



## مطالعه بر هم کنش سیال و سازه به منظور بررسی اثرات جنس و ضخامت اجزای پرهی توربین بادی محور افقی سائز کوچک بر تغییر شکل پره

محمد حسین گیاهی<sup>1</sup>، علی جعفریان دهکردی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 14115-111، jafarian@modares.ac.ir

### چکیده

انرژی بادی در سال‌های اخیر در بین منابع تجدیدپذیر انرژی رشد قابل توجهی داشته است. با بزرگ شدن روز افزون توربین‌های بادی و افزایش ظرفیت آن‌ها، مساله‌ی برهم‌کنش سازه و سیال به موضوع مهمی در طراحی آن‌ها بدل خواهد شد. در این پژوهش ابتدا اثرات سرعت باد و جنس اجزای سازنده‌ی پره بر میزان تغییر شکل استاتیک پره‌ی یک توربین بادی محور افقی سائز کوچک با استفاده از شبیه‌سازی عددی بررسی شده است. مقدار پارامترهای گشتاور شفت و گشتاور فلپ پایه‌ی پره حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق خوبی را با مقادیر تجربی نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش از افزایش جابجایی نوک پره با افزایش سرعت باد حکایت دارد؛ با این حال شیب این افزایش در ناحیه‌ی با سرعت باد 10 تا 15 متر بر ثانیه به علت وقوع پدیده‌ی جدایش در پره‌ی توربین، کاهش خواهد داشت. در ادامه اثر جنس مواد اجزای مختلف پره‌ی توربین بر تغییر شکل بررسی و ساختارهای با کمترین تغییر شکل تعیین شده‌اند. ضخامت اجزای مختلف پره‌ی توربین بادی با پوسته‌ی از جنس اپوکسی گلاس و اسپار و ریشه از جنس فیبر کربن با توجه به معیار شکست بیشینه کرنش به دست آمده است. ضخامت نهایی پوسته برابر 2/1 میلی‌متر، ضخامت اسپار برابر 2/8 میلی‌متر و ضخامت ناحیه‌ی ریشه برابر 10 میلی‌متر محاسبه شده است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 26 آذر 1393  
پذیرش: 02 اسفند 1393  
ارائه در سایت: 15 فروردین 1394  
کلیدواژه‌ها:  
توربین بادی محور افقی  
آیرودینامیک  
برهم‌کنش سازه و سیال  
شبیه‌سازی عددی

## FSI Simulation of a Small Size Horizontal Axis Wind Turbine to investigate the Effects of Blade Thickness and Material on Blade Deformation

Mohammad Hossein Giahi, Ali Jafarian Dehkordi \*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 111-14115 Tehran, Iran, jafarian@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 17 December 2014  
Accepted 21 February 2015  
Available Online 04 April 2015

**Keywords:**  
Horizontal Axis Wind Turbine  
Aerodynamics  
Fluid Structure Interaction  
Numerical Simulation

### ABSTRACT

In recent years, wind energy experienced faster growth compared with the other renewable energies. The interaction between fluid and structure becomes more important as the wind turbine size and its power production capacity increases. In the present research, the effect of wind speed and blade materials on static deformation of a small size horizontal axis wind turbine blade is investigated. The shaft torque and root flap bending moment values obtained from simulation are in a good agreement with experimental data. Results demonstrated that the deformation of the blade increases as the wind speed grows, although the increase rate has declined in the mean wind speed range because of the occurrence of separation phenomenon on the blade surface. The effect of blade components materials on blade deformation was investigated and the least deformed configurations were introduced. The thickness of the designated blade components has been investigated by means of the maximum strain theory. The final thickness of the skin, spur and root was estimated by 2.1 mm, 2.8 mm and 10 mm respectively which are 30% less than the primary one.

### 1- مقدمه

20 کیلوواتی در تونل باد ناسا به انجام رساندند. هدف از این آزمایش‌ها مطالعه رفتار آیرودینامیک توربین باد محور افقی به صورت سه‌بعدی و در ابعاد واقعی بوده است. نتایج این آزمایش‌ها مرجع خوبی برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های عددی شد. در سال 2005، تانگچی‌پاکدی و همکاران [3]، شبیه‌سازی عددی جریان سه بعدی ویسکوز غیردائم توربین باد نرل<sup>1</sup> را انجام دادند. مقایسه‌ی نتایج حل عددی آن‌ها با نتایج تجربی نشان از تطابق در

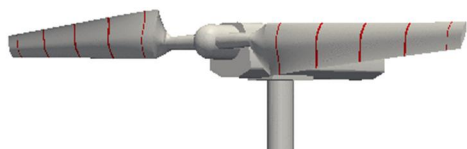
در سالیان اخیر با افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر روندی افزایشی داشته است. از سال 2000 تا کنون تولید برق از توربین‌های بادی سالیانه 25 درصد رشد داشته و این یعنی در هر سه سال، دو برابر شده است [1]. جهت پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع پدیده‌های مخرب، بررسی رفتار متقابل سازه و سیال ضروریست. در این راستا در سال 2001، هند و همکاران [2] آزمایش‌های گسترده‌ای بر روی یک توربین باد

1- National Renewable Energy Laboratory (NREL)

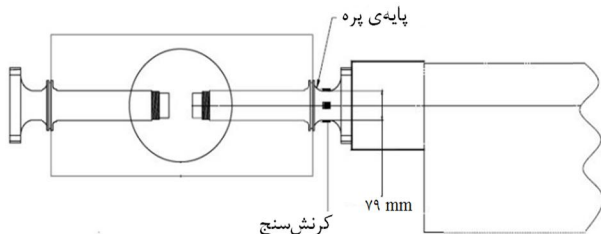
Please cite this article using:

M.H. Giahi, A. Jafarian Dehkordi, FSI Simulation of a Small Size Horizontal Axis Wind Turbine to investigate the Effects of Blade Thickness and Material on Blade Deformation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 5, pp. 145-152, 2015 (In Persian)

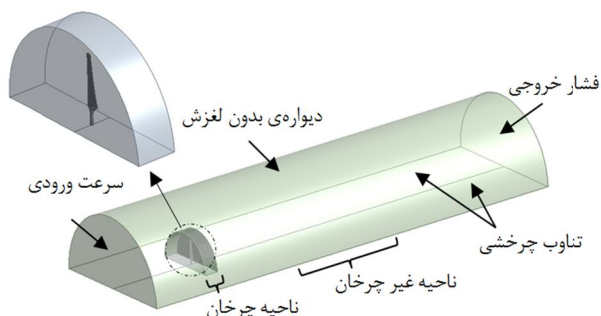
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:



