontală	8,6	8,2	29
A doua formă, tangențială	16,2	16	23
A doua formă frontală	22,8	22	32

solicitări periodice ale palei la efectuarea unei rotații complete.

Pentru un rotor în funcțiune, frecvențele excitabile apar ca multipli întregi ai frecvenței rotorului per rotație ( $1 \Omega, 2 \Omega \dots n \Omega$ ).

Într-o turbină cu trei pale, frecvența de excitație aerodinamică are loc la o frecvență de rotație multiplă lui 3 a rotorului ( $3 \times \Omega$ ). Pentru a evalua posibilele interacțiuni dintre aceste frecvențe de excitație și frecvențele naturale ale diferitelor componente ale turbinei a fost construită diagrama Campbell, figura 26.

În figura 26, liniile care încep din origine reprezintă frecvențele excitațiilor posibile până rotorul atinge turațiile nominale. Linia verticală la  $130 \text{ min}^{-1}$  reprezintă rotațiile nominale ale turbinei eoliene. Frecvențele naturale fundamentale pentru turn și pale sunt ilustrate cu curbe orizontale care, pentru pale, indică o creștere odată cu creșterea vitezei de rotație. Rezonanța este posibil să se producă în punctele de intersecție ale liniilor frecvențelor de excitație cu curbele frecvențelor naturale.

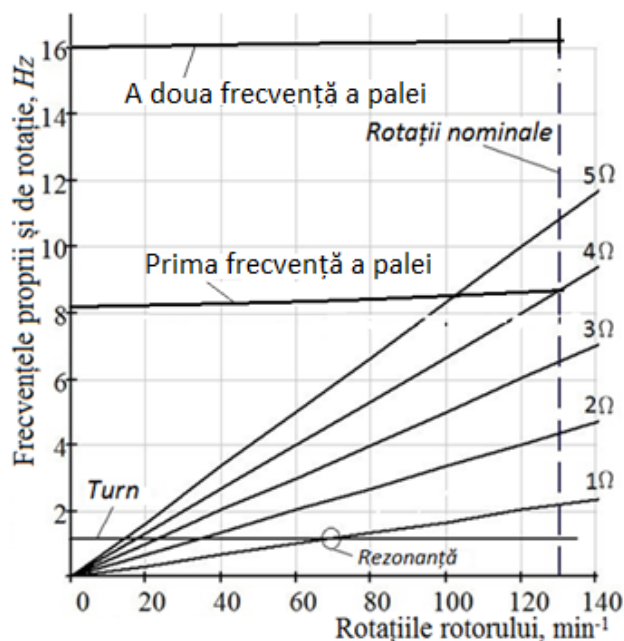


Fig. 26. Diagrama Campbell pentru rotorul turbinei cu pale optimizate.

A doua sursă de excitație este asociată cu vibrațiile turnului. Flexibilitatea la încovoiere a turnului poate fi reprezentată prin rigiditatea unui arc și amortizarea este dată sub forma unui coeficient de amortizare. Pentru turnul turbinei eoliene care este construit din țevi este valabil modelul unei grinzi tubulare cu o masă la capăt, figura 27. Pentru calcularea primei frecvențe proprii a turnului este valabilă următoarea aproximare:

$$f_1^2 = \frac{3.04}{4\pi^2} \frac{EI}{(M + 0.227 \cdot \mu \cdot L)L^3},$$

în care  $M$  este masa din capătul grinzii (masa turbinei);  $\mu$  – masa turnului pe un metru de lungime (masa specifică);  $L$  – înălțimea turnului;  $EI$  – rigiditatea la încovoiere ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ).

Prima frecvență proprie a turnului s-a obținut de  $1,1 \text{ Hz}$ . După cum se poate observa din diagrama Campbell, rotorul poate intra în rezonanță cu turnul la turația de  $70 \text{ min}^{-1}$ . Conform estimărilor, acest regim de lucru ar corespunde vitezei vântului de aprox.  $4,5 \text{ m/s}$ . La această viteză forțele aerodinamice influențează nesemnificativ comportamentul palei.

