هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

پیشرفت‌های اخیر در تعمیر، نگهداری و بازیافت پره‌های توربین بادی

مهدی حسین زاده بحرینی[۱]، سیّدحامد هاشمی مهنه[۲]

۱- دانشجوی دکتری، پژوهشگاه هوافضا، M_bahraini2000@yahoo.com
۲- عضو هیئت علمی، پژوهشگاه هوافضا

چکیده

بازیافت پره‌های توربین بادی به عنوان یک عنصر مهم برای تضمین پایداری توربین‌های بادی شناخته می‌شود که می‌تواند اثرات زیست محیطی مطلوبی داشته باشد. در مقاله حاضر، ضمن بررسی روند توسعه نیروگاه‌های بادی دنیا، اهمیت بازیابی مواد سازنده پره توربین‌های بادی بیان می‌شود. سپس روش‌های بازیافت فعلی و مزایا–معایب آنها بررسی می‌شود. همچنین پیشرفت‌های اخیر در تولید پره‌هایی با قابلیت بازیافت بالا که به فرآیند تولید و بازیافت آنها به انرژی کمتری نیاز دارند و خواص مواد بازیافتی در آنها بیشتر حفظ می‌شود، مطرح می‌شوند. در نهایت، چند راهکار برای افزایش عمر پره‌ها و استفاده موثر و چند باره از مواد ارزشمندی که در ساخت آنها به کار می‌رود، عنوان خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: انرژی باد، پره‌های توربین بادی، کامپوزیت‌ها، تعمیر و نگهداری، بازیافت.

مقدمه

امروزه از میان انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد دارای اهمیت ویژه است. بر اساس گزارش GWR2022[1]، در حال حاضر ظرفیت نیروگاه‌های بادی جهان ۸۳۷ گیگاوات است که ۹۴ گیگاوات آن بین سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ راه‌اندازی شده است. روند رو به رشد توسعه نیروگاه‌های بادی نشان می‌دهد که تا سال ۲۰۳۰ ظرفیت کلّ انرژی بادی به ۳۰۰۰ گیگاوات خواهد رسید [۱].

علی‌رغم اینکه انرژی باد به عنوان یکی از پاک‌ترین انرژی‌ها شناخته می‌شود و در خلال تولید برق آلودگی ندارد و سالانه ۱,۲ میلیارد تن به کاهش دی اکسید کربن کمک می‌کند، چند سالی است که پژوهشگران به بررسی تبعات زیست محیطی آن نیز پرداخته‌اند. بر اساس یافته‌های اخیر، توسعه انرژی باد در مرحله تولید توربین بسیار انرژی بر بوده و با مواد شیمیایی بیشماری در ارتباط است. از طرف دیگر امحاء این توربین‌ها در انتهای دوره کاربری نیز یک مسئله است.

یک توربین بادی بزرگ دارای یک فونداسیون بتونی، یک پایه فلزی، ناسل که از فلز و مس است و سه عدد پره‌ی کامپوزیتی است. حدود ۱۵٪ جرم یک توربین را پره‌ها تشکیل می‌دهند. از دید علم مواد، بتن و کامپوزیت اثرات زیست محیطی قابل توجهی دارند چرا که هنوز روش موثری برای بازیافت آنها وجود ندارد. به ویژه که پیش‌بینی شده در آمریکا بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۵ سالانه ۸۰۰۰ و در اروپا سالانه ۳۸۰۰ پره از نیروگاه‌ها حذف می‌شوند و حجم قابل توجهی مواد کامپوزیتی به جا می‌گذارند. بر اساس تخمینی که در [۲] ارائه شده تا سال ۲۰۵۰، ۴۳ میلیون تن پسماند پره توربین در دنیا تولید می‌شود.