شکل 1 نمایش شماتیکی از توربین واقعی



شکل 2 محل نصب کرنش سنج در ریشه پره [2]



شکل 3 نمایش شرایط مرزی و نواحی میدان حل سیال

جدول 1 مشخصات هندسی پرهی مدل شده

مشخصه هندسی	اندازه
طول پره	5/03m
پروفیل ایرفویل	s809
زاویه پیچش	از $20/04^\circ$ در ریشه تا $1/78^\circ$ در نوک
طول یال	از $73/7$ cm در ریشه تا $35/8$ cm در نوک
طول پایه پره	66 cm

جدول 2 فرض‌های به کار برده شده در تحلیل‌های سیال و سازه

مشخصه	فرض
تحلیل سیال	جریان پایا
تحلیل سازه	استاتیکی
ابعاد میدان‌ها	میدان سیال سه بعدی، سازه پوسته دو بعدی
نوع برهم کنش	یک طرفه

پوسته‌ی پرهی توربین از جنس فایبرگلاس و اسپار آن از فیبر کربن تک جهت می‌باشد [2]. ریشه‌ی پره توسط یک میله‌ی فولادی به هاب متصل است. بر روی این میله‌ی فولادی، چند حسگر کرنش<sup>3</sup> قرار داده شده است. محل قرارگیری این کرنش‌سنج‌ها در شکل 2 نمایش داده شده است.

برای شبیه‌سازی میدان سیال با توجه به حجم بالای عملیات عددی، تنها نیمی از میدان مدل شده و از شرط مرزی تناوب در مرزهای برش استفاده شده است. میدان حل سیال به شکل یک نیم استوانه با شعاع سه برابر قطر روتور در نظر گرفته شده است. ورودی میدان به فاصله‌ی 2 برابر و خروجی آن به فاصله‌ی 8 برابر قطر روتور از صفحه دوران پره قرار گرفته‌اند. پرهی توربین در یک میدان چرخان به قطر 14 و ضخامت 3 متر قرار گرفته است. شکل 3 نمایشی از میدان سیال و مرزها و نواحی آن و جدول 2 فرض‌های به

سرعت‌های بالا و پایین و عدم تطابق مطلوب در سرعت‌های متوسط داشت [3]. در سال 2005 آهلستروم [4] یک مدل المان محدود جهت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی پرهی توربین بادی محور افقی توسعه داد. نتایج این پژوهش از اثرات غیر خطی شدید در سازه‌ی پرهی یک توربین بادی دو مگاواتی زمانی که تغییر شکل تیغه‌ی پره تحت بارهای وارده از 10 درصد شعاع پره تجاوز می‌کند حکایت داشتند. نورلین و همکاران [5] در سال 2012 تقابل سازه و سیال را برای یک پرهی توربین بادی 61/5 متری مطالعه نمودند. این پژوهشگران یک کد جهت تولید مدل المان محدود سازه‌ی پرهی توربین باد توسعه دادند. نتایج تحلیل آن‌ها نشان داد که در سرعت‌های کمتر از 15 متر بر ثانیه تفاوت اندکی بین تحلیل برهم‌کنش یک طرفه و دو طرفه‌ی سازه و سیال وجود دارد. رامدنی و همکاران [6] در سال 2012 از نرم‌افزار انسیس سی-اف-ایکس<sup>1</sup> جهت مطالعه‌ی پدیده‌ی ناپایداری واگرایی در یک ایرفویل دو بعدی استفاده نمودند. تطابق مطلوب نتایج این شبیه‌سازی دو بعدی با نتایج تجربی به عنوان عاملی امیدوارکننده در پیش‌بینی نتایج مطلوب رفتار پرهی توربین باد در حالت سه بعدی ارزیابی شده است. لی و همکاران [7] در سال 2012 یک روش تحلیلی برای ملاحظه‌ی برهم‌کنش سازه و سیال با کوپل کردن روش ممنتم المان پره، نرم‌افزار ایکس-فویل<sup>2</sup> و تحلیل المان محدود ارائه دادند. این پژوهشگران کاهش 17 درصدی توان تولیدی توربین باد در سرعت 25 متر بر ثانیه به خاطر اثرات سازه و سیال را گزارش کردند.

هدف از پژوهش حاضر تحلیل یک توربین بادی محور افقی به منظور بررسی اثرات جنس اجزای مختلف پره بر تغییر شکل و همچنین تعیین ضخامت مورد نیاز این اجزا با توجه به نیروهای وارده بر سازه‌ی پره می‌باشد. بدین منظور ابتدا میدان سیال در هفت سرعت ورودی باد مختلف با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی انسیس سی-اف-ایکس حل شده است. نتایج حل میدان سیال سپس به بخش حل سازه‌ی نرم‌افزار انسیس منتقل شده؛ تغییر شکل استاتیکی، تنش و کرنش در اجزای مختلف سازه‌ی پرهی توربین باد تحت اثر نیروهای آیرودینامیکی، گرانشی و جانب مرکز حاصل از دوران پره به دست آمده است. در ادامه شش ترکیب‌بندی از مواد مختلف برای اجزای پره پیشنهاد، تغییر شکل استاتیکی پره در این ساختارها محاسبه و در انتها بهترین ساختار از بین این شش ساختار انتخاب شده است. در نهایت ضخامت اجزای مختلف پره با استفاده از معیار شکست بیشینه کرنش به دست آمده است.

## 2- مدل‌سازی هندسی، معادلات حاکم و روش حل عددی

توربین بادی شبیه‌سازی شده در این پژوهش، توربین بادی محور افقی 20 کیلوواتی نرل بوده که در تونل باد ناسا مورد مطالعه قرار گرفته است [2]. روتور این توربین دارای دو پره بوده و قطر آن برابر 10/06 متر می‌باشد. این روتور از یک ایرفویل یکسان در تمامی طول پره بهره می‌برد. روتور با سرعت دورانی 72 دور بر دقیقه دوران می‌کند. در این پژوهش تنها روتور توربین مدل شده و از سایر اجزای توربین شامل برج و ناسل صرف‌نظر شده است. جهت تحلیل میدان سیال، روتور به شکل یک حجم توخالی مدل شده است چون میدان سیال تنها دیواره‌ی جامد جسم را لمس می‌کند. با توجه به این‌که بخش پایه‌ی پره در شبیه‌سازی سیالاتی نقش کم‌رنگی ایفا می‌کند، در تولید هندسه‌ی این بخش ساده‌سازی صورت گرفته است. پره با استفاده از مقاطع متعدد ایرفویل دو بعدی در زوایای پیچش و طول یال مختلف و در نهایت اتصال این مقاطع به یکدیگر تولید شده است. جدول 1 مشخصات هندسی پره و شکل 1 نمایشی شماتیکی از توربین واقعی را نمایش می‌دهد.

