مکانیک سازهها و شارهها/ سال۱۴۰۴/ دوره ۱۵/ شماره ۱/ صفحه ۱–۱۷



نشربه مكانيك سازه فاوشاره ف



DOI: 10.22044/jsfm.2025.15556.3929

طراحی و تحلیل یک توربین بادی یک کیلوواتی محور عمودی داریوس با پرههای مستقیم

كامپوزيتى

امیر حسین دلواری احمدپور^۱، محمود مهرداد شکریه^{۲.»} ^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران ^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۱/۱

چکیدہ

امروزه، تولید انرژی از منابع پاک از قبیل باد، بیشازپیش موردتوجه پژوهشگران و صنعتگران است. توربینهای بادی محور عمودی، یکی از انواع توربینهای بادی است که اغلب برای مصارف شهری و کمتوان استفاده میشود. هدف از انجام مطالعه حاضر، طراحی و تحلیل یک توربین بادی محور عمودی است. در این مطالعه، برای منطقهای با سرعت باد میانگین ده متر بر ثانیه، توربینی یک کیلوواتی از نوع محور عمودی داریوس با پرههای مستقیم، طراحی ایرودینامیکی-مفهومی شد. با مشخص شدن ابعاد و هندسه توربین، با استفاده از روش تحلیلی و استفاده از کد پریکامپ طراحی سازهای و لایهچینی کامپوزیتی پره، برای تحمل نیروی ناشی از باد شدید با حفظ سبکی پره انجام شد. این توربین یک کیلوواتی، دارای قطر روتور ۲/۵ متر، سه پره، سرعت دورانی ۲۰۴۰ دور بر دقیقه، ارتفاع پره ۲/۱۸ متر، طول وتر ۲۰/۱ متر و ایرفویل ۲۰۰-۳-۶0 است. پره شامل لایهچینی کامپوزیتی مناسب در بخشهای مختلف از مواد کامپوزیتی تکجهته و دوجهته، هسته، لایه پیوندی و ژل کوت در نظر گرفته شد. جرم هر پره حدود ۲۰۰۰ گرم است که از مزایای به کاربردن مواد کامپوزیتی در آن است. طراحی سازهای انجام شده با روش ای کار گرفته شد. موان کر با می دور این ۲۰۱۰ می از مرای ای م

كلمات كليدى: توربين بادى محور عمودى داريوس؛ طراحى ايروديناميكى-مفهومى؛ طراحى سازهاى؛ روش اجزاى محدود؛ مواد كامپوزيتى.

Design and analysis of a 1 kW Darrieus vertical axis wind turbine with straight composite blades

A. Delvari Ahmadpoor¹, M.M. Shokrieh^{2,*}

¹ M.Sc. Student, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran ² Prof., School of Mechanical Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract

Nowadays, energy production from clean sources such as wind is receiving increasing attention from researchers and industrial professionals. Vertical axis wind turbines (VAWTs) are a type of wind turbine that are often used for urban and low-power applications. This study aimed to design and analyze a vertical-axis wind turbine. A 1 kW Darrieus-type VAWT with straight blades was aerodynamically and conceptually designed for a region with an average wind speed of 10 m/s. After determining the turbine's dimensions and geometry, the structural design and composite stacking sequence of the blades were conducted to withstand extreme wind forces while maintaining blade lightness. This was achieved using an analytical method and the PreComp code. The designed turbine features a rotor diameter of 2.5 m, three blades, a rotational speed of 240 rpm, a blade height of 2.18 m, a chord length of 0.11 m, and an airfoil of DU06-W-200. The blade structure included an optimized composite layup in different sections, consisting of unidirectional and bidirectional composite materials, a core, bonding layers, and a gel coat. The mass of each blade was approximately 600 g, showcasing the advantages of using composite materials. The structural design, validated through FEA, demonstrated a 3% error.

Keywords: Darrieus VAWT; Aerodynamic-conceptual design; Structural design; FEA; Composite materials.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۷۷۲۴۰۵۴۰-۲۱۰؛ فکس: ۷۷۲۴۰۴۸۸

آدرس پست الكترونيك: shokrieh@iust.ac.ir

۱– مقدمه

تقاضای روزافزون جهانی برای انرژی، اثرات مخرب گلخانهای ناشی از سوزاندن منابع فسیلی و مصرف سوخت را افزایش داده است. این امر استفاده بیشازپیش منابع انرژی تجدیدپذیر از قبیل منابع زیست توده ای، خورشید، موج دریا و باد را ضروری کرده است [۱]. توربینهای بادی، امروزه بهعنوان یک اصطلاح عمومی برای ماشینهایی با پرههای چرخان استفاده می شود که انرژی جنبشی باد را به نیروی مفید (توان الکتریکی) تبدیل مىكنند. انتخاب و طراحى مناسب يك توربين بادى نيازمند توجه همزمان به کارایی ایرودینامیکی، پیچیدگی، هزینه، صدا و زيبايي است [۲].

توربینهای بادی، ازنظر چگونگی قرارگیری محور چرخش پرهها، به دو دسته توربین بادی محور افقی و توربین بادی محور عمودی تقسیم میشوند. اگر محور چرخش پرهها موازی با سطح زمین باشد، توربین از نوع محور افقی و اگر عمود بر سطح زمین و همچنین جهت وزش باد باشد، از نوع محور عمودی است. باوجود پیشرفتها در فناوری توربینهای بادی، تولید برق با استفاده از توربینهای بادی محور افقی با چالشهای مهمی مواجه است. برخی از اشکالات اصلی توربین های بادی محور افقی عبارتاند از: ناکارآمدی در مناطق با سرعت پایین باد نظیر شهرها (سرعت باد کمتر از ۶ متر بر ثانیه)، ساخت، حملونقل، نصب پرههای غول پیکر، یخزدن پرهها، هزینههای بالای نگهداری برای ژنراتورهای برج و کاهش كارايي مزارع توربين باد محور افقى به دليل آشفته كردن باد توسط توربین های بالادست [۳]. توربین بادی محور عمودی برای کاربردهای خانگی و توان پایین که توان مورد نیاز، پایین و راندمان تولید بالاست، بسیار مورد استفاده قرار می گیرد. در حالى كه توربين بادى محور افقى بهطور گسترده براى توان تولیدی بیشتر استفاده می شود و نیاز به سرمایه گذاری هنگفت دارد. مزیت اصلی توربینهای بادی محور عمودی این است که راستای وزش باد مهم نیست و باد در هر جهتی حرکت کند این توربینها کار میکنند [۱].

توربینهای محور عمودی بهطورکلی به دو دسته ساونیوس و داریوس تقسیمبندی می شوند. توربین های نوع ساونیوس مبتنی بر نیروی پسا^۳ هستند، درحالی که توربینهای نوع داریوس مبتنی بر نیروی برا^۴ میباشند. توربینهای داریوس عملکرد بهتری نسبت به نوع ساونیوس دارند. بهطوری که راندمانی حدود ۲۰ درصد بیشتر از توربین ساونیوس دارند [۴]. شکل (۱) انواع توربینهای بادی داریوس و توربین بادی ساونيوس را نشان ميدهد.



شکل ۱- انواع پرکاربرد توربین بادی محور عمودی: الف) داريوس مارپيچي، ب) داريوس نوع D، ج) داريوس نوع V، د) داريوس نوع H، ه) ساونيوس [۵].