بنابراین، طبق این آمار و تخمین‌ها، پژوهش در حوزه بازیابی مواد کامپوزیتی پره‌های توربین اهمیت زیادی دارد. تحقیقات صورت گرفته در بحث بازیابی پره‌های توربین‌های بادی، نتایج امیدوار کننده‌ای مطرح

[1] Global Wind Report 2022

کرده‌اند که از آن میان می‌توان به [۳] اشاره کرد. در این مرجع یک روش سیستماتیک برای بازیافت مکانیکی پره‌های توربین و استفاده از الیاف شیشه آن به عنوان فیلامنت‌های حرارتی در پرینتر سه بعدی ارائه و ارزیابی شده است. در [۴] انواع روش‌های موجود برای بازیابی الیاف شیشه و کربن از پره‌های اسقاطی توربین‌های باد، مشکلات آنها و محصولاتی که می‌توان با این الیاف تولید کرد، مطرح و ارزیابی شده است. همچنین در [۵] روش‌های بازیافت مواد پره‌های توربین از منظر ظرفیت بازیافت، هزینه، سطح آمادگی فناوری و تبعات زیست محیطی مقایسه شده‌اند و بازیافت به منظور استفاده در صنعت سیمان به عنوان گزینه مطلوب از نظر محیط زیست و ظرفیت بازیافت پیشنهاد شده است.

در مقاله حاضر، فناوری‌های موجود توربین بادی بررسی شده ، تعمیر و نگهداری، بازیافت تیغه و همچنین پیشرفت‌های اخیر و مطالعات در این زمینه بررسی می‌شوند.

ساختار و مواد پره‌های توربین باد

توربین‌های باد بسته به نوع کاربرد انواع مختلفی دارند و به دو دسته اصلی محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. آنچه به طور عمده در نیروگاه‌های بادی استفاده می‌شود، توربین‌های بادی محور افقی با ظرفیت بیش از ۱ مگا وات هستند. این توربین‌ها دارای سه پره هستند. پروفیل پره‌ها معمولاً بر اساس ایرفویل‌های ناکا[2]یا نسخه‌های بهینه شده‌ی آنها طراحی و ساخته می‌شوند. استحکام خمشی و سفتی بالا، دوره تعمیر طولانی، مقاومت در برابر سایش، خوردگی و آتش از مواردی هستند که در طراحی و انتخاب مواد پره‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

ترکیب مواد تشکیل دهنده یک پره معمولاً عبارتند از مواد کامپوزیت ۹۳ درصد، پی وی سی ۲ درصد، چوب بالسا ۲ درصد و رنگ، فلز و سایر مواد ۳ درصد [۵].

بنابراین، سهم عمده مواد پره، به کامپوزیت‌های چند لایه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه، کربن، آرامید و بازالت یا ترکیب آنها همراه با زرین‌های اپوکسی، پلی‌استر یا وینیل متعلق است. بر اساس مراجع، هر ۱ کیلووات ظرفیت جدید بادی نیازمند ۱۰ کیلوگرم مواد کامپوزیت است [۴]. یعنی برای یک توربین ۱ مگاواتی ۱ تن مواد کامپوزیت تولید و در انتهای عمر پره‌ها که حدود ۲۰ سال است، ضایعات باقی می‌ماند.

