



مقایسه عملکرد ایروالاستیسیته پره‌های مینا و بهینه شده در توربین بادی محور افقی

محمد رضا صابر¹، محمد حسن جوارشکیان^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا - پیمان‌ش، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
 * مشهد، کدپستی 9177948974، javareshkian@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این تحقیق، دو پره بهینه شده و مینا 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 بالواره‌ها نیز توسط حل جریان لزج، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی در زوایای حمله مختلف بهینه می‌گردد و در نهایت شکل پره بهینه شده استخراج می‌شود. شبکه به کار گرفته شده در این تحقیق از نوع بی‌سازمان با المان‌های چهار وجهی می‌باشد. در روند شبیه‌سازی جریان سیال از الگوریتم سیمپل و روش مرتبه دوم بالا دست استفاده شده است. روند تحلیل به این صورت است که ابتدا نیروهای فشاری و لزجی توسط حل دینامیک سیالات محاسباتی بر روی گره‌های شبکه پره محاسبه می‌شوند، سپس این نیروها بطور مستقیم در تحلیل ایروالاستیسیته پره مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مرحله، علاوه بر نیروهای ایرودینامیکی، نیروهای اینرسی حاصل از چرخش پره توربین باد نیز در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از تحلیل ایرودینامیکی بر روی پره‌ها حاکی از افزایش راندمان و اختلاف فشار بیشتر در طرفین پره بهینه شده می‌باشد. نتایج حاصل از تحلیل تنش - کرنش نیز نشان می‌دهد که تنش ماکزیمم در پره بهینه شده کمتر از پره مینا، ضریب اطمینان و توان متوسط توربین با پره بهینه نیز بیشتر از پره مینا می‌باشد.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 04 دی 1392
 پذیرش: 02 بهمن 1392
 ارائه در سایت: 20 آبان 1393
 کلید واژگان:
 توربین باد
 تئوری BEM
 الگوریتم ژنتیک
 شبکه عصبی
 بهینه سازی

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

Mohamad Reza Saber¹, Mohamad Hassan Djavareshkian^{2*}

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

Original Research Paper
 Received 25 December 2013
 Accepted 22 January 2014
 Available Online 11 November 2014

Keywords:
 BEM
 Genetic Algorithm
 Neural Network
 Optimization

ABSTRACT

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 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 ناکارآمد باشند، استفاده از روش‌های 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 سوچونگ و همکارانش [1] تاثیر خطای یاو توربین باد محور افقی را روی مشخصه‌های ایروالاستیسیته مبتنی بر روش گردابه‌های آزاد دنباله و تئوری مومنتوم المان پره بررسی کردند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که مقدار میرایی ایروالاستیسیته در بدترین شرایط می‌تواند تا 33 درصد کاهش پیدا کند. و ن

قدرت بهره برداری از سیستم‌های انرژی باد تاثیر بالایی در تجزیه و تحلیل اقتصادی این نوع از انرژی‌ها 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 وقت‌گیر بوده

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

2- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای تحلیل جریان سیال و محاسبه نیروهای آیرودینامیکی عبارتند از معادلات بقای جرم، مومنتوم و اسکالر می باشند. به منظور مدل سازی اثر آشفته گی جریان از مدل $\epsilon - K$ استفاده شده است. معادلات فوق توسط روش حجم محدود گسسته شده و ترم جابجایی توسط روش متغیرهای بی بعد شده کنترل و محدود گردیده است. معادلات گسسته شده توسط الگوریتم سیمپل حل شده است. به منظور بهینه سازی، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک برای پردازش داده ها اعمال گردیده است. جزئیات بیشتر از معادلات حاکم گسسته شده، الگوریتم حل جریان سیال و الگوریتم بهینه سازی آیرودینامیکی در مرجع [11] آورده شده است. به منظور تحلیل الاستیسیته برای دو پره، از روش سختی یا تغییر مکان برای تحلیل استفاده شده است که در این روش مجهولات، تغییر مکان های گره ای می باشند. با در نظر گرفتن معادلات تعادل¹ و سازگاری² در هر گره به مجموعه ای از معادلات جبری دست خواهیم یافت که بر حسب مجهولات تغییر مکان گره های مرتب شده اند. با استفاده از معادله های تعادل روابط بین نیروها و تغییر مکان ها محاسبه می شوند و با بدست آوردن یک دستگاه معادله های جبری و حل آن، تغییر مکان های گره ای محاسبه می شوند [12].

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

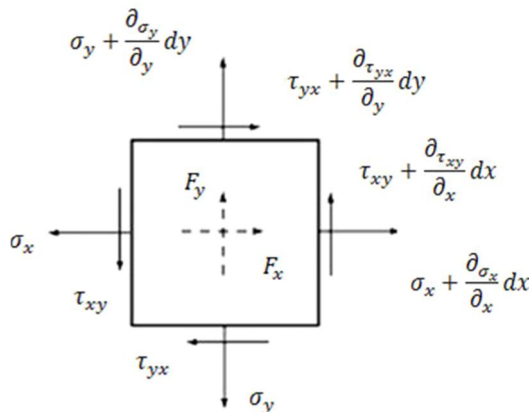
$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + F_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

معادلات کرنش - تغییر مکان برای یک المان مکعب مستطیل به ابعاد d_x, d_y و d_z در رابطه 2 آورده شده است که u, v و w تغییر مکان در جهت های محور مختصات می باشند. المان تنش در حالت دوبعدی در شکل 1 آورده شده است.

