



مقاله کامل پژوهشی

مواد و فناوری‌های ساخت پره توربین بادی محور افقی کوچک

عباس اکبری جوچی^۱، ابوالفضل پوررجیبیان^{۲*}، سعید رهگذر^۲، مازیار دهقان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

^۲ استادیار، پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه مواد و انرژی، مشکین دشت، البرز، ایران

تاریخچه مقاله:

ثبت اولیه: ۱۳۹۹/۰۲/۰۶

دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۹/۰۳/۲۰

پذیرش قطعی: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

کلیدواژه‌ها:

توربین بادی کوچک،

پره،

کامپوزیت،

چوب،

فناوری ساخت

چکیده نظر به پتانسیل مناسب انرژی بادی در ایران، امکان بهره‌گیری از توربین‌های بادی کوچک همانند توربین‌های بزرگ برای تأمین بخشی از برق مورد نیاز کشور وجود دارد. تحقیق حاضر به مواد مورد استفاده در تولید پره توربین بادی محور افقی کوچک و روش‌های ساخت آن می‌پردازد. به این منظور چوب و کامپوزیت، به عنوان دو ماده اصلی مورد استفاده در ساخت پره، بررسی شده‌اند. در ادامه، روش‌های اصلی تولید پره‌های چوبی شامل ماشین‌های براده‌بردار رایانه‌ای، کنترل عددی و کپی تراش و همچنین روش‌های تولید پره‌های کامپوزیتی از جمله لایه‌چینی خیس، پیش‌آغشته، تزریق رزین و قالب‌گیری تحت فشار مطالعه شده‌اند. سپس روش چاپ سه‌بعدی و مواد پلیمری مورد استفاده در آن به منظور تولید پره معرفی شده است. بررسی انجام گرفته نشان می‌دهد که پارامتر خستگی، نقش مهمی در تعیین جنس پره دارد و انتخاب روش ساخت با توجه به نوع کاربرد و تعداد پره مورد نظر، نیازمند تحلیل اقتصادی مرتبط است. با وجود مزایای زیست‌محیطی چوب، پیچیدگی‌ها و هزینه ساخت پره چوبی مانع از تولید سریع و ارزان آن است؛ اما استفاده از کامپوزیت، هرچند که همراه با معضلات زیست‌محیطی است، برای تولید انبوه پره، اقتصادی‌تر است. روش چاپ سه‌بعدی علیرغم ضعف خستگی، روشی سریع و نسبتاً ارزان برای تولید مدل توربین بادی کوچک برای انجام آزمایش‌های تونل باد است.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.228466.1087>

URL: https://www.jamt.ir/article_126423.html

Original Research Article

Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT): Vol. 10, No. 3, (Autumn 2021), 1-13

Materials and Manufacturing Techniques of Small Horizontal Axis Wind Turbine Blade

Abbas Akbari Jouchi¹, Abolfazl Pourrajabian^{2*}, Saeed Rahgozar², Maziar Dehghan²

¹ M. Sc. Student, Department of Energy, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran

² Assistant professor, Department of Energy, Materials and Energy Research Center (MERC), MeshkinDasht, Alborz, Iran

Paper History:

Received: 2020-04-25

Revised in revised form: 2020-06-09

Accepted: 2021-08-25

Abstract

Regarding the suitable potential for wind energy in Iran, it is possible to employ small wind turbines such as large ones to supply part of the electricity load of the country. The present study deals with materials used in small horizontal axis wind turbine blades and their fabrication methods. To this end, the wood and the composite, as the two main materials used in blades, have been investigated. Then, the main

*عهده دار مکاتبات

نشانی: ایران، البرز، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده انرژی، تلفن: ۰۲۶-۳۶۲۸۰۰۴۰، دورنگار: ۰۲۶-۳۶۲۰۱۸۸۸

پیام نگار: a.pourrajabian@merc.ac.ir

Please cite this article as: Akbari Jouchi, A., Pourrajabian, A., Rahgozar, S., Dehghan, M., "Materials and manufacturing techniques of small horizontal axis wind turbine blade", *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 10, No. 3, (2021), 1-13. (<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.228466.1087>).



Keywords:

Small Wind Turbine,
Blade,
Composite,
Wood,
Fabrication Method

methods of producing wooden and composite blades have been analyzed. Finally, the 3D printing method and polymer materials used in this technique have been introduced. The study shows that the fatigue parameter has an important role in determining the blade's material and the fabrication method. Despite the environmental benefits of using wood, the complexity and the manufacturing costs prevent rapid and affordable production of wooden blades. On the other hand, the mass production of composite blades is more economical, although it has environmental impacts. Despite the fatigue issue of the 3D printed blades, the 3D printing method is a fast and relatively inexpensive technique for fabrication of small wind turbine models for wind tunnel tests.



<https://doi.org/10.30501/jamt.2020.228466.1087>

URL: https://www.jamt.ir/article_126423.html

۱- مقدمه

در ادامه، معرفی روش‌های ساخت پره، مزایا، معایب و چالش‌های آن‌ها ارائه می‌شود.

۲- روش تحقیق**۲-۱- توربین بادی محور افقی**

توربین‌های بادی محور افقی به دودسته؛ رو به باد و پشت به باد؛ تقسیم‌بندی می‌شوند که درحال حاضر، اکثر آن‌ها رو به باد با تعداد سه پره هستند. چگالی هوا، سرعت باد، هندسه پره به همراه بزرگی آن از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر در تولید توان هستند. هندسه آیرودینامیک خاص پره توربین بادی، به منظور استحصال انرژی جنبشی موجود در هوا و تبدیل آن به انرژی مکانیکی است. سهم بخش‌های نزدیک به نوک پره در تولید قدرت از بخش‌های میانی و ریشه پره بیشتر است. گشتاور راه‌اندازی در توربین‌های بزرگ، در تمام طول پره رخ می‌دهد؛ درحالی‌که در توربین‌های کوچک در ناحیه نزدیک تویی، ناحیه ضخیم با کارایی کم آیرودینامیکی، تولید می‌شود [۸].

سطح مقطع پره به شکل ایرفویل^۲ (شکل ۱) است که برای جذب بیشترین انرژی ممکن از جریان و سرعت سیال اطراف آن طراحی می‌شود. نیروهای اندرکنش سیال و ایرفویل که منتج از نیروهای فشاری و اصطکاکی است، نیروی برآ (عمود بر جریان نسبی) و پسا (هم‌راستا با جریان نسبی) نامیده می‌شوند. در شکل (۲) نیروی برآ، گشتاور آیرودینامیکی حول پره توربین بادی ایجاد می‌کند و انرژی جنبشی جریان هوا را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. انتخاب ایرفویل مناسب نقش مهمی در کارایی پره یک توربین بادی دارد. معیار کارایی ایرفویل، بزرگی نسبت نیروی برآ به پسا است. نیروهای آیرودینامیکی به هندسه ایرفویل، کیفیت صافی سطح و خواص سیال وابسته‌اند. جنس، درجه صافی سطح، تندی انحناء پره و

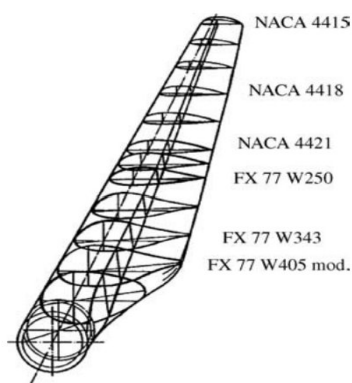
امروزه انرژی‌های تجدیدپذیر، منبعی غیرقابل انکار برای تأمین انرژی محسوب می‌شوند. انرژی بادی در طبقه‌بندی دسترسی و ظرفیت در زمره انرژی‌های تجدیدپذیر، بعد از انرژی‌های خورشیدی و آبی قرار دارد. توان موردنیاز جهان براساس آمار، حدود ۱۸ تراوات است [۱]. این درحالی است که توان قابل‌استحصال از انرژی بادی در سطح خشکی‌ها به میزان ۶۸ تراوات است [۲]. مطابق گزارش^۱ REN21 [۳]، توان تولیدشده از انرژی بادی در سال ۲۰۱۸، ۵۹۱ گیگاوات بوده است. این حجم از ظرفیت انرژی بادی، نقش مهمی در ایجاد اشتغال در سطح جهان داشته است [۴].

