



طراحی بهینه پرهی توربین باد محور افقی کوچک با در نظر گرفتن قيود مکانیکی

سید محمدسجاد سیفی¹، محمد مجدم^{2*}، پویان هاشمی طاری²

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

* تهران، صندوق پستی 167651719، m_mojaddam@sbu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، طراحی و بهیود آیرودینامیکی پره یک توربین بادی محور افقی کوچک جهت استخراج حداکثر توان خروجی در ضمن داشتن استحکام مکانیکی لازم برای تحمل نیروها و گشتاورهای وارده، انجام شده است. طراحی آیرودینامیکی پره با استفاده از روابط تئوری اندازه-حرکت اجزای پره و با استفاده از ضرایب تصحیح مناسب جهت در نظر گرفتن اثرات سه بعدی جریان بر روی عملکرد توربین، انجام می‌شود. فرایند طراحی، به منظور یافتن توزیع شعاعی اندازه وتر به گونه‌ای که حداکثر توان ممکن از توربین باد بدست آید، تنظیم شده است. با استفاده از نتایج طراحی آیرودینامیکی، نیروهای وارد بر پرهی توربین استخراج و پره از نظر استحکام مکانیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد و تحلیل نیروهای وارد شده و تحلیل تنش به منظور اصلاح ضخامت پوسته پره جهت تحمل بارهای مکانیکی وارد آن صورت گرفته است. کد عددی توسعه یافته، علاوه بر آن که ابزاری مناسب جهت طراحی آیرودینامیکی و تحلیل مکانیکی پره توربین به دست می‌دهد، نتایج آن برای توربین 500 واتی مورد مطالعه، منجر به افزایش حدود 5 درصدی توان شده است. از طرفی تحلیل مکانیکی پره جهت تحمل بارهای دینامیکی و استاتیکی بر اساس ضخامت پره و جنس آن نیز نشان می‌دهد تصحیح اندازه وتر چه تأثیر بر قابلیت اطمینان مکانیکی خواهد داشت. همچنین در این پژوهش مقدار بهینه‌ی سرعت نسبی نوک پره استخراج شده و تأثیر سرعت نسبی نوک پره بر ضخامت پره مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی سه ایرفویل متداول انجام شده است و تأثیر توزیع طول وتر و ضریب اطمینان آن‌ها مورد قیاس قرار گرفته است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 08 اسفند 1396
پذیرش: 24 فروردین 1397
ارائه در سایت: 10 خرداد 1397
کلید واژگان:

توربین باد محور افقی
اندازه حرکت اجزای پره
توزیع شعاعی اندازه وتر
تحلیل تنش
ضخامت پوسته پره

Optimal design of a blade of a small horizontal axis wind turbine (hawt) with considering mechanical constraints

Seyyed Mohammad Sajad Seifi, Mohammad Mojaddam*, Pooyan Hashemi Tari

Mechanical and Energy Engineering Department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 167651719 Tehran, Iran, m_mojaddam@sbu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 27 February 2018
Accepted 13 April 2018
Available Online 31 May 2018

Keywords:

Horizontal Axis Wind Turbine
Blade Element Momentum Theory
Airfoil Chord radial distribution
Stress Analysis
Blade surface thickness

ABSTRACT

Aerodynamic and optimal design of a blade of a horizontal axis wind turbine (HAWT) has been performed in order to extract maximum power output with considering the strength of the blade structure resulted from different loads and moments. A design procedure is developed based on the Blade Element Momentum (BEM) theory and suitable correction factors are implemented to include three-dimensionality effects on the turbine performance. The design process has been modified to achieve the maximum power by searching an optimal chord distribution along the blade. Based on the aerodynamic design, the blade loads have been extracted and the blade mechanical strength has been investigated by analyzing the thickness of the blade surface and the blade material. The developed numerical model can be considered as a suitable tool for aerodynamically and mechanically design of a turbine blade. The results for a 500 W turbine show that the turbine performance improves by 5% approximately, by modifying chord radial distribution. Yield stress analysis shows the effect of introduced chord distribution on the blade strength, in different blade thicknesses and different blade materials. In addition, optimum tip speed ratio for having favorable mechanical safety factor is derived. Three different airfoil are examined for this investigation and comparing their mechanical safety factor.

1- مقدمه

دولت‌ها و همچنین کاهش قیمت تمام شده توربین، همچنان توسعه می‌یابد. در انتهای سال 2016 میلادی، 90 کشور در حوزه توربین‌های بادی تجاری وارد شده‌اند و 29 کشور، بیش از هزار مگاوات نیروگاه بادی در حال بهره‌برداری دارند[1].

یکی از معیارهای تقسیم‌بندی توربین، بر اساس توان تولیدی است و طبق استاندارد کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک، توربین‌های بادی با

باد یک منبع انرژی تجدیدپذیر، در دسترس، بدون هزینه و بدون آلودگی است که بشر از دیرباز از انرژی آن بهره برده است. استفاده از این انرژی که در حمل‌ونقل و کشاورزی قدمت زیاد داشته است، امروز با توسعه فناوری‌های پیشرفته توربین‌های بادی که قابلیت تولید برق را از این انرژی مهیا ساخته‌است، به‌شدت مورد توجه قرار گرفته و با وضع سیاست‌های حمایتی

مقطع پره را در قسمت ریشه به صورت دو مقطع مجزای یک تیر آی-شکل بدون قسمت میانی ساده‌سازی کردند[12].

پوررجیبان و همکاران، بهینه‌سازی آیرودینامیکی پره‌ی توربین باد را با هدف کمینه‌کردن زمان رسیدن توربین از حالت سکون به سرعت دورانی طراحی را انجام دادند. در مدل آن‌ها، قید تنش بیشینه در ریشه با فرض مقطع ایرفویل به شکل یک مستطیل با ضخامت مشخص لحاظ شده است[13].

در پژوهش هیلر و همکاران، به منظور یافتن توزیع بهینه جرم در طول پره‌ی یک توربین باد محور افقی چندین مگاواتی، هر مقطع پره به صورت سه هندسه جداگانه تحلیل ساختاری گردید. یک ساختار مستطیلی برای قسمت وسط، یک ساختار دوزنقه‌ای برای لبه حمله و یک ساختار مثلثی برای لبه فرار ایرفویل با ضخامت مشخص برای تحلیل ساختار پره مدنظر قرار گرفت و پره از نظر استحکام و خستگی تحلیل گردید[14].

در این پژوهش، با استفاده از مدل‌های طراحی آیرودینامیکی موجود، به طور همزمان قیود مکانیکی در طراحی پره توربین باد لحاظ می‌شود به طوری که در هر مرحله تکرار فرایند طراحی آیرودینامیکی، تحلیل استاتیکی المان-های پره نیز صورت می‌گیرد. الگوریتم طراحی، با تنظیم طول وتر، توزیع زاویه چرخش و طول پره، توان خروجی توربین را با در نظر گرفتن قیود مکانیکی بیشینه می‌کند. بر اساس این الگوریتم، تغییر جنس و تغییر ضخامت پره بر روی استحکام پره یک توربین 500 واتی محور افقی، که بیشترین توان خروجی را برای یک ایرفویل مشخص دارد، بررسی شده است و این کار برای سه ایرفویل ناکا 4412، اس‌جی 6040 و اس 809 تکرار شده است. پس از بهینه‌سازی آیرودینامیکی و در نظر گرفتن قیود مکانیکی مناسب‌ترین گزینه برای طراحی پره معرفی می‌شود.

2- طراحی پره

از آن‌جا که پره‌ی توربین باد وظیفه اصلی استخراج انرژی از باد را داراست، لذا طراحی این جزء از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از روش‌های طراحی توربین باد، روش اندازه‌حرکت اجزای پره است که بر مبنای ترکیب دو تئوری اجزای پره و اندازه حرکت توسعه داده شده است[15,16].

