ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



# محمد رضا صابر<sup>1</sup>، محمد حسن جوارشکیان<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا- پیشرانش، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

\* مشهد، كديستى javareshkian@um.ac.ir،9177948974

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 04 دی 1392 پذیرش: 02 بهمن 1392 ارائه در سایت: 20 اَبان 1393	در این تحقیق، دو پره بهینه شده و مبنا یک توربین بادی محور افقی از دیدگاه ایروالاستیسیته مقایسه شدهاند. به منظور بهینهسازی پره، ابتدا با استفاده از تئوری المان پره برای شرایط عملکردی خاص، وتر و زاویه نصب بهینه در مقاطع مختلف شعاعی پره محاسبه میشود. سپس شکل بالواره ها نیز توسط حل جریان لزچ، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی در زوایای حمله مختلف بهینه میگردد و در نهایت شکل پره بهینه شده است المراد هه نیز توسط حل جریان لزچ، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی در زوایای حمله مختلف بهینه میگردد و در نهایت شکل
کلید واژگان: توربین باد تئوری BEM الگوریتم ژنتیک شبکه عصبی بهینه سازی	استخراج می سود. سبخه به کار کرفته سده در این تحقیق از نوع بی سازمان با المان های چهار وجهی می اسد. در روند سبیه سازی جزیان سیل از الگوریتم سیمپل و روش مرتبه دوم بالا دست استفاده شده است. روند تحلیل به این صورت است که ابتدا نیروهای فشاری و لزجتی توسط حل دینامیک سیالات محاسباتی بر روی گردهای شبکه پره محاسبه می شوند، سپس این نیروها بطور مستقیم در تحلیل الاستیسیته پره مورد استفاده قده است. روند تحلیل به این صورت است که ابتدا نیروهای فشاری و لزجتی توسط حل دینامیک سیالات محاسباتی بر روی گردهای شبکه پره محاسبه می شوند، سپس این نیروها بطور مستقیم در تحلیل الاستیسیته پره مورد استفاده قده است. روند تحلیل به این صورت است که سیالات محاسباتی بر روی گردهای شبکه پره محاسبه می شوند، سپس این نیروها بطور مستقیم در تعل گرفته شده است. قرار می گیرند.در این مرحله، علاوه بر نیروهای ایرودینامیکی، نیروهای اینرسی حاصل از چرخش پره توربین باد نیز در نظر گرفته شده است. تایج حاصل از تحلیل ایرودینامیکی بروی پرهها حاکی از افزایش راندمان و اختلاف فشار بیشتر در طرفین پره بهینه شده می شد. تنایج حاصل از تحلیل ایرودینامیکی بروی پرهها حاکی از افزایش راندمان و اختلاف فشار بیشتر در طرفین پره بهینه شده می شد. تنایج حاصل از تحلیل ایرودینامیکی بروی پرهها حاکی از افزایش راندمان و اختلاف فشار بیشتر در طرفین پره بهینه شده می باشد. نتایج حاصل از تحلیل ایرودینامیکی بره می باشد. نتایج حاصل از تحلیل تش - کرنش نیز نشان می دهد که تنش ماکزیم در پره بهینه شده کمتر از پره مبنا، ضریب اطمینان و توان متوسط توربین با پره به دند به ترب از بره می از در منانهای می دود که تنش ماکزیمه در پره بهینه شده کمتر از پره مبنا، ضریب اطمینان و توان متوسط توربین با پره به دند. در تر با در می بالاستان می دود که تنش ماکزیم در پره بهینه شده کمتر از پره مینا، خرمین می می ایندان می می در می می می به در می می می می می می می با پره مده می می شد.

# Comparison of aeroelastic performance base and optimized blades of horizontal axis wind turbine

### Mohamad Reza Saber<sup>1</sup>, Mohamad Hassan Djavareshkian<sup>2\*</sup>

1- Department of Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

\* P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran, javareshkian@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract	
Original Research Paper Received 25 December 2013 Accepted 22 January 2014 Available Online 11 November 2014	In this study, the results of two optimized and base blades of a horizontal axis wind turbine with aerodynamic point of view and analysis of the stresses and strains are compared. The aerodynamic forces are obtained by solving the viscous flow and the optimization is done by genetic algorithm and neural network. By applying the aerodynamic loads, the stress and strain	
<i>Keywords:</i> BEM Genetic Algorithm Neural Network Optimization	are analyzed. For optimization, the chord length and the twist angle of the blade at various radiuses have been calculated by BEM. The Navier Stokes equations are solved to simulate both two and three dimensional flows. The results which are obtained from 2D Computational Fluid Dynamics (CFD) have been utilized to train a Neural Network (NN). In the process of airfoil optimization, Genetic Algorithm (GA) is coupled with trained NN to attain the best airfoil shape at each angle of the attack. First, the results of both optimized and base wing are compared then the aerodynamic forces on the blades are applied for stress analysis. The results of the analysis of the stress - strain showed that optimized wing improves the wing performance.	