اساس استفاده از توربینهای با پره غیرمستقیم (نوع D و مارپیچی) به دلیل این است که آنها در شرایطی که باد وضعیت غیریکنواخت دارد، بهتر از توربینهای با پرههای مستقيم كار ميكنند و به نوعي اثر اغتشاشات جريان هوا و گشتاورهای ارتعاشی را کاهش میدهند. چراکه توربینهای داریوس نوع H، بسته به موقعیت پره، بارگذاری متفاوتی را از باد دریافت می کنند. قابل ذکر است، توربین های داریوس نوع D به دلیل شعاع مختلف روتور در نواحی ابتدا و انتهایی پره، گشتاور متفاوتی را ایجاد میکند که نکته منفی این نوع از توربینهاست؛ چراکه نواحی بالا و پایین نقش مؤثری در تولید انرژی ندارند. توربینهای داریوس با پرههای مستقیم توان خروجی بیشتری نسبت به نوع مارپیچی میدهند. برای مثال توربین مارپیچی، ضریب کارایی زیر ۱۳ درصد دارد؛ لذا استفاده از توربین داریوس نوع H، از نگاه کارایی، برای تولید انرژی بهتر است [۶]. شکل (۲) دستهبندی انواع مختلف توربین بادی را نشان میدهد.

¹ Savonius ² Darrieus

³ Drag

⁴ Lift



شکل ۲ – دستهبندی انواع توربین بادی.

زیست تخریبپذیر میتواند جایگزین مناسبی برای کامپوزیتهای شیشه یا کربن باشد.

با توجه به روند توسعهمحور توربینهای محور عمودی در مصارف كمتوان و شكاف تحقيقاتي در زمينه طراحي و تحليل كمهزينه توربين بادى محور عمودى كمتوان، مطالعه حاضر به ارائه روند طراحى و تحليل توربين بادى محور عمودى كمتوان از نوع داریوس با پرههای مستقیم می پردازد. در تحقیق حاضر، ابتدا روند طراحى ايروديناميكي و مفهومي توربين انجام مي شود. در این طراحی، سرعت باد میانگین و توان خروجی موردنیاز بهعنوان ورودیهای طراحی در نظر گرفته شده و پارامترهای مهم طراحی شامل صلبیت، تعداد پرهها، زاویه گام، نسبت منظری پره و نوع ایرفویل مشخص می شود. بعد از مشخص شدن پارامترهای هندسی توربین، طراحی سازهای پره و لايهچيني بهينه كامپوزيتي پرههاي توربين با توجه به اجزاي مختلف پره توربين، وظايف و عملكرد هركدام انجام مى شود. پس از انجام طراحی سازهای، به تحلیل اجزای محدود پره طراحیشده با نرمافزار تجاری آباکوس پرداخته میشود تا اعتبار طراحی انجامشده بررسی گردد و نتایج مهم از آن استخراج گردد. شکل (۳) روند کامل طراحی ایرودینامیکی و سازهای توربین انجام گرفته در مطالعه حاضر را نشان میدهد.

سان و همکاران [۷]، یک توربین بادی محور عمودی داريوس با پرههايي از جنس كامپوزيت تقويتشده با الياف کربن، طراحی، شبیهسازی و تست کردند که توانایی خود راهاندازی و عملکرد پایدار در سرعت باد پایین را داشت. این توربین، عملکرد بهتری نسبت به توربینهای مشابه با پرههای رزینی نشان داد. در مطالعه سان و همکاران، بهینهسازی لایه چینی کامپوزیتی مورد توجه قرار نگرفت. ژو^۲ و همکاران [8]، با استفاده از مدل اجزای محدود پارامتری و تکنیک بهینهسازی الگوریتم ژنتیک، مطالعهای روی بهینهسازی جرمی پره کامپوزیتی و سازه توربین بادی محور عمودی داشتند که به نتایج مطلوبی رسید. آنها همچنین پیشنهاد استفاده از سازههای خرپایی را برای بازوهای اتصال پره به ستون برای توربینهای بادی کوچک ارائه کردند. وانگ و همکاران [۹] نیز با استفاده از مدل اجزای محدود و الگوریتم ژنتیک روی تعداد لایه تکجهته کامپوزیتی، محل شاهتیر و ضخامت شبکههای برشی، بهینهسازی انجام دادند. آنها موفق شدند جرم توربین را نسبت به حالت اولیه ۱۷/۴٪ کاهش دهند. کاسترو[†] و همکاران [۱۰]، یک توربین بادی محور عمودی با پرههای کامپوزیتی زیست تخریب پذیر فیک الوکسی (مورد مطالعه و شبیه سازی قرار دادند. آنها نشان دادند که استفاده از این کامپوزیت

⁴ Castro

⁵ Fique/epoxy

¹ Sun ² Xue ³ Wang



شکل ۳- فلوچارت روند انجام مطالعه حاضر شامل سه مرحله کلی طراحی ایرودینامیکی، سازهای و تحلیل اجزای محدود.

۲- طراحی ایرودینامیکی-مفہومی توربین

در رابطه با توربینهای بادی و انواع آن توضیح داده شد. از انواع معرفی شده توربینهای بادی داریوس، مطابق شکل (۱-د) نوعی که دارای پرههای مستقیم است برای طراحی و مدلسازی انتخاب شده است؛ چراکه این نوع از توربینهای داریوس، از عملکرد و کارایی بهتری برخوردار هستند و همچنین به دلیل ساختار ساده تر پرههای آن، طراحی و تحلیل ساده تری دارند. البته همان طور که ذکر شد، این نوع توربین داریوس نسبت به دو نوع دیگر، نسبت به اغتشاشات جریان هوا عملکرد ضعیف تری دارد. در ادامه درباره پارامترهای طراحی مفهومی توربین و مشخص کردن آنها بحث می شود.

۲–۱– صلبیت

$$\sigma = \frac{Nc}{R} \tag{1}$$

که R و R به ترتیب تعداد پرهها، طول وتر پره و شعاع توربین هستند. این پارامتر در حقیقت نشاندهنده سرعتی است که توربین در آن بیشترین کارایی خود را دارد [۱۱].

¹ Power Coefficient

نسبت سرعت نوک پره نیز از پارامترهای مهم طراحی در توربینهای باد است که از طریق رابطه زیر تعریف میشود:

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_{\infty}} \tag{(7)}$$

که R، $W_{0} = 0$ W_{0} به ترتیب شعاع روتور، سرعت دورانی روتور و سرعت باد هستند. ضریب توان⁽⁾ بهنوعی بهرموری و کارایی یک توربین بادی یا هر مولد انرژی دیگری را نشان میدهد که بهصورت نسبت توان واقعی تولیدشده در یک دوره تناوب زمانی مشخص به توان در دسترس یا قابل تولید در همان دوره زمانی مطابق رابطه زیر تعریف میشود:

$$C_P = \frac{P_{gen}}{0.5\rho AV^3} \tag{(7)}$$

که ، ، ، ، A و V به ترتیب توان تولیدی، چگالی هوا، مساحت دیسک روتور و سرعت بالادست باد است.

شکل (۴-الف) اثر صلبیت توربین را روی عملکرد ایرودینامیکی توربینهای محور عمودی نشان میدهد. همانطور که در شکل (۴-الف) مشخص است، کارایی بیشینه

توربین ($_{p_{max}}$) با افزایش صلبیت توربین تا نسبت سرعت نوک بهینه توربین ($_{Aopt}$) بالا رفته و بعدازآن روند نزولی می گیرد؛ دلیل این اتفاق، اثر انسداد^{(۱} است که از نسبت سرعت نوک بهینه به بعد جریان باد به جای اینکه از توربین عبور کند، دور توربین حرکت می کند [11]. شکل (۴–الف) نشان می دهد، توربین با صلبیت ۲۶۳٬۰ در نسبت سرعت نوک ۳/۱۴ بالاترین راندمان را دارد. این صلبیت نسبتا کوچک، کنترل پذیری توربین را بالا می برد. سرعت دورانی روتور، نیروی گریز از مرکز پرهها را افزایش می دهد که با انتخاب بهینه مواد می توان خطر این نیرو را کم کرد.



شکل ۴- تاثیر آلف) صلبیت و ب) نسبت منظری پره روی عملکرد توربین [۱۳].