تئوری اندازه حرکت از قوانین بقای اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای جهت بررسی جریان اطراف یک توربین باد محور افقی با برخی فرضیات ساده‌کننده استفاده می‌کند. بر اساس قانون بقای اندازه حرکت خطی، حداکثر توان قابل استخراج برای توربین بادی 59.6 درصد توان موجود در باد است، که حد بالای ضریب توان مطابق رابطه (1) است[17].

$$C_p = \frac{P}{P_{\max}} \quad (1)$$

که در این رابطه C_p ضریب توان، P و $P_{\max}$ به ترتیب توان توربین باد و بیشینه توان ایده‌آل قابل استحصال از توربین است.

تئوری اندازه حرکت زاویه‌ای به بررسی سرعت زاویه‌ای عبوری باد (ω) نسبت به سرعت زاویه‌ای روتور (Ω) می‌پردازد. با تقسیم‌بندی پره به المان‌های کوچک، برای توان گرفته‌شده در هر المان و توان کل توربین به ترتیب روابط (2) و (3) نتیجه می‌شود.

$$dP = 4\pi r^3 \rho U_1 (1-a) a' \Omega^2 dr \quad (2)$$

$$C_p = \frac{8}{R^2} \int_{r=0}^{r=R} a' (1-a) \lambda_r^2 r dr \quad (3)$$

در این روابط r فاصله‌ی هر المان از ریشه‌ی پره، R شعاع پره U_1 سرعت باد پشت پره و a' ضریب القایی شعاعی است که تغییر سرعت باد در

طرفیت کمتر از 50 کیلووات، توربین‌های کوچک نامیده می‌شوند[2].

یکی از اهداف اصلی طراحی توربین‌ها، به دست آوردن حداکثر توان ممکن از پره‌ی توربین است. با این حال، طراحی یک توربین کوچک فقط به منظور بیشینه‌کردن توان خروجی، می‌تواند منجر به مشکل شود، برای نمونه از آن‌جا که اغلب توربین‌های کوچک سیستم‌های کنترل‌کننده زاویه ندارند و در مناطقی نصب می‌شود که نیاز به تولید برق وجود دارد و نه لزوماً در مناطقی که وزش باد مناسب دارند، لذا این پره‌ها باید بگونه طراحی شوند که با میزان وزش باد کم نیز شروع به حرکت کنند[3]. به همین جهت است که گشتاور اولیه‌ی بالایی برای غلبه بر اینرسی ناشی از جرم پره‌ی توربین باد و گشتاور راه‌اندازی ژنراتور مورد نیاز است، بنابراین بررسی استحکام ساختاری این توربین‌ها در کنار برآورده شدن حداکثر توان می‌بایست توأمان در نظر گرفته شود[3]. این درحالی است که موضوعاتی از قبیل جرم پره و کاهش نویز از موضوعات مهم در توربین‌های بادی بزرگ هستند.

در دو دهه اخیر با افزایش توان محاسباتی و قدرت پردازش، بهینه‌سازی‌های چنددهه‌ای که در آن ملاحظات مکانیکی پره، در کنار ملاحظات آیرودینامیکی پره و پارامترهای دیگری مانند هزینه، هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند توسعه یافته‌است[5,4].

جارسکو و همکاران در پژوهشی، نیروهای وارد بر پره توربین بادی را با هدف کاهش وزن و ارتعاشات پره و بیشینه کردن توان خروجی با تغییر ضخامت و طول پره، برای یک توربین بزرگ صنعتی و به منظور انتخاب جنس کامپوزیتی مناسب برای آن، مورد بررسی قرار دادند[6].

گروچیسک و همکاران نیز جهت بهینه‌سازی مکانیکی پره توربین بادی یک مگاواتی، که دارای تیغه‌های نگهدارنده در مقطع پروفیل پره بود، به تولید هندسه دو نوع مختلف از تیغه‌ها پرداختند[7,8]. در پژوهش کونگ و همکاران، یک پره توربین باد 750 کیلوواتی کامپوزیتی برای یک توربین بادی محور افقی مورد بررسی پارامتری قرار گرفته است و رفتار آن در برابر انواع مختلف بارگذاری‌ها در نظر گرفته شده است[9]. در این پژوهش‌ها تحلیل ساختاری پره با شبکه‌بندی پره و استفاده از مدل المان محدود و تحلیل آن به کمک نرم‌افزار انجام شده است.

بهینه‌سازی آیرودینامیکی پره توربین باد با استفاده از روش‌های مختلف بهینه‌سازی همچنان توسعه می‌یابند[10] با این وجود در نظر گرفتن قیود مکانیکی و آیرودینامیک جریان، هزینه محاسباتی بالایی خواهد داشت به ویژه در حالتی که نیاز به مدل‌سازی‌های سه بعدی باشد. از این رو، توسعه روش‌های طراحی یا بهینه‌سازی که طراحی آیرودینامیکی پره و ساختار مکانیکی پره هم‌زمان در آن لحاظ شده است، همواره مورد توجه است. چرا که این روش‌ها و کدهای عددی توسعه‌یافته علاوه بر این که خروجی‌هایی با دقت قابل قبول دارند، مبنای اولیه مناسبی برای تحلیل‌های بعدی خواهند بود.

این موضوعات برای توربین‌های بادی کوچک یا با ساده‌سازی‌هایی در طراحی انجام می‌گیرد یا اثرات آن‌ها به صورت قیود ریاضی بر مسئله بهینه‌سازی اضافه می‌گردد.

گیگوری و همکاران جهت لحاظ کردن قیود مرتبط با ساختار مکانیکی در پره یک توربین باد 750 کیلوواتی، محل اتصال پره به ریشه را به شکل تیوب و مقطع ایرفویل را به صورت یک تیر آی-شکل بدون قسمت میانی در نظر گرفته‌اند. آن‌ها اشاره کردند که این مدل اگر چه واقعی نیست ولی معرف ضخامت پوسته‌ای است که بارگذاری اصلی را تحمل می‌کند[11]. بنینی و توفلو نیز در یک بهینه‌سازی به منظور دستیابی به حداکثر توان توربین،

$$c = \frac{16\pi R}{9NC_L \lambda \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (8)$$

2-1- الگوریتم طراحی

در این پژوهش، جهت طراحی پره الگوریتمی استفاده شده است که بیشینه توان با تغییر توزیع طول وتر در طول پره حاصل می‌شود.

روابط مورد استفاده در این الگوریتم بر مبنای روابط طراحی آیرودینامیکی موجود در ادبیات است با این تفاوت که در اکثر این مراجع، طول پره توربین ثابت در نظر گرفته می‌شود و از روابط ریاضی برای توزیع طول وتر در طول پره استفاده می‌شود [18, 17]. در این الگوریتم طول پره توربین، طول وتر در هر شعاع پره (بخش 2-2) و سرعت نسبی نوک پره (بخش 3-2) به عنوان خروجی‌های طراحی هستند و فرایند طراحی به منظور بیشینه کردن توان خروجی توربین است. اضافه کردن ملاحظات مکانیکی پره به این الگوریتم طراحی (بخش 3)، به طراح این امکان را می‌دهد که ارزیابی مناسبی از طول پره، اندازه وتر در هر شعاع و سرعت نسبی نوک پره را با توجه به ضریب اطمینان حاصله داشته باشد و بیشینه کردن توان توربین باد منجر به اعداد غیر واقعی برای طول و وتر پره نگردد.

این الگوریتم به شرح زیر است.

