

بازیافت الیاف کربن از ضایعات کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن

حسین شهبازی^۱، امجد سازگار^{۲*}، مرتضی امیری^۳

^۱ دکتری شیمی، پژوهشگر سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

^۲ استادیار پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، تهران

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی مواد، متالورژی، پژوهشگر سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

Email: asazgar@aeoi.org.ir

چکیده

الیاف کربن یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌های مواد کامپوزیتی (CFRP) به شمار می‌رود؛ اما بدلیل بالا بودن قیمت الیاف کربن و آسیب‌های جبران ناپذیری که رهاسازی این الیاف به طبیعت وارد می‌کند و همچنین کاربرد بسیار زیاد و روز افزون کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن در صنعت، بازیافت این ماده از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین، می‌توان با فناوری‌های ارزان قیمت و دوست‌دار محیط‌زیست الیاف کربن را بازیافت کرد و در تولید کامپوزیت‌های جدید از این الیاف بازیافت شده استفاده نمود. الیاف بازیافت شده در شکل‌های مختلف برای کاربردهای گوناگون استفاده می‌شوند. بازیافت کامپوزیت‌ها با سه روش مکانیکی، شیمیایی و حرارتی انجام می‌گیرد که هر کدام از این روش‌ها ویژگی‌های خاص خود را دارند. از میان این سه روش، روش حرارتی در مقیاس صنعتی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر از دو روش دیگر می‌باشد. جستجو برای یافتن روشی مناسب برای حفظ کیفیت الیاف کربن در طول فرآیند بازیافت و روشی سازگار با شیمی سبز از چالش‌های پژوهش حاضر است.

واژگان کلیدی: بازیافت، شیمی سبز، الیاف کربن، ضایعات، کامپوزیت

مقدمه

درصد از استحکام الیاف اولیه به دست آورند. یو^۶ و همکاران [۱۳]، با غوطه‌ور کردن کامپوزیت در اتیلن گلاکول و افزایش دما تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد موفق به بازیابی نزدیک به ۱۰۰ درصد الیاف کربن شدند. شکل ۱ بازیابی کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن در حلال اتیلن گلاکول را نشان می‌دهد.

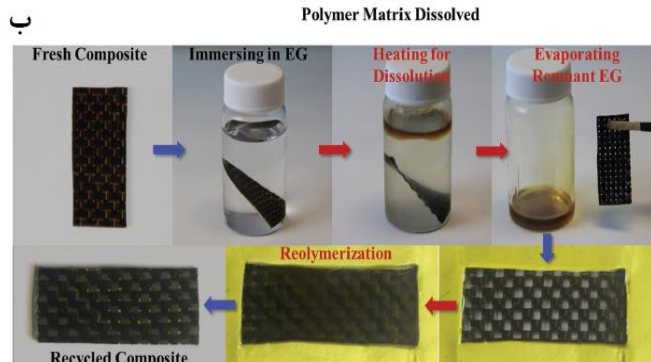
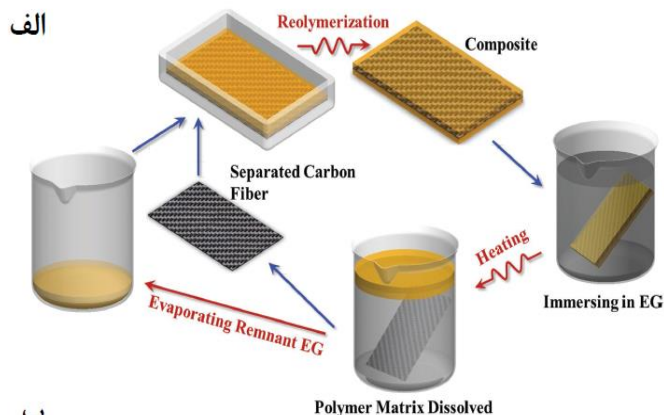
کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP)^۱ دارای خصوصیات منحصربه‌فردی شامل استحکام بالا، مدول بالا، وزن پایین و مقاومت به خوردگی هستند [۳-۱]. این کامپوزیت‌ها در صنایع هوایی، حمل‌ونقل، نظامی، ورزشی، الکترونیک، خودرو و انرژی کاربرد دارند [۴،۵]. ضایعات کامپوزیتی حاوی الیاف کربن بسیار با ارزش هستند. با توجه به نیاز روزافزون به الیاف کربن و هزینه تولید بالای آن، راه‌هایی برای استفاده دوباره و بازیافت این ماده پیشنهاد می‌شود [۶،۷]. بازیافت کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن با سه روش مکانیکی، شیمیایی و حرارتی انجام می‌گیرد [۸].