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

معادلات تنش - کرنش نیز در رابطه 3 آورده شده است

$$\begin{cases} \sigma_x = 2G \epsilon_x + \lambda e & \tau_{xy} = G \gamma_{xy} \\ \sigma_y = 2G \epsilon_y + \lambda e & \tau_{yz} = G \gamma_{yz} \\ \sigma_z = 2G \epsilon_z + \lambda e & \tau_{zx} = G \gamma_{zx} \end{cases} \quad (3)$$



شکل 1 المان تنش در حالت دو بعدی

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 پره های 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 آیرودینامیکی 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 ناپیر- 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 یکسرگیردار غیر یکنواخت تقریب زد که باعث کاهش هزینه محاسباتی آنالیز شد. مارتین [7] پارامترهای وابسته به پره های توربین بادی انعطاف پذیر با مواد الاستیک را بررسی کرد. او یک مدل ریاضی برای پیش بینی مقدار تغییر شکل ناشی از نیروهای آیرودینامیک بروی پره توربین باد به کار برد که نتایج نشان داد که یک ایرفویل را می توان با یک تیر غیرمنشوری تقریب زد. دال مونت [8] به بهینه سازی جامداتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه روی پره توربین بادی با مواد کامپوزیتی پرداخت که سبب کاهش وزن پره و افزایش استحکام در لبه ها شد. جین چن و همکارانش [9] به مطالعه بهینه سازی جامداتی پره توربین باد پرداختند که در این روش با استفاده از یک روش ترکیبی مبتنی بر تئوری المان پره و الگوریتم ازدحام ذرات، پره را بهینه کردند که نتایج این روش باعث کاهش وزن پره و تغییر چگالی جرمی پره شد. باکنی و همکارانش [10] به بهینه سازی جامداتی پره توربین بادی با استفاده از تکنیک بهینه سازی توپولوژی پرداخت. آن ها 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 فرض هایی برای ساده کردن آنالیز جریان و مدل سازی استفاده شده است از جمله: 1- فرض جریان دوبعدی برای هر مقطع 2- عدم استفاده از معادلات ناپیر استوکس برای تحلیل و اکتفا به روش های المان محدود یا حل جریان اوایلر 3- برای مدل پره از تقریب تیر یکسر گیردار استفاده شده است 4- در این تحقیق نتایج تنش لزجت سیال و فشار دقیقاً بر روی پره اعمال گردیده و نیاز به نرم افزار رابط برای میان یابی یا درون یابی نمی باشد. علاوه بر موارد فوق، در الگوریتم بهینه سازی استفاده شده، پس از آموزش شبکه عصبی، برای بهینه کردن نیاز مجدد به حل جریان روی پره نمی باشد بلکه با الگوریتم ژنتیک توسط یک سری روابط ریاضی (بدون حل جریان سیال روی پره که بسیار زمان گیر می باشد) بهینه سازی صورت می گیرد.

هدف از این تحقیق بهینه سازی پویاتر و در عین حال کاهش در زمان محاسبات و مقایسه عملکرد ایروالاستیسیته پره توربین بهینه شده و مینا یک توربین باد جریان محوری می باشد. در این تحقیق پس از مقایسه آیرودینامیکی پره ها، نیروهای فوق بر روی گره های شبکه پره بهینه شده و مینا، اعمال و توسط نرم افزار انسیس تحلیل تنش می شوند. 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 مکان های گره ای

1- Equilibrium
2- Compatibility

روی پره توربین، نیروی اینرسی حاصل از چرخش پره توربین نیز در نظر گرفته شده است که در این جا سرعت باد 20 متر بر ثانیه و سرعت چرخشی توربین نیز 8/235 رادیان بر ثانیه می باشد. شبکه بندی ایجاد شده و اعمال نیروهای ایرودینامیکی بر روی گره های 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 تک تک المان ها به دست آید. با به دست آوردن ماتریس سختی، معادله های حاکم بر رفتار یک المان از فرمول 6 بدست می آید:

$$\{f\}^e = [k]^e \{d\}^e \quad (6)$$

که در آن $\{f\}^e$ بردار نیروهای گره ای المان، $[K]^e$ ماتریس سختی المان و $\{d\}^e$ بردار درجات آزادی گره ای المان یا تغییر مکان گره ای می باشد.

با استفاده از روی هم گذاری ماتریس های سختی المان ها، ماتریس سختی کلی سازه به دست می آید. روابط 7 و 8 برای روی هم گذاری ماتریس سختی المان ها، بردار نیروهای گره ای المان ها و بردار درجات آزادی آن ها نوشته می شود.

$$[k] = \sum_{e=1}^n [k]^e, \{f\} = \sum_{e=1}^n \{f\}^e, \{d\} = \sum_{e=1}^n \{d\}^e \quad (7)$$

در نتیجه معادله عمومی سازی از رابطه 8 بدست می آید:

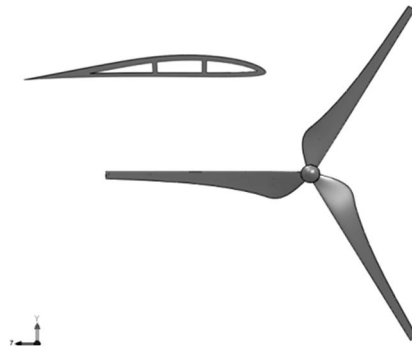
$$\{f\} = [k]\{d\} \quad (8)$$

که در آن $\{f\}$ بردار نیروهای گره ای کل سازه، $[K]$ ماتریس سختی کل سازه و $\{d\}$ بردار درجات آزادی گره ای یا تغییر مکان های 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 گaus-سایدل و یا روش های عددی دیگر حل می شود و تغییر مکان های d_i محاسبه می شوند. با استفاده از d_i های محاسبه شده در مرحله قبل و همچنین با استفاده از معادله های کرنش - تغییر مکان و تنش - کرنش، مقدار تنش ها و کرنش ها در المان ها محاسبه می شوند.