۲–۲– زاویه گام

زاویه گام، زاویه بین خط وتر پره و خط مماس بر دایره روتور در محل اتصال پره به پایه است. این زاویه، عامل مهمی است که بر توان تولیدی توربین تأثیر می گذارد. علاوه بر این، افزایش زاویه گام پره بیش از مقدار بهینه باعث کاهش راندمان توربین بادی می شود؛ لذا انتخاب بهینه این زاویه، برای طراحی لازم و مهم است. رضاییها و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۱۴]، مطالعهای

¹ Blockage effect

در رابطه تاثیر زاویه گام بر عملکرد توربین محور عمودی انجام دادند. طبق نتایج این مطالعه، بهترین زاویه گام برای پرهها، زاویه ۲- درجه (دو درجه از سمت لبه حمله به سمت بیرون) است.

۲-۳- نسبت منظری^۲

نسبت منظری برای یک پره، نسبت طول پره به طول وتر میانگین (H/c) است. بهطورکلی مطابق شکل (۴-ب)، با افرایش نسبت ابعاد پره در یک توربین بادی با یک صلبیت مشخص، عملکرد توربین بهبود مییابد؛ لذا ایدهآل ترین حالت آممکن موقعی است که طول پره به بینهایت نزدیک شود. از آنجایی با افزایش طول پره، هزینه و جرم هم زیاد میشود، باید نسبت منظری پره را بهینه انتخاب کرد. همان طور که در شکل (۴-ب) مشاهده میشود، بعد از نسبت ابعاد پره ۲۰، افزایش ضریب توان با شیب بسیار کمتری صورت می گیرد؛ لذا نسبت ابعاد بهینه پره برای ارضای ملاحظه بهینه بین ابعاد پره و نتیجتا هزینه و عملکرد، ۲۰ در نظر گرفته میشود.

۲-۴- ایر فویل

نوع هندسه ایرفویل نقش موثری در پیامدهای آیرودینامیکی پره و درنهایت روی عملکرد توربین بادی دارد. طبق تحقیقات انجام گرفته روی توربینهای بادی محور عمودی، ایرفویل DU۰۶-W-۲۰۰ به طور خاص برای این توربینها توسعه داده شده است که از لحاظ ایرودینامیکی و سازهای از ایرفویلهای سری NACA عملکرد بهتری دارد [۱۵].

۲-۵- محاسبه مشخصهها

با مقداردهی روابط (۱) تا (۳) و نسبت منظری پره و حل دستگاه معادلات تشکیل شده، پارامترهای مجهول هندسی طراحی مفهومی به دست میآیند. نمای سهبعدی پره طراحیشده از شکل (۵) قابل مشاهده است. مشخصههای توربین بادی طراحی شده در جدول (۱) مشخص شدهاند.

² Aspect ratio



شکل ۵- نمای سهبعدی پره طراحیشده.

جدول ۱- مشخصههای نهایی توربین بادی طراحی شده.

, نوع H	داريوس	نوع توربين
DU•۶-	W-T··	ايرفويل
١	<i>P</i> (kW)	توان خروجي
۲/۵	<i>D</i> (m)	قطر روتور
٣	Ν	تعداد پره
-۲	λ (degree)	زاويه گام
74.	Ω (rpm)	سرعت دورانی روتور
۱.	U_{∞} (m/s)	سرعت باد
۲/۱۸	<i>H</i> (m)	ارتفاع پرہ
•/11	<i>c</i> (m)	طول وتر پره
٣/١۴	λ	نسبت سرعت نوک پره
•/٢۶٣	σ	صلبيت

۳- طراحی سازهای پره

طراحی یک پره، نیازمند مصالحه بین ملاحظات آیرودینامیکی و سازهای است. معمولا طراحی دوسوم بیرونی پره بر اساس ملاحظات آیرودینامیکی و یکسوم داخلی بر اساس ملاحظات سازهای است. ازنظر سازهای، پره معمولا توخالی است و هندسه بیرونی آن توسط دو پوسته تشکیل شدهاست: سمت مکش¹ و سمت فشار⁷. سمت فشار، قسمتی از پره است که سیال (باد) به آن میوزد. یک یا چند شبکه سازهای برای اتصال دو پوسته به یکدیگر باهدف افزایش استحکام و انتقال بارهای برشی استفاده میشود که این اتصال توسط چسب انجام می گیرد.



شکل ۶- طرح اجزای مقطعی پره توربین بادی [۱۶].

اجزای سازهای مقطعی پره نشان داده شده در شکل (۶) به شرح زیر معرفی میشوند:

شاەتىر^۳:

شاه تیر، جزء سازهای پره توربین بادی است که در امتداد طول پره قرار دارد. شاه تیر به طور معمول از مواد کامپوزیتی مانند کامپوزیت های شیشه یا کربن ساخته می شود و برای افزایش استحکام و سفتی پره طراحی شده است. این جزء به توزیع بارها و تنش های متحمل شده توسط پره در حین بارگذاری مانند جرم پره، بارهای ایرودینامیکی و نیروهای گریز از مرکز ایجاد شده توسط چرخش پره کمک می کند. شاه تیر یا تیر اصلی معمولا در نزدیکی لبه حمله پره قرار دارد و ممکن است اصلی معمولا در نزدیکی لبه حمله پره قرار دارد و ممکن است شاه تیر بسته به نیازهای خاص پره توربین بادی می تواند متفاوت باشد. به طور کلی، یک پره توربین بادی بزرگتر، برای مقاومت در برابر بارها و تنش های افزایشی مرتبط، به تیر اصلی قوی تر و سفت تر نیاز دارد.

شبکههای برشی^۱:

شبکه برشی در پرههای توربین بادی برای افزایش سفتی و استحکام آنها استفاده میشود. این شبکهها معمولاً یک نوار یا لایه نازک از موادی مانند کامپوزیتهای شیشه یا کربن است که به سطوح داخلی پره باهدف اتصال دو سمت پره، چسبانده میشود. شبکههای برشی برای مقاومت در برابر نیروهای برشی طراحیشدهاند که عمود بر طول پره وارد میشوند. این نیروها میتوانند در اثر عوامل مختلفی مانند وزش باد یا تلاطم ایجاد شوند و باعث پیچ خوردن یا تغییر شکل پره شوند. با افزودن شبکههای برشی به ساختار پره، سفتی و استحکام پره افزایش،

³ Spar cap

⁴ Shear Webs

¹Suction side

² Pressure side

لبه انتهایی پره توربین بادی لبه مخالف پره از لبه حمله است.

این لبهای از پره است که دورترین فاصله را از باد برخوردی به

پره دارد. لبه انتهایی در مقایسه با لبه حمله معمولاً نازک و

مستقیم است و برای کاهش کشش و تلاطم پره به دلیل جریان

باد بر روی پره طراحی شده است. لبه فرار نیز همانند لبه حمله برای عملکرد آیرودینامیکی پره توربین بادی حیاتی است.

طراحي آن ميتواند بر ميزان نيروي برا توليدشده توسط پره و

راندمان کلی توربین بادی تاثیر بگذارد. شکل و ضخامت لبه

فرار بسته به نیازهای طراحی خاص پره می تواند متفاوت باشد،

اما بهطورکلی، به گونهای طراحی شدهاست که تا حد امکان

صاف و هموار باشد تا تلاطم را به حداقل برساند و توانایی یره

پنل ساندویچی، ساختهشده از مواد کامپوزیتی است که در

ساخت پرههای توربین بادی استفاده می شود. از دو پوسته با

استحکام بالا مانند کامپوزیتهای شیشه یا کربن تشکیل شده

است که به یک ماده هسته^۴ با چگالی کم مانند فوم متصل

شدهاست. طراحی پنل ساندویچی چندین مزیت را برای

پرههای توربین بادی محور عمودی فراهم می کند. پوستههای

با استحکام بالا، سفتی و استحکام لازم را برای مقاومت در برابر نیروها و تنشهای باد فراهم میکنند، درحالیکه مواد هسته

سبکوزن به کاهش جرم کلی پره کمک میکند. مواد هسته

همچنین به جذب و کاهش ارتعاشات و کاهش نویز در حین

كار كمك مىكند. استفاده از پنل ساندويچى همچنين انعطاف

بیشتری در طراحی ایجاد میکند؛ زیرا ضخامت و ترکیب

پوستهها و مواد هسته را میتوان برای ارضای نیازهای خاص

پره توربین بادی محور عمودی تنظیم کرد. علاوه بر این، سطح

صیقلی و پیوسته پنل ساندویچی به بهینهسازی عملکرد

آيروديناميكي پره و كاهش نيروي مقاوم كمك ميكند و كارايي

کلی توربین را بهبود میبخشد. بهطورکلی، استفاده از صفحه

ساندویچی در پرههای توربین بادی محور عمودی راهحلی

را برای تبدیل انرژی جنبشی به دوران پره بهبود بخشد.