- 1- ابتدا اطلاعات اولیه طراحی به صورت ورودی فرایند طراحی تعریف می‌شوند (نوع ایرفویل و ضریب برا و پسا، سرعت نسبی نوک پره، λ ، توان خروجی مورد نیاز و درصد اشغال شده توسط هاب توربین)
- 2- فرض می‌شود که پره‌ی توربین دارای حداکثر ضریب توان است (معیار بتز) و با استفاده از رابطه (9)، طول پره تخمین زده می‌شود. معیار بتز صرفاً یک حد اولیه است و مقدار کمتری برای طول پره تخمین می‌زند.

$$r = \sqrt{\frac{P}{\frac{1}{2} C_p \rho U^3 \pi}} \quad (9)$$

- 3- سرعت زاویه‌ای با استفاده از رابطه (10)، محاسبه می‌گردد.

$$\omega = \frac{\lambda U}{R} \quad (10)$$

- 4- با داشتن شعاع ریشه و تعیین تعداد المان‌ها، محاسبات برای اولین المان با فرض مقدار صفر برای ضریب القایی محوری (a) و مماسی (a')، آغاز می‌گردد.

- 5- با استفاده از ضرایب القایی، زاویه سرعت نسبی (φ) و زاویه گام (β) از روابط (11) و (12)، مطابق شکل 1 محاسبه خواهد شد.

$$\tan \varphi = \frac{U_1(1-a)}{r\Omega(1+a')} \quad (11)$$

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (12)$$

- 6- مقدار جدید ضریب القایی محوری و مماسی با استفاده از رابطه (13) محاسبه می‌گردد.

$$C_n = C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi \quad (13)$$

که در آن C_n ضریبی است که نیروی عمودی وارد شده به پره‌ها را محاسبه می‌کند. جهت محاسبه نیروی پیشران از رابطه‌ی تجربی گلارت، رابطه (6) استفاده می‌گردد.

- 7- مقادیر جدید بدست آمده برای ضریب محور القایی و مماسی در مرحله 5 جایگزین خواهد شد و این فرایندها تا همگرایی مقادیر ضرایب القایی محوری و مماسی ادامه پیدا خواهد کرد.

راستای شعاعی را نشان می‌دهد و λ سرعت نسبی نوک پره و a ضریب القایی محوری است.

تئوری اجزای پره با استفاده از نیروی محوری و نیروی مماسی به ترتیب به محاسبه‌ی بار کلی و توان روتور می‌پردازد. در این تئوری، نیروهای مماسی و عمودی ناشی از حرکت باد بر روی ایرفویل که در شکل 1 ملاحظه می‌شود در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از این نیروها، نیروهای لازم برای تولید توان از پره محاسبه و توان توربین استخراج می‌گردد. مطابق شکل 1، زاویه حمله، φ ، زاویه گام است که زاویه‌ی سرعت نسبی باد و صفحه‌ی دوران پره را نشان می‌دهد و β زاویه پیش است و عبارت است از زاویه‌ای که ایرفویل می‌بایست دوران یابد تا باد با زاویه حمله مناسب به آن برخورد کند.

تئوری اندازه حرکت اجزای پره، با ضرایب تصحیح که با ترکیب دو تئوری اشاره شده بدست می‌آید، می‌تواند مقادیر مجهول ضریب القایی محوری و مماسی را به دست آورد. این تئوری با استفاده از برخی ضرایب تصحیح، پاسخ قابل قبولی برای طراحی پره توربین باد خواهد داشت.

معروفترین این ضرایب، ضریب تصحیح پرائتل¹، برای لحاظ نمودن تأثیر عدم نامحدود بودن تعداد پره‌ها و ضریب تصحیح گلارت² برای تطابق نتایج تئوری با نتایج تجربی می‌باشد [18]. اعمال ضریب تصحیح پرائتل، H ، بر روی ضرایب القایی، مطابق رابطه (4) و (5) است که به فاصله المان مورد نظر از نوک پره وابسته است.

$$a = \frac{1}{\frac{4H \sin^2 \varphi}{\sigma_s C_n} + 1} \quad (4)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4H \sin \varphi \cos \varphi}{\sigma_s C_t} - 1} \quad (5)$$

در این روابط، σ صلبیت است که عبارت است از سطح اشغال شده توسط پره‌ها به نسبت سطح جاروب شده توسط پره‌ها.

ضریب تصحیح گلارت، علاوه بر تأثیر بر روی ضریب القایی محوری، ضریب نیروی محوری (C_T) را نیز تصحیح می‌کند که به صورت رابطه (6) استفاده می‌شود و در آن مقدار a_c معمولاً 0.66 در نظر گرفته می‌شود.

$$C_T = \begin{cases} 4a(1-a)H & a \leq a_c \\ 4a \left(1 - \frac{1}{4}(5-3a)a\right)H & a > a_c \end{cases} \quad (6)$$

جهت محاسبه طول وتر در هر المان پره، از روابط بتز و اشمیتز که به ترتیب در رابطه (7) و رابطه (8) ملاحظه می‌گردد [19]، استفاده می‌گردد. رابطه اشمیتز از توزیع وتر کوچک‌تر و توان بهتری برخوردار است.

$$c = \frac{16\pi r \sin^2 \left(\frac{\tan^{-1}(1/(r\Omega/U_1))}{3} \right)}{NC_L} \quad (7)$$

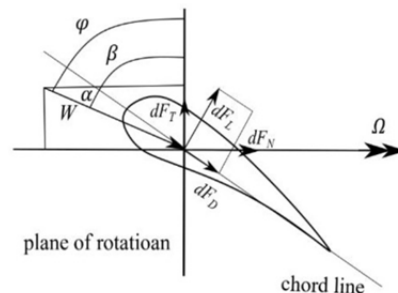


Fig. 1 Drag and lift force directions in each cross section

شکل 1 جهت نیروهای برآ و پسا بر مقطع ایرفویل

¹ Prandtl
² Glauert

المان پره، به صورت شکل 2 می‌باشد، که دو نیروی اول به ترتیب با استفاده از روابط (15) و (16) محاسبه می‌شود.

$$dT_{\text{torq}}(i) = \frac{dP(i)}{r\Omega} \quad (15)$$

$$dT_{\text{trust}}(i) = (\rho U^2 \pi R dr) C_T(i) \quad (16)$$

نیروی گریز از مرکز از رابطه (17) محاسبه می‌گردد که ناشی از چرخش جرم المان‌های پره است که به هر مقطع از المان‌ها وارد می‌شود [17]:

$$dF_{\text{cen}}(i) = \rho_b A r \Omega^2 dr \quad (17)$$

در توربین‌های بادی کوچک، نیروی گرانش در مقایسه با نیروی گریز از مرکز ناچیز است به همین منظور در محاسبات می‌توان از نیروی گرانش صرف‌نظر کرد [3]. نیروهای هر المانی که به ریشه‌ی پره نزدیک‌تر باشد باید با نیروهای سایر المان‌های دورتر از ریشه، جمع شود.