1- Ansys CFX  
2- X-foil

3-Strain gauge

کار برده شده در تحلیل میدان‌های سیال و سازه را نشان می‌دهد. معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات متوسط‌گیری شدهی ناویر-استوکس<sup>1</sup> شامل معادلات پیوستگی و ممنتوم می‌باشند (معادلات 1 تا 3). در این تحلیل سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است و لذا ترم جرم حجمی  $\rho$  از مشتق جزئی بیرون خواهد آمد.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}^{eff}) + G_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij}^{eff} = -\rho \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho u_i' u_j' \quad (3)$$

در این معادلات،  $u$  بردار سرعت بوده،  $t$  معرف زمان و  $x$  بردار مکان است. ترم آخر در معادلهی (3) ترم تنش رینولدزیست که توسط مدل توربولانسی انتخاب شده مدل می‌شود. مدل توربولانسی استفاده شده در این پژوهش مدل  $k-\omega$  می‌باشد [8] که معادلات پارامترهای انرژی جنبشی و فرکانس آشفتهگی مربوطه به ترتیب مطابق روابط (4) و (5) خواهند بود.

$$\frac{D(\rho k)}{Dt} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{D(\rho \omega)}{Dt} = \frac{a\omega}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (5)$$

در این معادلات،  $P$  نرخ تولید توربولانس بوده و  $\alpha = 0/56$ ،  $\beta^* = 0/09$  و  $\beta = 0/075$ ،  $\sigma_\omega = 2$  و  $\sigma_k = 2$  مقادیر ثابت عددی هستند [9]. با محاسبهی انرژی جنبشی و فرکانس توربولانس، ویسکوزیتهی اغتشاشی با استفاده از معادلهی (7) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

از روش چهارچوب مرجع چندگانه<sup>2</sup> برای مدل‌سازی چرخش روتور استفاده شده است. از شبکهی با سازمان بر روی صفحات روتور و از شبکهی بی سازمان در سایر نواحی استفاده شده؛ نوع تحلیل جریان پایا، جریان سیال تراکم‌ناپذیر و از سیال هوا در دمای 25 درجه سانتی‌گراد و فشار مرجع 1 اتمسفر استفاده شده است. زاویه انحراف روتور برابر صفر درجه و زاویهی گام برابر پنج درجه در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی در ورودی، سرعت باد ورودی (هفت سرعت باد مختلف)، در خروجی، فشار نسبی صفر اتمسفر، در دیوارهی بیرونی و سطح پرهی روتور، شرط دیوارهی بدون لغزش و در مقطع برش میدان به دو نیمه، شرط تناوب چرخشی<sup>3</sup> در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی بخش سازه، سازهی پره به چهار بخش پوسته، اسپار، ریشه و میله‌ی اتصال ریشه به هاب تقسیم شده و برای سه بخش اول از المان پوسته<sup>4</sup> استفاده شده است. شکل (4) نمایی از سازهی پرهی مدل شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد. در مدل مورد بررسی در بخش اعتبارسنجی نتایج، جنس اجزای مختلف مطابق با جنس پرهی واقعی انتخاب شده است. پوسته‌ی پره از جنس فایبرگلاس، اسپار آن از جنس فیبرکربن و میله‌ی اتصال از جنس فولاد در نظر گرفته شده است. همچنین ضخامت پوسته، 3 میلی‌متر، ضخامت اسپار 4 میلی‌متر و ضخامت ریشه 15 میلی‌متر قرار داده شده است. استفاده از مواد مرکب<sup>5</sup> به گونه‌ای است که

$$[K]\{u\} = \{F^a\} + \{F^r\} \quad (7)$$

در این معادله  $[K]$  ماتریس سختی کل،  $\{u\}$  بردار جابجایی گره‌ها،  $\{F^r\}$  بردار بارگذاری عکس‌العمل و  $\{F^a\}$  بردار بارگذاری اعمالیست. سیستم معادلات خطی حاصل شده توسط روش اجزای محدود سپس توسط روش تکراری حل شده و میزان جابجایی گره‌ها محاسبه می‌شود. رابطه‌ی بین تنش و کرنش برای مواد همسانگرد<sup>7</sup> معادلات (8) تا (13) خواهد بود.

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [(1-\nu)\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{yy} + \nu\epsilon_{zz}] \quad (8)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\epsilon_{xx} + (1-\nu)\epsilon_{yy} + \nu\epsilon_{zz}] \quad (9)$$

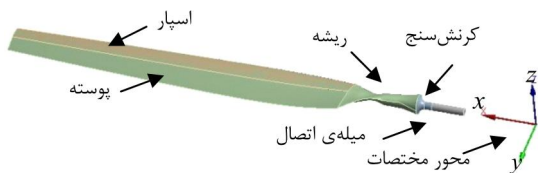
$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1-2\nu)(1+\nu)} [\nu\epsilon_{xx} + \nu\epsilon_{yy} + (1-\nu)\epsilon_{zz}] \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (11)$$

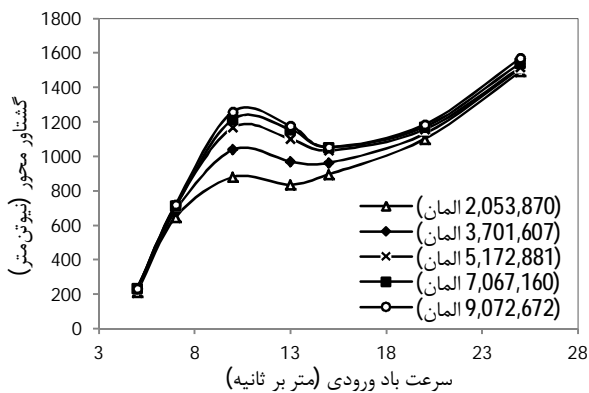
$$\tau_{yz} = G\gamma_{yz} \quad (12)$$

$$\tau_{xz} = G\gamma_{xz} \quad (13)$$

در این روابط،  $E$  مدول الاستیسیته،  $G$  مدول برشی و  $\nu$  نسبت پواسون می‌باشد. برای مواد ناهمسانگرد<sup>8</sup> روابط با مواد همسانگرد متفاوت خواهد بود. رابطه‌ی (14) معادلهی تنش-کرنش در دستگاه مختصات هم‌جهت با جهت‌های اصلی مادهی ناهمسانگرد را نمایش می‌دهد. ثابت‌های موجود در این معادله که به مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون وابسته‌اند نیز توسط معادلهی (15) قابل محاسبه‌اند [11].