روش بازیافت مکانیکی

در روش مکانیکی، قطعات کامپوزیتی به وسیله آسیاب‌هایی تا اندازه ۵۰ میکرومتر کوچک می‌شوند. ذرات خردشده در این روش به دو شکل تقویت‌کننده و پرکننده در کامپوزیت‌های جدید مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹]. آسیب واردشده به الیاف در این روش باعث کاهش خواص مکانیکی الیاف کربن می‌شود.

روش بازیافت شیمیایی

در روش شیمیایی، بخش پلیمری کامپوزیت در یک حلال شیمیایی حل می‌شود. در این روش، الیاف کربن پیوسته با حفظ حداکثر خواص مکانیکی به دست می‌آیند. روش‌های شیمیایی بازیافت، با استفاده از حلال‌های آبی (هیدرولیز) و با استفاده از سایر حلال‌های دیگر (سولولیز) انجام می‌پذیرد [۱۰]. لیو^۲ و همکاران [۱۱]، با استفاده از اسید نیتریک ۸ مولار در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد موفق به بازیافت الیاف کربن با حفظ خواص مکانیکی شدند. گزو^۳ و همکاران [۱۲]، با استفاده از هیدروژن پراکسید (H₂O₂)^۴ در حلال دی-متیل فرمامید (DMF)^۵ توانستند الیاف کربنی با حفظ ۹۵



شکل ۱- الف) طرح‌واره بازیافت الیاف؛ ب) تصویر آزمایشگاهی بازیافت [۱۳]

شکل ۲ الف و ب تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)^۷ الیاف کربن تازه و الیاف بازیافت شده را نشان می‌دهد. این تصاویر عدم تغییر مورفولوژی سطوح الیاف کربن در طی فرآیند بازیافت را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۲ پ منحنی تنش-کرنش الیاف کربن تازه و الیاف بازیافت شده نشان داده شده است. تصویر الیاف کربن قبل و بعد از تنش