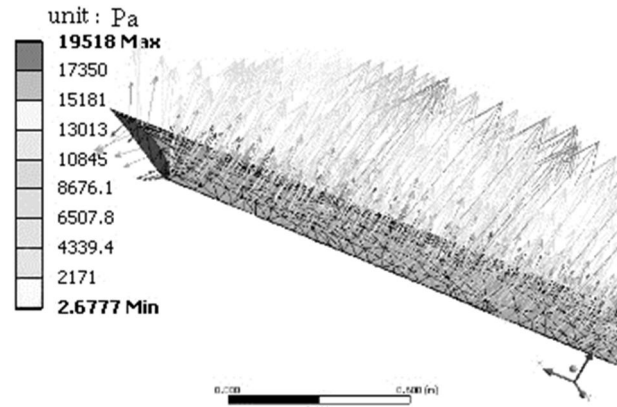
3- نتایج

در ابتدا مختصری از نتایج دینامیک سیالات محاسباتی که در روی پره بهینه شده و مینا 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 زاویه ای 6/17 رادیان بر ثانیه، سرعت باد 15 متر بر ثانیه و زاویه پیش از 2/5- تا 20/4 درجه تغییر می کند و متوسط عدد رینولدز 4500000 می باشد. پس از استقلال از حوزه حل محاسباتی و شبکه به کار گرفته شده، که در شکل های 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 تجربی NREL [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، ویک های پایین دست جریان و گردابه های نوک باشد که توسط روش عددی بخوبی تسخیر نشده است. در شکل 7 مقاطع بالواره بهینه شده و مینا 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 مینا را نشان می دهد. این منحنی ها نشان می دهد که تغییر قابل ملاحظه پس از بهینه سازی در روی توزیع فشار در مقاطع اشاره شده بوجود آمده است. شکل های 10 و 11 ضریب رانش و توان را به ترتیب در توربین باد در دو حالت پره بهینه شده و مینا تابعی از نسبت سرعت نوک پره نشان می دهد. از شکل های ارائه شده مشخص است که پره بهینه شده نسبت



شکل 2 مدل هندسی پره توربین باد



شکل 3 شبکه و نیروهای ایرودینامیکی بر روی گره های پره توربین

که در آن:

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (4)$$

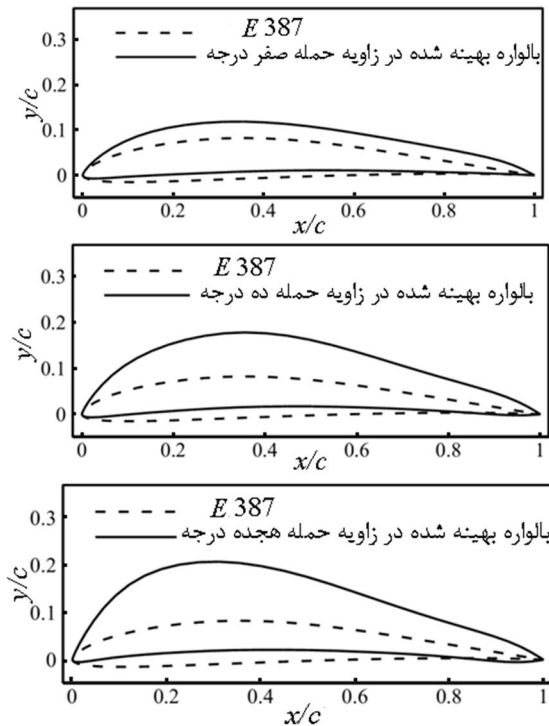
$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (5)$$

که در معادله 3، σ تنش عمودی، τ تنش برشی، ε کرنش عمودی و γ کرنش برشی می باشد. به G مدول برشی و مقدار λ ثابت های لامه¹ می گویند. e نشان دهنده کرنش حجمی² یا تغییرات حجم در واحد حجم می باشد [13]. با حل این پانزده معادله و پانزده مجهول می توان مسائل الاستیسیته را در حالت سه بعدی حل نمود. در ابتدا با توجه به نوع سازه یا قطعه می توان مدل هندسی را از ترکیب نقاط، خطوط، سطوح و اجسام به دست آورد. در اغلب نرم افزارهای المان محدود می توان مدل هندسی را توسط خود نرم افزار ایجاد نمود یا این که مدل هندسی ساخته شده در یک محیط نرم افزاری دیگر را فراخوانی نمود. در این جا ابعاد هندسی پره توربین بادی که توسط الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی بهینه شده است، در نرم افزار سالیدورک³ ساخته شده است. هندسه پره توخالی بوده و ضخامت آن 0/02 متر می باشد. شکل 2 هندسه مدل را نشان می دهد.

