ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



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

محمد حسين گياهى¹، على ج**ع**فريان دهكردى^{2*}

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

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

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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
انرژی بادی در سالهای اخیر در بین منابع تجدیدپذیر انرژی رشد قابل توجهی داشته است. با بزرگ شدن روز افزون توربینهای بادی و افزایش	مقاله پژوهشی کامل
ظرفیت آنها، مسالهی برهم کنش سازه و سیال به موضوع مهمی در طراحی آنها بدل خواهد شد. در این پژوهش ابتدا اثرات سرعت باد و جنس	دریافت: 26 آذر 1393
اجزای سازندهی پره بر میزان تغییر شکل استاتیک پرهی یک توربین بادی محور افقی سایز کوچک با استفاده از شبیهسازی عددی بررسی شده	ارائه در سایت: 15 فروردین 1394
– است. مقدار پارامترهای گشتاور شفت و گشتاور فلپ پایهی پره حاصل از شبیهسازی عددی تطابق خوبی را با مقادیر تجربی نشان میدهد. نتایج	<i>کلید واژگان:</i>
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 جا	توربین بادی محور افقی
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	آیرودینامیک
بررسی و ساختارهای با کمترین تغییر شکل تعیین شدهاند. ضخامت اجزای مختلف پرهی توربین بادی با پوستهی گلاس و اسپار	برهم کنش سازه و سیال
و ریشه از جنس فیبر کربن با توجه به معیار شکست بیشینه کرنش به دست آمده است. ضخامت نهایی پوسته برابر 2/1	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	Abstract
Original Research Paper Received 17 December 2014 Accepted 21 February 2015 Available Online 04 April 2015	In recent years, wind energy experienced faster growth compared with the other renewal energies. The interaction between fluid and structure becomes more important as the wi turbine size and its power production capacity increases. In the present research, the effect wind speed and blade materials on static deformation of a small size horizontal axis wind turbine to the second seco
<i>Keywords:</i> Horizontal Axis Wind Turbine Aerodynamics Fluid Structure Interaction Numerical Simulation	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 نرل¹ 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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.H. Giahi, A. Jafarian Dehkord¹, 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)

¹⁻ National Renewable Energy Laboratory (NREL)

سرعتهای بالا و پایین و عدم تطابق مطلوب در سرعتهای متوسط داشت [3]. در سال 2005 آهلستروم [4] يک مدل المان محدود جهت شبيهسازي 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 مى كند حكايت داشتند. نورلين و همكاران [5] در سال 2012 تقابل سازه و سیال را برای یک یرهی 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 برهم کنش یک طرفه و دو طرفهی سازه و سیال وجود دارد. رامدنی و همکاران [6] در سال 2012 از نرمافزار انسیس سی-اف-ایکس^ا 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 امیدوار کننده 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 برهم کنش سازه و سیال با كوپل كردن روش ممنتم المان پره، نرمافزار ايكس-فويل² و تحليل 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 نرم افزار انسیس منتقل شده؛ تغییر شکل استاتیکی، تنش و کرنش در اجزای مختلف سازهی پرهی توربین باد تحت آثر 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 شبیه سازی شده در این پژوهش، توربین بادی محور افقی 20 کیلوواتی نِرِل 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 می باشد. این دورانی 27 دور بر دقیقه دوران می کند. در این پژوهش تنها روتور با سرعت مدل شده و از سایر اجزای توربین شامل برج و ناسل صرف نظر شده است. جهت تحلیل میدان سیال، روتور به شکل یک حجم توخالی مدل شده است چون میدان سیال تنها دیواره ی جامد جسم را لمس می کند. با توجه به این که بخش پایه ی پره در شبیه سازی سیالاتی نقش کمرنگی ایفا می کند، در 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 نمایی شماتیکی از توربین واقعی را نمایش می دهد



روی این میلهی فولادی، چند حسگر کرنش³ قرار داده شده است. محل

برای شبیه سازی میدان سیال با توجه به حجم بالای عملیات عددی، تنها

قرار گیری این کرنشسنجها در شکل 2 نمایش داده شده است.