#### 1 - مقدمه

و همچنین به علت پیچیده بودن هندسه، که سبب میشود روشهای تحلیلی در این موارد ناکارامد باشند، استفاده از روش های عددی راهحل مناسبی میباشد. به عبارت دیگر برای بررسی یک طرح جدید از پرههای توربین باد یکی از روشهای مناسب مدلسازی عددی آن میباشد. مین سوجیونگ و همکارانش [1] تاثیرخطای یاو توربین باد محور افقی را روی مشخصههای ایروالاستیسیته مبتنی بر روش گردابه های آزاد دنباله و تئوری مومنتوم المان پره بررسی کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که مقدار میرایی ایرو الاستيسيته در بدترين شرايط مي تواند تا 33 درصد كاهش پيدا كند. ون لي

قدرت بهره برداری از سیستم های انرژی باد تاثیر بالایی در تجزیه و تحلیل اقتصادی این نوع از انرژی ها را داراست و گرفتن انرژی از باد، به طراحی تیغههای توربین باد و فاکتورهای مربوطه وابسته است. توربینهای بادی در معرض تنشها و بارگذاریهای مختلفی قرار دارند که به دلیل ماهیت باد، این بارگذاریها به شدت متغیر میباشند. طراحی برای بارگذاری دینامیکی در مقایسه با بارگذاری استاتیکی به دلیل بوجود آمدن پدیده خستگی به مراتب دشوارتر است. از آن جا که بررسیهای تجربی بسیار پرهزینه و وقت گیر بوده

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: M.R. Saber, M.H. Djavareshkian, Comparison of aeroelastic performance base and optimized blades of horizontal axis wind turbine, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 283-290, 2015 (In Persian)

و همکارانش [2] به بررسی مشخصات ایروالاستیسیته مبتنی بر دینامیک اجسام انعطاف پذیر با استفاده از نرم افزار انسیس پرداختند و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. کاردناس و همکارانش [3] با استفاده از یک روش ترکیبی کاهش مرتبه و ساده سازی به مدل تیرهای نازک میزان و محل آسیب به پرهای توربین باد را ارزیابی کردند. ال کو [4] به مطالعه رفتار ایروالاستیک یک ایرفویل انعطاف پذیر توربین بادی پرداخت. در این روش با استفاده از یک کد ترکیبی، با بکارگیری نرم افزار ایکس فویل برای محاسبات ایرودینامیکی و نرم افزار متلب برای آنالیز جامداتی، تاثیر انعطاف پذیری بالواره را در طراحی پارامترهای مختلف بررسی نمود. باکس وانو [5] با استفاده از یک مدل عددی جدید ایروالاستیک که حاصل از ترکیب حلگر ناویر-استوکس با مدل الاستیک و دو روش ترکیبی برای مطالعه رفتار ایروالاستیک در شرایط بال زدن می باشد، به بررسی پارامترهای ایروالاستیک روی پره پرداخت. فرنو [6] یک روش محاسباتی غیرخطی موثر برای آنالیز یک پره توربین باد به کار برد. او برای این کار پره توربین را با یک تیر یکسر گیردار غیر یکنواخت تقریب زد که باعث کاهش هزینه محاسباتی آنالیز شد. مارتین [7] پارامترهای وابسته به پرهای توربین بادی انعطاف پذیر با مواد الاستیک را بررسی کرد. او یک مدل ریاضی برای پیش بینی مقدار تغییر شکل ناشی از نیروهای ایرودینامیک بروی پره توربین باد به کار برد که نتایج نشان داد که یک ایرفویل را میتوان با یک تیر غیرمنشوری تقریب زد. دال مونته [8] به بهینهسازی جامداتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه روی پره توربین بادی با مواد کامپوزیتی پرداخت که سبب کاهش وزن پره و افزایش استحکام در لبهها شد. جین چن و همکارانش [9] به مطالعه بهینهسازی جامداتی پره توربین باد پرداختند که در این روش با استفاده از یک روش ترکیبی مبتنی بر تئوري المان پره و الگوريتم ازدحام ذرات، پره را بهينه كردند كه نتايج اين روش باعث کاهش وزن پره و تغییر چگالی جرمی پره شد. باکنی و همکاراش [10] به بهینهسازی جامداتی پره توربین بادی با استفاده از تکنیک بهینهسازی توپولوژی پرداخت. آنها با این روش توانستند به بیشترین سختی و کمترین تنش در روی پره برسند. نتایج این روش نشان داد که پره تحت خمش های نامتقارن بطور موثرتری عمل می کند.