⁵ Dimethylformamide

⁶ Yu

⁷ Scanning electron microscope

¹ Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites

² Liu

³ Xu

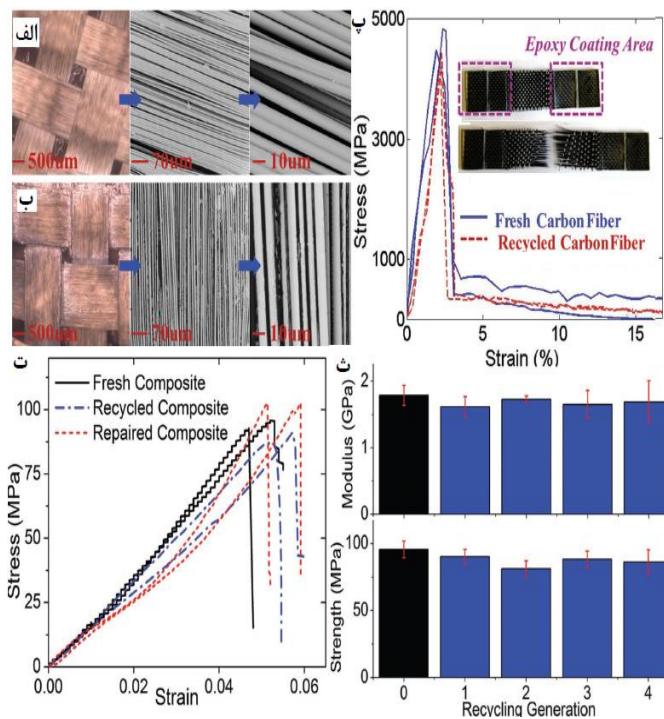
⁴ Hydrogen peroxide

یانگ^۹ و همکاران [۱۴] کامپوزیت‌های الیاف کربن را با استفاده از سیستم حلالی پلی‌اتیلن گلايکول و سدیم هیدروکسید در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد بازیافت کردند. اولیووکس^{۱۰} و همکاران [۱۵] با استفاده از یک راکتور با دمای ۳۲۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۸۰ بار در حلال آب و استون با نسبت ۲۰ به ۸۰ الیاف کربن را بازیافت کردند. یان^{۱۱} و همکاران [۱۶]، در شرایط فوق بحرانی در حلال ۱- پروپانول نتایج خوبی را برای بازیافت الیاف کربن به دست آوردند. لیو و همکاران [۱۷]، ضایعات کامپوزیت کربن- اپوکسی را در محلول روی کلرید- اتانول بازیافت کردند. در همه‌ی این گزارشات از روش شیمیایی برای بازیافت الیاف کربن استفاده شده است.

روش بازیافت حرارتی

در روش حرارتی، درشت مولکول‌های پلیمری در دماهای بالاتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به مولکول‌های کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. این مولکول‌های کوچک بخار شده و به دلیل ارزش گرمایی بالا، می‌توانند به‌عنوان منبع انرژی فرآیند، مورد استفاده قرار گیرند. فرآیند حرارتی می‌تواند در محیط‌های نیتروژن، هوا، خلأ و بخار فوق گرم انجام پذیرد. پیرولیز^{۱۲} (تجزیه در اثر حرارت) پلیمرها در محیط نیتروژن در دمای ۳۸۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. وزن باقی‌مانده در دمای بالاتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به کربن پیرولیتیک^{۱۳} (زغال) پلیمر است و مقدار کربن پیرولیتیک در این دما نسبت به تجزیه در محیط هوا بیشتر است. برای برداشتن کربن پیرولیتیک باید ادامه تجزیه در محیط هوا انجام پذیرد. در این روش، آسیب کمی به الیاف کربن وارد می‌شود؛ زیرا، تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد ابتدا درصد بسیار زیادی از پلیمر بدون آسیب به الیاف تجزیه شده و سپس کربن پیرولیتیک باقی‌مانده در محیط هوا در مدت‌زمان کوتاهی برداشته می‌شود. تصاویر میکروسکوپ

در این شکل مشخص است. شکل ۲ منحنی تنش- کرنش کامپوزیت تهیه‌شده با الیاف تازه و الیاف بازیافت شده و شکل ۳ استحکام نهایی و مدول الاستیک برای هر بار تولید کامپوزیت از الیاف کربن بازیافت شده را نشان می‌دهند. الیاف کربن در این پژوهش به صورت پارچه‌ای و ماتریس رزین اپوکسی برای ساخت کامپوزیت با روش لایه‌چینی استفاده شد. این نتایج که توسط محققان دانشگاه جورجیا^۸ به‌دست آمده است، بازیابی مناسب الیاف کربن با استفاده از حلال اتیلن گلايکول و در دمای ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. در واقع، خصوصیات الیاف کربن بازیافت شده به این روش بسیار مشابه با الیاف تازه است [۱۳].