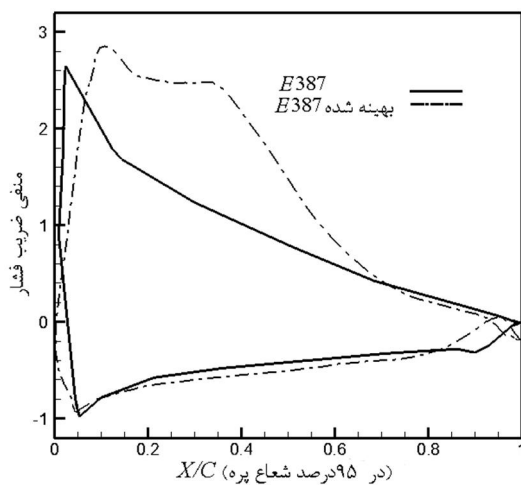
حال برای ایجاد شبکه حجم پره، ابتدا خطوط پره شبکه بندی شده سپس سطوح مقطع های پره به صورت بی سازمان مثلثی شبکه بندی می شود و در نهایت حجم پره شبکه می خورد. شرایط مرزی به کار رفته در این شبیه سازی عبارت است از ثابت بودن گره های روی خط محور اصلی روتور توربین باد و نیز غیر چرخشی بودن این گره ها در راستای عمود بر محور دوران می باشد. جزئیات مربوط به معادلات حاکم و شرایط مرزی در تحلیل ایرودینامیکی بطور کامل در مرجع [11] آورده شده است. در این شبیه سازی علاوه بر اعمال نیروهای فشاری حاصل از حل دینامیک سیالات محاسباتی بر

1- Lamé constants
2- Dilatation
3- solid work

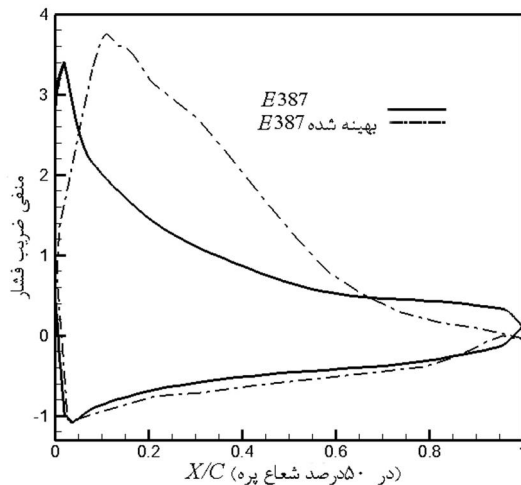
به پره مینا اختلاف فشار بیشتری را در دو سمت پره ایجاد می کند و سبب می شود پره در حالت بهینه شده توان بزرگتری را تولید نماید. مشخصه نیروی محوری یا همان رانش نیز در حالت بهینه در حدود 22% افزایش یافته است که خود رقمی قابل توجه می باشد [11].



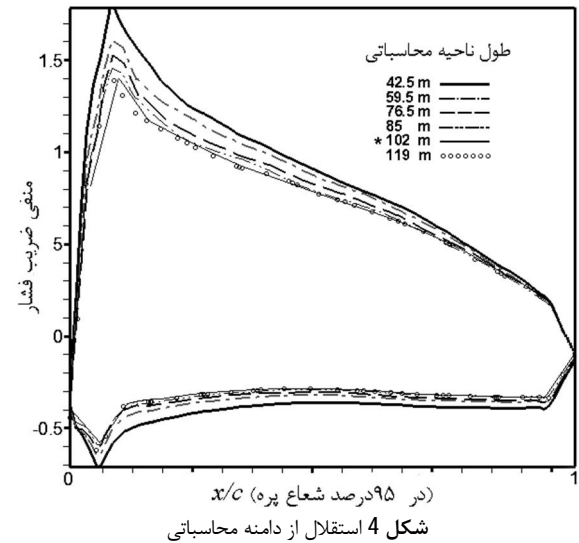
شکل 7 بالواره بهینه شده در تعدادی از زوایای حمله



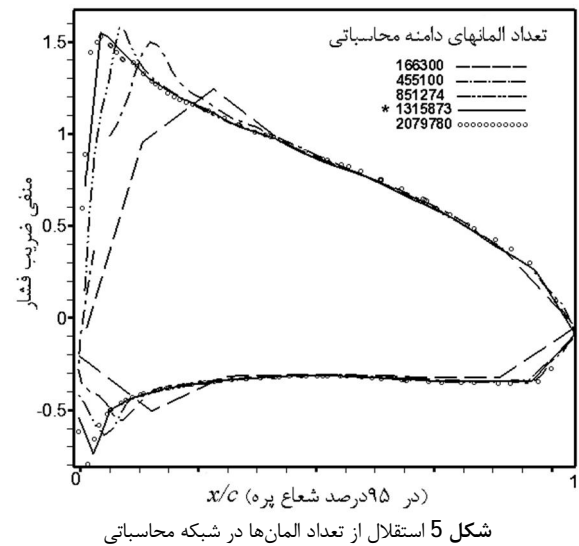
شکل 8 ضریب فشار در مقطع 95% شعاع پره در سرعت 20 متر بر ثانیه



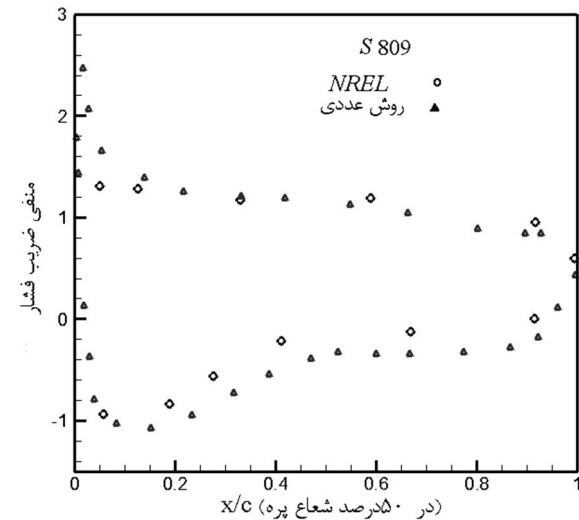
شکل 9 ضریب فشار در مقطع 50% شعاع پره در سرعت 20 متر بر ثانیه