صفحه ساندويجي :

لبه فرار ۲:

میزان تغییر شکل آن کاهش یافته و عملکرد کلی پره بهبود مییابد. شبکههای برشی را میتوان در اشکال و اندازههای مختلف، بسته به نیازهای خاص پره توربین بادی، طراحی کرد. آنها اغلب در فواصل منظم در طول پره قرار می گیرند و ممکن است با سایر عناصر سازهای مانند تیرهای اصلی ترکیب شوند تا یرهای قوی و بادوام ایجاد کنند.

سمت مکش و فشار:

سمت مکش و سمت فشار پره دو سطح متقابل پره توربین بادی هستند که برای استخراج انرژی از باد باهم کار میکنند. همان طور که باد روی سمت مکش پره جریان می یابد، ناحیه ای با فشار كم ايجاد مىكند كه باعث ايجاد نيروى بالابرنده شده و پره را به حرکت وامیدارد. سمت مکش معمولا صیقلی و منحنی طراحی میشود تا عملکرد ایرودینامیکی پره را بهینه کند و تولید انرژی را به حداکثر برساند. سمت فشار سطحی از پره است که در معرض مستقیم باد نیست. همان طور که باد بر روی سطح منحنی پره جریان مییابد، ناحیهای با فشار بالا در سمت فشار ایجاد می کند. اختلاف فشار بین دو طرف مکش و فشار پره نيرويي ايجاد مي کند که به حرکت پره به جلو و ايجاد نیروی برا کمک میکند. طراحی پره، ازجمله انحنا و شکل دو طرف مکش و فشار، در تعیین عملکرد و کارایی پره در تبدیل انرژی باد به انرژی مکانیکی بسیار مهم است.

ليه حمله':

لبه جلویی پره توربین بادی لبه حمله است. معمولاً این لبه ابتدا با باد تماس پیدا می کند. شکل و طراحی لبه حمله برای عملکرد آیرودینامیکی پره بسیار مهم است. لبه حملهای که بهخوبي طراحي شده باشد، ميتواند به كاهش كشش، افزايش نیروی بالابر و بهبود راندمان کلی توربین بادی کمک کند. لبههای حمله اغلب با شکل صیقلی و گرد طراحی می شوند تا تلاطم را به حداقل برسانند و توانایی پره را برای تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی دورانی بهبود بخشند. لبه حمله در معرض بیشترین تنشها و نیروها قرار دارد، بنابراین معمولا از مواد مستحکم ساخته میشود که بتواند در برابر باد و شرایط آب و هوایی سخت مقاومت کند.

³ Sandwich Panel

⁴Core

¹Leading edge ²Trailing edge

سبک، قوی و کارآمد برای تولید انرژی تجدید پذیر از باد ارائه میدهد.

۳-۱- لايەچينى مفھومى كامپوزيتى پرە

پرههای توربین بادی از مواد کامپوزیتی با اجزا و خواص مختلف تشکیل شدهاند که باعث ایجاد پرههای سبک تر و طولانی تر با شکل ایرودینامیکی بهینه شدهاند. امروزه ۲/۵ میلیون تن مواد کامپوزیتی در بخش انرژی بادی در سطح جهان استفاده می شود، بهطوری که حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد از کل جرم توربینهای بادی قابل بازیافت است [۱۷]. لایهچینی سازهای مناسب پرههای کامپوزیتی توربین باد برای مقاومت در برابر نیروهای پرههای کامپوزیتی توربین باد برای مقاومت در برابر نیروهای استفاده از چندلایههایی با لایههای صفر و ۴۵± درجه در پره، باعث استحکام سازهای بالای پره در برابر این بار گذاریها شده باعث استحکام سازهای بالای پره در برابر این بار گذاریها شده زو توزیع تنش به مورت یکنواخت تر انجام می گیرد. برای ایجاد چنین لایه چینی هایی از لایه هایی به شرح زیر استفاده می شود [۱۸]:



شکل ۷- لایهچینی سازهای کامپوزیتی در یک مقطع از پره [۱۸].

ژ**ل کوت**`

این پوشش، بهمنظور مهیاکردن سطحی صاف و صیقلی برای پره استفاده میشود تا پره ازلحاظ ایرودینامیکی عملکرد

¹Gelcoat ²Nexus

مناسبی داشته باشد. این پوشش برای محافظت پره در برابر شرایط محیطی از قبیل رطوبت، اشعه فرابنفش و سایش نیز کاربرد دارد؛ ژلکوت نقشه سازهای ندارد و از آن در طراحی و تحلیل بهعنوان یک عضو باربردار صرفنظر می شود.

لايه پيوندى ً

این لایه که بهنوعی اتصال دهنده ژل کوت و لایه متقاطع کامپوزیتی است، پارچهای نرم است که سطح ناهموار لایه متقاطع را محافظت می کند و از طرفی سطحی صاف و جاذب برای ژل کوت فراهم می آورد.

لایه متعامد دوجهته^۳ کامپوزیتی

این لایه برای افزایش استحکام برشی بخشهای مختلف پره مورداستفاده قرار می گیرد. علاوه بر استحکام، لایه متقاطع از باز و پخش شدن لایه تکجهته نیز جلو گیری می کند. سه لایه فوق الذکر، پوسته پره را تشکیل می دهند.

لايه تکجهته کامپوزيتي ً

لایه تکجهته به دلیل مقاومت خوب در برابر بارهای محوری، برای افزایش استحکام خمشی پره مورد استفاده می گیرد. همان طوری که بیان شد، بین لایه تکجهته از مواد هسته استفاده می شود تا ضمن حفظ سبکی پره، استحکام کمانشی سلول میانی پره نیز تقویت شود.

ماده هسته

لایه متقاطع در لبه فرار و همچنین لایه تکجهته در شبکههای برشی، به دو قسمت تقسیم شدهاند تا ماده فوم یا لانهزنبوری را بهعنوان هسته در خود جای دهند. ماده هسته در حقیقت بین لایههای قوی کامپوزیتی قرار میگیرد تا اینرسی موضعی را افزایش داده و باعث افزایش استحکام پره بهخصوص استحکام کمانشی شود.

برای طراحی و تحلیل سازهای، نیاز به ثوابت مهندسی و خواص استحکامی لایههای مختلف کامپوزیتی است. جدول (۲) و (۳)، به ترتیب خواص مهندسی لایههای کامپوزیتی

³ Bi-directional Cross Ply

⁴ Unidirectional composite ply

شیشه (لایههای تکجهته و دوجهته) و مواد ایزوتروپیک (هسته، ژلکوت و لایه پیوندی) را نشان میدهد.

جناول ۲ - خواص محاليتكي مواد ايدو ترو پيك ۲۰۱۱.					
t_{ply}	ρ	11	G	Ε	ماد
(mm)	(kg/m^3)	V	(GPa)	(GPa)	
• /۶	۲۰۰	٠/٣۵	۰/۰۸۵	٠/٢۵	هسته
·/\۵	1878	۰/٣	۴	γ/۵λ	لايە پيوندى
·/\ \	1220	۰/٣	١/٣٨	۳/۴۴	ژل کوت

جدول ۳- خواص مکانیکی مواد ایزوتروپیک [۱۹].