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی؛ الف) الیاف تازه؛ ب) الیاف بازیافت شده؛ پ) منحنی تنش-کرنش الیاف تازه و الیاف بازیافت‌شده؛ ت) منحنی تنش- کرنش کامپوزیت تهیه‌شده با الیاف تازه و الیاف بازیافت‌شده؛ ث) استحکام نهایی و مدول الاستیک برای هر بار تولید کامپوزیت از الیاف کربن بازیافت شده [۱۳]

¹² Pyrolysis

¹³ Pyrolytic carbon

⁸ Georgia

⁹ Yang

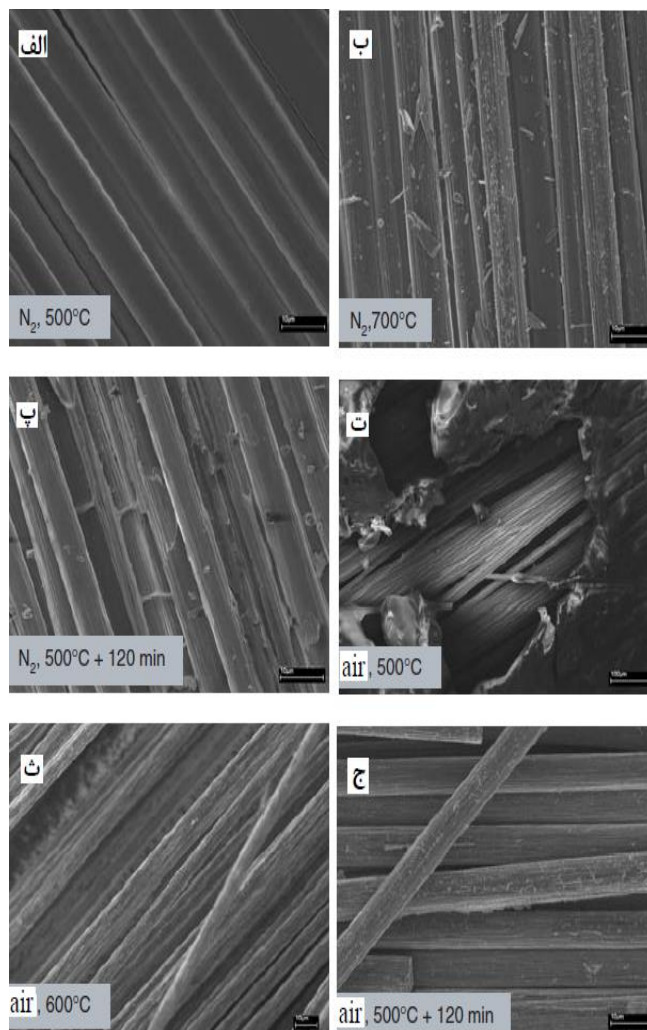
¹⁰ Oliveux

¹¹ Yan

الیاف هنوز به هم متصل‌اند و یک‌لایه از کربن پیرولیتیک روی الیاف را پوشانده است. در شکل ۳ (ب) در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقدار کربن پیرولیتیک کاهش یافته و الیاف کم‌وبیش از یکدیگر جدا هستند. شکل ۳ (پ) الیاف بازیافتی نگهداری شده در دمای ۵۰۰ °C، به مدت ۱۲۰ دقیقه در محیط نیتروژن را نشان می‌دهد. مقدار کربن پیرولیتیک بعد از ۱۲۰ دقیقه به میزان کمی کاهش یافته است. شکل ۳ (ت) تصویر الیاف در محیط هوا در دمای ۵۰۰ °C بدون زمان ثابت در کوره را نشان می‌دهد. شکل ۳ ت، الیاف هنوز به‌وسیله باقی‌مانده‌های رزین پوشیده شده‌اند. با افزایش دما (شکل ۳ث) این باقی‌مانده‌های رزین، کاملاً برداشته می‌شوند و سطوح الیاف تمیز و صاف هستند. در حضور اکسیژن هوا، اثر زمان آشکارتر است. در محیط هوا طی مدت ۱۲۰ دقیقه، الیاف کربن در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کاملاً از یکدیگر جدا هستند. مقدار کربن پیرولیتیک نیز بسیار کم است [۱۹،۱۸].