استحصال انرژی باد به وسیله توربین بادی که خود به دو گروه توربین‌های کوچک و بزرگ تقسیم‌بندی می‌شود، انجام می‌گردد. آمارها نشان می‌دهند که تا پایان سال ۲۰۱۵، ۹۹۰,۰۰۰ توربین بادی کوچک در سطح جهان نصب شده است [۵]. براساس مطالعات، ظرفیت انرژی بادی در ایران حداقل ۶۵۰۰ مگاوات تخمین زده می‌شود [۶]. قابل ذکر است که در ایران تولید برق از انرژی بادی بالغ بر ۹۱ مگاوات [۷] است که فقط از ۱/۴ درصد پتانسیل باد استفاده می‌شود.

استاندارد IEC61400-2، توربین بادی محور افقی را با مساحت جاروب کمتر از ۲۰۰ مترمربع، توربین بادی کوچک تعریف می‌کند [۸]. توربین بادی کوچک، طول پره کمتر از ۸ متر و قدرت خروجی حداکثر ۵۰ کیلووات دارد [۹]. مطالعه حاضر، به معرفی مواد مورد استفاده در پره توربین بادی محور افقی کوچک و بررسی روش‌های ساخت آن می‌پردازد. در این راستا، پس از معرفی توربین بادی محور افقی کوچک و پره آن، به مواد مورد استفاده در پره به‌ویژه چوب و کامپوزیت اشاره می‌شود و ویژگی‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

² Airfoil

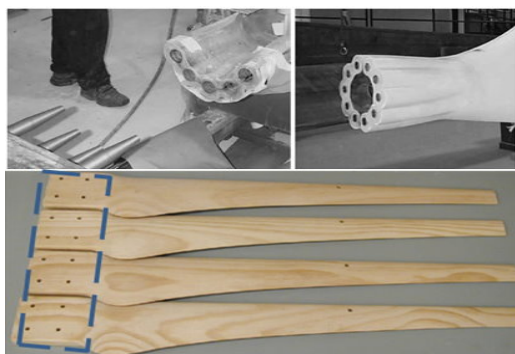
¹ Renewable Energy Policy Network for the 21st



شکل ۳. مقاطع و ایرفویل‌های مختلف در طول پره [۱۲]

ساختمان پره باید هم‌زمان، هم تنش (σ) را تحمل کند و هم کمترین تغییرشکل را برای جلوگیری از برخورد با برج توربین داشته باشد. شکل ریشه پره برای اتصال به توبی، مناسب ساخته می‌شود تا بیشترین بارها را تحمل کند.

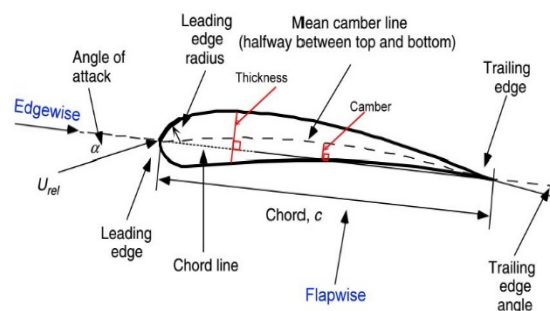
از آنجاکه بارهای وارده به شدت متغیر، متناوب و تغییر جهت‌دهنده هستند، خستگی مصالح پره توربین بادی، مشکل بسیار اساسی است [۱۱]. به این منظور برای کاهش تنش‌ها، ریشه در جهت خمسو (flap-wise)، تا حد ممکن ضخیم ساخته می‌شود. همچنین اتصال بین ریشه پره و توبی از حساسیت ویژه‌ای برخوردار است و پرهیز از نقاط مستعد تمرکز تنش در قسمت اتصال پره به توبی مهم است. سکویی در ریشه پره‌ها، با شکل مناسب و متناسب با جنس پره (کامپوزیت یا چوب)، برای امکان اتصال پره به توبی ایجاد می‌شود (شکل ۴).



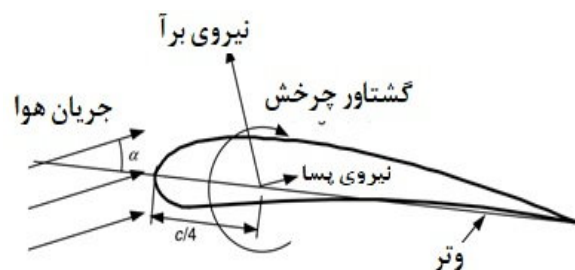
شکل ۴. اتصال پره کامپوزیتی (بالا) و چوبی (پایین) به توبی [۱۱-۱۲]

روش ابداعی هوتر^۱ [۱۲] برای افزایش تحمل اتصال پره توربین‌های بزرگ به توبی، مطابق شکل (۵) به کار می‌رود. رشته‌های الیاف شیشه در این روش، از بدنه پره به ناحیه ریشه

نوع ایرفویل، همچنین دما، فشار و سرعت سیال مؤلفه‌های تولید الگوی جریان در اطراف ایرفویل هستند. خانواده ایرفویل‌های NACA و SG [۹-۱۰] از جمله ایرفویل‌های متداول مورد استفاده می‌باشند. به‌طورکلی ایرفویل‌ها با کارایی بالای آیرودینامیکی در نزدیکی نوک پره و ایرفویل‌های ضخیم به‌منظور تحمل بارهای خمشی در ریشه پره استفاده می‌شوند [۱۱].



شکل ۱. هندسه مقطع پره (ایرفویل) و پارامترهای آن [۱۲]



شکل ۲. نیروهای وارد بر مقطع پره [۱۲]

۲-۱-۱- پیکره‌بندی پره

بر اساس اصول آیرودینامیک، طول وتر ایرفویل از ریشه به سمت نوک پره کاهش می‌یابد و گاهی با تغییر خانواده ایرفویل (شکل ۳) در طول پره همراه است [۱۲]. تغییر در خانواده ایرفویل در طول پره توربین‌های کوچک به‌علت پیچیدگی تولید و هزینه بالا، کمتر استفاده می‌شود [۱۱].

پارامتر مهم دیگر، تغییرات زاویه تاب (twist) پره (زاویه بین صفحه چرخش توربین و خط وتر ایرفویل) در راستای طولی پره است. به‌منظور استفاده بهینه از ایرفویل و قرارگیری آن در زاویه حمله ایده‌آل (جهت تولید بیشینه گشتاور آیرودینامیکی)، تغییرات زاویه تاب به‌تدریج از ریشه به سمت نوک پره کاهش می‌یابد.

¹ Hütter

ساختمان این ناحیه را با یک چالش ویژه روبه‌رو می‌کند. برای این پره‌ها، با افزایش فاصله پره نصب‌شده از برج، اهمیت انعطاف پره کمتر می‌شود.

در کنترل غیرفعال، پره باید دارای جنس و فیزیک قابل‌انعطاف باشد. با جاگذاری الیاف کربن در بین الیاف شیشه با ترتیبی خاص و متقارن نسبت به الیاف شیشه، قابلیت کنترل غیرفعال در پره الیاف شیشه‌ای ایجاد می‌شود. روش دیگر کنترل غیرفعال، ایجاد پیش‌خمش در پیکره‌بندی پره برای خودتنظیمی حین کارکرد تحت بارهای آیرودینامیکی است. در توربین‌های رو به باد، پیش‌خمش به سمت باد و دور شدن از صفحه چرخش است که درحین کار، پره به صفحه چرخش باز می‌گردد و در موقعیت و شرایط تنظیم مناسب قرار می‌گیرد. اعمال و چگونگی چنین روش‌هایی به جنس پره بستگی دارد. وضعیت برای پره‌های چوبی ساده‌تر و برای پره‌های کامپوزیتی (شکل ۷) پیچیده‌تر است.