شکل 4 استقلال از دامنه محاسباتی



شکل 5 استقلال از تعداد المانها در شبکه محاسباتی



شکل 6 مقایسه ضریب فشار در 50 درصد شعاع پره توربین

جدول 2 خصوصیات مواد

چگالی	1500 kg/m ³
ضریب انبساط حرارتی	1/C × 10 ⁻⁵
گرمای ویژه	434 J/kg.c
هدایت حرارتی	60/5 w/m.c
مقاومت ویژه	1/7 × 10 ⁻⁷ ohm.m
ضریب پواسون	0/3
مدول یانگ	1/9 × 10 ¹¹ پاسکال
مدول بالک	1/5833 × 10 ¹¹ پاسکال
مدول برشی	7/3077 × 10 ¹⁰ پاسکال
استحکام تسلیم فشاری	3/7 × 10 ⁸ پاسکال
استحکام تسلیم کششی	3/5 × 10 ⁸ پاسکال
استحکام کششی نهایی	4/6 × 10 ⁸ پاسکال

هدف از تحلیل جامداتی در اینجا بررسی تحلیل تنش و کرنش بر روی پره‌های مینا 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. به منظور 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 می‌باشد. محاسبات زیر برای به دست آوردن تنش ماکزیمم و جابجایی دقیق انتهایی تیر انجام گرفته است. شکل 12 مقایسه جابجایی در طول تیر در حالت تئوری و عددی را نشان می‌دهد.

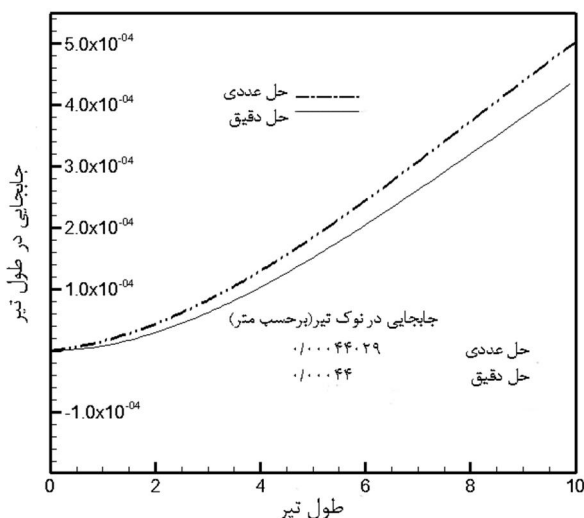
$$y'' = \frac{M(x)}{EI}, y'(0) = 0, y(0) = 0 \quad (9)$$

$$M(x) = -6666.66 + 1000x - 3.3333x^3 \quad (10)$$

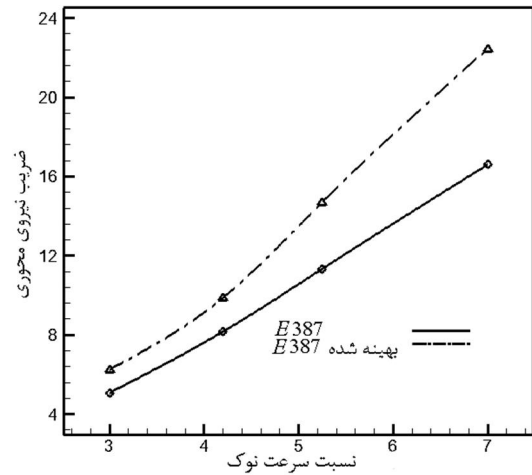
$$\int y'' = \int \frac{M(x)}{EI} dx = \frac{1}{EI} [-6666.66x + 500x^2 - 0.8333x^4] \quad (11)$$

$$y = \int y' dx = \frac{1}{EI} [-3333.333x^2 + 166.66x^3 - 0.1666x^5] \quad (12)$$