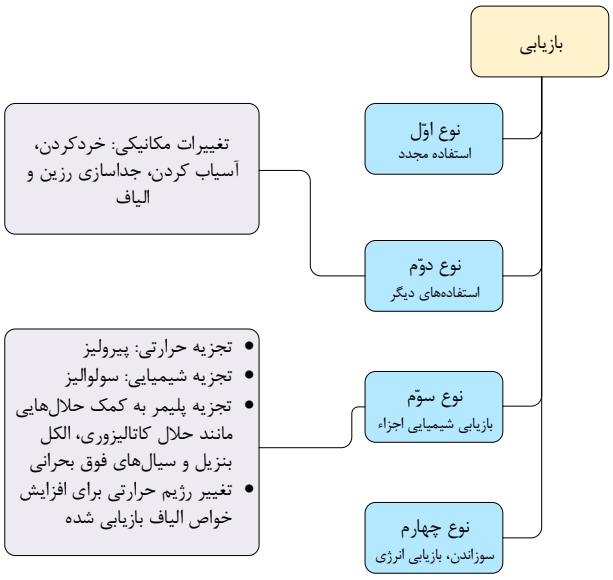
روش‌های بازیافت پره‌های توربین باد

روش‌های بازیافت پره‌های توربین معمولاً به سه دسته مکانیکی، حرارتی و شیمیایی تقسیم‌بندی می‌شود. در یک دسته‌بندی جدیدتر در [۶]، چهار دسته‌بندی اول تا چهارم مطرح شده است. مطابق شکل ۱، در بازیابی نوع اوّل، با انجام تعمیرات و اصلاحات از پره مجدداً در همان توربین یا توربین‌های دیگر استفاده می‌شود. در بازیابی نوع دوّم که همان بازیابی مکانیکی است، پره‌های زمین‌گیر و اسقاطی به کمک اره‌های نواری به شکل‌ها و اندازه‌های متفاوت تقسیم می‌شوند. سپس آنها را خرد کرده و از مواد و الیاف حاصل در ساخت قالب، بتن، عایق، مواد افزودنیِ رنگ و کامپوزیت‌های نایلون و پروپیلن استفاده می‌شود. الیاف شیشه در کلّ از نظر هزینه تولید و مسائل زیست محیطی به صرفه‌تر از الیاف کربن هستند و تقاضای بیشتری در صنعت برای آن گزارش شده است. البته در ترکیب پره‌های توربین نیز بیشتر از الیاف شیشه استفاده می‌شود. لذا با توجه به تقاضای بازار و حجم تولید الیاف شیشه جهان که برای سال ۲۰۲۱ حدود ۵,۳ میلیون تن تخمین زده می‌شود [۷]، بازیافت این الیاف صرفه اقتصادی دارد.

روش دوّم بازیافت، روش‌های شیمیایی هستند. در این روش‌ها، به کمک حرارت یا فرآیندهای شیمیایی، مواد و اجزاء کامپوزیت‌ها جداسازی می‌شوند. این روش‌ها یا حرراتی هستند مانند پیرولیز یا شیمیایی هستند مانند سولوالیز.

پیرولیز: پیرولیز یک فرآیند شیمیایی گرماگیر است که طی آن، مواد آلی در اثر گرما بدون حضور اکسیژن تجزیه می‌شوند. استفاده از این روش برای بازیافت الیاف شیشه از پره مستلزم مصرف مقدار قابل توجهی انرژی برای ایجاد دماهای حدود ۴۵۰ درجه سانتی گراد است. طی این فرآیند، گازهای سمّی نیز تولید می‌شود. برای پیرولیز روش‌های مختلفی وجود دارد مانند دمیدن هوای داغ، پیرولیز مایکروویو و پیرولیز کم اکسیژن دمای پایین. در این روش‌ها هرچه دما کمتر باشد، مصرف انرژی کمتر بوده و استحکام الیاف بیشتر حفظ می‌شود.

[2] National Advisory Committee for Aeronautics (NACA)



شکل ۱: دسته‌بندی روش‌های بازیافت پره‌های توربین [۶]

بستر سیال یکی از انواع پیرولیز است که با آن ماتریس پلیمری شکسته شده و الیاف جدا می‌شوند. در این روش ۶۰ تا ۷۰ درصد از استحکام الیاف باقی می‌ماند.

اخیراً یک تیم هلندی فناوری را برای جداسازی الیاف از پره توسعه داده‌اند [۹]. در این روش، نخست با پیرولیز بدون اکسیژن رزین و الیاف از هم جدا می‌شوند. سپس با پیرولیز کم اکسیژن باقی مانده رزین روی الیاف سوزانده و الیاف استخراج می‌شوند. از الیاف حاصل در ساخت قطعات خودرو استفاده می‌شود.