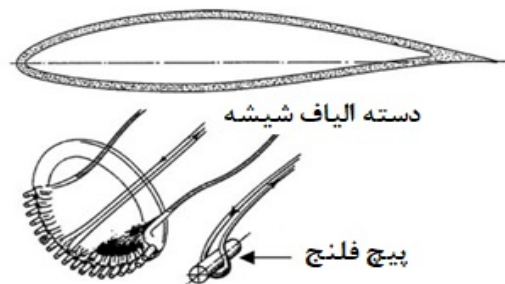
۲-۱-۲- آزمایش‌ها و آزمون‌های پره توربین بادی

در طراحی توربین باد که براساس استاندارد شماره IEC61400-1 انجام می‌شود [۱۲]، شناخت خواص مصالح مورد استفاده، ضروری است. در این راستا، آزمایش‌ها با بازرسی مواد اولیه خام و اجزاء تولیدی مانند چوب، الیاف، رزین، فوم و دیگر مواد صورت می‌گیرد.

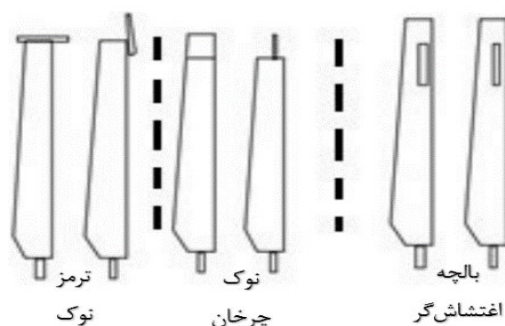
آزمون‌های پره توربین برای تأیید استحکام نهایی و خستگی، تحت استاندارد شماره IEC61400-23 انجام می‌شود. هدف از این آزمون‌ها، بررسی تحمل پره است که با بارگذاری پره یا مقطعی از آن انجام می‌شود. در شکل (۸) آزمون بارگذاری ایستا و خستگی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که آزمون‌ها در دو گروه مخرب و غیرمخرب با ارجحیت غیرمخرب انجام می‌شوند [۱۲]. آزمون خستگی از نوع مخرب است و آزمایش با مقدار واقعی تنش، برحسب نوع ماشین، تا چندین ماه طول می‌کشد. کاهش زمان با به‌کارگیری روش‌های آماری، امکان‌پذیر است که پیش‌بینی دقیق را با اندازه واقعی تنش فراهم می‌کند. با به‌کارگیری قانون ماینر^۳، مدت‌زمان یک آزمایش برای عمر ۲۰ ساله می‌تواند به ۱ ماه کاهش یابد [۱۳].

امتداد می‌یابد و با قالب‌گیری و ایجاد شکل مناسب برای اتصال به توپی و تزریق رزین، ساختمانی مطمئن ایجاد می‌شود.

کنترل توان توربین بادی به دو روش، فعال و غیرفعال، به کمک پره‌ها و تجهیزاتی مانند موتور و دستگاه‌های کنترل انجام می‌شود. هدف کلی تنظیم مقدار گشتاور آیرودینامیکی در طول پره، نگهداری توان توربین در سطحی مشخص است. در کنترل فعال، پره به‌وسیله موتور و دستگاه‌های کنترلی حول محور خود می‌چرخد و با قرارگیری سطح مقطع‌های پره (ایرفویل‌ها) در زوایای حمله مشخص، مقدار گشتاور کل آیرودینامیکی و در نتیجه توان توربین قابل‌کنترل است. در روش کنترل غیرفعال، توربین‌ها به دستگاه تنظیم و اماندگی^۱ مجهزند و مشخصه‌های آیرودینامیکی روتور^۲ به کمک انواع ترمزهای بالک (flap) آویخته آیرودینامیکی، تغییر می‌کند و سطح توان کنترل می‌شود (شکل ۶).



شکل ۵. ریشه پره کامپوزیتی جهت اتصال به توپی [۱۲]



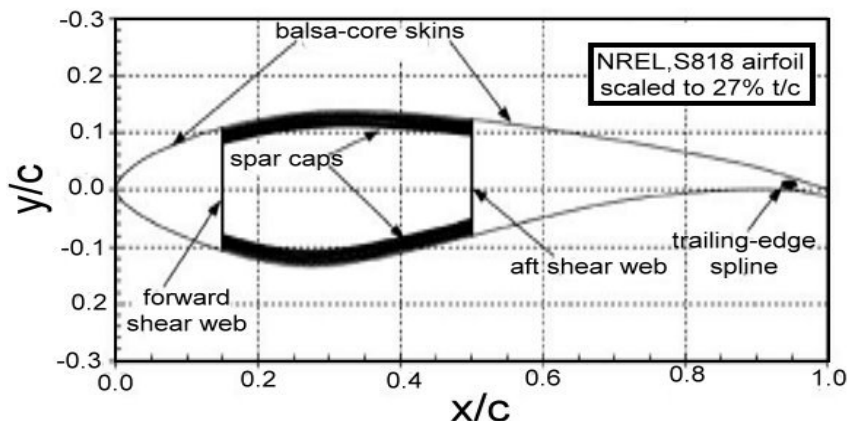
شکل ۶. ادوات کنترل توان خروجی به کمک روش غیرفعال [۱۲]

توربین‌های بادی کوچک برای به‌حداقل رسیدن هزینه، معمولاً فاقد دستگاه‌های کنترلی فعال هستند. نصب و مراقبت از پره‌های کوچک در نبود سازوکار کنترل فعال، آسان‌تر است؛ ولی به پره نازک‌تر نزدیک توپی، نیاز است که طراحی

¹ Stall-Regulated

² Rotor

³ Miner's Rule



شکل ۷. نمایش معماری داخلی و مقطع عرضی نوعی پره کامپوزیت [۱۲]



شکل ۸. آزمون ایستایی (چپ) و خستگی (راست) پره توربین [۱۱]

۲-۲- مواد کاربردی در پره

برای تولید پره و به‌ویژه پره توربین بادی کوچک، آشنایی با اصول مقاومت مصالح، خواص مصالح، انواع بارگذاری و طراحی اجزاء مکانیکی الزامی است [۱۵-۱۴]. مشخصات زیر از ویژگی‌های اصلی مصالح پره توربین بادی می‌باشند.

- بالاترین استحکام برای مقاومت در برابر بیشترین بارها؛
- بالاترین سفتی جهت مقاومت در مقابل تغییر شکل برای حفظ شکل آیرودینامیکی و عدم برخورد با برج و نیز عدم تغییر شکل‌های موضعی و شکست در مقابل بارهای فشاری (قابلیت انعطاف با حفظ سفتی مطلوب از مشخصات مصالح پره در توربین‌هایی با کنترل غیرفعال است)؛
- بالاترین تحمل در مقابل بارهای خستگی؛
- کمترین چگالی (ρ) برای کاهش وزن و به‌دنبال آن کاهش لختی به‌ویژه هنگام راه‌اندازی توربین بادی کوچک [۱۱]؛

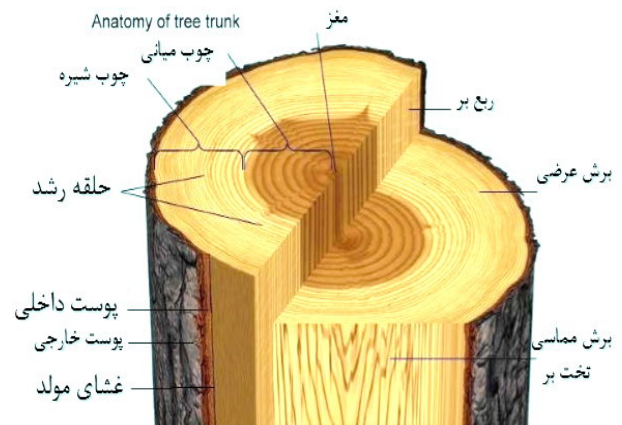
- مقاومت در برابر شرایط محیطی؛

- شکل‌پذیری مناسب در مراحل تولید و ساخت.