2-3- محاسبه‌ی گشتاورها

برای محاسبه‌ی گشتاور نزدیک به ریشه المان، نیروهای دورتر از آن المان نسبت به ریشه‌ی پره، در فاصله‌ی نیرو تا المان ضرب‌شده و در نهایت با یکدیگر جمع می‌گردد و این عمل برای تمام المان‌ها تکرار می‌شود تا گشتاور المان محاسبه‌شود (شکل 3).

$$M_1 = dT_{\text{torq}(i+1)}(r_{i+1} - r_i) + dT_{\text{torq}(i+2)}(r_{i+2} - r_i) + \dots + dT_{\text{torq}(r_N - r_i)} \quad (18)$$

$$M_2 = dT_{\text{trust}(i+1)}(r_{i+1} - r_i) + dT_{\text{trust}(i+2)}(r_{i+2} - r_i) + \dots + dT_{\text{trust}(r_N - r_i)} \quad (19)$$

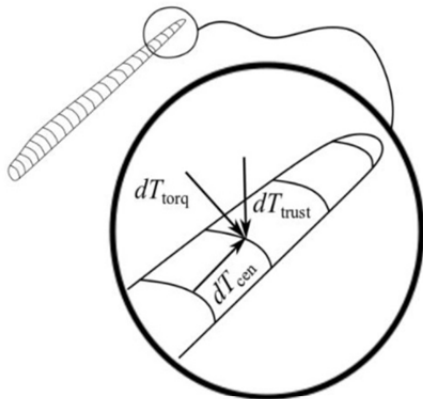


Fig. 2 Force components on a blade element

شکل 2 مؤلفه‌های نیروی وارد بر المان پره

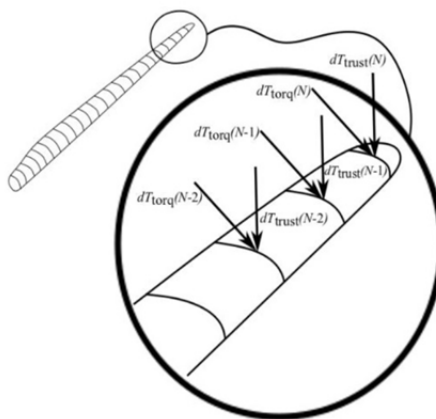


Fig. 3 Moment calculation for each blade element

شکل 3 نحوه محاسبه گشتاور وارد بر هر المان پره

8- توان المان مورد بررسی از رابطه‌ی (14) محاسبه می‌شود.

$$dP = 4\pi r^3 \rho U_1 (1 - a) a' \Omega^2 dr \quad (14)$$

9- برای المان بعدی، از مرحله 5، فرایند تکرار خواهد شد.

10- توان پره‌ی توربین باد با جمع بستن توان المان‌ها بدست می‌آید.

11- چنانچه، توان محاسبه‌شده، از مقدار طراحی کمتر باشد، طول تخمینی پره به مقدار مشخصی افزایش می‌یابد و مراحل از مرحله 3 تکرار خواهد شد.

12- در نهایت مقدار ضریب توان بدست می‌آید.

2-2- توزیع پهنه طول وتر

برای پهنه‌سازی طول وتر در هر المان، از مقدار صفر تا مقدار طول وتر پیشنهادی بتز برای ریشه‌ی پره، توان محاسبه می‌گردد (مراحل 1 تا 8) و مقدار بیشینه توان، طول پره و سایر مشخصات آن بدست می‌آید. سپس تحلیل خواهد شد که آیا ضریب توان پره بهبود یافته است یا خیر و مقدار طول وتر مناسب در هر شعاع به دست می‌آید.

2-3- پهنه‌سازی سرعت نسبی نوک پره

از آنجایی که سرعت نسبی نوک پره، نسبت مستقیمی با طول وتر المان‌های پره دارد، با تغییر آن، سرعت نسبی نوک پره‌ی پهنه براساس بیشینه تنش مجاز با توجه به توضیحات بخش 3، محاسبه می‌گردد.

3- تحلیل تنش

پهنه‌سازی آیرودینامیکی پره توربین باد به منظور بیشینه کردن توان خروجی می‌تواند منجر به اعداد غیرواقعی گردد. بزرگ شدن بیش از اندازه طول پره، چرخش بیش از حد پره، بزرگ یا کوچک شدن غیرواقعی وتر و یا افزایش بیش از حد وزن پره از جمله این موارد هستند بنابراین نیاز است تحلیل مکانیکی همزمان با طراحی یا پهنه‌سازی آیرودینامیکی پره در نظر گرفته شود تا طراح بداند در چه حاشیه اطمینانی می‌تواند از نتایج طراحی استفاده کند.

این تحلیل که در اینجا از آن به عنوان تحلیل تنش یاد شده است، برای یک توربین باد شامل تحلیل تنش استاتیکی و تحلیل تنش دینامیکی می‌شود، تحلیل تنش استاتیک به بررسی نیروهای استاتیکی که در ادامه توضیح داده خواهد شد می‌پردازد. تنش‌های دینامیک ناشی از نیروهای دینامیکی مانند نیروهای ناشی از تغییر سرعت باد، غیر یکنواخت پروفیل باد، تأثیر برج توربین بر پره و یا دیگر توربین‌ها و یا تأثیر زلزله برای یک مزرعه توربین‌های بادی است [20].

در این پژوهش تحلیل استاتیک توربین باد صورت گرفته است بدین منظور پره باد بگونه‌ای باشد که تاب نیروهای استاتیکی وارد بر آن را داشته باشد. همچنین در نظر گرفته شده است که ضریب اطمینان پره حداقل 1.5 باشد.

برای تحلیل تنش، ابتدا به محاسبه نیرو و گشتاور و پس از آن به محاسبه تنش‌های عمودی و برشی پرداخته می‌شود.

1-3- محاسبه‌ی نیروها

سه نیروی غالب وارد بر پره، شامل نیرویی که سبب چرخش پره می‌شود (T_{torq})، نیرویی که در جهت حرکت باد به توربین وارد می‌شود (T_{trust}) و نیروی گریز از مرکز در جهت شعاعی پره‌ی توربین (F_{cen})، این نیروها برای

نیروهای محاسبه شده از تئوری اندازه حرکت اجزای پره بر روی مرکز فشار ایرفویل در نظر گرفته شده است که محل آن یک چهارم طول وتر از لبه ابتدایی ایرفویل فرض شده است، این نیروها باید به مرکز سطح ایرفویل انتقال داده شود. این موضوع سبب ایجاد پیچش می شود، لذا دو تنش برشی وجود دارد، یکی ناشی از نیروی برشی (τ) و دیگری ناشی از گشتاور پیچشی (τ_M). نیروهای برشی، تنش‌هایی عمود بر یکدیگر در دو راستا ایجاد می کنند که مطابق رابطه (24) می باشند که باید در هر دو راستا محاسبه و جمع برداری شوند.

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (24)$$

در این رابطه V و Q به ترتیب نیروی برشی سطح و ممان اول حول محور اصلی هستند. از آنجایی که مقاطع مختلف پره بر روی خطی قرار دارند که از مرکز فشار آن‌ها می گذرد، بنابراین مقدار M_0 نشان داده شده در شکل 6 که ناشی از انتقال نیروها به مرکز فشار می باشد، صفر است [23] و مقدار تنش پیچشی صرفاً از انتقال نیروهای برشی به مرکز سطح ایجاد می گردد. محاسبه تنش پیچشی مستطیل پیچیده خواهد بود، با این حال حداکثر تنش پیچشی برای مستطیل در وسط بزرگترین ضلع آن قرار دارد، مطابق رابطه (25) است [13].

$$\tau_M = \frac{M_x}{2t_s S} \cdot S = (b - t_s)(h - t_s) \quad (25)$$

در این رابطه S مساحت معادل مستطیل است. این مقدار به عنوان مقدار تنش پیچشی در سراسر مقطع در نظر گرفته شده است.