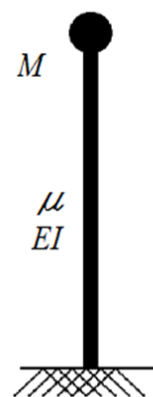


Fig. 27. Model structural al sistemului elastic al turbinei.



## CONCLUZII GENERALE ȘI RECOMANDĂRI

Problema abordată în teză este consacrată argumentării teoretice și experimentale a structurii de rezistență a palei din materiale compozite sub aspectul sporirii eficienței de conversie a energiei pentru turbine eoliene de mică putere ( $P < 20$  kW).

Rezultatele teoretice și experimentale obținute, concluziile și recomandările formulate prezintă contribuții originale care, în sinteză, sunt următoarele:

1. În baza analizei macromecanicii unui strat individual și a stratificatului de material compozit în ansamblu: s-a stabilit că rigiditatea stratificatului este o funcție de geometrie, proprietățile materialului și de modul de aranjare a laminelor în stratificat; iar criteriile de rezistență principale necesare calculului la rezistență s plăcilor din materiale compozite stratificate prin metode analitice și numerice sunt empirice și sunt asemănătoare cu cele utilizate pentru calculul materialelor metalice.

2. În baza testelor prin metoda tensometriei electrice rezistive au fost determinate caracteristicile elastice și mecanice principale ale materialelor compozite, utilizate în construcția palei, stabilindu-se că:

- la solicitarea epruvetelor executate din țesătură unidirecțională pe direcția fibrelor forța maximă la tracțiune depășește de 20 de ori valoarea obținută la solicitarea pe direcție perpendiculară fibrelor;

- la solicitarea epruvetelor executate din țesătură bidirecțională forța maximă la tracțiune depășește de 1,9 ori valoarea maximă obținută la solicitarea epruvetelor executate din țesătură unidirecțională. Comparația rezultatelor obținute cu datele din diagramele oferite de producătorul țesăturilor din fibre de sticlă arată că: valorile modulului de elasticitate  $E$  corelează foarte bine; valorile tensiunilor de rupere  $\sigma_r$  din epruvetele din țesătură unidirecțională sunt mai mici cu aproximativ 7 % decât cele indicate de producător; valorile tensiunilor de rupere pentru epruvetele din țesătură bidirecțională sunt mai mari cu 20 % decât cele indicate de producător din cauza grosimii mai mari a epruvetelor față standard;

- rezultatele testelor la forfecare pentru epruvetele din țesătură bidirecțională au fost comparate cu rezultatele testelor efectuate de către Sandia National Laboratories și arată o concordanță foarte bună (abaterea este mai mică de 5%). Totodată, aceste teste au confirmat faptul că materialele compozite lucrează mai prost la forfecare (forța maximă de forfecare este de apr. 7 ori mai mică decât forța de rupere).

3. A fost validată metoda de analiză cu elemente finite a stratificatelor din materiale compozite prin utilizarea constantelor elastice obținute în rezultatul testelor. Astfel, în baza simulării numerice a testelor reale s-a obținut o corelare foarte bună pentru toate epruvetele în diagramele *tensiuni – deformații specifice* (abateri de maxim 5%).

4. În baza simulărilor numerice CFD ale rotorului eolian cu eficiență sporită au fost determinate momentele de torsiune dezvoltate la axul rotorului și distribuția presiunii vântului pe suprafața palei pentru diferite viteze ale vântului (4 – 16 m/s); calculată curba de putere, fără a fi

considerate pierderile, și comparată cu rezultatele cercetărilor efectuate pentru această turbină în lucrarea [15]. Datorită optimizării geometriei palei s-a obținut o creștere a puterii cu  $\approx 10\%$ .