	جدول ۲- ثوابت مهندسی و خواص مکانیکی لایههای کامپوزیتی [۱۹].											
	t _{ply} (mm)	ρ (kg/m ³)	<i>G</i> ₂₃ (GPa)	<i>G</i> ₁₃ (GPa)	<i>G</i> ₁₂ (GPa)	<i>v</i> ₂₃	<i>v</i> ₁₃	<i>v</i> ₁₂	E ₃ (GPa)	<i>E</i> ₂ (GPa)	E ₁ (GPa)	مادہ
_	•/١	19	٢	۴/۳	۴/۵	• / ١	• / ١	۰/٣	14	14	۴۳	تکجهته
	• /)	19	٢	٢	۹/۵	٠/٢	٠/٢	• 18	11	١٢	۱۳	دوحهته

جدول ۴- استحکامهای نهایی کامپوزیت شیشه [۱۹].

<i>F</i> ₂₃ (MPa)	<i>F</i> ₁₃ (MPa)	<i>F</i> ₁₂ (MPa)	<i>F</i> ₃ (<i>t</i> / <i>c</i>) (MPa)	<i>F</i> ₂ (<i>t/c</i>) (MPa)	<i>F</i> ₁ (<i>t</i> / <i>c</i>) (MPa)	مادہ
١٠	۳۵	۳۶	42 / 122	42 / 121	914/220	تكجهته
٣٩	۳۸	144	۴۰ / ۵۷۰	10. / 10.	10. / 10.	دوجهته

که E مدول یانگ، G مدول برشی و v نسبت پواسون است. جهتهای ۱، ۲ و ۳ در سیستم مختصات نشان داده در شکل (۷) بهترتیب نمایانگر جهات طولی، عرضی و عمودی مواد است. جدول (۴) استحکامهای فشاری و کششی مواد کامپوزیتی شیشه را نشان میدهد.

که F استحکامهای مواد را نشان میدهد که t نشانگر کششی بودن و c نشانگر فشاری بودن استحکام است.

۳-۲- پایه ٔ اتصال و شرایط مرزی پره

پایه نقش موثری در عملکرد سازهای و ایرودینامیکی توربین دارد. اتصال پایهها نسبت به پره متقارن بوده و مطابق شکل (۸) با سه حالت این اتصال امکانپذیر است. اتصال از نوع میانه (شکل (۸–الف))، کمترین نیروی پسا را ایجاد میکند و خمش زیادی را به پره وارد میکند؛ چراکه فقط از یک پایه برای اتصال هر پره استفاده شده است. اتصال پایه در انتهای پره بهترین عملکرد ایرودینامیکی را ایجاد میکند، ولی ازلحاظ سازهای،

این نوع اتصال تا پنج برابر تنش بیشتری نسبت به حالت یکچهارم (منظور از انتهای پره این است که بین موقعیت میانه و انتهایی قرار دارد و نه اینکه دقیقا روی یکچهارم قرار داشته باشد) ایجاد می کند که مناسب نیست؛ لذا انتخاب اتصال یکچهارم انتخاب بهتری برای اتصال پایه به پرههاست. پره (۲۲/۰ و ۲۸/۰) از ابتدا و انتهای پره است. یکی دیگر از موارد اتصال پایه به پره موقعیت اتصال نسبت به وتر پره است. در بیشتر موارد ساختی پایه به وسط طول وتر پره متصل شده مادون صوت در فاصله یکچهارم وتر از لبه حمله (۲/۵۰) قرار دارد، این نقطه برای اتصال مناسبت تا نیروهای لازم بهتر ایجاد شوند [۲۰].

¹ Strut



شکل ۸- انواع اتصال پایه به پرهها بسته به موقعیت نسبت به طول پره: الف) میانه پره، ب) یکچهارم پره، ج) انتهای پره [۲۰].

۳-۳- بارگذاری بحرانی

طراحی و تحلیل سازه بر اساس بدترین شرایط بارگذاری یا بارگذاری بحرانی انجام می گیرد. بارگذاری بحرانی برای توربین بادی وقتی است که توربین در حالت سکون باشد و سمت فشار یا مکش پره دقیقا رو به باد باشد. از آنجایی که نیروی وارده به پره با سرعت باد رابطه مستقیم دارد، باید سرعت باد بیشینه مشخص گردد [۲۱]. استاندارد ۱۰–۶۲۴۰۰ IEC استانداردی است که الزامات ایمنی را برای توربینهای باد بیان می کند این استاندارد جدولی مطابق جدول (۵) ارائه می کند که می توان از آن بحرانی ترین سرعت باد یک منطقه را بر اساس کلاس بندی و میانگین سرعت باد برای طراحی و تحلیل انتخاب کرد.

جدول ۵- کلاسهای طراحی توربین بادی [۲۱].

کلاس IV	کلاس III	کلاس II	کلاس I	سرعت باد
				(m/s)
۶	V/Δ	Λ/Δ	۱.	ميانگين
47	۵۲/۵	۵۹/۵	٧٠	بحراني

همان طوری که ذکر شد، حالت بحرانی برای پره توربین بادی زمانی است که باد عمود به سطح فشار (زاویه حمله ۹۰ درجه) ایروفویل در حالت بارگذاری شدید (بحرانی) بوزد درحالی که توربین نمی چرخد. در این حالت خمش ناشی از باد بیشینه است. برای سرعت باد میانگین ۱۰ متر بر ثانیه سرعت باد بحرانی ۷۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته می شود. بنا به هندسه پره این توربین می توان ضریب پسا را با تقریب مناسب و در نظر گرفتن پره به صورت صفحه تخت محاسبه نمود. با توجه به نسبت ارتفاع به وتر پره معادل ۲۰، ضریب پسا برای این پره

برابر ۱/۵ خواهد بود. نیروی پسا حاصله از نیروی باد از رابطه زیر به دست میآید:

$$D = C_D \left(\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A_b\right) \tag{f}$$

که در آن C_D ضریب پسا، ρ چگالی هوا، $_{\infty}U$ سرعت باد و A_b مساحت صفحه تخت است. در ضمن استاندارد IEC ضریب اطمینان ۱/۳۵ را هم برای شرایط بحرانی در نظر میگیرد که باید در ضریب پسای ناشی از باد بحرانی ضرب شود؛ درنتیجه با استفاده از رابطه (۴)، نیروی پسای اعمالی به سمت فشار پره توربین معادل (۴)، میشود. با تقسیم این نیرو به ارتفاع، نیروی گسترده در راستای ارتفاع، معادل یک تیر با دو تکیه گاه ساده و نیروی اعمالی گسترده مدل کرد. یک تیر با دو تکیه گاه ساده و نیروی اعمالی گسترده مدل کرد. با توجه به نمودارهای نیروی برشی و ممان خمشی منتنجه از نمودار نیرویی آزاد تیر فرض شده در شکل (۹)، حداکثر ممان خمشی وارده به پره برابر ۷۹/۴۱ N.m خواهد بود که به سطح مقطع وسط پره وارد میشود.



شکل ۹- نمودارهای: الف) شرایط مرزی و نیرویی تیر، ب) آزاد نیرویی، ج) نیروی برشی، و د) ممان خمشی.

۳-۴- معیار شکست

در نظر گرفتن ضریب اطمینان برای طراحی سازههای مختلف امری ضروری است. شرکت جرمنیشر لوید^۱ برای توربینهای بادی، ضرایب اطمینان جزئی متناسب با شرایط کاری مختلف در نظر گرفته است که از جدول (۶) قابلمشاهده است [۲۲]. ضریب اطمینان پره از رابطه زیر به دست می آید:

$$n_b = C_o \prod_i n_i \tag{(a)}$$

 n_i مریب اطمینان پره، c_o مقدار ثابت ۱/۳۵ و n_b ضریب اطمینان جزئی است.

جدول ۶- ضرایب اطمینان جزئی توربین های باد [۲۲].