شکل 4 سازهی پره و اجزای تشکیل دهندهی آن



شکل 5 گشتاور محور روتور بره از ای سرعت‌های باد ورودی در پنج شبکه با تعداد المان‌های مختلف

6- Unidirectional  
7- Isotropic  
8- Orthotropic

1- Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)  
2- Multiple Reference Frame  
3- Rotational Periodicity  
4- Shell  
5- Composite

از روش برهم‌کنش یک طرفه جهت محاسبه‌ی تغییر شکل پره‌ی توربین استفاده شده است. این روش زمانی از دقت لازم برخوردار است که کوپلینگ بین دو میدان به طور عمده یک طرفه باشد، بدین معنی که یکی از میدان‌ها قویاً بر میدان دیگر تاثیر گذار بوده اما از آن تاثیر قابل توجهی نگیرد. در مورد مساله‌ی حاضر این شرط زمانی برقرار است که تغییر شکل سازه‌ی پره اندک بوده به طوری که این تغییر شکل بر نتایج حاصل از میدان سیال تاثیر گذار نباشد. در روش برهم‌کنش یک طرفه، ابتدا معادلات حاکم بر میدان سیال به روش حجم محدود گسسته و حل شده، مقدار سرعت و فشار در نقاط مختلف میدان محاسبه می‌شود. پس از آن فشار حاصل از حل میدان سیال در مرز مشترک بین سیال و جامد که همان دیواره‌ی پره‌ی توربین است به صورت بار فشاری به میدان سازه انتقال می‌یابد. این بار فشاری که از میدان سیال وارد شده است؛ سپس به همراه بارهای حاصل از وزن و دوران به سازه‌ی پره اعمال شده و تغییر شکل پره حاصل از این بارها به وسیله‌ی حل معادلات اجزای محدود محاسبه می‌گردد. تغییر شکل محاسبه شده در این روش، تغییر شکل استاتیکی پره‌ی توربین خواهد بود.

### 3- بررسی استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

در ابتدا، عملیات استقلال از شبکه برای هر دو محیط سازه و سیال به طور جداگانه انجام شده است. در میدان سیال، گشتاور شفت حاصل از انتگرال‌گیری فشار وارده بر دیواره‌ی پره حول محور دوران روتور در هفت سرعت مختلف به دست آمده است. این پارامتر برای پنج شبکه با تراکم‌های مختلف محاسبه شده و در شکل 5 نمایش داده شده است. با توجه به نتایج شکل 5 می‌توان دید که اختلاف بین شبکه‌های 7 و 9 میلیون المان اندک است، لذا شبکه‌ی محاسباتی با 7067160 المان انتخاب شده است. برای بررسی استقلال از شبکه‌ی سازه، مقدار جابجایی در نوک پره به ازای شبکه‌هایی با تراکم مختلف در سرعت 20 متر بر ثانیه محاسبه شده است. از شبکه‌هایی با تعداد المان‌های 2778 تا 189882 استفاده شده و با توجه به تغییرات اندک (1/8 درصد) بین جابجایی نوک در شبکه‌ی با تعداد المان 189882 و شبکه‌ی با تعداد المان 46102، در نهایت شبکه‌ی با تعداد المان 46102 برای حل سازه انتخاب شده است.

اعتبارسنجی کامل نتایج حل میدان سیال در مقاله‌ی دیگری توسط نویسندگان مقاله‌ی حاضر انجام گرفته است [8]. مقدار توان تولیدی به عنوان یک معیار نمونه برای صحت‌سنجی نتایج حل میدان سیال انتخاب شده است. مقدار توان به دست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از شبکه‌ی منتخب به دست آمده در بخش 3-1 به همراه نتایج تجربی، در شکل 6 نمایش داده شده است. همان‌طور که از نتایج این نمودار مشخص است، مقدار میانگین خطا به ازای هفت سرعت ورودی مختلف، کمتر از 10 درصد است و توان تولیدی روتور حاصل از شبیه‌سازی عددی، تطابق خوبی با نتایج تجربی دارد. همچنین برای صحت‌سنجی نتایج حل سازه، پارامتر گشتاور فلپ در ریشه‌ی پره مورد استفاده قرار گرفته است [14]. گشتاور فلپ با استفاده از کرنش سنج نصب شده در پایه‌ی پره (شکل 2) و با استفاده از معادلات (16) و (17) به دست آمده است. مقدار کرنش از طریق روابط کرنش-جابجایی با مقدار جابجایی رابطه خواهد داشت. بنابراین برابری گشتاور فلپ و در نتیجه برابری مقدار کرنش به دست آمده در روش عددی با آزمایش تجربی، صحت مقدار جابجایی و تغییر شکل پره را نتیجه خواهد داد. مقدار گشتاور در پایه‌ی پره، در شکل 7 نمایش داده شده که نمایانگر صحت نتایج شبیه‌سازی بخش سازه می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}$$

$$C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta}$$

$$C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$C_{12} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta}$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$C_{13} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$C_{44} = G_{23}$$

$$C_{55} = G_{31}$$

$$C_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (15)$$

گشتاور فلپ پایه‌ی پره در محل نصب حسگر کرنش (شکل 4) با استفاده از معادلات (16) و (17) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\sigma = \sigma_{xx} - \frac{mr\omega^2}{A} \quad (16)$$

$$M = \frac{I\sigma}{y} \quad (17)$$

که در آن جرم پره،  $m$  مرکز جرم آن،  $\omega$  سرعت دوران روتور،  $A$  سطح مقطع پایه‌ی پره (میله‌ی فولادی) و  $I$  گشتاور دوم سطح مقطع پایه می‌باشد.