5. A fost elaborat modelul structural al palei și modelat învelișul și structura ei din material compozit. În baza simulărilor interacțiunii fluidului cu structura palei (FSI) au fost: verificată rezistența palei în cvasistatică pentru viteza limită a vântului de 16 m/s, determinată grosimea optimă a stratificatului de material compozit din structura de rezistență la care tensiunile echivalente von Mises (29 MPa) și deplasarea vârfului palei (195 mm) sunt în limitele admisibile; verificată rezistența stratificatului de material compozit conform criteriilor tensiunilor maxime, Tsai-Wu, Tsai-Hill și Puck. Astfel, conform acestor criterii de rezistență cele mai solicitate straturi din interiorul materialului compozit sunt tensionate la comprimare la nivelul de  $\approx 0,5$  din valoarea tensiunilor limită, adică coeficientul de siguranță este  $\approx 2$ . Conform criteriului de rezistență Puck, tensiunile maxime care apar între fibre (adică în rășină) sunt la întindere, atingând nivelul de 0,87 din valoarea tensiunilor limită; masa palei modelate a fost redusă cu 20%;

6. În baza analizei modale (dinamice) a modelului palei au fost determinate formele oscilațiilor armonice și a frecvențelor proprii. Pentru verificarea apariției rezonanței în rotorul elaborat, a fost construită diagrama Campbell în care au fost incluse frecvențele proprii ale palei și ale turnului turbinei, și conform căreia riscul apariției rezonanței este exclus pentru regimul de funcționare la turațiile  $80 - 160 \text{ min}^{-1}$ .

#### **Direcții și obiective de cercetare pe viitor**

Pentru viitor se propune continuarea cercetărilor legate de rezistența structurii și a învelișului palei sub aspectul influenței unor factori cum ar fi: comportarea la oboseală (determinarea numărului de solicitări ciclice); degradarea materialului compozit sub influența factorilor externi etc. De asemenea, se propune efectuarea cercetărilor legate de tehnologia de fabricare a palelor din materiale compozite prin realizarea experimentală a palei propuse.

#### **BIBLIOGRAFIE**

1. **Guțu M.** Energia eoliană, pilon al dezvoltării europene, Revista de Proprietate Intelectuală Intellectus 1/2012, Editor: AGEPI. P. 75-79.
2. Bere P. Materiale compozite polimerice. U.T. Press Cluj-Napoca, 2012. 252 p.
3. **Guțu M.** Correlation of composite material test results with finite element analysis. The 7th International Conference on Advanced Concepts on Mechanical Engineering (ACME 2016), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 147, 2016, Iasi, Romania. 7 p.
4. Bostan V., **Guțu M.** Determination of structural properties of glass/polyester composite for 10 kW wind turbine blades. Proceedings of the 16th International Conference – „Modern Technologies Quality and Innovation”. Volume I, 2012. Pp. 145-148.
5. Bostan V., **Guțu M.** Analiza cu elemente finite a materialelor compozite pentru construcția

palelor turbinelor eoliene. A II-a Conferință Internațională „Energetica Moldovei-2012”, 4-6 Octombrie, Chișinău. P. 553-556.

6. **Guțu M.** Experimental and numerical analysis of stresses and strain in specimen of composite material. Meridian Ingineresc, nr. 4, 2012, Pp. 24 – 27.

7. Dulgheru V., Bostan V., **Guțu M.** Some research on finite element analysis of composite materials. Proceedings of the 3rd international conference on diagnosis and prediction in mechanical engineering systems. Mechanical Testing and Diagnosis ISSN 2247 – 9635, 2012 (II), Volume 3. Pp. 79-85.

8. Brevet de invenție nr. 681 Z MD. Turbină eoliană / Bostan V., Bostan I., Dulgheru V., Sobor I., **Guțu M.**, BOPI nr 9/2013.

9. Bostan I., Dulgheru V., Sobor I., Bostan V., **Guțu M.** Horizontal axis wind microturbines with power of 10 kW. In Environmental Engineering and Management Journal, Universitatea Transilvania din Brașov, România, 10-12 Noiembrie 2011. Pp. 1041-1045.

10. Bostan V., **Guțu M.** Optimization of the strength structure for 10 kw wind turbine blades. Environmental Engineering and Management Journal. September 2011, Vol.10. P. 1221-224.

11. **Guțu M.** Unele aspecte privind structura de rezistență a palelor cu profil aerodinamic Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, UTM, 17-19 noiembrie, Chișinău, 2010. P. 177 – 180.

12. **Guțu M.**, Crudu R. Modelarea CAD și analiza structurii palei pentru turbina eoliană cu puterea de 10 kW. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților. Volumul II. Chișinău, 2012. P. 384-351.