در بیشتر تحقیقات انجام شده از یک سری فرضهایی برای ساده کردن آنالیز جریان و مدلسازی استفاده شده است از جمله: 1- فرض جریان دوبعدی برای هر مقطع 2- عدم استفاده از معادلات ناویر استوکس برای تحلیل و اکتفا به روشهای المان محدود یا حل جریان اویلر 3- برای مدل پره از تقریب تیر یکسر گیردار استفاده شده است 4- در این تحقیق نتایج تنش لزجت سیال و فشار دقیقا بر روی پره اعمال گردیده و نیاز به نرمافزار رابط برای میانیابی یا درونیابی نمیباشد. علاوه بر موارد فوق، در الگوریتم بهینهسازی استفاده شده، پس از آموزش شبکه عصبی، برای بهینه کردن نیاز مجدد به حل جریان روی پره نمیباشد بلکه با الگوریتم ژنیتیک توسط یک سری روابط ریاضی (بدون حل جریان سیال روی پره که بسیار زمان گیر میباشد) بهینهسازی صورت میگیرد.

هدف از این تحقیق بهینهسازی پویاتر و در عین حال کاهش در زمان محاسبات و مقایسه عملکرد آیروالاستیسیته پره توربین بهینه شده و مبنا یک توربین باد جریان محوری میباشد. در این تحقیق پس از مقایسه آیرودینامیکی پرهها، نیروهای فوق بر روی گرههای شبکه پره بهینه شده و مبنا، اعمال و توسط نرمافزار انسیس تحلیل تنش میشوند. در ابتدای این تحقیق، اعتبارسنجی برای تحلیل آیرودینامیکی و تنش، صورت گرفته است و در انتها پس از شبیه سازی و تحلیل، تنش، کرنش و تغییر مکانهای گرهای

استخراج گردیده و دو پره از دیدگاه فوق مقایسه شده است.

#### 2- معادلات حاكم

معادلات حاکم برای تحلیل جریان سیال و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی عبارتند از معادلات بقای جرم، مومنتوم و اسکالر میباشند. بهمنظور مدلسازی اثر آشفتگی جریان از مدل $\kappa - \epsilon$  استفاده شده است. معادلات فوق توسط روش حجم محدود گسسته شده و ترم جابجایی توسط روش متغیرهای بیبعد شده کنترل و محدود گردیده است. معادلات گسسته شده توسط الگوريتم سيمپل حل شده است. بهمنظور بهينهسازي، شبكه عصبي و الگوریتم ژنتیک برای پردازش داده ها اعمال گردیده است. جزئیات بیشتری از معادلات حاكم گسسته شده، الگوريتم حل جريان سيال و الگوريتم بهینهسازی آیرودینامیکی در مرجع [11] آورده شده است. بهمنظور تحلیل الاستیسیته برای دو پره، از روش سختی یا تغییر مکان برای تحلیل استفاده شده است که در این روش مجهولات, تغییر مکانهای گرهای میباشند. با در نظر گرفتن معادلات تعادل<sup>1</sup> و سازگاری<sup>2</sup> در هر گره به مجموعهای از معادلات جبرى دست خواهيم يافت كه برحسب مجهولات تغيير مكان گرههاى مرتب شدهاند. با استفاده از معادلههای تعادل روابط بین نیروها و تغییر مکانها محاسبه می شوند و با بدست آوردن یک دستگاه معادله های جبری و حل آن، تغییر مکان های گرهای محاسبه می شوند [12].

معادلات تعادل درحالت سه بعدی در رابطه 1 آورده شده است.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = \mathbf{0}$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + F_z = \mathbf{0}$$
(1)

معادلات کرنش - تغییر مکان برای یک المان مکعب مستطیل به ابعاد  $d_x$ ،  $d_y$  محور  $d_z$  و u تغییرمکان در جهتهای محور  $d_z$  و  $d_z$  در رابطه 2 آورده شده است که u, v و u تغییرمکان در جهتهای محور مختصات می باشند. المان تنش در حالت دوبعدی درشکل 1 آورده شده است.