همانند مواد همسانگرد، برای مواد ناهمسانگرد نیز معیارهای طراحی متفاوتی وجود دارد. یکی از پرکاربردترین و در عین حال ساده‌ترین معیارهای طراحی، معیار شکست بیشینه مقدار کرنش می‌باشد [12]. بر اساس این تئوری، شکست زمانی اتفاق می‌افتد که کرنش در یکی از جهت‌های اصلی ماده (با توجه به جهت چیدمان فایبرها) از کرنش نهایی مربوطه بیشتر شود [13]. به طور مثال برای کرنش در جهت  $x$  و صفحه‌ی  $xy$  در شکل 4 بایستی روابط (18) و (19) برقرار باشد.

$$-\varepsilon_{Lc} < \varepsilon_{xx} < \varepsilon_{Lt} \quad (18)$$

$$-\gamma_{LT} < \gamma_{xy} < \gamma_{LT} \quad (19)$$

در این روابط،  $\varepsilon_{Lc}$  و  $\varepsilon_{Lt}$  به ترتیب بیانگر کرنش نهایی فشاری و کششی در جهت فایبرها و  $\gamma_{LT}$  بیانگر کرنش برشی نهایی در صفحه‌ی  $xy$  است. همچنین مقادیر  $\varepsilon_{xx}$  و  $\gamma_{xy}$  به ترتیب برابر کرنش عمودی در جهت قرارگیری فایبرها، و کرنش برشی در صفحه‌ی  $xy$  می‌باشند [13]. برای کرنش‌های کششی، فشاری و برشی در سایر جهت‌ها نیز روابط مشابهی وجود دارد.

#### 4- نتایج و بحث

##### 4-1- بررسی اثر سرعت باد بر تغییر شکل پره

شکل 8 میزان جابجایی نوک پره به ازای سرعت‌های باد ورودی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان دید که جابجایی در نوک پره در سرعت‌های زیر 10 متر بر ثانیه، روند افزایشی را دنبال می‌کند. بین سرعت 10 تا 15 متر بر ثانیه، شیب خط کاهش پیدا کرده و برای سرعت‌های بالاتر از 20 متر بر ثانیه دوباره روند افزایش شتاب می‌گیرد. دلیل این امر را می‌توان در رژیم حاکم بر جریان جستجو کرد. در سرعت‌های زیر 10 متر بر ثانیه، جریان به صورت کاملاً چسبیده در تمام طول روتور بوده و لذا نیروی برآ با افزایش سرعت افزایش خواهد داشت. با افزایش نیروی برآ، هر دو مولفه‌ی نیروی وارد بر پره افزایش یافته و تغییر شکل نوک پره افزایش خواهد داشت. با افزایش سرعت به مقادیر بیش از 10 متر بر ثانیه، جدایش جریان از سمت ریشه‌ی پره آغاز شده و به تدریج به سمت نوک پره سرایت خواهد کرد. جدایش جریان باعث واماندگی پره و در نتیجه کاهش نیروی برآی تولیدی در نواحی جدا شده خواهد شد و لذا روند افزایشی جابجایی نوک پره، شیب ملایم‌تری به خود خواهد گرفت. با افزایش سرعت به مقادیر بیش از 20 متر بر ثانیه، جدایش در طول کل پره گسترش یافته و کل تیغه در حالت واماندگی قرار می‌گیرد. در این حالت با افزایش سرعت، نیروهای وارد بر پره افزایش یافته و به تبع آن جابجایی نوک پره افزایش خواهد داشت.

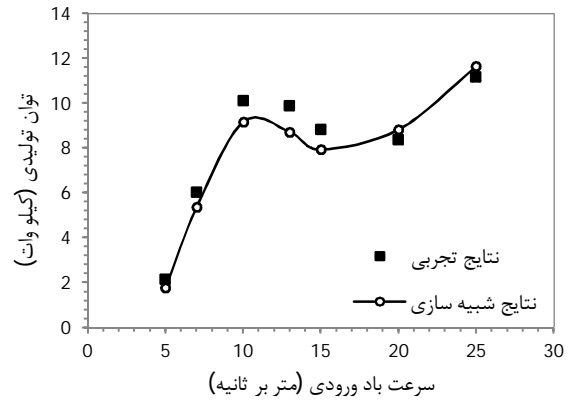
##### 4-2- بررسی اثر جنس مواد مورد استفاده در اجزا بر تغییر شکل پره

تغییر شکل پره‌ی توربین بادی از نظر آیرودینامیکی پدیده‌ی نامطلوبی به حساب می‌آید [15]. اثرات میدان سیال بر سازه‌ی پره باعث اعمال نیروهای آیرودینامیکی بر سازه، ایجاد تنش و احتمال وقوع شکست در سازه‌ی پره خواهند شد. به بیان دیگر، در صورتی که جنس و ضخامت مواد مورد استفاده در سازه‌ی پره به درستی انتخاب نشده باشد، پره دچار شکست خواهد شد.

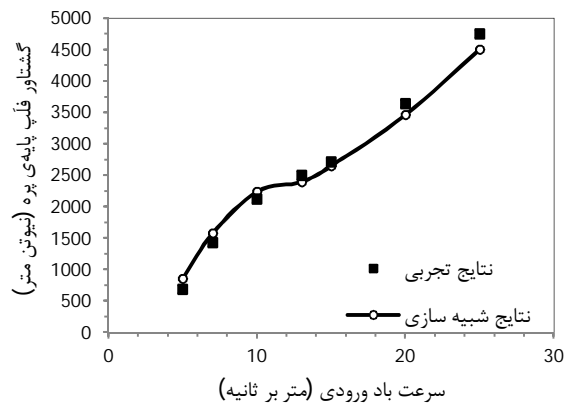
در این بخش، بررسی اثر جنس مواد مورد استفاده در ساختار اجزای مختلف پره بر تغییر شکل آن مورد توجه است. از چهار ماده‌ی مختلف جهت تولید پره‌ها استفاده شده است. مشخصات مکانیکی این مواد در جدول 3 قابل مشاهده است. پره‌ی توربین به سه بخش روکش (پوسته) پره، اسپار و ریشه تقسیم شده است. شکل‌دهی ساختارهای مختلف پره با استفاده از مواد اشاره شده در جدول 3 ممکن می‌باشد؛ با این حال شش ترکیب مختلف برای پره پیشنهاد شده و تغییر شکل هر یک به دست آمده است.

این ترکیب‌ها در جدول 4 نمایش داده شده‌اند. با توجه به این که بیش‌ترین تنش توسط ریشه‌ی پره تحمل می‌شود، مستحکم‌ترین ماده در بخش ریشه استفاده شده است. پس از آن اسپار پره وظیفه‌ی تحمل بار را بر عهده خواهد داشت و لذا ماده‌ی مورد استفاده در آن از ماده‌ی مورد استفاده در پوسته پره مستحکم‌تر انتخاب شده است.