مقدار	ضریب اطمینان جزئی n _i
١/٣۵	تاثیر پیرشدگی
1/1	تاثیر دما
1/1	روش ساخت

ضریب اطمینان بقیه شرایط کاری، برابر یک در نظر گرفته میشود؛ لذا ضریب اطمینان پره ۲/۲ به دست میآید. مطابق رابطه زیر با تقسیم کردن کرنش نهایی به ضریب اطمینان پره، حداکثر کرنش مجاز به دست میآید که معیار طراحی و تحلیل خواهد بود.

$$\varepsilon_{allow} = \frac{\varepsilon_{ultimate}}{n_b} \tag{9}$$

با استفاده از رابطه (۶)، قانون هوک و جدول (۴)، کرنشهای مجاز کششی (t) و فشاری (c) مواد کامپوزیتی بدست میآید که از جدول (۲) قابل مشاهده است.

جدول ۷- کرنشهای مجاز فشاری و کششی مواد

	كامپوزيتى.					
$\mathcal{E}_{allow,3}$	(1· ⁻ ″)	$\mathcal{E}_{allow,2}$	(1•-*)	$\mathcal{E}_{allow,1}$	(1•-~)	
(c)	(t)	(c)	(t)	(c)	(t)	ماده
-٣/٩٨	۱/۳۶	-٣/٩٢	۱/۳۶	-۵/۵۴	٩/۶۴	تکجهته
-٣/۶٢	۱/۶۵	-۵/۶Y	۵/۶۷	-۵/۲۳	۵/۲۳	دوجهته

PreComp عیین ضخامت مورد نیاز لایه ها با کد PreComp

همان طور که ذکر شد شکل (۷) لایه چینی سازهای مناسب پرههای توربین باد را نشان می دهد. این لایه چینی، استحکام نهایی و کمانشی لازم را به شرط ضخامت مناسب لایه ها به پره توربین بادی می دهد. البته این لایه چینی پیشنهادی است و طراح با تغییر شرایط محیطی و بارگذاری می تواند این طرح کلی را تغییر دهد، برای مثال به قصد بالابردن استحکام برشی پره می تواند جای لایه های تک جهته و دوجهته را عوض کند. برای نهایی کردن طراحی سازه ای پره نیاز به تعیین ضخامت هر لایه در بخش های مختلف پره داریم. معیار مشخص کردن ضخامت هر لایه به شرح زیر است^۲ [۲۳]:

لایه دو جهته کامپوزیتی:

ازآنجایی که عموما پره تحت بارگذاری برشی قرار نمی گیرد و بارگذاری اصلی از نوع خمشی است، این لایه بیشتر از اینکه ازنظر سازهای موردبررسی قرار بگیرد، ازنظر ساختی بررسی می شود. همان طور که ذکر شد، وظیفه اصلی این لایه ممانعت کردن از پخش و باز شدن لایههای دیگر است. به جهت رسیدن به این هدف، از رابطه زیر برای تعیین ضخامت کل این لایه استفاده می شود:

$$t_{db} = \max[0.0025 \times \max(w_{panel-1}, w_{panel-2}, ..., w_{panel-i}), n_{dbplies}$$
(Y)
 $\times t_{db-ply}]$

^۲ لایه پیوندی و ژلکوت، باربر نیستند؛ برای هرکدام یک لایه کافی است.

i که در آن $w_{panel-i}$ عرض صفحه بین شبکههای برشی i و (+i است؛ $w_{panel-i}$ عرض صفحه بین شبکههای برشی e (+i است؛ t_{db-ply} است؛ هر لایه ماده دوجهته است که توسط کاربر م*abplies* کاربر مشخص می شود. برای پره موردنظر، پارامتر t_{db} معادل ۱/۱۴ میلی متر به دست می آید؛ لذا حداقل ۲ لایه از ماده کامپوزیتی دوجهته برای بخشهای مختلف موردنیاز است.

لایه تکجهته و هسته

برای رسیدن به سفتی مناسب به هدف مهار کرنش شکست لايهها، نياز است تعداد لايههاي موردنياز تكجهته و هسته هر بخش نیز تعیین گردد. واضح است پره از بخشهای مختلف با اهداف مختلف و مواد و لایهچینیهای متفاوت تشکیل شده است که شرایط پیچیدهای را برای حل تحلیل به وجود می آورد. هندسه ایرفویل به همراه شبکههای برشی نیز این چالش را بزرگتر میکند. برای این کار کدی بر پایه فرترن توسط گانجت بیر ' از NREL ' به نام PreComp' [۲۴]، توسعه یافته است. PreComp کدی است که ویژگیهای سازهای مقطعی پرههای کامپوزیتی را از قبیل صلبیت خمشی به دست میآورد. این خصوصیات شامل خواص سفتی مقاطع، خواص اینرسی و مرکز برشی پره نسبت به محورهای ایرودینامیکی پره است. برای ارزیابی سریع لایهچینی کامپوزیتها، اثرات آنها بر خواص پرهها و کرنشهای مواد به این ویژگیها نیاز است. PreComp به شکل هندسی پره و چیدمان داخلی لایههای کامپوزیت بهعنوان ورودی نیاز دارد [۲۵].

بر اساس رابطه کرنش تیر اویلر-برنولی (رابطه زیر) می توان صلبیت خمشی مورد نیاز پره برای مهار کرنش شکست را محاسبه کرد:

$$\varepsilon = \frac{Mb}{EI} \tag{(A)}$$

که در آن M ممان خمشی، d حداکثر فاصله مرکز برشی با پروفیل ایرفویل، a کرنش ایجادشده و EI صلبیت خمشی مقطع است. با در نظر گرفتن حداقل کرنش مجاز مواد در راستای طولی مطابق جدول (۲)، صلبیت خمشی مورد نیاز حول محور منطبق بر وتر ایرفویل برابر ۲N.۳ N.۳ EI است. ازآنجایی که تعداد لایههای مواد هسته و تکجهته هر دو مجهول هستند، نیاز است با آزمایش و خطا و چند تلاش با کد preComp لایهچینیای را به دست آورد که با کمترین جرم، صلبیت خمشی بالاتر از مقدار لازم داشته باشد. از آنجایی که کد preComp در چند دهم ثانیه خروجی میدهد، می توان با هزینه زمانی کمی به طراحی مطلوب رسید، در حالی که نرمافزارهای اجزای محدود، هزینه زمانی و مالی داشته و جواب را به طور دقیق (تحلیلی) نمیدهد.

جدول (۸) خروجیهای PreComp را نشان میدهد که با آن میتوان لایهچینی بهینه را مشخص کرد. با توجه به محاسبات انجامشده و مقایسه تلاشهای مختلف جدول (۸)، لایه چینی مناسب، لایهچینی تلاش چهار است؛ چراکه صلبیت خمشی آن برابر ۲N.۳ ۷۹/۱ = EI شدهاست، درصورتی که صلبیت خمشی موردنیاز ۲۹.۳ ۱۹۷ = EI هست. این لایهچینی ازلحاظ جرم نهایی پره از بقیه گزینهها بهینهتر است. جدول (۹) مشخصات لایهچینی نهایی پره را نشان میدهد.

³ Pre-Processor for Computing Composite Blade Properties

¹ Gunjit Bir

² National Renewable Energy Laboratory

دلواری احمدپور و شکریه | ۳

جرم بر واحد ارتفاع m (kg/m)	صلبیت خمشی <i>EI</i> ('Nm)		لايەچىنى'	تلاش
٠/٣٩٨۴	274/2	لبه فرار	شاەتيرھا	
		۲ لايه دوجهته	۶ لايه تکجهته	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	``
		شبکههای برشی	۱ لایه هسته	١
		۱۲ لايه تکجهته	لبه حمله	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	
•/٣٢۶٣	۲۰۰/۲	لبه فرار	شاەتيرھا	
		۲ لايه دوجهته	۴ لايه تکجهته	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	J
		شبکههای برشی	۱ لایه هسته	ì
		۶ لايه تکجهته	لبه حمله	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	
•/٢٨٢٧	۱۳۲/۵	لبه فرار	شاەتيرھا	
		۲ لايه دوجهته	۲ لايه تکجهته	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	
		شبکههای برشی	۱ لایه هسته	1
		۴ لايه تکجهته	لبه حمله	
		۱ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	
•/٢٧٢۴	144/4	لبه فرار	شاەتيرھا	
		۲ لايه دوجهته	۴ لايه تکجهته	
		۰ لایه هسته	۲ لايه دوجهته	×
		شبکههای برشی	۱ لایه هسته	1
		۲ لايه تکجهته	لبه حمله	
		۰ لایه هسته	۱ لايه دوجهته	

جدول ۸- خروجی PreComp بر حسب لایهچینیها.