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases}$$
(2)

$$\sigma_{y} = 2 G \mathcal{E}_{y} + \lambda e \quad \tau_{yz} = G \gamma_{yz}$$
  

$$\sigma_{z} = 2 G \mathcal{E}_{z} + \lambda e \quad \tau_{xz} = G \gamma_{xz}$$
(3)



<sup>1-</sup> Equilibrium 2- Compatibility

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16



شکل 3 شبکه و نیروهای ایرودینامیکی بر روی گرههای پره توربین

$$e = \mathcal{E}_x + \mathcal{E}_y + \mathcal{E}_z \tag{4}$$

$$\lambda = \frac{v E}{G + V G + 2N} \tag{5}$$

که در معادله 3،  $\sigma$  تنش عمودی,  $\tau$  تنش برشی,  $\mathcal{E}$  کرنش عمودی و  $\gamma$  کرنش e برشی میباشد. به G مدول برشی و مقدار  $\lambda$  ثابتهای لامه می گویند. eنشاندهنده کرنش حجمی<sup>2</sup> یا تغییرات حجم در واحد حجم می باشد [13]. با حل این پانزده معادله و پانزده مجهول می توان مسائل الاستیسیته را در حالت سهبعدی حل نمود. در ابتدا با توجه به نوع سازه یا قطعه میتوان مدل هندسی را از ترکیب نقاط، خطوط، سطوح و احجام بهدست آورد. در اغلب نرمافزارهای المان محدود میتوان مدل هندسی را توسط خود نرمافزار ایجاد نمود یا این که مدل هندسی ساخته شده در یک محیط نرمافزاری دیگر را فراخوانی نمود. در اینجا ابعاد هندسی پره توربین بادی که توسط الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بهینه شده است، در نرمافزار سالیدورک<sup>8</sup> ساخته شده است. هندسه پره توخالی بوده و ضخامت آن 0/02وتر می باشد. شکل2 هندسه مدل را نشان میدهد.

حال برای ایجاد شبکه حجم پره، ابتدا خطوط پره شبکهبندی شده سپس سطوح مقطعهای پره به صورت بیسازمان مثلثی شبکهبندی میشود و در نهایت حجم پره شبکه میخورد. شرایط مرزی به کار رفته در این شبیه-سازی عبارت است از ثابت بودن گرههای روی خط محور اصلی روتور توربین باد و نیز غیرچرخشی بودن این گرهها در راستای عمود بر محور دوران میباشد. جزئیات مربوط به معادلات حاکم و شرایط مرزی در تحلیل ایرودینامیکی بطور کامل در مرجع [11] آورده شده است. در این شبیهسازی علاوه بر اعمال نیروهای فشاری حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی بر

روی پره توربین، نیروی اینرسی حاصل از چرخش پره توربین نیز در نظر گرفته شده است که در اینجا سرعت باد 20 متر بر ثانیه و سرعت چرخشی توربین نیز 8/235 رادیان بر ثانیه میباشد. شبکهبندی ایجاد شده و اعمال نیروهای ایرودینامیکی بر روی گرههای پره توربین باد در شکل 3 نشان داده شده است. برای حل عددی یک سازه به صورت المان محدود لازم است که ابتدا ماتریس سختی تکتک المانها بهدست آید. با بهدست آوردن ماتریس سختی، معادله های حاکم بر رفتار یک المان از فرمول 6 بدست می آید: (6)

#### ${f}^{e} = [k]^{e} {d}^{e}$

که در آن <sup>\*</sup>{f} بردار نیروهای گرهای المان، <sup>\*</sup>[K] ماتریس سختی المان و <sup>\*</sup>{d} بردار درجات آزادی گرهای المان یا تغییر مکان گرهای میباشد.

با استفاده از روی هم گذاری ماتریس های سختی المان ها، ماتریس سختی کلی سازه بهدست میآید. روابط 7 و 8 برای روی هم گذاری ماتریس سختی المانها، بردار نیروهای گرهای المانها و بردار درجات آزادی آنها نوشته مىشود.

$$[k] = \sum_{e=1}^{n} [k]^{e}, (f) = \sum_{e=1}^{n} (f)^{e}, (d) = \sum_{e=1}^{n} (d)^{e}$$
c, it is a number of the second state of th

(8)

#### ${f} = [k]{d}$

که در آن {f} بردار نیروهای گرهای کل سازه، [K] ماتریس سختی کل سازه و {a} بردار درجات آزادی گرهای یا تغییر مکانهای عمومی کل سازه می باشند. در نوشتن معادله فوق شرایط مرزی حاکم بر مسئله نیز اعمال می گردد. در این مرحله معادله عمومی کل سازه به روش گاوس یا گاوس- سایدل و یا روشهای عددی دیگر حل می شود و تغییر مکان های *d*i محاسبه می شوند. با استفاده از di های محاسبه شده در مرحله قبل و همچنین با استفاده از معادلههای کرنش- تغییر مکان و تنش- کرنش، مقدار تنشها و کرنشها در المانها محاسبه مىشوند.