پره‌های توربین بادی کوچک نسبت به توربین‌های بزرگ با مصالح و روش‌های متنوع‌تری تولید می‌شوند؛ هرچند که فناوری مصالح پره‌های بزرگ قابل بسط به پره‌های کوچک است. کامپوزیت‌های مسلح به الیاف شیشه و کربن، مصالح غالب در ساخت اکثر پره‌ها، به‌ویژه با طول بیش از ۴۰ متر هستند [۱۶]. تنوع مصالح پره‌های کوچک در توربین‌هایی تا توان ۵۰ کیلووات و طول پره حدود ۸ متر، نسبت به توربین‌های بزرگ بیشتر است. تجربه نشان می‌دهد در توربین‌های کوچکی که طول عمر پره آن‌ها بیش از ۲۰ سال و با سرعت گردشی بیشتر و تحت بارهای ترکیبی ایستایی-نوسانی فراتر از 10^8 سیکل کار می‌کنند، توجه بیشتر به مشخصه خستگی، ضروری است [۱۷].

۲-۲-۱- چوب

چوب به‌عنوان مصالح مهندسی پایدار و سبز، ساده، مفید، مؤثر و بادوام، در گستره وسیعی مانند لوازم خانگی، کشتی، ملخ هواپیما، پره توربین بادی و کامپوزیت‌های پیشرفته کاربرد دارد. در شکل (۹)، قسمت‌های مقطع بریده‌شده از تنه یک درخت با خواص منحصر به فرد نشان داده شده است [۱۸].



شکل ۹. جزئیات تنه درخت و نوع برش‌ها

چوب ماده‌ای ناهمسانگرد است که برای پایداری ابعادی، به مراقبت نیازمند است. مؤثرترین مؤلفه در پایداری ابعادی، تغییرات رطوبت است. رطوبت بر خواص چوب و کاربرد آن در تولیدات چوبی بسیار تأثیرگذار است. با تغییر رطوبت چوب، ابعاد و هندسه آن تغییر می‌کند. جذب رطوبت در چوب همراه با چاقی است و تغییرات ابعادی به‌علت ناهمسانگردی، غیرقابل پیش‌بینی خواهد بود.

چگالی از خواص مهم چوب، به‌شدت به میزان رطوبت موجود در آن وابسته است که معمولاً رطوبت، کمتر از یک بوده و فقط در بعضی از چوب‌های نواحی گرمسیری این مقدار از یک بیشتر است.

انتخاب الوار مناسب برای تولید پره باید بسیار دقیق و با توجه به ظرایف رفتار چوب (با مطالعه مراجع معتبر) انجام شود. ترکیبی از دو گروه سلول‌های طولی و شعاعی در تنه یک درخت، یک بافت سلولی را ایجاد می‌کند که استحکام و خواص چوب را به وجود می‌آورد. سلول‌های طولی در امتداد بدنه رگه‌ها (مهم‌ترین مشخصه ساختاری چوب) و سلول‌های شعاعی، عمود بر سلول‌های طولی هستند.

اره‌کاری چوب مطابق با جهت سلول‌ها، در سه جهت

شعاعی، مماسی و عرضی (مقطعی) برای دستیابی به بهترین خواص مورد نیاز انجام می‌شود (شکل ۹) [۱۸]. در پره چوبی تطبیق امتداد رگه‌ها با امتداد طول پره منجر به استفاده بهینه از خاصیت ناهمسانگردی چوب می‌شود [۱۹].

عیوب و بی‌نظمی‌ها موجب کاهش استحکام، دوام و ارزش‌های کاربردی و نیز خرابی ظاهر چوب می‌شود. گره‌ها، چاکچه شعاعی و چاکچه محیطی مواردی از عیوب هستند (شکل ۱۰). عیوب انقباضی که ناشی از ضعف در عملیات است، عبارت‌اند از: شکم عرضی یا طولی، شمشیری شدن و پیچش در چوب.



شکل ۱۰. عیوب چاک شعاعی و محیطی در چوب.

۲-۲-۱-۱- استحکام چوب

مقاومت به خستگی چوب، عالی است و مشخصه نسبت استحکام به چگالی آن بسیار رضایت‌بخش است؛ هرچند تعیین و تشخیص دقیق خواص آن با اطمینان بالا، به‌علت رشد طبیعی و غیر قابل مراقبت، مقدور نیست [۱۹]. خواص مکانیکی چوب (شامل چگالی، مدول کشسانی (E)، مدول شکست و تنش مجاز) با آزمون روی چوب با رگه مستقیم و بدون داشتن گره، رگه‌های عرضی، چاک، ترک و شکاف به‌دست می‌آید.

۲-۲-۲- کامپوزیت

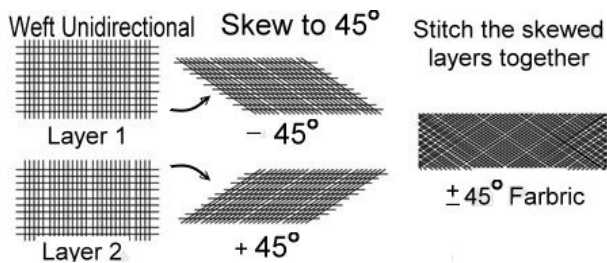
کامپوزیت، مصالحی چندجزئی است که شامل حداقل دو نوع ماده غیرمشابه، مواد تسلیح یا تقویت‌کننده و یک پرکننده چسبنده در زمینه یا بستر است. در شکل (۱۱) خواص متفاوت مخلوط اجزاء، با خواص هر یک از اجزاء اولیه مقایسه شده است [۲۰]. بستر کامپوزیت‌ها به سه گروه فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌شوند که فقط گروه پلیمری در

۲-۲-۲-۱- الیاف کاربردی در کامپوزیت پلیمری پره‌ها

پرکاربردترین الیاف شیشه در زمینه پلیمر، E-glass است که جنس آن کلسیم آلومینوسیلیکات شیشه است و ارزان قیمت، دارای استحکام کششی و فشاری قابل قبول و دارای ضعف نسبی در مقاومت به ضربه است [۲۱].

رشته کربن با استحکام دو برابر فولاد و در نسبت استحکام به چگالی، پنج برابر قوی‌تر از فولاد است. همچنین استحکام الیاف کربن تقریباً دو برابر و سفتی آن سه برابر E-glass است [۲۱]. در حال حاضر کامپوزیت پلیمری الیاف کربن بیشتر در پره‌های بسیار بزرگ برای کاهش وزن استفاده می‌شود [۲۴].

شکل و ریخت الیاف برحسب موضوع متفاوت است و به صورت رشته‌ای، دسته‌رشته و پارچه، مورد مصرف قرار می‌گیرد. کاربرد الیاف به صورت تک‌رشته‌ای، دسته‌ای یا پارچه‌ای است. برای ایجاد استحکام در جهت‌های مختلف مانند شکل (۱۲)، الیاف در جهت‌های معین ۴۵ یا ۹۰ درجه، به تناوب قرار می‌گیرند. ترکیب نمودن الیاف با جنس‌های متفاوت برای دستیابی به مزایای استحکامی و اقتصادی نیز، معمول است.