۴– تحلیل اجزای محدود

در این بخش، با استفاده از نرمافزار تجاری آباکوس [۲۶]، پره طراحی شده با لایه چینی به دست آمده، تحلیل اجزای محدود می شود تا نتایج دقیق تر آن برای تصمیم نهایی مورداستفاده قرار گیرد. قابل ذکر است با توجه به هزینه های زمانی و محاسباتی تحلیل اجزای محدود، استفاده از این روش برای طراحی منطقی به نظر نمی رسد. حال آنکه کد PreComp سریع و با هزینه کم طراحی مناسب را نتیجه داد.

برای اینکه بارگذاری اعمالی به پره دقیقا مثل بارگذاری ناشی از باد باشد، به سمت فشار پره نیرویی فشاری از نوع Surface Traction اعمال شد که بردار نیرو به شکلی صحیح اعمال شود. اندازه این فشار ۶۰۷۵/۹ N/m^۲ در نظر گرفته شد.

جدول ۹- خواص لايەچينى نهايى پرە.

-	-	
۴ لايه تکجهته	شاەتيرھا	لايه چينې
۲ لايه دوجهته		
۱ لایه هسته		
۲ لايه تکجهته	شبکههای برشی	
۰ لايه هسته		
۱ لايه دوجهته	لبه حمله	
۲ لايه دوجهته	لبه فرار	
۰ لايه هسته		
	۵۹۴ گرم	جرم هر پره
1 Y 9/Y	(Nm ^{r}) EI_{flap}	خواص مقطعی پرہ
740.	$(N^{\tau}) EI_{lag}$	
۵ (۱۰۶)	$(Nm^{r}) EA$	
11 <i>8</i> /Y	$(Nm^{r}) GJ$	

ٔ برای تمام تلاشها یک لایه پیوندی و ژلکوت نیز وجود دارد.

با توجه انتخاب محل اتصال مناسب، پره از طرف سمت مکش در موقعیتهای ۲۰ درصد طول پره از ابتدا و انتهای پره کاملا بستهشد. نوع المان با توجه به نوع حل و پوستهای بودن مدل، R4S و اندازه دانه ۲۰/۰۰۳ انتخاب شد.

با فراخوانی نتایج، بیشینه جابجایی پره مطابق شکل (۱۰)، ۳۵/۵۸ میلیمتر گزارش شد.



شکل ۱۰– پره تغییرشکلیافته در نرمافزار تحلیل اجزای محدود.

شکل (۱۱) نشان میدهد در هر لایه از لایهچینی کامپوزیتی بحرانی ترین المان پره، مقدار معیار کرنش بیشینه چقدر است؛ طبق دادههای این نمودار، بیشترین مقدار معیار کرنش بیشینه در لایه دوم (لایه تکجهته) با مقدار ۱۹/۲ رخ میدهد. جدول (۱۰) وضعیت بحرانی ترین لایه پره را بر اساس معیارهای خرابی مختلف مواد کامپوزیت بیان میکند. مقادیر هر معیار بر اساس مولفههای تنش و کرنش محاسبه شده و توسط نرمافزار اجزای محدود محاسبه شدهاست. برای مثال مقدار معیار تسای-هیل با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$I = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{11}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X_{11}^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{22}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \qquad (9)$$

که در آن σ_{11} , σ_{22} و τ_{12} به ترتیب تنشهای اعمالی در جهت الیاف، در جهت عمود الیاف و برشی در نقطهای مشخص از سازه هستند؛ همچنین X_{11} , X_{22} و S_{12} به ترتیب استحکام راستای الیاف، عمود بر الیاف و برشی کامپوزیت هستند. اگر مقدار هر معیاری (*I*)، به یک برسد، نشانگر این است که سازه شروع به خرابی می کند. اگر مقدار معیار کمتر از یک باشد نشانگر سالمماندن سازه است.



شکل ۱۱– نمودار مقدار معیار کرنش بیشینه در طول ضخامت لایههای کامپوزیتی در بحرانی ترین المان پره.

د برای بحرانی ترین	یل اجزای محدو	۱۰- نتایج تحل	حدول ا
--------------------	---------------	---------------	--------

المان پره.			
مقدار	معيار خرابي		
٠/٩٧	تئورى كرنش بيشينه		
۰/۵۴	تئورى تنش بيشينه		
• /8٣	تسای-ھیل		
• /۶Y	تسای-وو`		
• /۴۳	خرابى فشارى الياف هشين		

تمام معیارهای خرابی استخراجشده از تحلیل اجزای محدود نشان میدهد، پره در برابر بارگذاری اعمالی ایمن خواهد بود و طراحی مبتنی بر حل تحلیل و کد PreComp با دقت بسیار خوبی تایید میشود. طراحی بر اساس معیار خرابی کرنش بیشینه انجام گرفته بود؛ مقدار این معیار در تحلیل اجزای محدود ۹۸'۰ به دست آمد که تقریبا برابر یک است؛ لذا علی رغم فرضیاتی که در طراحی سازهای وجود داشت، درصد اطمینان پذیری طراحی را می سازه وجود داشت، در جرم، ۲ اطمینان پذیری طراحی را می ساند. جدول (۱۱) اختلاف و در معیار خرابی، ۳ درصد اختلاف وجود دارد. قابل ذکر که هم کد preComp و هم نرمافزار اجزای محدود با توجه به و رودی هایی از قبیل چگالی هر ماده و هندسه، جرم را به عنوان خروجی ارائه می دهند. ضمنا همان طور که قبلا ذکر شد، مقدار معیار کرنش بیشینه هم توسط نرمافزار اجزای محدود با

تنشهای بدستآمده و استحکامهای ارائهشده محاسبه می گردد؛ همچنین مقدار معیار خرابی در روش تحلیلی مبتنی بر کد PreComp به طور پیش فرض یک در نظر گرفته شد. درنهایت با توجه به این دو پارامتر اساسی، بهینه بودن پره طراحی و تحلیل شده تایید می گردد.

جدول ۱۱- مقایسه طراحی انجام گرفته با Precomp و

محدود.	اجزاى	تحليل
--------	-------	-------

اختلاف	تحليل اجزاى	کد	مشخصه
	محدود	PreComp	
۲./	8.8/2	۵۹۴/۰	جرم (g)
/٣	•/٩٧	۱/۰۰	معيار كرنش بيشينه

همچنین با توجه به اهمیت پدیده تشدید و خرابیهای زیاد این پدیده در صورت رویداد، لازم است برای سازههای مختلف تحلیل فرکانسی هم انجام شود. با تحلیل فرکانسی انجامشده برای پره، پنج فرکانس طبیعی اول پره و شکل مودهای ^۱ متناظر آن از جدول (۱۲) قابلمشاهده است.

جدول (۱۲) پنج فرکانس طبیعی اول پره و شکل مودهای

	ان.	
فرکانس طبیعی (Hz)	شکل مود	مود
٣۶/٨١٨		اول
54/884		دوم
V•/FFT	\smile	سوم
187/22	\sim	چهارم
१८६/८४		پنجم

۵- جمعبندی و نتیجهگیری

بعد از مرور انواع توربین بادی و عملکرد آنها، توربین بادی محور عمودی از نوع داریوس با پرههای مستقیم برای انجام مطالعه حاضر انتخاب شد تا مصالحهای بین عملکرد، قیمت، راحتی طراحی و ساخت و اعتمادپذیری از توربین حاصل شود.