طیف‌سنجی رامان^{۱۴}، روش مناسبی برای بررسی سطوح الیاف است. این روش بینش بیشتری در مورد ساختار کربن موجود در سطح الیاف و میزان باقی‌مانده‌های پلیمری از ماتریس سابق روی سطح الیاف را ایجاد می‌کند [۱۹]. شکل ۴ طیف رامان الیاف بازیافتی در محیط نیتروژن و هوا را نشان می‌دهد. پیک‌های G و D در طیف رامان در دماهای بالا تیزتر هستند. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در محیط نیتروژن، کربن پیرولیتیک شامل برخی از باقی‌مانده‌های مواد آلی، منجر به پیک پهن در طیف رامان می‌شود. در حالی که در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد پیک‌ها باریک‌تر و تیزتر هستند. اثر زمان در محیط نیتروژن تغییرات چندانی را در طیف رامان ایجاد نمی‌کند. الیاف پیرولیز شده در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در ۱۲۰ دقیقه کمی تغییر در مقایسه با الیاف پیرولیز شده در همین دما بدون زمان را نشان می‌دهد (شکل ۴ الف و شکل ۴ پ)؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تجزیه حرارتی رزین اپوکسی در گاز نیتروژن بیشتر وابسته به دما است. طیف رامان الیاف پیرولیز شده در محیط هوا، یک اثر قوی زمان و دما را

الکترونی روبشی از نمونه‌های بازیافت شده کامپوزیت الیاف کربن- اپوکسی در محیط‌های نیتروژن و هوا در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۹،۱۸].



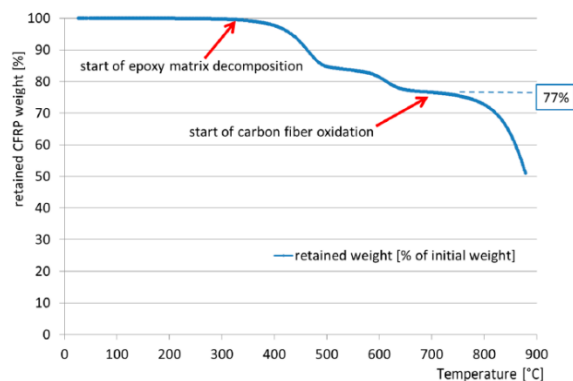
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از الیاف کربن بازیافتی به روش حرارتی؛ الف) در محیط نیتروژن در دمای ۵۰۰ °C، بدون زمان ثابت در کوره؛ ب) در محیط نیتروژن در دمای ۷۰۰ °C، بدون زمان ثابت؛ پ) در محیط نیتروژن در دمای ۵۰۰ °C، در زمان ۱۲۰ دقیقه؛ ت) در محیط هوا در دمای ۵۰۰ °C، بدون زمان ثابت در کوره؛ ث) در محیط هوا در دمای ۶۰۰ °C، بدون زمان ثابت؛ ج) در محیط هوا در دمای ۵۰۰ °C، در ۱۲۰ دقیقه [۱۹،۱۸]

شکل ۳ الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الیاف کربن در محیط نیتروژن در دمای ۵۰۰ °C، بدون زمان نگهداری در کوره را نشان می‌دهد. شکل ۳ نشان می‌دهد که

¹⁴ Raman spectroscopy

براساس نتایج بالا برای بازیافت حرارتی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن، ابتدا دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۲ ساعت در محیط نیتروژن، بدون ریسک افزایش دمای کنترل نشده برای برداشتن مواد آلی انتخاب می‌شود. سپس کربن پیرولیتیک به وسیله اکسیداسیون جزئی در محیط هوا در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد برداشته می‌شود. استحکام کششی به دست آمده از الیاف تازه برای ساخت کامپوزیت و الیاف بازیافت شده مقادیر مشابهی را نشان می‌دهد [۱۹، ۱۸].