¹⁻ Ansys CFX 2- X-foil

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 نمایی از میدان سیال و مرزها و نواحی آن و جدول 2 فرضهای به

³⁻Strain gauge

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1394، دورہ 15، شمارہ 5

کار برده شده در تحلیل میدانهای سیال و سازه را نشان میدهد.

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات متوسط گیری شدهی ناویر-استوکس¹ شامل معادلات پیوستگی و ممنتم میباشند (معادلات 1 تا 3). در این تحلیل سیال تراکمناپذیر در نظر گرفته شده است و لذا ترم جرم حجمی م از مشتق جزئی بیرون خواهد آمد.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

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

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

در این معادلات، **U** بردار سرعت بوده، **I** 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 $\omega - M$ میباشد [8] که معادلاتِ پارامترهای انرژی جنبشی و فرکانس آشفتگی مربوطه به ترتیب مطابق روابط (4) و (5) خواهند بود.

$$\frac{\mathsf{D}(\rho k)}{\mathsf{D}t} = P - \beta' \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(4)

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

در این معادلات، \mathbf{P} نرخ تولید توربولانس بوده و 0/09 = β^{*} ، 0/05 ، $\alpha = 0/56$ ، $\alpha = 0/075$ معادلات، عددی هستند [9]. با $\sigma_{\omega} = 2$, $\beta = 0/075$ محاسبهی انرژی جنبشی و فرکانس توربولانس، ویسکوزیتهی اغتشاشی با استفاده از معادلهی (7) قابل محاسبه خواهد بود.

$$\mu_{t} = \rho \frac{\kappa}{\omega} \tag{6}$$

از روش چهارچوب مرجع چندگانه² 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 سانتی گراد 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 چرخشی³ در نظر گرفته شده است.

برای مدلسازی بخش سازه، سازهی پره به چهار بخشِ پوسته، اسپار، ریشه و میلهی اتصال ریشه به هاب تقسیم شده و برای سه بخش اول از المانِ پوسته⁴ 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 فخامت پوسته، 3 میلی متر، ضخامت اسپار 4 میلی متر و ضخامت ریشه 15 میلی متر قرار داده شده است. استفاده از مواد مرکب⁵ به گونهای است که

جهت فایبرها در مواد تک جهته⁶ در راستای طول پره (راستای محور **ت** در شکل (4) باشد. بارهای وارد بر پره از نیروهای آیرودینامیکی، نیروی گرانش حاصل از وزن و نیروی جانب مرکز حاصل از دوران پره تشکیل شدهاند. شرط مرزی انتهای پره، تکیهگاه ثابت قرار داده شده است. رابطهی (7) معادلهی کلی حاکم بر تحلیل استاتیکی خطی سازه را به نمایش میگذارد [10]:

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

در این معادله [**X**] ماتریس سختی کل، (**u**) بردار جابجایی گرهها، (**F**') بردار بارگذاری عکسالعمل و (**F**') بردار بارگذاری اعمالیست. سیستم معادلات خطی حاصل شده توسط روش اجزای محدود سپس توسط روش تکراری حل شده و میزان جابجایی گرهها محاسبه می شود.

رابطهی بین تنش و کرنش برای مواد همسانگرد⁷ معادلات **(8)** تا **(13)** خواهد بود. ۲

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

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

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

$$\tau_{\mathbf{x}\mathbf{y}} = \mathbf{G}\gamma_{\mathbf{x}\mathbf{y}} \tag{11}$$

$$\mathbf{y}_{\mathbf{y}\mathbf{z}} = \mathbf{G} \boldsymbol{\gamma}_{\mathbf{y}\mathbf{z}} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{\mathcal{F}}_{\boldsymbol{x}\boldsymbol{z}} = \boldsymbol{\boldsymbol{\mathcal{G}}} \boldsymbol{\gamma}_{\boldsymbol{x}\boldsymbol{z}} \tag{13}$$

در این روابط، **ع** مدول الاستیسیته، **۵** مدول برشی و ۷ نسبت پواسون میباشد. برای مواد ناهمسانگرد⁸ روابط با مواد همسانگرد متفاوت خواهد بود. رابطهی(14) معادلهی تنش-کرنش در دستگاه مختصات هم جهت 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 5 گشتاور محور روتور به ازای سرعتهای باد ورودی در پنج شبکه با تعداد المانهای مختلف