بعد از مشخص شدن نوع توربین، پارامترهای مهم طراحی ایرودینامیکی موردبحث قرار گرفت و درنهایت با توجه به عملکرد ایرودینامیکی، طراحی مناسبی برای توربین در سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه و توان خروجی ۱ کیلووات انجام شد. صلبیت توربین با توجه به عملکرد بهینه ایرودینامیکی ۲۶۳/۰ در نسبت سرعت نوک بهینه ۲۱۴ انتخاب شد. در ادامه تعداد پرههای توربین و زاویه گام بهینه به ترتیب، ۳ و ۲- درجه در نظر گرفته شد. نسبت منظری بهینه پره برای حاصل شدن عملکرد مناسب با حفظ صرفه توربین ۲۰ انتخاب شد و بعد از بررسی انواع ایرفویل ها برای گرفتن بهترین کارایی برای توربین محور عمودی، ایرفویل ۲۰۰-W-۶۰ در نظر گرفته شد. ارتفاع پره توربین ۲/۱۸ متر، طول وتر ۱۱ سانتیمتر، قطر روتور مدت

بعداز نهایی شدن طراحی ایرودینامیکی و ارائه شدن مدل مفهومی، طراحی سازهای و لایهچینی کامپوزیتی موردبحث قرار گرفت. با توجه به هندسه و اجزای پیچیده پره توربین بادی، این مرحله با استفاده از طراحی تحلیلی با کمک کد PreComp انجام گرفت که نتایج خوبی برای طراحی اولیه ارائه شود. در ابتدا بخشهای مختلف پره شامل شاهتیر، لبه حمله و فرار و شبکههای برشی، وظایف و عملکرد آنها بررسی شد و برای هر بخش یک لایهچینی مفهومی با مجهول ماندن ضخامت لايهها ارائه شد. خواص هر لايه كامپوزيتي مناسب برای پره توربین بادی از قبیل مواد کامپوزیتی تکجهته و دوجهته، هسته، لایه پیوندی و پوششی ارائه شد تا با استفاده از آنها بتوان طراحي را ادامه داد. بهترين موقعيت اتصال پره به بازوی اتصال برای شرایط مرزی ۰/۲ و ۰/۸ ارتفاع پره و ۰/۲۵ طول وتر از سمت لبه حمله پیشنهاد شد تا مصالحهای بین عملکرد سازهای و ایرودینامیکی مهیا گردد. با مروری بر استاندارد IEC و تئوری نیروهای برا و پسا، نیرویی معادل

¹ Mode Shape

- [9] Wang L, Kolios A, Nishino T, Delafin PL, Bird T (2016) Structural optimisation of vertical-axis wind turbine composite blades based on finite element analysis and genetic algorithm. Compos. Struct. 153: 123–138.
- [10] Castro D, Pertuz A, León-Becerra J (2022) Mechanical behavior analysis of a vertical axis wind turbine blade made with fique-epoxy composite using FEM. Procedia Comput. Sci. 203: 310–317.
- [11] Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B (2018) Towards optimal aerodynamic design of vertical axis wind turbines: Impact of solidity and number of blades. Energy 165: 1129–1148.
- [12] Hand BP, Kelly G, Cashman A (2021) Aerodynamic design and performance parameters of a lift-type vertical axis wind turbine: A comprehensive review. Renew. Sustain. Energy Rev. 139: 110699.
- [13] Hand BP, Cashman A (2017) Conceptual design of a large-scale floating offshore vertical axis wind turbine. Energy Procedia 142: 150–157.
- [14] Rezaeiha A, Kalkman I, Blocken B (2017) Effect of pitch angle on power performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine. Appl. Energy 197: 132–150.
- [15] Battisti L, et al. (2018) Experimental benchmark data for H-shaped and troposkien VAWT architectures. Renew. Energy 125: 98–110.
- [16] Lee S-L (2021) Active vibration suppression of wind turbine blades integrated with piezoelectric sensors. Sci. Eng. Compos. Mater. 28: 402–414.
- [17] Fraile CW (2020) Accelerating Wind Turbine Blade Circularity. Themat. reports May: 11–13.
- [18] Bir G, Lawson M, Li Ye (2011) Structural Design of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine Composite Blade. J. Sol. Energy Eng. 133: 1–5.
- [19] Leong M, Overgaard LCT, Thomsen O, Lund E, Daniel I (2012) Investigation of failure mechanisms in GFRP sandwich structures with face sheet wrinkle defects used for wind turbine blades. Compos. Struct. 94: 1501–1513.
- [20] Miao W, et al. (2023) Recommendation for strut designs of vertical axis wind turbines: Effects of strut profiles and connecting configurations on the aerodynamic performance. Energy Convers. Manag. 276: 116436.
- [21] IEC (2005) IEC 61400-1: Wind Turbines Part 1: Design Requirements. Int. Electrotech. Comm.
- [22] Germanischer L (2010) DNV Standard GL. IV -Rules and Guideline Industrial Services. Guidel. Certif. offshore Wind turbines. Hamburg: DNV. Available: www.gl-group.com/GLRenewables.
- [23] Bir G (2001) Computerized Method for Preliminary Structural Design of Composite Wind Turbine Blades. J. Sol. Energy Eng. 123: 345–358.

۱۴۵۷ نیوتن با احتساب ضرایب ایمنی مربوطه تحت بار شدید باد برای پره در نظر گرفته شد. با این نیرو، حداکثر ممان خمشی ۷۹/۴۱ نیوتن متر به مرکز پره وارد می شود که مبنای طراحی سازهای با استفاده از تئوری خرابی کرنش بیشینه شکست شد. با استفاده از استاندارد منتشرشده از شرکت GL، حداکثر کرنش مجاز برای پره توربین ۵/۲۳ میلی استرین به دست آمد. در ادامه با استفاده از ملاحظات ساختی ضخامت لایه دوجهته برای هر بخش مشخص شد. با به دست آمدن صلبیت خمشی کاندیداهای ضخامتهای مختلف با استفاده از نهایی شد و طراحی تکمیل شد. وزن هر پره حدود ۶۰۰ گرم به دست آمد که برای این توربین بسیار سبک است. بعد از انجام طراحی، مدل سازهای ارائه شده تحلیل اجزای محدود شد که با دقت خوبی طراحی را تایید و ایمن تلقی کرد.

مراجع

- Brøndsted P, Nijssen R, Goutianos S (2023) Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials. Woodhead Publishing.
- [2] Hau E, von Renouard H (2006) Wind Turbines. Springer Berlin Heidelberg.
- [3] Ghorani MM, Karimi B, Mirghavami SM, Saboohi Z (2023) A numerical study on the feasibility of electricity production using an optimized wind delivery system (Invelox) integrated with a Horizontal axis wind turbine (HAWT). Energy 268: 126643.
- [4] Mohamed RR (2017) A Review on Vertical and Horizontal Axis Wind Turbine. Int. Res. J. Eng. Technol. Sept: 247–250.
- [5] Castellani F, Astolfi D, Peppoloni M, Natili F, Buttà D, Hirschl A (2019) Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. Machines 7: 35.
- [6] Marsh P, Ranmuthugala D, Penesis I, Thomas G (2015) Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance characteristics of vertical axis tidal turbines. Renew. Energy 81: 926– 935.
- [7] Sun M, et al. (2024) A novel small-scale H-type Darrieus vertical axis wind turbine manufactured of carbon fiber reinforced composites. Renew. Energy 238: 121923.
- [8] Xue P, Wan Y, Takahashi J, Akimoto H (2024) Structural optimization using a genetic algorithm aiming for the minimum mass of vertical axis wind turbines using composite materials. Heliyon 10(12): e33185.

- [25] NREL (2024) PreComp. Available: https://www.nrel.gov/wind/nwtc/precomp.html.
- [26] Dassault Systèmes (2016) Abaqus Analysis User's Guide Volume II.
- [24] Bir G (2005) User's Guide to PreComp (Pre-Processor for Computing Composite Blade Properties). National Renewable Energy Lab.