13. **Guțu M.** Optimizarea structurii de rezistență a palei pentru turbină eoliană de 10 kW, Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, 7-10 decembrie, Chișinău, 2011. P. 186 – 189.

14. **Guțu M.**: Modelarea numerică a interacțiunii dintre fluxul de aer și pala aerodinamică din materiale compozite. Meridian Ingineresc nr. 3, 2010. P. 34 – 36.

15. Bostan V. Modele matematice în inginerie. Probleme de contact. Modelări și simulări numerice în aero-hidrodinamică. Tipogr. „Bons Offices”. Chișinău, 2014. 437 p.

16. **Guțu M.** Analysis of a composite blade design for 10 kw wind turbine using a finite element model. Applied Mechanics and Materials Vol. 657 (2014). Pp. 589-593.

17. Brevet de invenție. Pală a rotorului turbinei eoliene. Bostan V., Bostan I., Dulgheru V., **Guțu M.**, Decizie de acordare a brevetului de invenție, nr. depozit 20160086 din 27.06.2016.

18. Brevet de invenție nr. 1007. Instalație mareică. Bostan I., Dulgheru V., **Guțu M.**, nr. depozit: S 2015 0130 din 22.09.2015.

## ADNOTARE

la teza de doctor cu tema „**Optimizarea structurii de rezistență a palelor aerodinamice pentru turbine eoliene**”, prezentată de către **Marin Guțu** pentru obținerea titlului științific de doctor în științe tehnice la specialitatea 242.01 – „Teoria mașinilor, mecatronică”, Chișinău, 2016.

Teza cuprinde introducere, patru capitole, concluzii și recomandări, bibliografia din 121 de denumiri și 4 anexe. Volumul este de 140 de pagini, inclusiv, 99 de figuri și 20 tabele. Conținutul de bază al tezei a fost publicat în 16 lucrări științifice, din care 8 lucrări de unic autor, 6 lucrări în reviste recenzate și 3 brevete de invenție.

**Cuvinte-cheie:** pală aerodinamică; conversia energiei eoliene; structură de rezistență; materiale compozite; testare epruvete; simulare numerică CFD; simulare numerică FSI.

**Domeniul de studiu** se referă la structura de rezistență a palelor aerodinamice pentru turbine eoliene fabricate din materiale compozite.

**Scopul lucrării** constă în argumentarea teoretică și experimentală a structurii de rezistență a palei aerodinamice sub aspectul sporirii eficienței de conversie a energiei pentru turbine eoliene de mică putere ( $P < 20$  kW).

**Noutatea științifică și valoarea aplicativă a lucrării.** Elaborarea structurii de rezistență a palei din materiale compozite pentru turbine eoliene de mică putere și argumentarea ei din punct de vedere al simplității constructive și al masei reduse obținute în rezultatul optimizării arhitecturii materialului compozit stratificat.

**Semnificația teoretică** constă în elaborarea metodologiei cercetării aerodinamicii rotorului eolian și a structurii de rezistență a palelor realizate din materiale compozite stratificate.

**Metodologia cercetării științifice** constă în crearea unei platforme bazate pe modele și metode de calcul numerice și experimentale, care permite determinarea caracteristicilor mecanice ale materialelor compozite, elaborarea modelului palei aerodinamice din materiale compozite, simularea aerodinamicii rotorului și a interacțiunii fluidului cu structura palei.

**Implementarea rezultatelor cercetării.** Au fost elaborate două lucrări de laborator pentru procesul de studii de masterat la specialitatea IS CER. Totodată au fost definite recomandările privind arhitectura materialului compozit și tehnologia de fabricare a palelor care, pe viitor, va permite fabricarea în serie a palelor aerodinamice pentru turbine eoliene de putere mică.

## АННОТАЦИЯ

к докторской диссертации с темой «**Оптимизация несущей конструкции аэродинамических лопастей для ветровых турбин**», представленной **Марин Гуцу** на соискании учёной степени доктора технических наук по специальности 242.01 - «Теория машин, мехатроника», Кишинёв, 2016 год.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, рекомендаций, списка литературы из 121 названий и 4 приложений. Объем диссертации 140 страниц, включая 99 рисунков и 20 таблиц. Основное содержание диссертации было опубликовано в 16 научных работах, включая 8 без соавторов, 6 работ в рецензированных журналах и 3 патента.