#### 3- نتايج

در ابتدا مختصری از نتایج دینامیک سیالات محاسباتی که در روی پره بهینه شده و مبنا انجام گرفته، ارائه می شود سپس نتایج حاصل از تحلیل جامداتی آورده می شود. پره بهینه شده نوع اپلر E387 می باشد. طول این پره 17 متر، سرعت زاویهای 6/17 رادیان بر ثانیه، سرعت باد 15 متر بر ثانیه و زاویه ییچش از 2/5- تا 20/4 درجه تغییر می کند و متوسط عدد رینولدز 4500000 مى باشد. پس از استقلال از حوزه حل محاسباتى و شبكه بهكار گرفته شده، که در شکلهای 4 و 5 نشان داده شده است[11]، به منظور اعتبارسنجی نتایج، توزیع ضریب فشار در 50% شعاع پره برای روش عددی حاضر با نتایج تجربیNREL [14] در مقطع پره S809 مقایسه شده است که در شکل 6 نشان داده شده است. در این مقایسه اختلافی بین دو نتایج مشاهده می شود که می تواند ناشی از مدل آشفتگی جریان، جدایش جریان، ویکهای پایین دست جریان و گردابههای نوک باشد که توسط روش عددی بخوبی تسخیر نشده است. در شکل 7 مقاطع بالواره بهینه شده و مبنا در تعدادی از زوایای حمله نشان داده شده است[11].

شکل 8 و 9 ضریب فشار برای دو مقطع 95% و 50% شعاع پره برای بالواره بهینه شده و مبنا را نشان میدهد. این منحنیها نشان میدهد که تغییر قابل ملاحظه پس از بهینهسازی در روی توزیع فشار در مقاطع اشاره شده بوجود آمده است. شکلهای 10 و 11 ضریب رانش و توان را بهترتیب در توربین باد در دو حالت پره بهینه شده و مبنا تابعی از نسبت سرعت نوک پره نشان میدهد. از شکلهای ارائه شده مشخص است که پره بهینه شده نسبت

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.30.9

285

<sup>1 -</sup> Lame constants

<sup>2-</sup> Dilatation 3- solid work

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16

به پره مبنا اختلاف فشار بیشتری را در دو سمت پره ایجاد میکند و سبب میشود پره در حالت بهینه شده توان بزرگتری را تولید نماید. مشخصه نیروی محوری یا همان رانش نیز در حالت بهینه در حدود 22% افزایش یافته است که خود رقمی قابل توجه میباشد[11].





**شکل 9** ضریب فشار در مقطع50% شعاع پره در سرعت 20متر برثانیه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-06]

DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.16.30.9 ]

<b>جدول 2</b> خصوصيات مواد			
<b>1500</b> kg/m^3	چگالی		
1/2×10 <sup>-5</sup> 1/ <i>C</i>	ضريب انبساط حرارتي		
<b>434</b> J/kg.c	گرمای ویژه		
<b>60/5</b> w/m.c	هدایت حرارتی		
1/7×10 <sup>-7</sup> ohm.m	مقاومت ويژه		
0/3	ضريب پواسون		
پاسکال <sup>11</sup> 1×1/9	مدول يانگ		
پاسكال <sup>11</sup> پاسكال 10×1/5833	مدول بالک		
پاسكال <sup>10</sup> x10×7/3077	مدول برشی		
پاسکال <sup>8</sup> 3/7×3/	استحكام تسليم فشارى		
پاسکال <sup>8</sup> 3/5×3/	استحكام تسليم كششى		
پاسکال <sup>8</sup> 4/6×10	استحکام کششی نهایی		

هدف از تحلیل جامداتی در اینجا بررسی تحلیل تنش و کرنش بر روی پرههای مبنا و بهینه شده میباشد. حال میخواهیم بررسی کنیم آیا پره بهینه شده توانایی تحمل بارهای ایرودینامیکی را دارد و ضریب اطمینان روتور توربین باد چقدر میباشد و این که تنش ماکزیمم اصلی پره روتور از حد تنش تسلیم ماده بالاتر نرفته باشد. بهمنظور اعتبارسنجی پره توربین باد در تحلیل جامداتی، ابتدا پره را با یک تیر یکسر گیردار تقریب زده و نیروی فشاری غیریکنواخت را به تیر اعمال کرده و نتایج حل دقیق با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده است. طول تیر 10 متر و ابعاد مقطع آن 0/2 متر در عرض و 0/5 متر در ارتفاع می باشد. محاسبات زیر برای بهدست آوردن تنش ماکزیمم و جابجایی دقیق انتهایی تیر انجام گرفته است. شکل12 مقایسه جابجای در طول تیر در حالت تئوری و عددی را نشان میدهد.