5-3- تحلیل تنش

برای طراحی با حاشیه امنیت بالا، فرض شده است که در سرتاسر ایرفویل تنش پیچشی حداکثر مقدار باشد، از طرفی جهت این تنش نیز با جهت تنش برشی ناشی از نیروهای محوری برابر فرض شده است و محل این تنش نیز با محل تنش عمودی یکسان فرض می گردد، چراکه تخمین ایرفویل به مستطیل محل دقیق تنش برشی‌های بدست آمده بر روی ایرفویل را مشخص نمی کند. این عمل سبب می شود مقدار تنش محاسبه شده از مقدار تنش واقعی در مقطع بررسی شده اندکی بیشتر باشد که یک حاشیه امنیت مطلوب است. لذا پس از محاسبات فوق با استفاده از تحلیل تنش فون مایزس تنش با استفاده از رابطه (26) محاسبه می شود [21].

$$\sigma_{von} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (26)$$

با استفاده از مقدار تنش تسلیم استاتیکی پره، σ_{all} ، ضریب اطمینان به صورت رابطه (27) تعریف می شود.

$$Sf = \frac{\sigma_{all}}{\sigma_{von}} \quad (27)$$

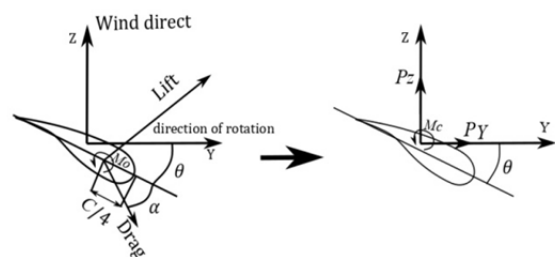


Fig. 6 Transformation the forces from pressure center to the area center [13]

شکل 6 انتقال نیروها از مرکز فشار به مرکز سطح [13]

3-3- محاسبه تنش عمودی

تنش عمودی شامل دو تنش نیروی گریز از مرکز و گشتاور خمشی است. برای محاسبه تنش خمشی، معادلات در صفحه اصلی ممان دوم نوشته می شود که با صفحه‌ی واقع در مرکز سطح ایرفویل اندکی زاویه، v ، دارد (شکل 4). این زاویه نسبت به صفحه‌ی واقع در مرکز سطح و ممان‌های دوم سطحی اصلی، بر اساس ممان دوم واقع در مرکز سطح با استفاده از روابط (20) تا (22) به دست می آید [21].

$$v = 0.5 \tan^{-1} \left(\frac{-2\bar{I}_{yz}}{\bar{I}_y - \bar{I}_z} \right) \quad (20)$$

$$I_1 = \bar{I}_y \cos^2 v + \bar{I}_z \sin^2 v - 2\bar{I}_{yz} \sin v \cos v \quad (21)$$

$$I_2 = \bar{I}_z \cos^2 v + \bar{I}_y \sin^2 v + 2\bar{I}_{yz} \sin v \cos v \quad (22)$$

در این روابط I_y و I_z ممان دوم سطح نسبت به محورهای z, y و yz حول مرکز سطح و I_1 و I_2 ممان سطح حول محور اصلی هستند. گشتاورهای حاصل در راستای باد و عمود بر آن نوشته شده است حال آن که المان پره‌ی توربین باد خود به اندازه‌ی زاویه‌ی گام دوران داشته است، بنابراین گشتاور حاصل از راستای صفحه‌ی اصلی به میزان $\beta + v$ از صفحه‌ی محاسبه شده زاویه دارد، لذا باید در این راستا تجزیه شود. پس از تجزیه می توان تنش ناشی عمودی ناشی از تنش خمشی و نیروی گریز از مرکز را به صورت رابطه (23) نوشت.

$$\sigma = \frac{M'_1(i)u}{I_1} - \frac{M'_2(i)v}{I_2} + \frac{F_{cen}}{A} \quad (23)$$

که در عبارت فوق M'_1 و M'_2 گشتاور دوران یافته محاسبه شده در مرحله قبل است. u و v نیز فواصل نقاط ایرفویل از صفحه‌ی اصلی است و A مساحت آن مقطع از پره می باشد.

4-3- محاسبه تنش برشی

برای محاسبه تنش برشی، ایرفویل با مستطیلی مطابق شکل 5 تخمین زده می شود [22]. بدین صورت که طول مستطیل برابر طول وتر و ضخامتش برابر با ضخامت داخلی ایرفویل و مساحت مستطیل با ایرفویل برابر باشد.

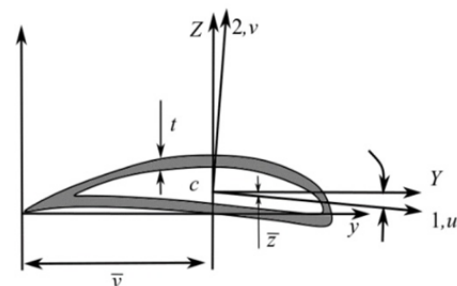


Fig. 4 Principal coordinates for airfoil cross section

شکل 4 محورهای اصلی مقطع ایرفویل [13]

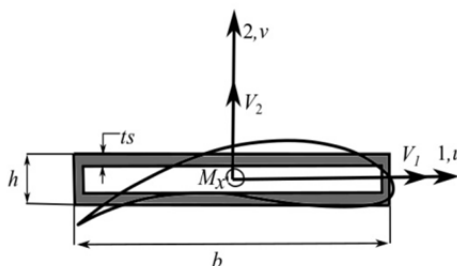


Fig. 5 Equivalent the airfoil cross section to a hollow rectangle [13]

شکل 5 معادل سازی ایرفویل با مستطیل توخالی [13]

4- نتایج

اولین گام جهت طراحی پره توربین باد، انتخاب ایرفویل مناسب است، برای طراحی پره ی توربین باد باید از ایرفویلی استفاده شود که از ضریب لیفت و نسبت ضریب برآ به پسا بالا داشته باشد، بدین منظور باید ایرفویل مناسب برای این کارکرد انتخاب گردد [24]. در این پژوهش از ایرفویل‌های ناکا 4412، اس جی 6040 و اس 809 برای طراحی استفاده شده است که با توجه به ضریب برآ بالا و ضریب پسای پایین آن‌ها، برای توربین باد محور افقی استفاده می‌شوند. مقادیر ضریب برآ و پسای این ایرفویل‌ها در جدول 1 و شکل مقطع آن‌ها در شکل 7 ملاحظه می‌گردد.

طراحی برای توربین بادی محور افقی سه پره‌ای، با توان 500 وات، سرعت وزش باد 7 متر بر ثانیه و λ برابر 5 صورت می‌گیرد. در مرحله اول برای جنس پره، از چگالی 500 kgm^{-3} و تنش تسلیم 65MPa استفاده می‌گردد [13]. این ماده یک نوع چوب نرم است که به راحتی برش خورده و توانایی تحمل چوبکاری بالایی دارد، هنگام استفاده از مواد نگهدارنده از عمر بالایی برخوردار است و هزینه ی نسبتاً کمی دارد و به دلیل خواص خستگی خوب برای تولید پره بسیار مورد توجه هستند [25].