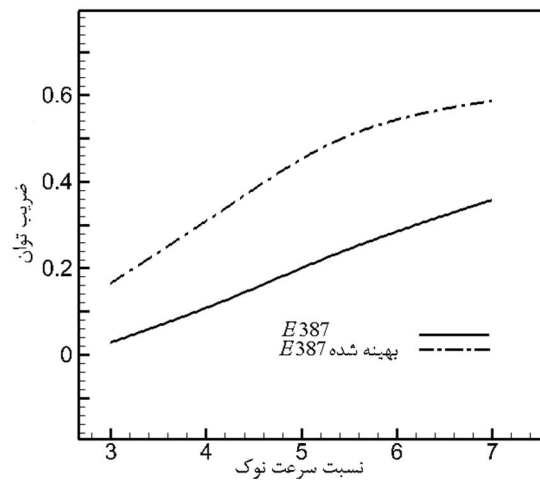
$$y(10) = 0.00044 \text{ m}$$



شکل 12 مقایسه جابجایی در طول تیر در حالت تئوری و عددی



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



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

جدول 1 توان توربین باد در سرعت های متفاوت

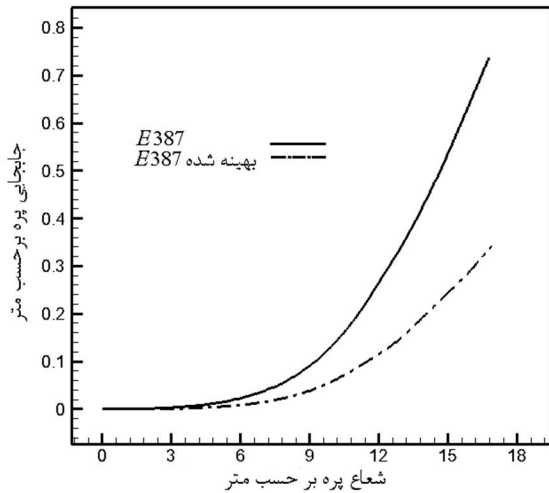
سرعت باد m/s	توان توربین در حالت مینا kW	توان توربین در حالت بهینه شده kW
15	725	906
20	1363	1684
25	1883	2285
35	2418	2902
	$\bar{p}_{\text{مینا}} = 1597$	$\bar{p}_{\text{بهینه شده}} = 1944$

به منظور نشان دادن افزایش توان پره بهینه شده، بدلیل این که این پارامتر در سرعت‌های باد مختلف، متفاوت می‌باشد 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. مسلماً 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 می‌شود.

$$\text{درصد افزایش توان} = \frac{\bar{p}_{\text{بهینه شده}} - \bar{p}_{\text{مینا}}}{\bar{p}_{\text{بهینه شده}}} \times 100$$

3-1- خصوصیات مواد بکار گرفته شده

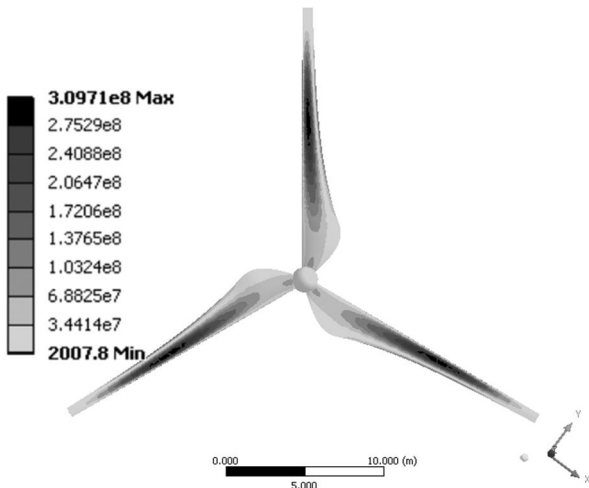
خصوصیات مواد بکار گرفته شده در این تحقیق در جدول 2 آمده است.



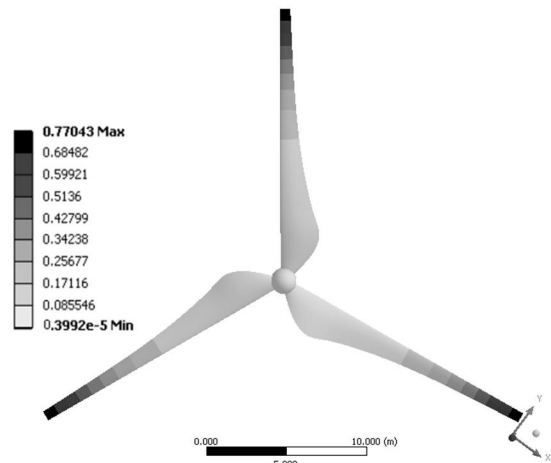
شکل 15 مقایسه تغییر شکل در راستای محور دوران بر حسب شعاع در روی پره بهینه شده و مینا

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 جهت مختلف رسم گردیده است و پره حالت مینا 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. شکل‌های 13 و 14 تغییر شکل حاصل از نیروها در راستای محور دوران در روی پره مینا و بهینه شده را به ترتیب نشان می‌دهد و شکل 15 مقایسه تغییر شکل در راستای محور دوران بر حسب شعاع در روی پره بهینه شده و مینا 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.

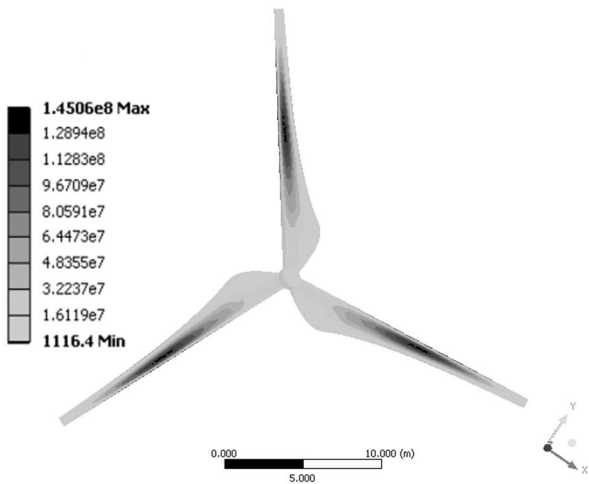
بعبارت دیگر، جابجایی در نوک پره در حالت بهینه شده تقریباً 35 سانتی‌متر و در حالت پره مینا تغییرات در حدود 77 سانتی‌متر می‌باشد که گویای این است که نسبت به حالت پره مینا، تغییرات جابجایی در نوک پره در حدود 42 سانتی‌متر کمتر شده است که نشان از ممان خمشی کمتر در پره بهینه شده می‌باشد و از طرفی باعث می‌شود 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 می‌یابد.