$$y'' = \frac{M(x)}{E_{L}}, y'(0) = 0, y(0) = 0$$
 (9)

$$M_{(x)} = -6666.66 + 1000 \text{ x} - 3.3333 \text{ x}^3$$

$$\begin{cases} y' = \int y'' dx = \frac{1}{E I} [-6666.66x + 500 x^2 - 0.8333 x^4] \\ y = \int y' dx = \frac{1}{E I} [-3333.333 x^2 + 166.66 x^3 - 0.1666 x^5] \end{cases}$$
(11)

$$y_{(10)} = 0.00044 \text{ m}$$
(12)







شکل 10 ضریب نیروی محوری پره در دو حالت پره بهینه شده و مبنا



**شکل 11** ضریب توان توربین باد در دو حالت پره بهینه شده و م

<b>جدول ا</b> توان توربین باد در سرعت های متفاوت			
سرعت باد	توان توربين در حالت	توان توربين درحالت	
m/s	مبناkW	بهینه شده kW	
15	725	906	
20	1363	1684	
25	1883	2285	
35	2418	2902	
	p = 1597	1944 = <sub>بهینهشده</sub> <del>و</del>	

بهمنظور نشان دادن افزایش توان پره بهینه شده، بدلیل این که این پارامتر در سرعتهای باد مختلف، متفاوت می باشد به ازای سرعتهای مختلف بر طبق جدول 1 محاسبه شده است، سپس متوسط توان برای هر دو نوع پره ارائه گردیده است. این محاسبه نشان میدهد درصد افزایش توان متوسط برای توربین 17/83% میباشد. مسلما در طراحی، پارامترهای دیگری از جمله پروسه و هزینه ساخت از فاکتورهای مهم میباشد که در عمل با توجه به در نظر گرفتن همه فاکتورها تغییرات اعمال می شود.

$$\sum_{=1}^{n} \frac{p_{\text{ هینهشده}}}{p_{\text{ هینهشده}}} imes$$
 = درصد افزایش توان

#### 3-1- خصوصيات مواد بكار گرفته شده

خصوصیات مواد به کار گرفته شده در این تحقیق در جدول 2 آمده است.

در شکلهای زیر ابتدا تغییر شکل حاصل از اعمال نیروها نشان داده میشود و با توجه به این که نیروهای ایرودینامیکی در کل شامل برآ و پسا میباشند لذا انتظار میرود که پره در جهت اعمال این نیروها خم شود برای آن که این امر مشخص شود نمودارهایی برای تغییر شکل پره در جهات مختلف رسم گردیده است و پره حالت مبنا و بهینه با یکدیگر مقایسه شدهاند. در نهایت تنش ون میزز، تنش برشی ماکزیمم، کرنش نرمال و ضریب اطمینان در روی پره نمایش داده میشود. پره مبنا و بهینه شده را بهترتیب نشان میدهد و شکل 15 مقایسه تغییر شکل در راستای محور دوران برحسب شعاع در روی پره بهینه شده و مبنا را نشان میدهد. مشاهده میشود هرچه شعاع افزایش مییابد اختلاف تغییر مکان در دو پره افزایش مییابد و پره بهینه دارای تغییر مکان کمتر میباشد.

بهعبارت دیگر، جابجایی در نوک پره در حالت بهینه شده تقریبا 35 سانتیمتر و در حالت پره مبنا تغییرات در حدود 77 سانتیمتر میباشد که گویای این است که نسبت به حالت پره مبنا، تغییرات جابجایی در نوک پره در حدود 42 سانتیمتر کمتر شده است که نشان از ممان خمشی کمتر در پره بهینه شده میباشد و از طرفی باعث میشود هندسه پره طراحی شده، دچار تغییرات کوچکتری شود و نیروهای ایرودینامیکی روی پره دستخوش تغییرات کمتری شود چرا که با تغییر هندسه پره، نیروهای ایرودینامیکی روی پره توربین باد از حالت بهینه دور شده و توان توربین باد کاهش میابد.