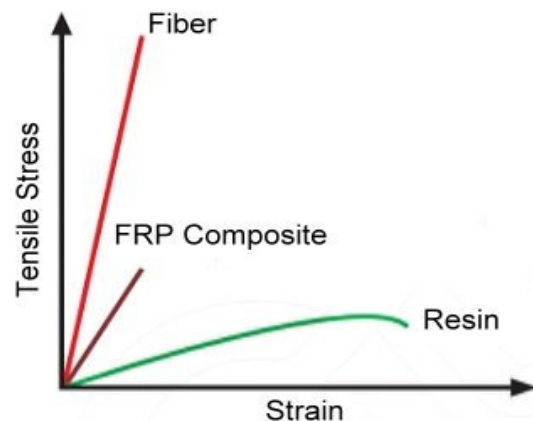
شکل ۱۲. جهت‌دهی الیاف برای رسیدن به استحکام بهینه [۲۰]

۲-۲-۲-۲- ساندویچ پانل‌های کامپوزیتی

در بارهای محوری خالص، کل مقطع قطعه تنش یکسانی را تجربه می‌کند. ساندویچ پانل کامپوزیتی، رفتاری شبیه یک تیر برای تحمل بارهای خمشی دارد. ساندویچ پانل از دو پوسته لمینت یکپارچه در دو طرف و یک هسته داخلی از جنسی سبک، فوم پلیمری، چوب بالسا و گاهی لانه زنبوری تشکیل می‌گردد. لمینت‌ها تنش‌های کششی، فشاری و هسته تنش برشی را تحمل می‌نماید. چگالی ماده هسته باید بسیار کمتر از کامپوزیت یکپارچه باشد. چگالی کمتر هسته، امکان

تولید پره به کار می‌رود. عیوب اساسی این کامپوزیت، دمای کار پایین و انعطاف‌پذیری کم در بعضی جهات است. همچنین مسئله زیست‌محیطی عمده‌ترین چالش پیش‌روی کامپوزیت‌های پلیمری است. زمینه پلیمر کامپوزیت گرماسخت^۱، تاکنون قابل بازیافت نبوده و تنها شیوه اقتصادی و ناسازگار با محیط‌زیست، سوزاندن آن‌هاست.

کامپوزیت در مقایسه با فلز، مقاومت به خستگی بسیار بهتری دارد. رفتار خستگی کامپوزیت متأثر از چقرمگی و مقاومت به میکروتکرک‌های رزین است. خواص کلی کامپوزیت تابع خواص الیاف، خواص رزین، نسبت الیاف به رزین، کیفیت درهمکنش سطح الیاف با رزین و هندسه و جهت الیاف است. خواص کامپوزیت به دلیل هندسه و جهت الیاف، ناهمسانگرد است. بارگذاری با در نظر گرفتن ناهمسانگردی از نظر اقتصادی و وزن دارای اهمیت ویژه است و باعث کاهش مقدار مصالح مصرفی و یا حذف مصالح زائد می‌شود [۲۱-۲۲]. خواص اصلی پرکاربردترین کامپوزیت‌ها در جدول (۱) آورده شده است. علاوه بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌ها، دو مشخصه مدول یانگ ویژه (E/p) و استحکام ویژه (σ/p) معرفی و تعریف می‌شوند.



شکل ۱۱. خواص نتیجه ترکیب رزین و الیاف [۲۰]

جدول ۱. خواص اصلی پرکاربردترین کامپوزیت‌ها [۲۳]

نوع ماده	چگالی ویژه	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)
گرافیت اپوکسی	۱/۶	۱۸۱	۱۴۹۶
شیشه اپوکسی	۱/۸	۳۸/۶	۱۰۶۲

¹ Thermoset

جایی که خاصیت جاری شدن از دست می‌رود. مرز سلب سیال بودن، به نقطه انعقاد معروف است. با ادامه سخت شدن رزین بعد از نقطه انعقاد، رزین به سختی کامل خود رسیده و خواص تعریف شده آن بروز می‌کند. واکنش سخت شدن، گرم‌مازاست که خود عاملی برای سرعت بیشتر واکنش می‌شود. مدت زمان آغاز تا پایان واکنش، به فرایند پخت رزین معروف است. سرعت پخت در رزین‌های پلی‌استر و وینیل‌استر با مقدار شتاب‌دهنده، مراقبت و تنظیم می‌شود. زمان پخت با افزایش دما کاهش می‌یابد که پخت در دمای اتاق، گاهی تا چندین روز طول می‌کشد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساخت پره توربین بادی

خواص مکانیکی پره ساخته شده، تابعی از خواص مصالح انتخابی، روش تولید و دقت روش اعمالی است. ساخت پره توربین بادی کوچک در دو گروه چوب و کامپوزیت قابل بررسی است. در این مطالعه، برخی روش‌های تولید در گروه کامپوزیت و دو روش ساخت به شیوه‌های ماشین‌کاری و براده‌برداری در گروه چوب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس به منظور ساخت پره توربین بادی کوچک، روش جدید چاپ سه‌بعدی معرفی و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۳-۱-۱- تهیه داده‌های ساخت

گام اول در تولید یک پره، شناسایی و تعیین مختصات هندسی ایرفویلی است که در مرحله طراحی آیرودینامیک انتخاب شده است. همچنین براساس اطلاعات طراحی آیرودینامیکی، طول وتر ایرفویل و زاویه تاب در راستای پره، محاسبه خواهد شد [۱۱]. براساس داده‌های حاصل، مدل‌سازی هندسی در یکی از نرم‌افزارهای مرتبط انجام می‌شود تا این مدل به عنوان ورودی ماشین‌های سی‌ان‌سی در تولید مستقیم پره چوبی یا مدل و قالب کامپوزیت، مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۱-۲- ساختمان و ساخت پره کامپوزیتی

ساختمان پره مطابق شکل (۷) از دو بخش اساسی

افزایش ضخامت را فراهم می‌کند. ساندویچ پانل‌ها در بخش قابل توجهی از بدنه یک پره بزرگ بکار گرفته می‌شوند. همچنین فوم‌ها از مواد مصنوعی مختلفی مانند پلی‌وینیل کلراید، پلی‌استایرن، پلی‌اورتان، پلی‌متیل متاکریل‌آمید و پلی‌اتریمید تولید می‌شوند [۲۱].

۲-۲-۲- پرکننده بستر

انواع رزین بستر و پرکننده کامپوزیت‌های پلیمری عبارت‌اند از: پلی‌استرهای اشباع‌نشده، اپوکسی‌ها، وینیل‌استرها، فنولیک‌ها، اکریلیک و اورتان. این رزین‌ها در فرایند لایه‌چینی کامپوزیت به حالت مایع استفاده می‌شوند که بعد از پخت (Curing) جامد می‌گردند. تأثیر ماده پرکننده بر مقاومت به خستگی کامپوزیت، بیشتر از الیاف است و تنش برشی بین‌لایه‌ای در یک لمینت توسط رزین تحمل می‌شود. سه معیار مهم در انتخاب یک سامانه رزین برای تولید کامپوزیت عبارت است از: خواص چسبندگی، خواص مکانیکی و مقاومت به تخریب در مقابل ورود آب.

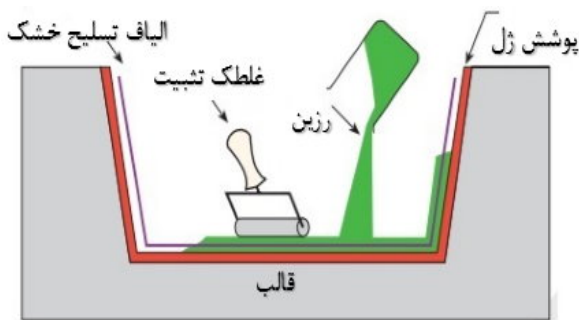
خاصیت چسبندگی رزین مهم‌ترین مؤلفه تأمین استحکام کامپوزیت است. ویژگی چسبندگی به ترتیب در رزین پلی‌استر، وینیل‌استر و اپوکسی افزایش می‌یابد. استحکام پیوند بین رزین و الیاف صرفاً به خاصیت چسبندگی رزین وابسته نیست و تحت تأثیر اندودش الیاف تسلیح نیز قرار می‌گیرد. انقباض رزین بعد از پخت معیار مهم دیگری است.