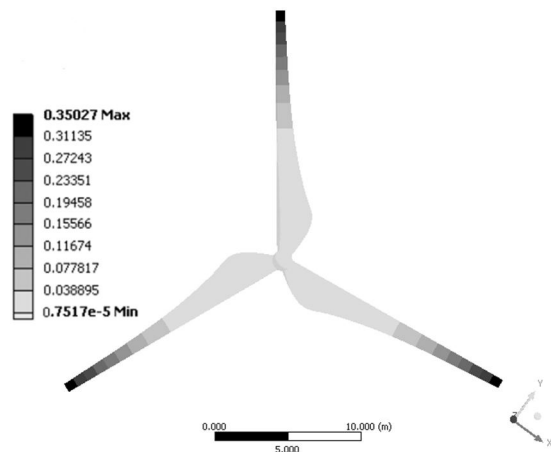
شکل 16 توزیع تنش ون میزز بر روی پره مینا بر حسب پاسکال



شکل 13 تغییر شکل حاصل از نیروها در راستای محور دوران در روی پره مینا بر حسب متر



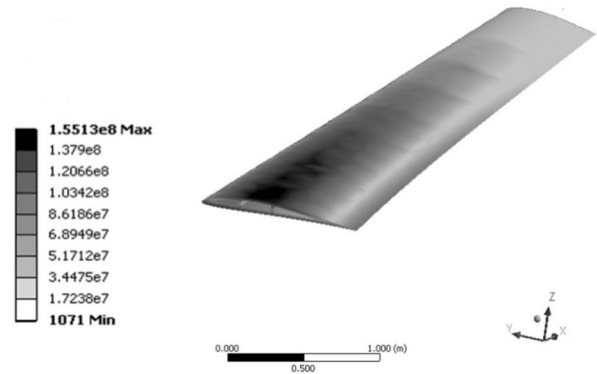
شکل 17 توزیع تنش ون میزز بر روی پره بهینه شده بر حسب پاسکال



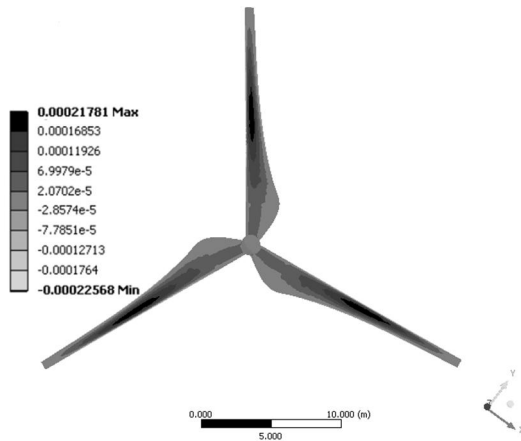
شکل 14 تغییر شکل حاصل از نیروها در راستای محور دوران در روی پره بهینه شده بر حسب متر

در شکل‌های 16 و 17 توزیع تنش ون میزز را برای دو پره نشان می‌دهد، در حالت پره مینا 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.

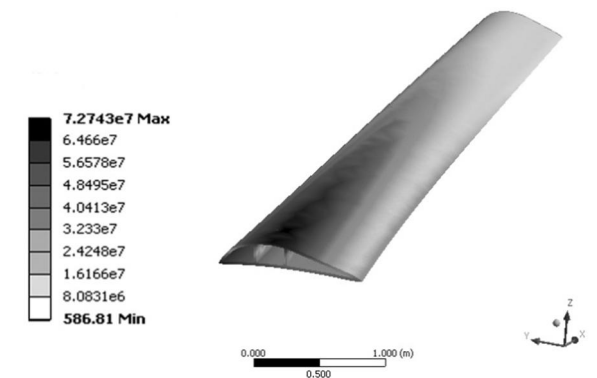
شکل‌های 18 و 19 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پره‌های مینا و بهینه شده را نشان می‌دهد. توزیع تنش برشی ماکزیمم بروی پره بهینه شده، بعلت لنگر لختی سطح [15] بیشتر، توانایی تحمل بارهای بزرگ‌تری را دارد و در برابر خمش موثرتر عمل می‌کند. از طرفی چون پره مورد نظر صفحه تقارن ندارد همزمان خمش و پیچش می‌یابد و مرکز برش بر مرکزوار مقطع پره 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 همان‌طور که مشاهده می‌شود کرنش نرمال محوری بیشینه تقریباً در $\frac{1}{3}$ از نوک پره می‌باشد که احتمال شکست پره در آن محدوده بیشتر از سایر نقاط می‌باشد.



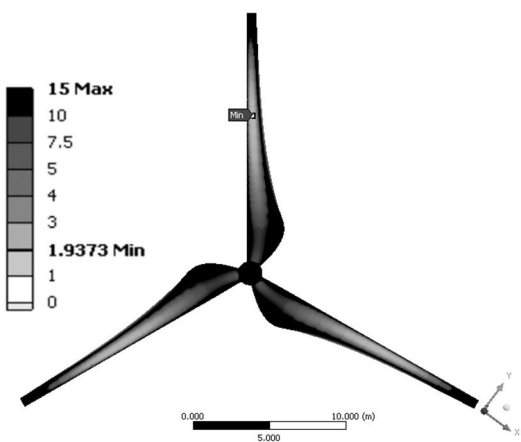
شکل 18 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پره مینا برحسب پاسکال