147

¹⁻ Reynolds-averaged Navier–Stokes (RANS)

²⁻ Multiple Reference Frame

Rotational Periodicity
 Shell

⁵⁻ Composite

⁶⁻ Unidirectional

⁷⁻ Isotropic 8- Orthotropic

$$\begin{bmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{3} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{3} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$
(14)
$$c_{11} = \frac{1 - v_{23} v_{32}}{E_{2} E_{3} \Delta}$$
$$c_{22} = \frac{1 - v_{13} v_{31}}{E_{1} E_{2} \Delta}$$
$$c_{33} = \frac{1 - v_{12} v_{21}}{E_{1} E_{2} \Delta}$$
$$c_{12} = \frac{v_{12} + v_{22} v_{13}}{E_{1} E_{2} \Delta}$$
$$c_{13} = \frac{v_{13} + v_{12} v_{23}}{E_{1} E_{2} \Delta}$$
$$c_{13} = \frac{v_{13} + v_{12} v_{23}}{E_{1} E_{2} \Delta}$$
$$c_{44} = \mathbf{G}_{23}$$
$$c_{66} = \mathbf{G}_{12}$$
$$\Delta = \frac{1 - v_{12} v_{21} - v_{23} v_{32} - v_{31} v_{13} - 2 v_{21} v_{32} v_{13}}{E_{1} E_{2} E_{3}}$$
(15)

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

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

$$M = \frac{W}{y}$$
(17)

که در آن **m** جرم پره، r مرکز جرم آن، @ 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 ۲ و صفحهی ۷۲ در شکل بایستی روابط (18) و (19) برقرار باشد.

$$-\varepsilon_{Lc} < \varepsilon_{xx} < \varepsilon_{Lt} \tag{18}$$

$$-\gamma_{\mathbf{LT}} < \gamma_{\mathbf{xy}} < \gamma_{\mathbf{LT}} \tag{19}$$

در این روابط، $a^2 = a_1^3$ به ترتیب بیانگر کرنش نهایی فشاری و کششی در جهت جهت فایبرها و $a_1\gamma$ بیانگر کرنش برشی نهایی در صفحه ی **لا** است. همچنین مقادیر a_2 و $a_7\gamma$ به ترتیب برابر کرنش عمودی در جهت قرارگیری فایبرها، و کرنش برشی در صفحه ی **لا** میباشند [13]. برای کرنشهای کششی، فشاری و برشی در سایر جهتها نیز روابط مشابهی وجود دارد.

از روش برهم کنش یک طرفه جهت محاسبهی تغییر شکل پرهی توربین استفاده شده است. این روش زمانی از دقت لازم برخودار است که کوپلینگ قویاً بر 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 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 به مشترک بین سیال و جامد که همان دیوارهی پرهی توربین است به صورت بار فشاری به میدان سازه انتقال می ابد. 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 می گردد. تغییر شکل محاسبه شده در این روش،

3- بررسي استقلال از شبكه و اعتبارسنجي نتايج

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 انتگرال گیری 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 با 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 1-3 به همراه نتایج تجربی، در شکل 6 نمایش داده شده است. همان طور 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 شبیه سازی 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 کرنشسنج 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 مى باشد.





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

مهندسی مکانیک مدرس، مرداد 1394، دورہ 15، شمارہ 5

25

30

30

30

4- نتايج 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 می گیرد. دلیل این امر را می توان در رژیم حاکم بر جریان جستجو کرد. در سرعتهای زیر 10 متر بر ثانیه، جریان به صورت کاملا 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 می گیرد. 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 می آید [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. شکل دهی ساختارهای مختلف پره با استفاده از مواد اشاره شده در جدول 3 ممکن می باشد؛ 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 مستحكم تر 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 یرههای با ساختار 2 (یوسته از جنس ایوکسی گلاس، ریشه و اسیار از جنس فیبر کربن) و ساختار 6 (کل پره از جنس آلومنیوم) نیز بسیار نزدیک به ساختار 1 مىباشد.