برحسب متر







شکل 16 توزیع تنش ون میزز بر روی پره مبنا برحسب پاسکال



شکل 17 توزیع تنش ون میزز بر روی پره بهینه شده برحسب پاسکال

در شکلهای 16و 17 توزیع تنش ون میزز را برای دو پره نشان میدهد، در حالت پره مبنا توزیع تنش ون میزز ناحیه گستردهتری را تحت پوشش قرار داده است و علاوه بر آن تنش بیشینه در حالت بهینه شده 53% کاهش داشته است. این کاهش تنش ماکزیمم در پره بهینه شده از چند نقطه نظر مورد بحث میباشد.



**شکل 1**8 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پره مبنا برحسب پاسکال



شکل 19 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پره بهینه شده برحسب پاسکال



**شکل2**0 توزیع کرنش نرمال در جهت محور دوران بروی پره مبنا

1- در دو پره بهینه و مبنا تنش ماکزیمم در نقاط نظیر به نظیر نمیباشد و ضخامت پره در این نقاط یکسان نیست 2- پره بهینه شده دارای لنگر لختی نبزرگتری میباشد که سبب میشود تنش ماکزیمم در پره بهینه شده نسبت به پره مبنا کاهش یابد. 3- در حالت بهینه چون با افزایش ضخامت و سطح مقطع همراه میباشد مسلما افزایش وزن را هم به همراه دارد، بعبارت دیگر اگر از یک فلزی با چگالی 1500 کیلوگرم بر متر مکعب برای ساخت پره استفاده شود، وزنها در حالت بهینه و مبنا تقریبا 17 و 12 تن بترتیب میباشد. اگرچه وزن پره بهینه با چگالی اشاره شده 29% افزایش مییابد با توجه به این که تنش ماکزییم 53% کاهش یافته طراح میتواند نوع مواد پوسته و ضخامت ریبهای استفاده شده در داخل پره را کاهش دهد که این پدیده خود میتواند کاهش وزن را به همراه داشته باشد.

شکلهای 18 و 19 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پرههای مبنا و بهینه شده را نشان میدهد. توزیع تنش برشی ماکزیمم بروی پره بهینه شده، بعلت لنگر لختی سطح [15] بیشتر، توانایی تحمل بارهای بزرگتری را دارد و در برابر خمش موثرتر عمل میکند. از طرفی چون پره مورد نظر صفحه تقارن ندارد همزمان خمش و پیچش می یابد و مرکز برش بر مرکزوار مقطع یره منطبق نیست.

در شکلهای 20 و 21 کرنش نرمال در جهت محور دوران نشان داده شده است که در حالت بهینه شده در حدود 6/75 % کمتر شده است که گویای تنش نرمال محوری کمتر میباشد. و همان طور که مشاهده می شود کرنش نرمال محوری بیشینه تقریبا در  $\frac{1}{5}$ از نوک پره میباشد که احتمال شکست پره در آن محدوده بیشتر از سایر نقاط میباشد.



289

ضریب اطمینان به نسبت استحکام تسلیم ماده به تنش مجاز گفته می شود که همواره برای طراحی های مختلف می بایست بزرگتر از یک باشد. استحکام تسلیم ماده نه به بارگذاری و نه به شکل ماده بستگی دارد و فقط به جنس ماده وابسته است [16]. در این جا از تئوری ون میزز که انرژی اعوجاج یافته یا انرژی واپیچش ماده می باشد استفاده شده است. بر طبق این تئوری ارتباط تنشهای اصلی با ضریب اطمینان (n) و تنش تسلیم ( $_{s}$ ) مطابق معادله 13 می باشد:

[1/2( $(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2$ )]<sup>1/2</sup>  $\geq \frac{S_y}{n}$  (13) حال چون مقادیر تنشهای اصلی در پره بهینه شده نسبت به پره مبنا کمتر میباشد انتظار میرود که مقدار ضریب اطمینان بزرگتری را داشته باشد. در شکلهای 22 و 23 مقدار مینیمم ضریب اطمینان در حالت پره مبنا 1/9 و در حالت بهینه 2/4 نشان داده شده است که افزایش 19/7% را بههمراه دارد.