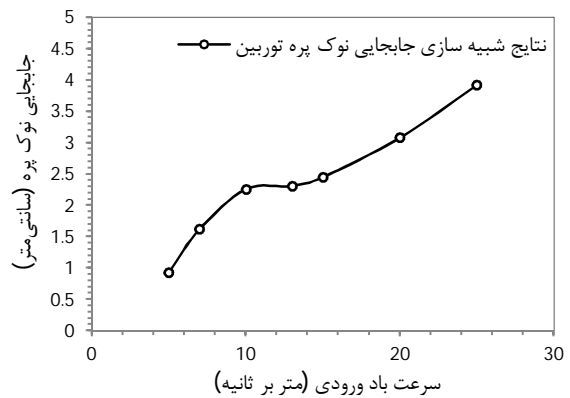
هر یک از این ساختارهای پره، در هفت سرعت ورودی متفاوت شبیه‌سازی شده‌اند. شکل 9 میزان جابجایی نوک پره‌ی توربین را برحسب سرعت باد ورودی نشان می‌دهد. با توجه به شکل 9 می‌توان دریافت که بیشترین مقدار تغییر شکل پره در ساختار 4 (همه‌ی اجزای پره از جنس اپوکسی گلاس) رخ داده است. همچنین کمترین مقدار تغییر شکل در ساختار 1 (کلیه اجزای پره از جنس فیبرکربن) اتفاق افتاده؛ با این حال تغییر شکل پره‌های با ساختار 2 (پوسته از جنس اپوکسی گلاس، ریشه و اسپار از جنس فیبرکربن) و ساختار 6 (کل پره از جنس آلومینیوم) نیز بسیار نزدیک به ساختار 1 می‌باشد.



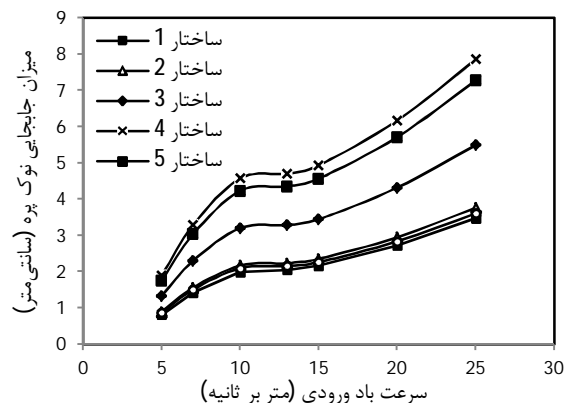
شکل 6 توان تولیدی روتور به ازای سرعت باد ورودی



شکل 7 گشتاور فلپ پایه‌ی پره به ازای هفت سرعت باد مختلف



شکل 8 جابجایی نوک پره به ازای سرعت باد ورودی



شکل 9 جابجایی نوک پره به ازای سرعت‌های ورودی مختلف در شش ساختار ارائه شده در جدول 4

جدول 3 مشخصات مکانیکی مواد مورد استفاده در ساختار پره [10]

مشخصات ماده	فیبرکربن پیش آغشته تک جهته 230 GPa	فیبرکربن پیش آغشته تک جهته 395 GPa	اپوکسی گلاس تک جهته	آلومنیوم
جرم حجمی kg/m <sup>3</sup>	1420	1480	2000	2770
مدول الاستیسیته MPa	جهت x	91820	45000	71000
	جهت y	61340	10000	
	جهت z	6900	10000	
مدول برشی Mpa	جهت xy	19500	5000	
	جهت yz	2700	3846	26692
ضریب پواسون	جهت xz	2700	5000	
	جهت xy	0/27	0/3	0/33
حد بیشینه کرنش کششی	جهت yz	0/4	0/4	
	جهت xz	0/27	0/3	
	جهت x	0/0167	0/0244	
حد بیشینه کرنش برشی	جهت y	0/0032	0/0035	-
	جهت z	0/0032	0/0035	
	جهت xy	0/012	0/016	
کرنش برشی	جهت yz	0/011	0/012	-
	جهت xz	0/012	0/016	

جدول 4 ساختارهای مختلف تعریف شده در تولید پرها

ساختارهای مختلف	پوسته‌ی پره	اسپار	ریشه‌ی پره
ساختار (1)	فیبرکربن 230 GPa	فیبرکربن 230 GPa	فیبرکربن 395 GPa
ساختار (2)	اپوکسی گلاس	فیبرکربن 230 GPa	فیبرکربن 395 GPa
ساختار (3)	اپوکسی گلاس	اپوکسی گلاس	فیبرکربن 230 GPa
ساختار (4)	اپوکسی گلاس	اپوکسی گلاس	اپوکسی گلاس
ساختار (5)	اپوکسی گلاس	آلومنیوم	اپوکسی گلاس
ساختار (6)	آلومنیوم	آلومنیوم	آلومنیوم

جدول 5 وزن سازه‌ی پره در ساختارهای مختلف

ساختارهای مختلف	وزن سازه‌ی پره (kg)
ساختار (1)	51
ساختار (2)	59
ساختار (3)	64
ساختار (4)	68
ساختار (5)	76
ساختار (6)	94

بودن اپوکسی گلاس نسبت به فیبرکربن، از هزینه‌های تولیدی پره نیز خواهد کاست. در ادامه ضخامت لازم برای مواد برای ساختار 2 با توجه به معیار شکست بیشینه انرژی کرنش که در بخش 2-2 توضیح داده شد تعیین شده است. بدین منظور از ضخامت بخش‌های مختلف پره (پوسته، ریشه و اسپار) در هر مرحله به مقدار 10% ضخامت اولیه‌ی پره کاسته شده، بیشینه کرنش پدید آمده در هر جزء به دست آمده و از نظر معیار شکست مورد بررسی قرار گرفته است. این کار تا زمانی که بیشینه کرنش حاصل شده در یکی از اجزاء از حد مجاز آن فراتر رود ادامه یافته است. شکل‌های 10 و 11 به ترتیب مقدار کرنش کششی و برشی در اجزای مختلف پره را به ازای ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهند.