سولوالیز: سولوالیز یا واکنش با حلال یکی از واکنش‌های شیمیایی از نوع جایگزینی است که در آن ماده حلال بیش از نیاز واکنش وجود دارد. در جداسازی الیاف با سولوالیز الیاف تمیزتری به دست آمده و بیشتر استحکام خود را نیز حفظ می‌کنند. واکنش نیز به دما و در نتیجه انرژی کمتری نیاز دارد. حلال‌هایی که در این فرآیند استفاده می‌شوند، اسید نیتریک، آمونیاک، گلیکول، آب یا الکل هستند که می‌توانند پلیمر کامپوزیت را حل کنند. این روش به دلیل نیاز به مواد جانبی پر هزینه و در حد آزمایشگاهی انجام شده است. با این حال روشی زیست محیطی و نسبتاً پاک محسوب می‌شود.

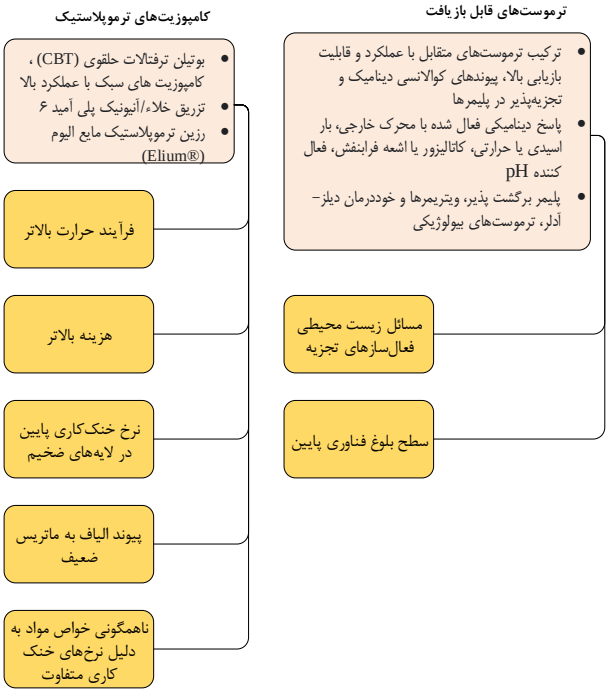
اخیراً یک تیم سوئدی روی روش‌های سولوالیز با حلال آب زیر و فوق بحرانی همراه با کاتالیست اسید و باز و افزودنی‌هایی مانند الکل و گلیکول برای بازیابی الیاف پره‌های توربین تحقیقاتی انجام داده‌اند [۱۰]. واکنش در دمای ۲۵۰ تا ۳۷۰ درجه سانتی گراد و فشار ۱۰۰ تا ۱۷۰بار انجام می‌شود. در این تحقیق، تاثیر اندازه و ضخامت قطعات بر زمان انجام واکنش نیز بررسی شده است. در یکی دیگر از تلاش‌های آزمایشگاهی استفاده از هیدروژن دی اکساید و اسید استیک همراه با تابش مایکروویو بررسی شده است [۱۱]. امواج مایکرو ویو ۷۰۰ واتی در این فرآیند به حذف کامل رزین اپوکسی تا ۹۷,۲ درصد کمک می‌کنند. این روش همچنین سهم زیادی از مشخصات مکانیکی الیاف شیشه را نیز حفظ می‌کند.

توسعه فن‌آوری‌های چند مرحله‌ای و مولتی فیزیک، روند امیدوارکننده‌ای برای بازیافت پره‌هارا نشان می‌دهد و به طور بالقوه می‌تواند تمامی الزامات بازیافت از جمله جداسازی تمیز اجزاء، سازگاری با محیط‌زیست، کیفیت بالای مواد بازیافتی و استفاده کارآمد از مواد بازیافت شده را برآورده سازد.

پیشنهادها

در این بخش، پیشنهادهایی برای استفاده موثر از مواد پره‌ها از دیدگاه انرژی و مسائل زیست محیطی ارائه می‌شود.