۲-۲-۲- اتصال و پیوند اجزاء کامپوزیت

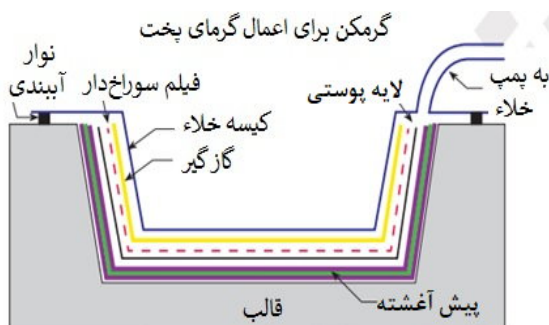
در صنعت کامپوزیت، سازوکار چسب بین الیاف رزین و اتصال بین اجزاء یک مجموعه کامپوزیتی، حیاتی است. از کامپوزیت‌ها بیشتر در کاربردهایی با وزن بحرانی استفاده می‌شود و باید برای اتصال بین آن‌ها، کمترین وزن پیوند به مجموعه اضافه شود که مناسب‌ترین نوع اتصال، چسب است. در اتصال با چسب، دو پایه اتصال و یک فیلم از ماده چسب شرکت دارند. هرچه ضخامت فیلم چسب کمتر باشد، اتصال قوی‌تری به وجود می‌آید. اتصال پایدار چسب، اتصالی است که شکست در ناحیه پایه‌های اتصال و نه در فیلم چسب رخ دهد. با ادامه افزایش مقدار سخت‌کننده یا کاتالیست در رزین، میزان گرانروی آن در حین فرایند پخت افزایش یافته، تا

(شکل ۱۵) انجام می‌شود.

سایر روش‌های تولید قطعات کامپوزیتی که می‌توانند در ساخت پره مورد استفاده قرار گیرند، عبارت‌اند از: پیش‌آغشته گرم‌خانه اتمسفریک (Oven)، تزریق رزین با حالت‌های لایه‌چینی با نایلون تحت خلأ، انتقال رزین به قالب، فرایندهای تزریق ترکیبی و همچنین قالب‌گیری تحت فشار. شکل (۱۶) نمونه یک نیم‌پره خارج‌شده از قالب کامپوزیت لایه‌چینی شده با نایلون تحت خلأ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. لایه‌چینی خیس با دست [۲۱]



شکل ۱۵. گرم‌خانه پخت روش پیش‌آغشته [۲۱]



شکل ۱۶. نمونه نیم‌پره کامپوزیت خارج‌شده از قالب [۲۵]

۳-۲-۱-۳- برآورد و انتخاب مصالح کامپوزیتی

انتخاب نوع مواد و مصالح در تولید یک قطعه کامپوزیتی، براساس دو معیار خواص و قیمت انجام می‌شود و در مصالحه و بهینه‌سازی، بهترین مواد با خواص مطلوب و با

پوسته بیرونی (حافظ ساختار آیرودینامیک و تحمل‌کننده بارهای آیرودینامیک) و دکل^۱ یا هسته داخلی (تحمل‌کننده بارهای انتقال‌یافته از طریق پوسته) تشکیل می‌شود. در پره‌های کوچک‌تر، هسته داخلی حذف شده و پوسته هر دو وظیفه؛ حفظ هندسه آیرودینامیک و تحمل بار را انجام می‌دهد. پره‌های کوچک برخلاف پره‌های بزرگ، غالباً توپر^۲ هستند.

معمولاً پره کامپوزیت نیازمند قالب است و شرایط قالب برحسب اندازه و تعداد تولید و با در نظر گرفتن مسائل اقتصادی تعیین می‌شود. در ادامه، اجزاء پره کامپوزیت به‌طور مجزا ساخته شده و به‌وسیله چسب به یکدیگر متصل می‌شوند. در شکل (۱۳) ساختار ترکیبی قسمت‌های مختلف پره، شامل لمینت‌ها و ساندویچ پانل‌ها نشان داده شده است [۲۴].



شکل ۱۳. ساختار جزئیات پره با دکل و پوسته خارجی [۲۴]

۳-۲-۱-۳- روش تولید کامپوزیت- لایه‌چینی خیس

در روش لایه‌چینی خیس^۳ (شکل ۱۴) چند لایه الیاف در چیدمان لایه به لایه با رزین و سخت‌کننده بصورت دستی در داخل قالب قرار می‌گیرند [۲۱]. بعد از هر لایه‌چینی، زمان کافی به مجموعه برای پخت در دمای محیط داده می‌شود.

۳-۲-۱-۳- روش تولید کامپوزیت- پیش‌آغشته

در روش پیش‌آغشته^۴، الیاف با ریخت نواری، هنگام تولید با رزین کاملاً آغشته می‌شوند. مزیت این روش، نسبت مناسب رزین به الیاف است و نتایج خوبی به دست می‌آید [۲۱]. سپس پخت با گرمادهی تحت فشار^۵ یا شرایط محیط

^۱ Spar

^۲ Solid

^۳ Wet Lay-Up

^۴ Pre-Preg

^۵ Auto Clave

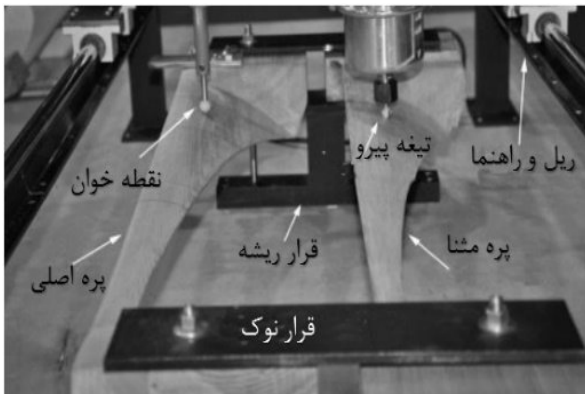
مواد قابل ذوب، پلیمر یا فلز، با فناوری‌های گوناگون و متعدد امکان‌پذیر است. این روش به فرایند ساخت افزایشی معروف است و در چهار مرحله کلی که در ادامه آورده شده، انجام می‌شود [۲۵].

- ایجاد فایل CAD و استخراج فایل با فرمت STL از نرم‌افزار مدل‌سازی؛

- انتقال فایل به ماشین ساخت افزایشی و تنظیم ماشین؛

- ساخت قطعه براساس ایجاد لایه‌ها با منظری پلکانی؛

- جدا کردن محصول و انجام عملیات نهایی مانند پوشش‌دهی، پرداخت سطحی، پولیش، رنگ‌آمیزی و عملیات حرارتی.



شکل ۱۷. ماشین کپی‌تراش در حال تولید پره توربین بادی کوچک

[۱۹]

در روش ساخت افزایشی، محدودیت‌های حداقل و حداکثر ابعاد در مقایسه با دیگر روش‌ها بیشتر است. همچنین سرعت تولید انبوه آن در مقایسه با روش‌های دیگر بالا نیست. در مقابل، تولید قطعات بسیار پیچیده با فضاهای تودرتو با این روش امکان‌پذیر است.

نوع مواد اولیه مورد استفاده و حالت فیزیکی آن (مانند ورق جامد، رزین مایع، فلز و یا سرامیک پودری) در تعیین خواص نهایی موردنظر نقش اساسی دارد. باتوجه به خواص ناهمسانگرد و دیگر خواص، کیفیت محصولات ساخت افزایشی نسبت به روش‌های متداول ساخت، می‌تواند متفاوت باشد [۲۶]. خاصیت ناهمسانگرد چاپ سه‌بعدی ناشی از ضعف شدیدتر استحکام در امتداد رشد و لایه سازی است. در صورت تطبیق امتداد لایه سازی با امتداد طول پره توربین‌های باد امکان ساخت پره (باتوجه به تنش وارده در جهت مذکور)

کمترین هزینه انتخاب خواهند شد. درعمل، به کارنما، فهرست راهنمای اشیاء^۱ و مدارک فنی بسیار گسترده‌ای برای انتخاب نیاز است و برآورد مقدار مصالح براساس روابط محاسباتی انجام می‌شود؛ درعین‌حال، ضرایب تجربی خاص هر کارگاه در این محاسبات مؤثر است [۲۱].