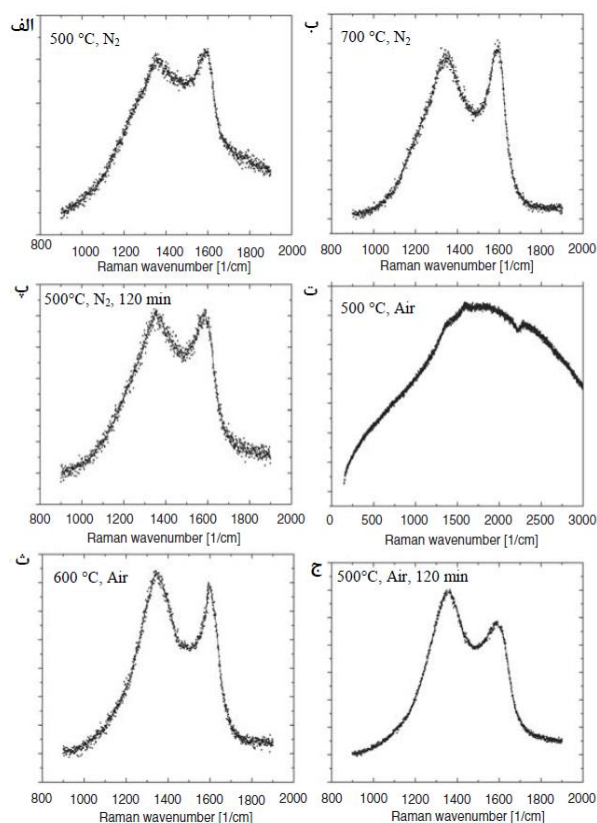
شکل ۵ آنالیز حرارتی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در محیط هوا را نشان می‌دهد. بخش رزین اپوکسی پخت شده در کامپوزیت در دمای ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و الیاف کربن از دمای ۶۵۰ تا ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد اکسید می‌شوند؛ بنابراین، در محیط هوا باید دمای بازیافت کنترل شده باشد تا از آسیب به الیاف جلوگیری شود [۲۰]؛ اما، در محیط نیتروژن آسیبی به الیاف کربن وارد نمی‌شود.



شکل ۵- آنالیز حرارتی کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن [۲۰]

بازیافت الیاف کربن در شرایط بخار فوق گرم^{۱۵} با بیشترین حفظ خواص مکانیکی در مقایسه با هر روش پیرولیز دیگر انجام شده است. بازده بازیافت در این روش وابسته به زمان انجام واکنش، دما و سرعت جریان بخار فوق گرم در راکتور است [۲۱]. بازیافت الیاف کربن در شرایط امواج ریزموج^{۱۶}

نشان می‌دهد. طیف رامان در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بدون زمان، در محیط هوا فقط یک پیک پهن را نشان می‌دهد، این یک پیک عمومی از طیف رامان الیاف کربن نیست و حضور یک مقدار بزرگی از بقایای آلی روی سطح الیاف را نشان می‌دهد. با افزایش دمای پیرولیز به ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد یا دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۲۰ دقیقه، بقایای مواد آلی برداشته می‌شود و طیف دو پیک واضح را نشان می‌دهد. به هر حال، چگالی نقص‌های الیاف پیرولیز شده در هوا در مقایسه با محیط نیتروژن کمی افزایش یافته که ممکن است به واسطه اکسیداسیون سطوح الیاف باشد [۱۹].