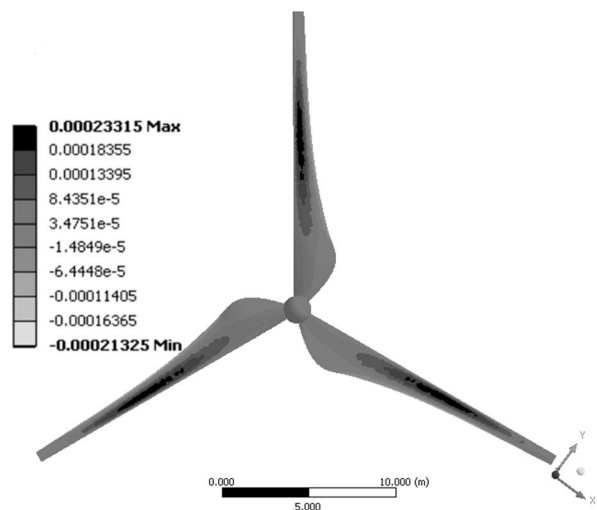
شکل 21 توزیع کرنش نرمال در جهت محور دوران بروی پره بهینه شده



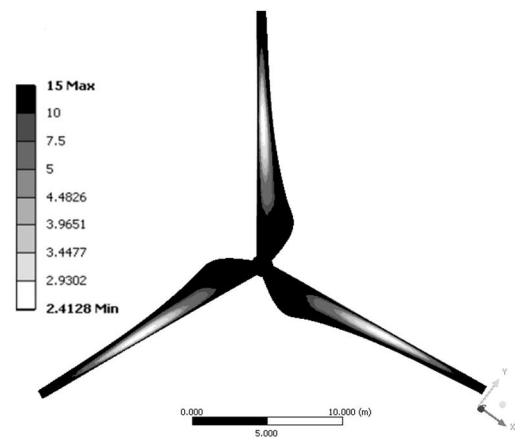
شکل 19 توزیع تنش برشی ماکزیمم بر روی پره بهینه شده برحسب پاسکال



شکل 22 توزیع ضریب اطمینان بر روی پره مینا



شکل 20 توزیع کرنش نرمال در جهت محور دوران بروی پره مینا



شکل 23 توزیع ضریب اطمینان بر روی پره بهینه شده

1- در دو پره بهینه و مینا تنش ماکزیمم در نقاط نظیر به نظیر نمی‌باشد و ضخامت پره در این نقاط یکسان نیست 2- پره بهینه شده دارای لنگر لختی بزرگتری می‌باشد که سبب می‌شود تنش ماکزیمم در پره بهینه شده نسبت به پره مینا کاهش یابد. 3- در حالت بهینه چون با افزایش ضخامت و سطح مقطع همراه می‌باشد مسلماً 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 مینا تقریباً 17 و 12 تن بترتیب می‌باشد. اگرچه وزن پره بهینه با چگالی اشاره شده 29% افزایش می‌یابد با توجه به این‌که تنش ماکزیمم 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.

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 مینا کمتر می باشد، چون لنگر لختی پره بهینه شده نسبت به حالت پره مینا بیشتر می باشد و تنش های بزرگ تری را می تواند تحمل کند و در برابر نیروهای ایرودینامیکی و خمش بطور موثرتری عمل کند.

5- مراجع

- [1] 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. Wang, 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. Latifi Bidarouni 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 Tapered 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*, 7th ed. 1927, Tehran, Iran. (In Persian)

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 میز که انرژی اعوجاج یافته یا انرژی واپیچش ماده می باشد استفاده شده است. برطبق این تئوری ارتباط تنش های اصلی با ضریب اطمینان (n) و تنش تسلیم (σ_y) مطابق معادله 13 می باشد:

$$[1/2((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)]^{1/2} \geq \frac{\sigma_y}{n} \quad (13)$$

حال چون مقادیر تنش های اصلی در پره بهینه شده نسبت به پره مینا کمتر می باشد انتظار می رود که مقدار ضریب اطمینان بزرگتری را داشته باشد. در شکل های 22 و 23 مقدار مینیمم ضریب اطمینان در حالت پره مینا 1/9 و در حالت بهینه 2/4 نشان داده شده است که افزایش 19/7% را به همراه دارد.

4- نتیجه گیری

در این تحقیق، نتایج دو پره بهینه شده و مینا یک توربین باد محور افقی از دیدگاه ایروالاستیسیته مقایسه شده اند. شکل پره بهینه شده توربین باد، توسط حل جریان لزج، الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی استخراج شده و تحلیل تنش و کرنش، با اعمال نیروهای ایرودینامیکی برای دو پره صورت گرفته است. نقاط اصلی این تحقیق عبارتند از 1- در تحلیل ایرودینامیکی 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 مینا می باشد. 3- در پره بهینه شده، تغییر شکل پره در طول شعاع کمتر از حالت مینا می باشد که این باعث می شود عملکرد پره از حالت طراحی کمتر فاصله بگیرد. 4- در این شبیه سازی از ساده سازی های کمتری برای تحلیل استفاده شده و نیروهای فشاری و لزجتی بطور مستقیم بر روی گره های شبکه پره اعمال شده است. 5- توزیع تنش ون میز 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 وسیع تری حقه انتخاب داشته باشد که خود سبب می شود تا پره حاصل سبک تر ساخته شود و نیروهای وارد به شفت و یاتاقان ها کمتر و در عین حال از نظر اقتصادی بصره تر باشد. 6- ضریب اطمینان پره نیز در حالت بهینه شده بیشتر از حالت مینا می باشد. 7- مقادیر تنش و کرنش و تغییر شکل ها در حد معقولی می باشد و مقادیر