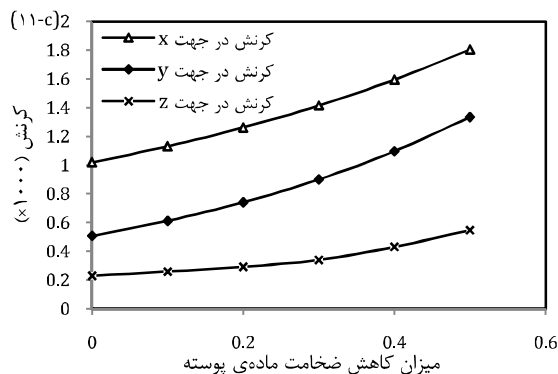
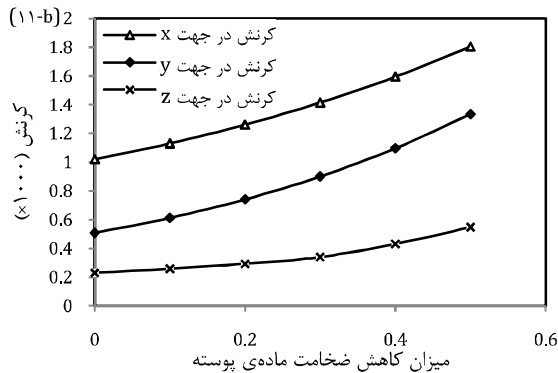
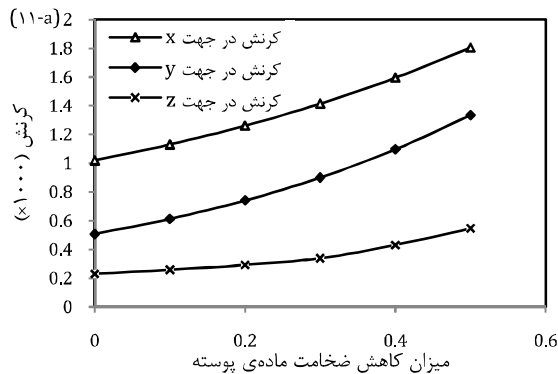
همان‌طور که از نتایج شکل 10 برمی‌آید، با کاهش ضخامت اجزای مختلف پره، مقدار بیشینه کرنش کششی افزایش خواهد داشت. با کاهش ضخامت اجزای مختلف به نصف مقدار اولیه، بیشینه کرنش در اسپار پره در جهت z از مقدار بیشینه کرنش قابل تحمل (جدول 3) بالاتر خواهد رفت و ماده در ناحیه‌ی بیشینه کرنش دچار شکست خواهد شد. همچنین شکل 11 کرنش برشی را در راستای صفحات مختصات برای اجزای مختلف پره‌ی توربین نشان می‌دهد. نتایج این نمودار نیز از افزایش کرنش برشی با کاهش ضخامت اجزا حکایت دارد با این حال بیشینه کرنش برشی در اجزا تا محدوده‌ی کاهش ضخامت بررسی شده، از بیشینه کرنش قابل تحمل ماده فراتر نرفته است و لذا کرنش بحرانی که محدود کننده‌ی کاهش ضخامت اجزای پره است، کرنش کششی در جهت محور z (راستای ضخامت ماده) در اسپار خواهد بود. برای بیشینه کرنش فشاری در اجزا نیز نمودارهای مشابه شکل 10 به دست آمده و این پارامتر نیز مانند کرنش برشی با کاهش ضخامت پره از حد مجاز شکست فراتر نرفته است.

نکته‌ی قابل توجه دیگر در شکل 10، تغییرات غیرخطی کرنش با کاهش ضخامت پره به مقادیر کاهش بیش از 0/3 ضخامت اولیه است. با توجه به اینکه مواد استفاده شده در ناحیه‌ی الاستیک رفتاری خطی دارد، تغییرات غیر خطی کرنش با کاهش ضخامت پره نشان از اثرات غیرخطی هندسی دارد. همچنین این نمودار نشان می‌دهد که این اثرات غیرخطی هندسی با افزایش تغییر شکل پره افزایش خواهند داشت.

برای انتخاب نهایی ضخامت پره، بایستی ضریب اطمینان مناسبی نیز

با توجه به شکل 9 می‌توان نتیجه گرفت در صورتی که ملاحظات اقتصادی مد نظر نباشد، بهترین ساختار پره در بین ساختارهای پیشنهاد شده از نظر مقاومت در برابر تغییر شکل، تولید کلیه‌ی اجزای پره از جنس فیبرکربن است. جدول 5 وزن سازه‌ی پره را در ساختارهای مختلف بررسی شده نشان می‌دهد.

جدول 5 کمترین مقدار وزن سازه را در ساختار 1 (پره‌ی فیبرکربنی) و بیشترین مقدار آن را در ساختار 6 (پره‌ی آلومنیومی) نشان می‌دهد. وزن زیاد سازه‌ی پره‌ی توربین باد عامل نامطلوبیست چون علاوه بر نیاز به طراحی استاتیکی مقاومتر اجزای نگهدارنده‌ی روتور مانند شفت، باعث ایجاد پدیده‌ی خستگی حاصل از نیروهای متناوب گرانشی اعمال شده بر روی پره خواهد شد؛ لذا اگر چه پره‌ی با ساختار آلومنیومی، از نظر میزان تغییر شکل ساختار مطلوبی به نظر می‌رسد، وزن تقریباً دو برابری آن نسبت به ساختار فیبرکربنی به عنوان عاملی نامطلوب ارزیابی می‌گردد. از بین شش ساختار بررسی شده، به نظر می‌رسد، بهترین حالت، ساختار 2 (پوسته از جنس اپوکسی گلاس، ریشه و اسپار از جنس فیبرکربن) باشد؛ چون علاوه بر تغییر شکل اندک و وزن پایین، با توجه به ارزان‌تر



شکل 11 کرنش برشی در پوسته (11-a)، ریشه (11-b) و اسپار (11-c) به ازای ضخامت‌های مختلف

نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر دو بخش میدان سیال و سازه، تطابق خوبی با نتایج تجربی داشتند. نتایج این تحقیق نشان از افزایش تغییر شکل پرهی توربین با افزایش سرعت باد داشت، با این حال شیب این افزایش در سرعت‌های میانی کم می‌باشد. در ادامه شش ساختار برای جنس اجزای مختلف پره پیشنهاد و ساختارهای با کمترین تغییر شکل پره معرفی شده‌اند. در انتها ضخامت اجزای مختلف با توجه به ضریب اطمینان اعمالی برابر 70% ضخامت اولیه‌ی آنها به دست آمده است.