نتایج توزیع مقدار وتر در طول پره در مقایسه با پیشنهاد های بتز و اشمیتز در شکل 8 نمایش داده شده است. استفاده از الگوریتم بهینه سازی

جدول 1 مقادیر ضرایب آیرودینامیکی ایرفویل‌های استفاده شده

Table 1 Aerodynamic characteristics of selected airfoils

ایرفویل	ضریب آیرودینامیکی	مقدار
ایرفویل NACA4412	C_L	1.3000
ایرفویل NACA4412	C_D	0.0230
ایرفویل S809	C_L	0.8469
ایرفویل S809	C_D	0.0362
ایرفویل SG6040	C_L	1.2061
ایرفویل SG6040	C_D	0.02388

+ NACA 4412
-- S809
- SG6040



Fig. 7 NACA4412, S809 and SG6040 Airfoil cross sections [26]

شکل 7 مقطع ایرفویل‌های ناکا 4412، اس جی 6040 و اس 809 [26]

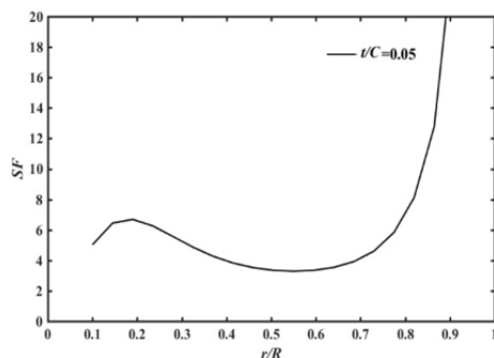


Fig. 9 Blade safety factor at each cross section for SG6040 Airfoil

شکل 9 ضریب اطمینان پره طراحی شده با ایرفویل اس جی 6040

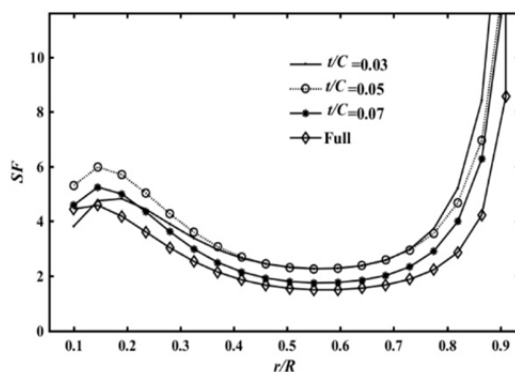


Fig. 10 Comparison the stress safety factor for different blade thicknesses

شکل 10 مقایسه ی ضریب اطمینان پره ی طراحی شده برای ضخامت‌های مختلف

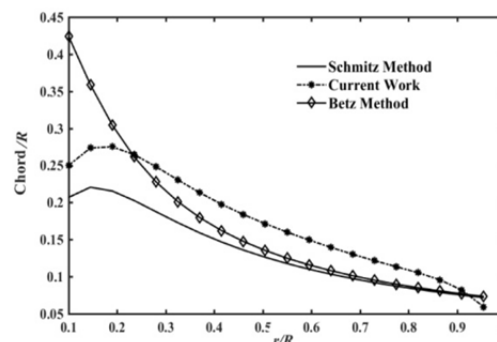


Fig. 8 Comparison the chord distribution along the blade [26]

شکل 8 مقایسه توزیع طول وتر در طول پره [26]

اطمینان به دلیل کمبود تنش مجاز آن است و این مکانیزم غالب در تعیین ضریب اطمینان پره خواهد بود.

سرعت نسبی نوک پره، نسبت عکس با طول وتر المان مورد بررسی دارد که سبب افزایش اندازه و در نتیجه هزینه می‌شود، لذا می‌بایست سعی شود سرعت نسبی نوک پره تا حد ممکن افزایش یابد. از طرفی افزایش سرعت نسبی نوک پره، سبب کاهش ضریب اطمینان سازه پره نیز می‌شود، لذا در این پژوهش سرعت نسبی نوک پره برای ایرفویل‌های مورد بررسی اندک اندک افزایش می‌یابد تا سرعت نسبی نوک پره به گونه‌ای شود که با افزایش آن، مقدار ضریب اطمینان از 2 کمتر نگردد. نتیجه این بررسی برای ایرفویل اس‌جی 6040 در شکل 13 مشاهده می‌شود.

شکل 13 نشان می‌دهد در صورتی که سرعت نسبی نوک پره برای پرهی طراحی شده 5.5 باشد، کمترین ضخامت پره را خواهیم داشت به گونه‌ای که این پره ضریب اطمینان قابل قبولی داشته باشد. نتایج حاصل برای دو ایرفویل دیگر در جدول 2 آورده شده است. جدول 2، نشان می‌دهد که ایرفویل اس 809 با آنکه از طول پرهی بیشتری برخوردار است ولی بسته به شرایط کاری و محدودیت‌های اعمالی ممکن است انتخاب مناسبی باشد. توزیع وتر المان‌های پره در شکل 14 آورده شده است.

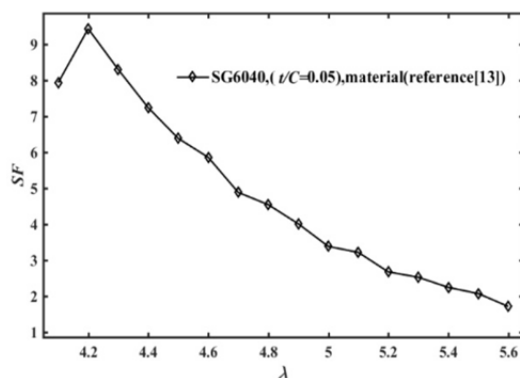


Fig. 13 Safety factor vs. tip speed ratio (SG6040)

شکل 13 ضریب اطمینان بر حسب سرعت نسبی نوک پره برای ایرفویل SG6040

جدول 2 سرعت نسبی نوک پره بهینه‌سازی شده برای پره

Table 2 Optimized tip speed ratio

نوع ایرفویل	سرعت نسبی نوک پره
ایرفویل SG6040	5.5
ایرفویل NACA4412	5
ایرفویل S809	7

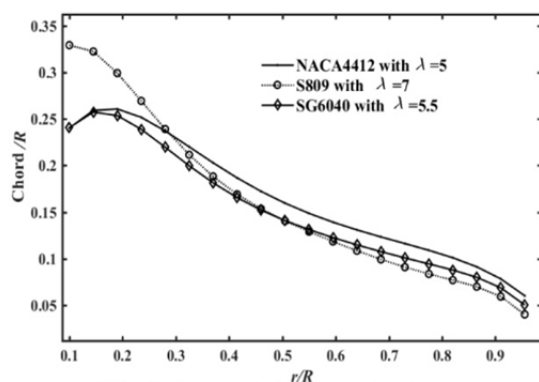


Fig. 14 Chord distribution at optimized tip speed ratio

شکل 14 توزیع وتر برای سرعت نسبی نوک پره بهینه شده

طرفی سبب سبک شدن پره می‌شود و از طرفی می‌تواند میزان سطح لازم برای تحمل تنش وارد بر مقطع را کاهش دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای ایرفویل اس‌جی 6040 نقطه‌ی بهینه در مقدار ضخامت نسبی 0.05 است. تابعیت ضریب اطمینان به شکل ایرفویل، متأثر از تغییرات ضرایب برآ و پسای ایرفویل و همچنین تغییرات ممان‌های دوم سطح با تغییر شکل ایرفویل است.

ضریب اطمینان در صورت استفاده از روابط بتز و اشمیتز برای توزیع شعاعی وتر در شکل 11 ملاحظه می‌گردد. این شکل نشان می‌دهد که ضریب اطمینان پرهی بهینه شده با آن‌که در انتهای پره مورد بررسی طول وتر المان‌ها کوچک‌تر می‌شود ولی ضریب اطمینان آن کاهش زیادی نخواهد داشت و در این ناحیه ضریب اطمینان به میزان کافی بزرگ است. ضریب اطمینان تقریباً روند ثابتی دارد و نسبت به روابط دیگر همچون رابطه بتز تغییر ناگهانی ضریب اطمینان ملاحظه نمی‌گردد. استفاده از رابطه بتز همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، ضریب اطمینان بیشتری دارد در حالی که این موضوع بدون آنکه ضریب توان استخراج‌شده را افزایش دهد صرفاً جرم پره را بالا می‌برد.