ساخت پره‌های قابل بازیافت: همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، جداسازی مواد مفید و قابل استفاده از پره‌های موجود با چالش‌هایی همراه است. به منظور رفع این مشکلات می‌توان در توسعه پره‌های جدید استفاده از مواد با سهولت بازیافت مانند پلیمرهای قابل تجزیه، قابل بازیافت و استفاده مجدد را پیشنهاد داد. در مرجع [۶] استفاده از پلیمرهای ترموپلاست یا ترموست به جایرزین اپوکسی مطرح شده است. کامپوزیت‌های با رزین ترموپلاستیک دارای زمان تولید کوتاه‌تر، فناوری اتصال آسان‌تر و قابلیت بازیافت حرارتی هستند. امّا در فرآیند تولیدشان حرارت بیشتری نیاز است. یکی از نمونه‌های کامپوزیت‌های بر پایه ترموپلاستیک برای ساخت پره توربین بادی در دانشگاه دلف هلند انجام شده است [۱۲]. کامپوزیت استفاده شده در این محصول با فناوری تزریق خلاء و بر پایه پلی آمید آنیونی تولید شده است. همچنین شرکت ایرلندیِ E´ireComposites پره‌هایی از کامپوزیت الیاف شیشه بر پایه ترموپلاستیک پلی‌پروپیلن تولید کرده است که الیاف آن قابلیت بازیافت و استفاده مجدد دارند.



شکل ۲: ویژگی‌های ترموپلاستیک‌ها ترموست‌های قابل بازیافت برای پره توربین بادی [۶]

پیوندهای کووالانسی تجزیه‌پذیر یا پویا در پلیمرهای ترموست امکان ایجاد ترموست قابل بازیافت را فراهم می‌کند. محرک‌های خارجی مختلف می‌توانند پاسخ دینامیکی این پیوندها را تحریک کنند. به عنوان مثال، بارگذاری حرارتی یا اسیدی، کاتالیزورهایا نور فرابنفش. در میان ترموست‌های قابل بازیافت برای کاربردهای ساختاری، چندین راه حل وجود دارد از جمله رزین‌های اپوکسی مبتنی بر سخت‌کننده ریسیکلامین، اپوکسی با سخت‌کننده‌های حاوی دی سولفید قابل شکافت و افزودنی دی سولفیدی مبتنی بر زیستی و ترموست‌های قابل بازیافت که از طریق تراکم پارافرمالدئید با دی آمین‌ها به‌دست می‌آیند، که می‌توانند به مونومر تبدیل شوند [۶].

ترموست‌ها را می‌توان همانند ترموپلاستیک بازیابی کرد و امکان استفاده مجدد به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌ها را دارند.

رزین ترموست در سال ۲۰۲۰ برای ساخت نخستین پره توربین بادی قابل بازیافت در جهان توسط شرکت زیمنس گِیمسا[3]استفاده شده است. این شرکت قصد دارد تا سال ۲۰۴۰ توربین بادی ۱۰۰ درصد قابل بازیافت تولید کند.

در شکل ۲، ویژگی‌های و مزایا–معایب ترموپلاستیک‌ها و ترموست‌ها مشخص شده است.

تعمیر و نگهداری به موقع: عمر یک توربین بادی در زمان عملیات بین ۲۰ تا ۲۵ سال است. توربین‌های بادی به طور معمول سالی ۲ بار بازبینی می‌شوند. بازبینی منظم و انجام تعمیرات لازم آنها می‌تواند تا حد زیادی مانع خرابی‌های آتی و افزایش طول عمرشان شود. این موضوع معطوف به تعمیرات و نگهداری محصول محور است که بر فرآیندهای و اصولی که توسط کاربران باید رعایت شوند، تمرکز دارد.

قابلیت اطمینان: افزایش قابلیت اطمینان توربین‌ها در مراحل طراحی و ساخت می‌تواند، نیاز به تعمیرات و خرابی آنها را کاهش دهد و باعث استفاده موثر و اقتصادی از آنها شود. به ویژه توربین‌های دریایی با توجه به شرایط دریا، باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که همه اجزای آن در مقایسه با توربین‌های زمینی دارای قابل اطمینان بیشتر و انعطاف‌پذیرتر باشند. زیرا علاوه بر شرایط عملکردی، حمل و نقل اجراء و دسترسی به آنها برای بازبینی و تعمیرات سخت‌تر است. در نتیجه رویکرد پیشگیرانه به تعمیرات و نگه‌داری توربین‌های دریایی اهمیت ویژه‌ای دارد.