## 6- مراجع

- [1] G. W. E. Council, Global Wind Report 2011-annual market update, 2012.
- [2] M. M. Hand, D. Simms, L. Fingersh, D. Jager, J. Cotrell, S. Schreck, S. Larwood, Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 2001.
- [3] C. Tongchitpakdee, S. Benjanirat, L. N. Sankar, Numerical simulation of the aerodynamics of horizontal axis wind turbines under yawed flow conditions, Transactions-American Society Of Mechanical Engineers Journal Of Solar Energy Engineering, Vol. 127, No. 4, pp. 464-474, 2005.
- [4] A. Ahlström, Aeroelastic simulation of wind turbine dynamics, PhD Thesis, Department of Mechanics, Royal Institute of Technology Stockholm, Stockholm, Sweden, 2005.

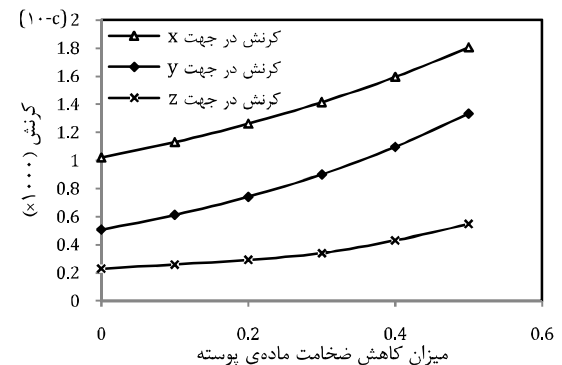
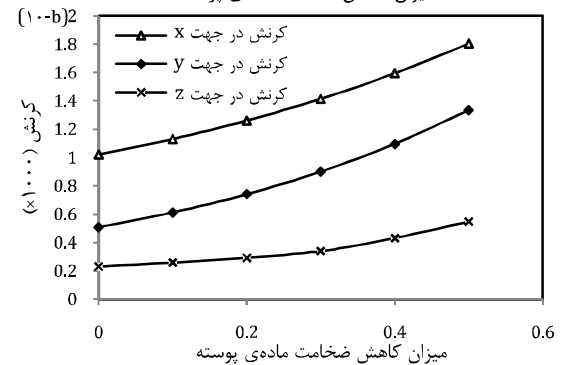
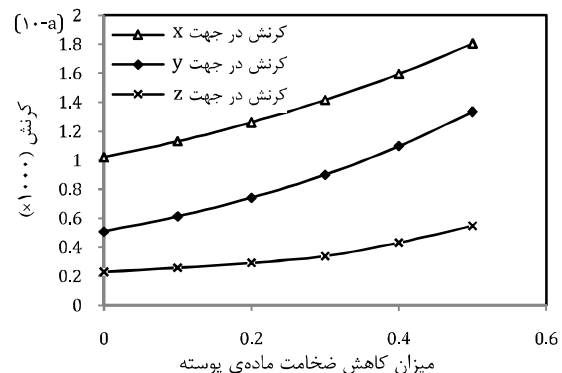
اعمال کرد. با توجه به استاندارد طراحی توربین‌های بادی سایز کوچک [16]، ضریب اطمینان برای مواد مورد استفاده برابر 1/1 و ضریب اطمینان برای بارهای اعمالی برابر 1/35 می‌باشد. با اعمال این ضرایب اطمینان، ضخامت نهایی قابل قبول برای اجزای مختلف پره می‌تواند برابر 70% ضخامت اولیه‌ی آن‌ها انتخاب شود. جدول 6 ضخامت پوسته، اسپار و ریشه در نمونه‌ی اولیه و نهایی را نمایش می‌دهد. جرم پره‌ی نهایی برابر 42/6 کیلوگرم بوده که نسبت به نمونه‌ی اولیه 17/4 کیلوگرم کاهش داشته است.

## 5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این پژوهش اثر میدان سیال بر سازه‌ی پره‌ی یک توربین بادی محور افقی سایز کوچک جهت بررسی اثرات سرعت باد بر تغییر شکل آن و انتخاب جنس و ضخامت اجزای مختلف پره با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی صورت گرفت.

جدول 6 ضخامت اجزای مختلف نمونه اولیه و نهایی پره

اجزای پره	ضخامت نمونه اولیه (mm)	ضخامت نمونه‌ی نهایی (mm)
پوسته	3	2/1
اسپار	4	2/8
ریشه	12	10



شکل 10 کرنش کششی در پوسته (10-a)، ریشه (10-b) و اسپار (10-c) به ازای ضخامت‌های مختلف

- [12] C. T. Sun, B. J. Quinn, J. Tao, Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates, School of Aeronautics and Astronautics Purdue University, West Lafayette, 1996.
- [13] P. K. Mallick, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, third ed., Boca Raton: CRC press, 2007.
- [14] D. A. Simms, S. Schreck, M. Hand, L. Fingersh, NREL unsteady aerodynamics experiment in the NASA-Ames wind tunnel: a comparison of predictions to measurements, National Renewable Energy Laboratory Colorado, USA, 2001.
- [15] D.-H. Kim, Y.-H. Kim, Performance prediction of a 5MW wind turbine blade considering aeroelastic effect, World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 81, pp. 771-775, 2011.
- [16] CEI/IEC, British-Standard, Wind Turbines-Part 2: Design Requirements for Small Wind Turbines, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2006.
- [5] C. Järpner, J. Norlin, Fluid structure interaction on wind turbine blades, M.sc. Thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.
- [6] D. Ramdenee, A. Ilinca, I. S. Minea, Aeroelasticity of Wind Turbines Blades Using Numerical Simulation: InTech Open Access Publisher, 2012.
- [7] Y.-J. Lee, Y.-T. Jhan, C.-H. Chung, Fluid-structure interaction of FRP wind turbine blades under aerodynamic effect, Composites Part B: Engineering, Vol. 43, No. 5, pp. 2180-2191, 2012.
- [8] A. Jafarian, M. h. Giahi, Numerical Simulation of A Small Size Horizontal Axis Wind Turbine Aerodynamics, in 4th annual clean energy confrence, Kerman, Iran, 2014. (In Persian)
- [9] D. C. Wilcox, Turbulence modeling for CFD: DCW industries La Canada, CA, 1998.
- [10] Ansys, Ansys Mechanical APDL and Mechanical Applications Theory Reference: Ansys Inc, 2010.
- [11] R. M. Jones, Mechanics of composite materials, Second ed., Philadelphia, PA: CRC Press, 1998.