شکل 12، ضرایب اطمینان پره را برای جنس‌های چوب، فایبرگلاس، ورق فولادی و آلومینیوم، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد استفاده از چوب برای توربین طراحی‌شده در صورت استفاده از ایرفویل ناکا 4412 مناسب نیست و پره آسیب خواهد دید. بنابراین در موادی مانند چوب که به دلیل کم بودن چگالی، نیروی گریز از مرکز کمتری وجود دارد، پایین بودن ضریب

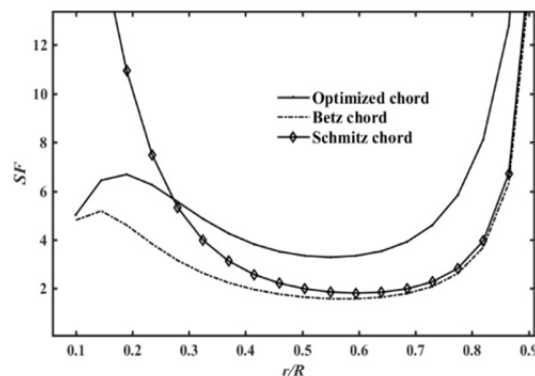


Fig. 11 Comparison the stress safety factor for different relations used for chord distribution (SG6040)

شکل 11 ضریب اطمینان روابط استفاده شده برای طول وتر (ایرفویل اس‌جی 6040)

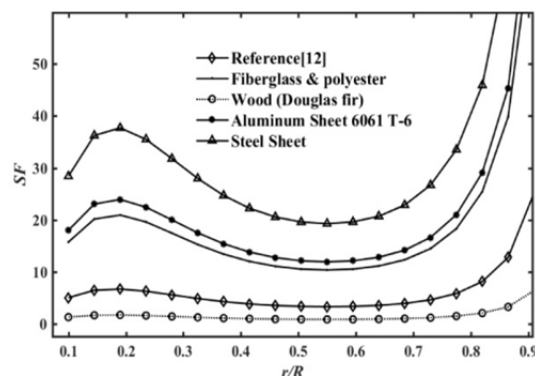


Fig. 12 Comparison the stress safety factor for different blade material (NACA 4412)

شکل 12 مقایسه‌ی ضریب اطمینان جنس‌های مختلف پره برای ناکا 4412

ناکا 4412 نسبت به ایرفویل اس 809 و اس جی 6040 بیشتر شده است و طول پره برای آن کمتر است (جدول 3) ولی ضریب اطمینان پره برای ایرفویل اس 809 نسبت به اس جی 6040 و ایرفویل اس جی 6040 نسبت به ناکا 4412 بیشتر خواهد بود. این موضوع به دلیل آن است که سطح مقطع المان مورد بررسی با ایرفویل اس 809 نسبت به دو ایرفویل دیگر بیشتر است. از طرفی هرچه ضریب برا و پسا برای ایرفویل کمتر باشد نیروهای ایرودینامیکی کمتری به پره وارد خواهد شد. البته می‌بایست توجه داشت برای توربین بادی کوچک، ایرفویل اس 809 ضریب برا کوچکی خواهد داشت چرا که این ایرفویل برای رینولدزهای بالاتر از مقادیر در نظر گرفته شده در این طراحی مناسب است.

جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد، اگرچه بدیهی است که بالابودن ضریب برا و بالابودن نسبت ضریب برا به ضریب پسا، ضریب توان پرهی طراحی شده را افزایش خواهد داد، بررسی جزئی‌تر رفتار نمودارها نتایج زیر را به دست می‌دهد:

- 1- افزایش سرعت نسبی نوک پره سبب کاهش ضریب اطمینان خواهد شد.
- 2- بالابودن تنش تسلیم و کم‌بودن چگالی پره ضریب اطمینان را افزایش خواهد داد با این حال تأثیر تنش تسلیم بر ضریب اطمینان بیشتر از چگالی است.

- 3- افزایش ضخامت نسبی پره غالباً سبب افزایش ضریب اطمینان می‌شود، هرچند تأثیر آن بر نیروی گریزازمرکز می‌تواند در برخی موارد سبب کاهش ضریب اطمینان شود که می‌بایست این موضوع در فرایند طراحی در نظر گرفته شود.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از توسعه الگوریتم طراحی پرهی توربین باد با روش اندازه‌حرکت اجزای پره، جهت بهبود توان، از تغییر توزیع شعاعی طول وتر استفاده گردید. نتایج نشان‌داد، توزیع بهینه طول وتر، منجر به افزایش 5 درصدی ضریب توان گردید. مقدار بهبود توان با توجه ضریب برا و پسای ایرفویل انتخابی، می‌تواند تغییر کند. همچنین با در نظر گرفتن ضخامت نسبی برای پرهی توربین باد، نشان داده شد که این پره توان تحمل بارهای استاتیکی وارده را داراست. نشان‌داده شد که طراحی صورت گرفته، از ضریب اطمینان مناسبی از نظر استحکام تسلیم برخوردار است و علاوه بر این، ضریب اطمینان برای جنس‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت و ملاحظه گردید که مکانیزم غالب در بررسی ضریب اطمینان پره، مقدار تنش مجاز آن است.

در فرایند طراحی، سرعت نسبی نوک پره بر اساس ضریب اطمینان مکانیکی مطلوب، بهینه گردید. طراحی پره با استفاده از سه ایرفویل، ناکا 4412، اس جی 6040 و اس 809 نشان‌داد که پره طراحی‌شده بر مبنای ایرفویل ناکا 4412، طول کمتر و ضریب توان بالایی دارد در حالی که طراحی بر مبنای اس 809، ضریب اطمینان بالایی خواهد داشت.

6- فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
a	ضریب القایی محوری
a'	ضریب القایی مماسی
C	طول وتر (m)

همان‌طور که در شکل 14 مشاهده می‌گردد، برای پره طراحی شده براساس ایرفویل اس جی 6040، می‌توان نسبت به سایر پره‌ها از مواد کمتری به ازای طول واحد مصرف کرد که در صورتی که تکنولوژی ساخت برای هر سه ایرفویل یکسان در نظر گرفته شود تولید پره با ایرفویل اس جی 6040 اقتصادی‌تر است.

در صورتی که از یک ایرفویل برای طراحی پرهی توربین باد استفاده شود افزایش سرعت نسبی نوک پره می‌تواند باعث کاهش اندازه‌ی وتر المان‌ها گردد، برای مشاهده این مساله اندازه‌ی طول وتر المان‌ها برای دو سرعت نسبی نوک پره 5 و 7 برای پرهی توربین باد طراحی‌شده با استفاده از ایرفویل اس 809 در شکل 15 آورده شده است. مشاهده می‌شود افزایش سرعت نسبی نوک پره سبب کاهش طول وتر پره و در نتیجه کاهش ماده به کار رفته و کاهش هزینه ساخت خواهد شد.

ضریب اطمینان در شرایط اولیه طراحی برای سه ایرفویل مورد بررسی، در شکل 16 و ضریب توان و طول پره برای همان سه ایرفویل در جدول 3 مشاهده می‌شود.