۳-۱-۳- ساختمان و ساخت پره چوبی

پره چوبی، قطعه‌ای توپر و یکپارچه است که فاقد پیچیدگی‌های پره کامپوزیتی است و تنها محدودیت عملی آن، اندازه است. پره‌های چوبی معمولاً به روش‌های براده‌برداری با فرز سی‌ان‌سی، کپی‌تراش^۲ و دست‌ساز قابل تولیدند. تولید پره چوبی با فرز سی‌ان‌سی گران‌ترین و دقیق‌ترین روش است. این روش برای ساخت مدل و قالب پره کامپوزیت یا مدل اصلی در روش کپی‌تراشی نیز مناسب است. ساخت پره چوبی به‌وسیله ابزار دستی نیز امکان‌پذیر بوده؛ اما ابعاد و هندسه پره حاصله دارای دقت کافی نیست. در این روش به تعداد کافی الگوی (شابلون) مقطع ایرفویل از نقاط طولی پره نیاز است.

تولید پره چوبی به شیوه کپی‌تراشی (شکل ۱۷) روشی نسبتاً دقیق، ارزان و سریع بوده و دقت ابعادی آن تا $\pm 0/5$ میلی‌متر قابل حصول است. این روش به پره‌ای از جنس ماده مقاوم به سایش و دقیق به‌عنوان مدل اصلی نیاز دارد که با فرز سی‌ان‌سی ساخته شده باشد. کپی‌تراش نیازمند کارور با مهارت ویژه جهت تأمین دقت موردنیاز است [۱۹]. توجه به هم‌زمانی حرکت‌های مدل با پره، تنظیم باردهی براده‌برداری، حذف انعطاف ناشی از اختلاف سفتی مدل با چوب، سفتی ساختار کپی‌تراش و میزان خیز در اجزاء طویل کپی‌تراش بسیار مهم است.

۳-۱-۴- چاپ سه‌بعدی

فناوری چاپ سه‌بعدی، یک فرایند ساخت لایه‌ای خودکار برای تولید قطعات از مواد قابل ذوب است که به‌طور مستقیم از نقشه مدل سه‌بعدی اولیه آن‌ها و بدون دخالت ابزار واسطه انجام می‌شود. در این روش، تولید قطعات مختلف از

¹ Brochure

² Catalogue

³ Copying-Router

۴- نتیجه‌گیری

با وجود پتانسیل قابل‌توجه انرژی بادی در ایران، بهره‌گیری مناسبی از این انرژی پاک در کشور انجام نمی‌شود و به فعالیت‌های گسترده و بیشتری در این زمینه نیاز است. در این راستا، پژوهش حاضر به بررسی مواد و روش‌های ساخت پره توربین بادی محور افقی کوچک پرداخت. از جمله کاربرد این نوع توربین‌ها، تولید برق در مناطق شهری و همچنین دورافتاده، پمپ آب و آسیاب کردن غلات است. تولید پره توربین بادی، براساس الگوریتم معین و مشخص انجام‌پذیر است و آگاهی، شناخت دقیق از علوم مرتبط با طراحی آیرودینامیک، مواد مورد استفاده (شامل چوب، کامپوزیت و پلیمرها) و روش‌های ساخت مرتبط با هر یک از مواد مذکور، امری لازم و ضروری است. بارهای متناوب وارده بر پره توربین همراه با خستگی بوده که انتخاب مواد را بااهمیت می‌کند. انتخاب نوع مصالح و روش تولید پره تابعی از مؤلفه‌های مختلف است. اولین عامل تأثیرگذار بر عملکرد پره در بازه زمانی کاری، طراحی آیرودینامیکی آن و دومین عامل، نوع جنس پره است. در پره چوبی جزئیات هندسه، نوع چوب و همچنین اصول مهندسی چوب بر مسئله حاکم است؛ در حالی‌که پارامترهای مهم و اثرگذار در پره‌های کامپوزیتی عبارت‌اند از: الیاف و کیفیت پرکننده. با وجود مزایای استفاده از چوب (به‌ویژه مسائل زیست‌محیطی)، پیچیدگی‌ها و هزینه ساخت مانع از تولید سریع و ارزان پره می‌شود. از طرف دیگر کامپوزیت‌ها مصالحی بسیار انعطاف‌پذیرند و با توجه به خواص مکانیکی و وزن، اقتصادی‌ترین مصالح برای تولید انبوه پره محسوب می‌شوند. با این وجود مسائل زیست‌محیطی مرتبط با مواد کامپوزیت یکی از معهود عیوب آن است. از مقایسه چوب با کامپوزیت، باید گفت در جایی که امکان کاربرد کامپوزیت به دلایل فنی و اقتصادی فراهم نباشد، چوب جایگزین می‌شود. همچنین با افزایش طول پره در توربین‌های بادی، امکان کاربرد چوب وجود ندارد. در کنار چوب و کامپوزیت، مواد پلیمری نیز اخیراً در چاپگرهای سه‌بعدی به‌منظور ساخت پره توربین بادی کوچک مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجاکه مواد مورد استفاده در چاپگرهای سه‌بعدی، عملکرد مناسبی از منظر خستگی (معضل اصلی پره‌های توربین

با محدودیت روبه‌رو است. با این وجود در مورد پره‌های توربین‌های محور عمودی، موفقیت بیشتری قابل حصول است. اولین رزین‌های مورد استفاده در روش چاپ سه‌بعدی، اغلب پایه اکریلی بودند و به‌واسطه وجود انقباض و پیچش بالای آن‌ها حین فرایند، محصولات نهایی دارای استحکام کم و دقت ابعادی نامناسب بودند [۲۵]. رزین‌های پایه اپوکسی توانایی تولید قطعاتی سخت‌تر، دقیق‌تر و با استحکام بالاتری را نسبت به گونه اکریلی دارند. برای رفع بعضی از مشکلات رزین‌های اپوکسی، افزودن رزین اکریلی به‌منظور دستیابی به قطعات مستحکم با سرعت ساخت بالا و بدون اعوجاج حین فرایند تولید، در بسیاری از کاربردها ضروری است. رزین‌های اپوکسی حساسیت بیشتری نسبت به رطوبت دارند.

از گروه پلی‌آمیدها دو نوع PA11 و PA12 در چاپ سه‌بعدی به‌کار می‌روند و PA6 نیز در حال توسعه است. از دیگر مواد پلیمری، گروه‌های پلی‌کربنات، پلی‌استایرن و ABS^۱ می‌باشند [۲۷]. مواد ABS^۲ و PLA^۲ در چاپ سه‌بعدی پرکاربردند و دارای استحکام نهایی ۲۸/۵ و ۵۵/۶ مگاپاسکال می‌باشند [۲۸]. مقایسه این مقادیر با جدول ۱ (خواص کامپوزیت)، در طراحی و انتخاب جنس پره مفید است.

از مزایای روش چاپ سه‌بعدی در تولید پره توربین بادی، استفاده از آن در کاهش هزینه‌ها برای کمک به روش‌های سنتی است. امکان ساخت مدل اصلی^۳ برای کپی‌تراشی به روش چاپ سه‌بعدی وجود دارد؛ به طوری‌که بعد از عملیات تکمیلی مانند پرداخت سطح یا انجام ماشین‌کاری، این مدل با کیفیت قابل‌قبول به‌دست می‌آید. ساخت قالب‌های پره‌های کامپوزیت به روش لایه‌چینی خیس یا پیش‌آغشته و ساخت پره‌های کوچک به روش چاپ سه‌بعدی برای انجام آزمایش‌ها در تونل باد، انجام شده است [۲۹]. لازم به ذکر است که ابعاد قطعات تولیدی به روش چاپگر سه‌بعدی در مقایسه با طول‌های موردنیاز پره، بسیار کوچک است و نیاز به اتصال آن‌ها پس از چاپ می‌باشد [۳۰]. محدودیت اساسی دیگر در مورد پره، تفاوت بسیار فاحش اندازه وتر و ضخامت با طول پره است [۳۱].