**Ключевые слова:** аэродинамическая лопасть; конверсия энергии ветра; несущая конструкция; композитные материалы; испытание образцов; численное моделирование CFD; численное моделирование FSI.

**Область исследования:** относится к несущей конструкции аэродинамических лопастей для ветровых турбин, изготовленных из композитных материалов.

**Цель работы** состоит в теоретической и экспериментальной обосновании несущей структуры аэродинамической лопасти с точки зрения повышения эффективности преобразования энергии для ветровых турбин малой мощности ( $P < 20$  кВт).

**Научная новизна и прикладная значимость работы.** Разработка несущей структуры лопасти из композитных материалов для небольших маломощных ветровых турбин и ее аргументация с точки зрения конструктивной простоты и низкой массы полученные в результате оптимизации архитектуры слоистого композитного материала.

**Теоретическая значимость** заключается в разработке методологии исследования аэродинамики ротора ветряной турбины и несущей структуры лопасти, изготовленной из композитных слоистых материалов.

**Методология исследования** заключается в создании платформы, основанной на численных и экспериментальных моделях и методах расчета, позволяющее определение механических характеристик композитных материалов, разработку модели лопасти из композитных материалов, моделирование аэродинамики ротора и взаимодействия жидкости со структурой лопасти.

**Внедрение результатов исследований.** Были разработаны две лабораторные работы для учебного процесса специальности IS CER на мастерат. В то же время были разработаны рекомендации по архитектуре композитного материала и технологии изготовления лопастей которая в будущем позволит серийное производство аэродинамических лопастей для маломощных ветроагрегатов.

## ANNOTATION

**Guțu Marin**

Doctoral thesis „**Strength structure optimization of aerodynamic wind turbines blades**”, presented for the conferring of the scientific degree Doctor of technical sciences, speciality 242.01 – „Theory of Machines, Mechatronics”: Chișinău, 2014.

The thesis includes an introduction, four chapters, conclusions and recommendations, references with 121 titles and 4 annexes. The volume is 140 pages, including 99 figures and 20 tables. The main content of the thesis has been published in 16 scientific papers, including 8 single author papers, 6 papers in peer-reviewed journals and 3 patents.

**Key words:** aerodynamic blade; wind energy conversion; strength structure; composite materials; test specimens; CFD simulation; FSI simulation.

**The field of study** refers to strength structure of aerodynamic wind turbines blades made from composite materials.

**The purpose of this paper** is theoretical and experimental argumentation of strength structure of the aerodynamic blade for small wind turbines ( $P < 20$  kW) for increasing the efficiency of energy conversion.

**Scientific novelty and value of the work.** Elaboration of strength structure of blade from composite materials for small wind turbines and argumentation it from point of view of constructive simplicity and low weight obtained as a result of optimization of the architecture of layered composite material.

**Theoretical significance** consists in the development of research methodology of the wind turbine rotor aerodynamics and of the strength structure of the blades from layered composite materials.

**Scientific research methodology** is to create a platform based on numerical and experimental models and methods of research which allows determination of the mechanical characteristics of composite materials, elaboration of aerodynamic blade design from composite materials, simulation of the rotor aerodynamics and interaction of fluid with blade structure.

**Implementation of research results.** There were developed two laboratory works for the process of master studies for the specialty ISCER. Also, the recommendations of composite material architecture and the blades manufacturing technology were defined, which in the future, will allow serial production of aerodynamic blades for small wind turbines.

**GUȚU MARIN**

**OPTIMIZAREA STRUCTURII DE REZISTENȚĂ A PALELOR  
AERODINAMICE PENTRU TURBINE EOLIENE**

**242.01 – TEORIA MAȘINILOR, MECATRONICĂ**

Autoreferatul tezei de doctor în științe tehnice

---

Bun de tipar 02.03.2017.  
Hârtie ofset. Tipar RISO.  
Coli de tipar 2,0.

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

---

UTM, 2017, MD 2004, Chișinău, bd. Ștefan cel Mare și Sfânt, nr. 168,  
EDITURA TEHNICA - UTM, MD 2045,  
Chișinău, str. Studenților, nr. 9/9.