نتیجه‌گیری

روند پیشرفت‌های اخیر در بازیابی پره توربین‌های بادی در این مقاله بررسی شد. این بررسی نشان می‌دهد که موضوع بازیابی مواد به ویژه الیاف شیشه از این پره‌ها مورد توجه محققان است. البته روش‌های سنتی مکانیکی و شیمیایی انرژی‌بر بوده و در آنها، بخشی از خاصیت الیاف بازیابی شده از بین می‌رود. در نتیجه، استفاده از کامپوزیت‌های ترموپلاستیک و ترموست پیشنهاد شده است. در حال حاضر، چند شرکت نیز پره‌هایی با قابلیت بازیافت بالا بر پایه این فناری‌های جدید تولید کرده‌اند. بنابراین، با توسعه روش‌های جدید در ساخت پره‌های قابل بازیافت، بازیافت پره‌های موجود و زمین‌گیر، افزایش قابلیت اطمینان پره‌های جدید و استفاده از فناوری‌های موثر و به موقع تعمیر و نگهداری، پیش‌بینی می‌شود، پایداری توربین‌های بادی در آینده نزدیک افزایش یابد.

[3] Siemens Gamesa

مراجع

[1] Global Wind Report 2022, https://gwec.net/global-wind-report-2022/.

[2] Liu P. and Barlow, C. Y., Wind turbine blade waste in 2050, Waste Management, 62, 229-240, 2017.

[3] Rahimizadeh A., Kalman J., Fayazbakhsh K, and Lessard L, Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing, Repowering and lifetime extension: making, Composites Part B: Engineering, 175, 107101, 2019.

[4] Rani M., Choudhary P., Krishnan, V., Zafar S., A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fibercomposites waste from wind turbine blades, Composites Part B, 215, 108768, 2021.

[5] Paulsen E.B. and Enevoldsen, P., A Multidisciplinary Review of Recycling Methods forEnd-of-Life Wind Turbine Blades, Energies, 14, 4247, 2021.

[6] Mishnaevsky J. L., Recycling of wind turbine blades: Recentdevelopments, Current Opinion inGreen and Sustainable Chemistry, 39, 100746, 2023.

[7] Glass fiber demand worldwide from 2011 to 2021, available at: https://www.statista.com/statistics/759404/worldwide-glass-fiber-demand-and-capacity/

[8] Wiedemann M, Schreiner C: Alte Windräder - einungelöstesMüllproblem?. https://www.zdf.de/nachrichten; 27.12.2019.

[9] M.Ierides, J.Reiland, Wind turbine blade circularity. Technologies and practices around the value chain, Bax& Company, https:// baxcompany.com/wp-content/uploads/2019/06/wind-turbinecircularity.pdf.

[10] Liu P, Barlow CY: Wind turbine blade waste in 2050. Waste Manag 2017, 62:229–240. https://doi.org/10.1016/ j.wasman.2017.02.007.

[11] Karavida S, Nõmmik R: Waste management of end-of-service wind turbines. Aalborg University; 2015. https://projekter.aau.dk/ projekter/files/213319772.

[12] Ecoenergy Ventures, n.d.. What is the ‘Waste Management Hierarchy’?. http://www.ecoenergyventures.com/about/why-wasteto-energy/.

[13] Mishnaevsky Jr L: Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: overview of current and coming solutions. Materials 2021, 14:1124, 2021.

[14] New production method makes wind turbine blades easily recyclable,TaketoNews; OCT 16, 2022.

[15] Mattsson C., André A.,Juntikka M., Tränkle T., and SottS., Chemical recycling of End-of-Life wind turbine blades by solvolysis/HTL, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 942, 012013, 2020.
[16] Rani M., Choudhary P., Krishnan V. and Zafar S., Development of sustainable microwave-based approach to recover glass fibers for wind turbine blades composite waste, Resources, Conservation and Recycling, 179, 106107, 2022.
[17] Teuwen J. J., van Geenen A, and Bersee H. E., Vacuum-infused anionic polyamide-6 composites: The effect of postprocessing, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 25, 965-986, 2012