## 4- نتیجه گیری

در این تحقیق، نتایج دو پره بهینه شده و مبنا یک توربین باد محور افقی از ديدگاه ايروالاستيسيته مقايسه شدهاند. شكل پره بهينه شده توربين باد، توسط حل جريان لزج، الگوريتم ژنتيک و شبکه عصبی استخراج شده و تحلیل تنش و کرنش، با اعمال نیروهای آیرودینامیکی برای دو پره صورت گرفته است. نقاط اصلی این تحقیق عبارتند از 1- در تحلیل آیرودینامیکی توان و نیروی رانش بترتیب 17/83 و 22 درصد در حالت بهینه افزایش یافته است. 2- نرخ رشد ضریب توان و نیروی رانش در حالت بهینه شده بیشتر از حالت مبنا می باشد. 3- در پره بهینه شده، تغییر شکل پره در طول شعاع کمتر از حالت مبنا می باشد که این باعث می شود عملکرد پره از حالت طراحی کمتر فاصله بگیرد. 4- در این شبیهسازی از سادهسازیهای کمتری برای تحلیل استفاده شده و نیروهای فشاری و لزجتی بطور مستقیم بر روی گرههای شبکه پره اعمال شده است. 5- توزیع تنش ون میزز پره در حالت بهینه شده 53 درصد کاهش داشته که این باعث می شود طراح بتواند در انتخاب ماده و نیز ضخامت پره در گستره وسیعتری حقه انتخاب داشته باشد که خود سبب می شود تا پره حاصل سبک تر ساخته شود و نیروهای وارد به شفت و یاتاقانها کمتر و در عین حال از نظر اقتصادی بصرفهتر باشد. **6**-ضریب اطمینان پره نیز در حالت بهینه شده بیشتر از حالت مبنا میباشد. 7-مقادیر تنش و کرنش و تغییر شکلها در حد معقولی میباشد و مقادیر

تنش ماکزیمم در نقاط حساس از تنش تسلیم ماده تجاوز نکرده است. مقدار تنش های ماکزیمم اصلی پره نیز در حالت بهینه شده از پره مبنا کمتر میباشد، چون لنگر لختی پره بهینه شده نسبت به حالت پره مبنا بیشتر میباشد و تنشهای بزرگتری را میتواند تحمل کند و در برابر نیروهای ایرودینامیکی و خمش بطور موثرتری عمل کند.

#### 5- مراجع

- M.S. Jeonga, S. W. Kima, I. Leea, S. J. Yoob and K.C. Parkc, The impact of yaw error on aeroelastic characteristics of a horizontal axis wind turbine blade. 2013.
- [2] J. W. Leea, J. S. Leea and J. H. Han, Aeroelastic analysis of wind turbine blades based on modified strip theory. 2012.
- [3] D. Cárdenasa, H. Elizaldeb, P. Marzoccac and S. Gallegos, A coupled aeroelastic damage progression model for wind turbine blades, 2012.
- [4] E. Hoogedoorna and G. B. Jacobs, Aero-elastic behavior of a flexible blade for wind turbine application: A 2D computational study, 2008.
- [5] C.A. Baxevanoua, P.K. Chaviaropoulosb, S.G. Voutsinasc and N. S. Vlachos, Evaluation study of a Navier-Stokes CFD aero-elastic model of wind turbine airfoils in classical flutter, 2008.
- [6] B.A. Freno and P.G.A. Cizmas, A computationally efficient non-linear beam model, 2011.
- [7] M. Puterbaugh and A. Beyene, Parametric dependence of a morphing wind turbine blade on material elasticity, 2011.
- [8] A. Dal Monte , M. R. Castelli and E.Benini, Multi-objective structural optimization of a HAWT composite blade, 2013.
- [9] J. Chena, Q. Wanga, W. Z. Shenb, X.Panga and S. Li, Structural optimization study of composite wind turbine blade, 2013.
- [10] N. Buckney, A.Pirrera, S. D. Green and P. M. Weaver, Structural efficiency of a wind turbine blade, 2013.
- [11] M.H. Djavareshkian, A. LatifiBidarouni and M.R. Saber, New Approach to High-Fidelity Aerodynamic Design Optimization of a Wind Turbine Blade, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 725-734, 2013.
- [12] O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method in Engineering Science, New York, McGraw – Hill, 1971; W. Weaver, Jr. and P. R. Johnston, Finite Elements for Structural Analysis, Englewood Cliffs,NJ:Prentice-Hall,1984.
- [13] Martin H. Sadd, Theory applications and numeric's Burlington, MA 01803, USA, Linacre House, Jordan Hill ,Oxford OX2 8DP, UK,2009.
- [14] P. Giguere, and M. S, Selig, Design of a Tapared and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor, Nrel/sr-500-26173, NREL, April 1999.
- [15] P. B. Ferdinand and E.R. Johnston, Mechanics of Materials, McGraw-Hill, 1992(second edition), Tehran, Iran. (In Persian)
- [16] Shigley, Mischke. Budynas, Mechanical Engineering Design, 7<sup>th</sup>.ed. 1927, Tehran, Iran. (In Persian)