آلومنيوم	اپوکسی گلاس تک جهته	فيبركربن پيش آغشته تک جهته GPa 395	فيبركربن پيش أغشته تک جهته GPa و 230	دە	مشخصات ما		
2770	2000	1480	1420		جرم حجمی kg/m³		
	45000	91820	61340	_ جهت x			
71000	10000	91820	61340	جهت <i>y</i>	مدول الاستيسيته		
	10000	9000	6900	جهت z	MPa		
	5000	19500	19500	 جهت xy			
26692	3846	3000	2700	جهت yz	مدول برشی		
	5000	3000	2700	جهت xz	мра		
	0/3	0/027	0/27	 جهت xy			
0/33	0/4	0/4	0/4	جهت yz	ضريب پواسون		
	0/3	0/27	0/27	جهت xz			
	0/0244	0/0092	0/0167	_ جهت x			
-	0/0035	0/0031	0/0032	جهت <i>y</i>	حد بیشینه		
	0/0035	0/0031	0/0032	جهت z	درىش دششى		
	0/016	0/016	0/012	 جهت xy			
-	0/012	0/012	0/011	جهت yz	حد بیشینه		
	0/016	0/016	0/012	جهت XZ	ىرىس برسى		

[]	0]	پرہ	ساختار	، در	استفاده	مورد	مواد	مكانيكى	مشخصات	3	ول	جد
----	----	-----	--------	------	---------	------	------	---------	--------	---	----	----

جدول 4 ساختارهای مختلف تعریف شده در تولید پرهها

ریشەی پرە	اسپار	پوستەي پرە	ساختارهای مختلف			
فيبر كربن GPa 395	د فيبر كربن GPa 2 30	فيبر كربن GPa 230	ساختار (1)			
فيبر كربن GPa 395	فيبر كربن GPa 230	اپوكسى گلاس	ساختار (2)			
فيبر كربن GPa 230	اپوكسى گلاس	اپوكسى گلاس	ساختار (3)			
اپوكسى گلاس	اپوكسى گلاس	اپوكسى گلاس	ساختار (4)			
اپوكسى گلاس	آلومنيوم	اپوكسى گلاس	ساختار (5)			
آلومنيوم	آلومنيوم	آلومنيوم	ساختار (6)			
جدول 5 وزن سازهی پره در ساختارهای مختلف						
(وزن سازهی پره (kg	ساختارهای مختلف	<u>ى</u>			

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

با توجه به شکل 9 می توان 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 فیبر کربن است. جدول 5 وزن سازهی پره را در ساختارهای مختلف ِبررسی شده نشان میدهد.

جدول 5 کمترین مقدار وزن سازه را در ساختار 1 (یرهی 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 می سد، وزن تقریبا دو برابری آن نسبت به ساختار فیبر کربنی به عنوان عاملی نامطلوب ارزیابی می گردد. از بین شش ساختار بررسی شده، به نظر میرسد، بهترین حالت، ساختار 2 (پوسته از جنس اپوکسی گلاس، ریشه و اسپار از جنس فیبر کربن) باشد؛ چون علاوه بر تغییر شکل اندک و وزن پایین، با توجه به ارزانتر

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 جـزء به دست آمده و از نظر معيار شكست مورد بررسي قرار گرفته است. اين كار 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.

همان طور که از نتایج شکل 10 برمی آید، با کاهش ضخامت اجزای مختلف یره، مقدار بیشینه کرنش کششی افزایش خواهد داشت. با کاهش ضخامت اجزای مختلف به نصف مقدار اولیه، بیشینه کرنش در اسیار پره در جهت z از مقدار بیشینه کرنش قابل تحمل (جدول ${f S})$ بالاتر خواهد رفت و zماده 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 كرنش بحراني كه محدود كنندهي كاهش ضخامت (راستای ضخامت ماده) z (راستای ضخامت ماده) اجزای پره است. کرنش کششی در جهت محور zدر 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 مقادير كاهش بيش از 0/3 ضخامت اوليه 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 تغيير شكل پره افزايش خواهند داشت.

برای انتخاب نهایی ضخامت پره، بایستی ضریب اطمینان مناسبی نیز

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 می تواند 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- نتيجه گيري و جمع بندي

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.



ضخامتهای مختلف



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



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 اوليهي 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 vawed 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

- [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.