همان‌طور که در شکل 16 مشاهده می‌شود مقایسه سه ایرفویل مورد بررسی نشان می‌دهد که با آنکه ضریب توان برای پره توربین با ایرفویل

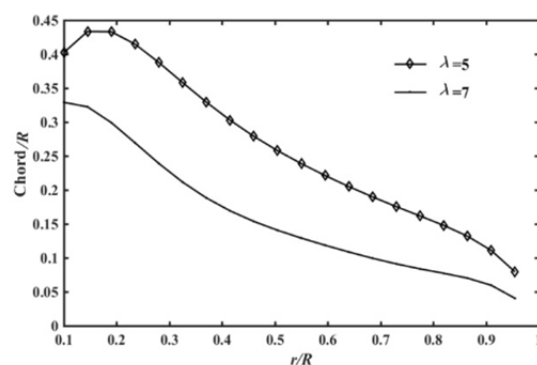


Fig. 15 Chord distribution for two different tip speed ratios (SG6040)
شکل 15 توزیع وتر پره در دو سرعت نسبی نوک پره برای ایرفویل SG6040

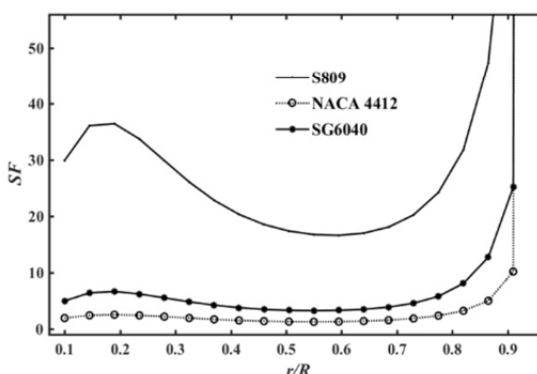


Fig. 16 Safety factor for three different airfoils at design condition
شکل 16 ضریب اطمینان سه ایرفویل در شرایط طراحی

جدول 3 مشخصات پره طراحی شده سه ایرفویل در شرایط طراحی

Table 3 Design blade characteristics at design condition

نوع ایرفویل	شعاع پره (m)	ضریب توان
ایرفویل S809	1.28	0.462
ایرفویل NACA4412	1.18	0.550
ایرفویل SG 6040	1.19	0.542

- [2] *Wind Turbines, Part2 - Design requirements for small turbines*, Third Edition, pp. 11-29, Geneva: International Electrotechnical Commission (61400-2 Standard), 2013.
- [3] D. H. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*, pp. 195-211, London: Springer-Verlag, 2011.
- [4] T. Ashuri, M. B. Zaaijer, J.R.R.A. Martins, G.J.W. van Bussel, et al., Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum leveled cost of energy, *Renewable Energy*, Vol. 68, pp. 893-905, 2014.
- [5] C. L. Bottasso, F. Campagnolo, A. Croce, Multi-disciplinary constrained optimization of wind turbines, *Multibody System Dynamics*, Vol. 27, No. 1, pp. 21-53, 2012.
- [6] M. Jureczko, M. Pawlak, A. Męzyk, Optimization of wind turbine blades, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2, pp. 463-71, 2005.
- [7] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, V. Sellappan, et al., Multidisciplinary design optimization for glass-fiber epoxy-matrix composite 5 MW horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 8, pp. 1116-27, 2010.
- [8] M. Grujicic, G. Arakere, B. Pandurangan, V. Sellappan, et al., Structural-response analysis, fatigue-life prediction, and material selection for 1 MW horizontal-axis wind-turbine blades, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 6, pp. 790-801, 2010.
- [9] C. Kong, J. Bang, Y. Sugiyama, Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life, *Energy*, Vol. 30, No. 11, pp. 2101-14, 2005.
- [10] A. Nejat, H. R. Kaviyani, Aerodynamic optimization of a megawatt class horizontal axis wind turbine blade with particle swarm optimization algorithm, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 1-11, 2016. (in Persian)
- [11] P. Giguère, M. S. Selig, J. L. Tangler, Blade design trade-offs using low-lift airfoils for stall-regulated HAWTs, *ASME Wind Energy Symposium*, Reno, US, January 11-14, 1999.
- [12] E. Benini, A. Toffolo, Optimal design of horizontal-axis wind turbines using blade-element theory and evolutionary computation, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 124, No. 4, pp. 357-63, 2002.
- [13] A. Pourrajabian, P. A. N. Afshar, M. Ahmadi, D. Wood, Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade, *Renewable Energy*, Vol. 31, No. 87, pp. 837-48, 2016.
- [14] B. Hillmer, T. Borstelmann, P. A. Schaffarczyk, L. Dannenberg, Aerodynamic and structural design of multiMW wind turbine blades beyond 5MW, *Journal of Physics: Conference Series* 2007, Vol. 75, No. 1, p. 012002, 2002.
- [15] M. Refan, H. Hangan, Aerodynamic performance of a small horizontal axis wind turbine, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 134, No. 2, p. 021013, 2012.
- [16] H. Moradtabrizi, A. Nejat, Aerodynamic design and optimization of Megawatt wind turbine blade based on Blade Element Momentum theory, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 279-290, 2015. (in Persian)
- [17] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, E. Bossanyi, *Wind energy handbook*, Second Edition, pp. 41-59, New York: Wiley, 2011.
- [18] M. O. Hansen, *Aerodynamics of wind turbines*, pp. 45-62, Abingdon: Routledge, 2015.
- [19] J. Mc Cosker, *Design and optimization of a small wind turbine*, pp. 15-56, New York: Troy, 2012.
- [20] O. Kiyomiya, T. Rikiji, P. H. van Gelder, Dynamic response analysis of onshore wind energy power units during earthquakes and wind, *Proceedings of The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Kitakyushu, Japan, May 26-31, 2002.
- [21] F. P. Beer, E. R. Johnston, D. F. Mazurek, E. R. Eisenberg, *Vector Mechanics for Engineers: Statics*, Ninth Edition, pp. 72-248, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [22] M. Capuzzi, A. Pirrera, P. M. Weaver, A novel adaptive blade concept for largescale wind turbines Part I: aeroelastic behavior, *Energy*, Vol. 73, pp. 15-24, 2014.
- [23] S. Gudmundsson, *General aviation aircraft design: Applied Methods and Procedures*, pp. 236-296, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
- [24] P. Asad Ayoubi, M. Ebrahimi, Optimization of an airfoil used in the tip of wind turbine blades for maximizing its lift to drag coefficients ratio, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 13, pp. 222-225, 2016. (in Persian)
- [25] P. Peterson, P. D. Clausen, Timber for high efficiency small wind turbine blades, *Wind Engineering*, Vol. 28, No. 1, p. 87-96, 2004.
- [26] S. Seifi, M. Mojaddam, Design and optimization of wind turbine blade, *Proceedings of the 25th Annual International Conference on Mechanical Engineering (ISME 2017)*, Tehran, Iran, May 2-4, 2017. (in Persian)

C_t	ضریب نیروی مماسی
C_p	ضریب توان
C_n	ضریب نیروی عمودی
F	نیرو (N)
H	ضریب تصحیح پرانتل
h	ارتفاع مستطیل (m)
I	ممان دوم سطح (m^4)
M	گشتاور (Nm)
N	تعداد پره
p	توان (W)
Q	ممان اول سطح (m^3)
R	طول پره (m)
r	شعاع محلی (m)
S_f	ضریب اطمینان
S	مساحت مستطیل (m^2)
T	نیرو (N)
t	ضخامت (m)
U	سرعت باد (ms^{-1})
V	نیروی برشی (N)

علائم یونانی

α	زاویه حمله
β	زاویه پیچش
λ	سرعت نسبی نوک پره
ν	زاویه انحراف بردار اصلی
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ_s	صلبیت
σ	تنش (Nm^{-2})
τ	تنش برشی (Nm^{-2})
φ	زاویه گام
Ω	سرعت زاویه‌ای پره (rpm)
ω	سرعت زاویه‌ای باد (rpm)

زیر نویس‌ها

All	مجاز
b	پره
cen	گریز از مرکز
max	ماکزیمم
torq	در راستای دورانی
trust	در راستای محور
Von	فن‌مایز

7- مراجع

- [1] J. L. Sawin, K. Seyboth, F. Sverrisson, *Renewables 2017 Global Status Report*, pp. 80-84, Paris: Renewable Energy Policy Network for the twenty first Century Association, 2017.