^۱ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

^۲ Poly Lactic Acid (PLA)

^۳ Master

8. Pourrajabian, A., Ebrahimi, R., Mirzaei, M., "Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions", *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, (2014), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.003>
9. Giguère, P., Selig, M. S., "New airfoils for small horizontal axis wind turbines", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 120, No. 2, (1998), 108. <https://doi.org/10.1115/1.2888052>
10. Pourrajabian, A., Afshar, P. A. N., Mirzaei, M., Ebrahimi, R., Wood, D. H., "Hollow blades for small wind turbines operating at high altitudes", *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 138, No. 6, (2016). <https://doi.org/10.1115/1.4034333>
11. Wood, D., *Small Wind Turbines*, Springer, London, (2012). <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-175-2>
12. Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*, John Wiley & Sons, (2010). <https://doi.org/10.1002/9781119994367>
13. Bechly, M. E., Clausen, P. D., "Some dynamic strain measurements from the blade of a small wind turbine", *Wind Engineering*, Vol. 23, No. 1, (1999), 15-22. <https://www.jstor.org/stable/43749720>, (Accessed: 11 July 2019).
14. Pourrajabian, A., Afshar, P. A. N., Ahmadi, M., Wood, D., "Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade", *Renewable Energy*, Vol. 87, (2016), 837-848. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.002>
15. Shigley, J. E., Mischke, C. R., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, Inc., Singapore, (1989). <https://www.amazon.com/Mechanical-engineering-design-McGraw-Hill-mechanical/dp/007056888X>
16. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, (2001). https://books.google.com/books/about/Wind_Energy_Handbook.html?id=XFYrEAAAQBAJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button
17. Peterson, P., Clausen, P. D., "Timber for high efficiency small wind turbine blades", *Wind Engineering*, Vol. 28, No. 1, (2004), 87-96. <https://doi.org/10.1260/02F0309524041210865>
18. Ross, R. J., *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Madison, (2010). <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-113>
19. Astle, C., Burge, I., Chen, M., Herrler, T., Kwan, L., Zibin, N., Wood, D., "Timber for small wind turbine blades", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 17, No. 6, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.03.001>
20. Gurit Holding, A. G., *Guide to Composites*, (2000). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjZjrm6LDxAhXlg_0HHVAmDz0QFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.gurit.com%2F%2Fmedia%2FGurit%2Fdatasheets%2Fguide-to-composites.pdf&usq=AOvVaw0I4UcAIXzhgQzgI24vcVw
21. *Guide to Composites*, (2016). https://composites.ugent.be/home_made_composites/documentati/on/SP_Composites_Guide.pdf, (Accessed: 15 July 2019).
22. Kaw, A., *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, (2005). https://books.google.com/books?id=MwHLBQAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Mechanics+of+Composite+Materials+kaw+A+2005&hl=en&sa=X&ved=2ahUKewjQo_bW57DxAhU0hf0HHWFIAjEQ6AEwAXoECAoQA#v=onepage&q=Mechanics%20of%20Composite%20Materials%20kaw%20A%202005&f=false
23. Kaw, A., "Macromechanical analysis of a lamina Tsai-Wu failure theory", (2015). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjknvyB6LDxAhWWgP0HHfmOBioQFjAAegQIBBAD&url=http%3A%2F%2Fwww.eng.usf.edu%2F-ka%2FcompositesOCW%2Fppts%2Fchapter2_revised%2FChapter2_8_6_tsaiwu%2520failure%2520theory.pdf&usq=AOvVaw1WxLpX6i6B4KT9ucVOPuRY
24. Thomsen, O. T., "Sandwich materials for wind turbine blades-Present and future", *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Vol. 11, No. 1, (2009), 7-26. <https://doi.org/10.1177/1099636208099710>
25. Mandri, G., "Blade manufacturing of small wind turbine within the Moroccan context", (2016). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewjptWb6LDxAhWT_7sIHZA8BjwQFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.res

بادی) ندارند، گسترش استفاده از روش چاپ سه‌بعدی جهت ساخت پره توربین بادی با محدودیت همراه است؛ با این وجود به کمک این روش می‌توان هزینه‌های روش‌های سنتی را تا حد امکان کاهش داد. در این راستا، چاپ سه‌بعدی برای ساخت قالب‌های پره‌های کامپوزیت و ساخت مدل اصلی مورد استفاده در کپی تراش مؤثر است. همچنین به کمک چاپ سه‌بعدی امکان تولید پره‌های کوچک به منظور انجام آزمایش در تونل باد در زمان کوتاه وجود دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب جنس و روش ساخت پره توربین بادی کوچک، به کاربرد و حجم تولید (تعداد محدود یا در مقیاس انبوه) بستگی دارد و نیازمند تحلیل اقتصادی مرتبط و جامع است.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر دیوید وود، استاد دانشگاه کلگری، در تهیه این پژوهش کمال قدردانی و سپاس را دارند.

مراجع

1. Lakshmi, G. S., Rathore, G. S., Sharma, R., Anand, A., Sharma, S., Hada, A. S., *Energy statistics*, (2017). https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/energy_statistics_2017r.pdf, (Accessed: 11 Dec. 2018).
2. Miller, L. M., Gans, F., Kleidon, A., "Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences", *Earth system dynamics*, Vol. 2, No. 1, (2011), 1-12. <https://doi.org/10.5194/esd-2-1-2011>
3. Appavou, F., Brown, A., Epp, B., Leidreiter, A., Lins, C., Murdock, H. E., Musolino, E., Petrichenko, K., Farrell, T. C., Krader, T. T., Tsakiris, A., *Renewables 2017 global status report*, REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21 Secretariate, Paris, (2017). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKewih4vW36bDxAhV3_7sIHU_aAq0QFjADegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.ren21.net%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F05%2F2017_Full-Report_English.pdf&usq=AOvVaw0tL-6lnsf9PxZLihDzPWB, (Accessed: 20 Dec. 2018).
4. Hales, D., *Renewables 2018-global status report*, REN21, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, REN21 Secretariate, Paris, (2018). <https://www.energia.org/renewables-2018-global-status-report-ren21/>, (Accessed: 10 Jan. 2019).
5. *Small wind turbine market*. <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/small-wind-turbine-market>, (Accessed: 11 Jan. 2019).
6. Mohammadi, K., Mostafaepour, A., Sabzpooshani, M., "Assessment of solar and wind energy potentials for three free economic and industrial zones of Iran", *Energy*, Vol. 67, (2014), 117-128. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.024>
7. Pourrajabian, A., Mirzaei, M., Ebrahimi, R., Wood, D., "Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 126, (2014), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.001>

- München, (2016). https://books.google.com/books/about/Additive_Manufacturing.html?id=nu-gDAAAQBAJ&source=kp_book_description
29. Tymrak, B. M., Kreiger, M., Pearce, J. M., "Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions", *Materials & Design*, Vol. 58, No. 2, (2014), 242-246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
 30. Akour, S. N., Al-Heydari, M., Ahmed, T., Khalil, K. A., "Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions", *Renewable Energy*, Vol. 116, (2018), 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.076>
 31. Pourrajabian, A., Dehghan, M., Javed, A., Wood, D., "Choosing an appropriate timber for a small wind turbine blade: A comparative study". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 100, (2019), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.010>
 26. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, New York, (2014). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
 27. Bandyopadhyay, A., Bose, S., *Additive Manufacturing*, CRC Press, (2015). https://books.google.com/books?id=70W4DwAAQBAJ&dq=Additive+Manufacturing+Bandyopadhyay,+A.+Bose,+S.&hl=en&sa=X&ved=2ahUKewjT-Jji5rDxAhVwgP0HHRMxA_4Q6AEwAHoECAgQAag
 28. Gebhardt, A., Hötter, J. S., *Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, <http://www.elsevier.com/locate/locate/locate>