شکل ۴- طیف رامان از الیاف کربن بازیافتی به روش حرارتی؛ (الف) در محیط نیتروژن در دمای ۵۰۰ °C، بدون زمان ثابت در کوره؛ (ب) در محیط نیتروژن در دمای ۷۰۰ °C، بدون زمان ثابت؛ (پ) در محیط نیتروژن در دمای ۵۰۰ °C، در زمان ۱۲۰ دقیقه؛ (ت) در محیط هوا در دمای ۵۰۰ °C، بدون زمان ثابت در کوره؛ (ث) در محیط هوا در دمای ۶۰۰ °C، بدون زمان ثابت؛ (ج) در محیط هوا در دمای ۵۰۰ °C، در ۱۲۰ دقیقه [۱۹]

¹⁶ Microwave

¹⁵ Super-heated-steam



شکل ۷- ضایعات الیاف کربن مورد استفاده در شرکت ELG. [۲۴]



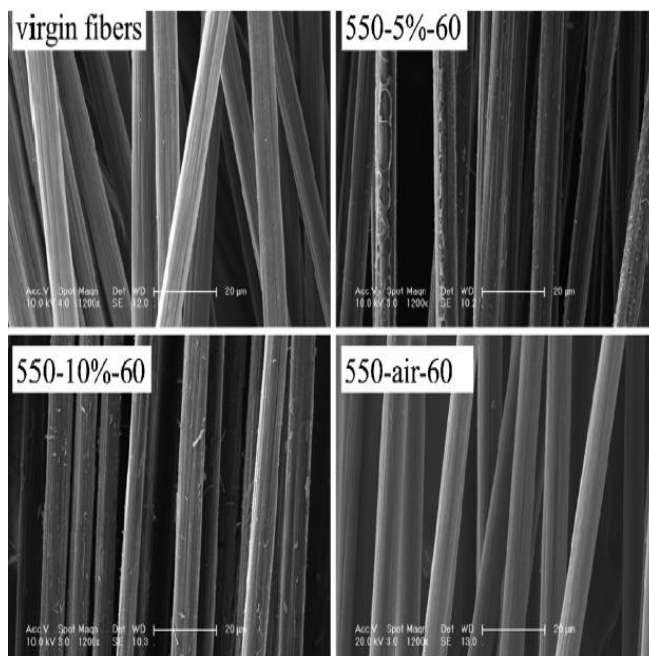
شکل ۸- کوره فرآیند پیرولیز مورد استفاده در شرکت ELG. [۲۵]



شکل ۹- الیاف کربن بازیافت شده در شرکت ELG. [۲۴،۲۵]

در اتمسفر آرگون با یک بازده بسیار بالایی با استحکام مناسبی نسبت به نمونه اولیه انجام شده است [۲۲].

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی الیاف بازیافتی در دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد در غلظت‌های ۰.۵٪ اکسیژن- ۹۵٪ نیتروژن؛ ۱۰٪ اکسیژن-۹۰٪ نیتروژن و هوا را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت اکسیژن میزان کربن پیرولیتیک حاصل از تجزیه ترکیبات آلی پلیمری کاهش می‌یابد [۲۳].



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی الیاف کربن اولیه مورد استفاده در ساخت کامپوزیت و الیاف بازیافت شده در غلظت‌های مختلفی از اکسیژن- نیتروژن [۲۳]

شرکت ELG در انگلستان سالانه ۱۵۰۰ تن الیاف کربن از ضایعات کامپوزیت‌ها را به روش تجزیه حرارتی بازیافت می‌کند [۲۴،۲۵] (شکل ۷، ۸ و ۹).

اشکال و کاربردهای الیاف بازیافت شده

الیاف بازیافت‌شده به شکل‌های خردشده^{۱۷}، قطعه‌قطعه شده^{۱۸}، فایبربال^{۱۹}، فایبرتوب^{۲۰}، پارچه غیربافت‌شده^{۲۱} و پرده^{۲۲} و الیاف مورد استفاده در ساخت کامپوزیت‌های قالب‌گیری شده مورد استفاده قرار می‌گیرند (شکل ۱۰) [۲۶].



شکل ۱۰- اشکال مختلف الیاف کربنی بازیافت‌شده [۲۶]

الیاف کربن بازیافت‌شده با توجه به نوع بازیافت و نوع اشکال آنها در ساخت قطعات هوایی، قطعات خودرو، وسایل ورزشی، ویلچر، دوچرخه، بدنه و قاب‌های گوشی‌های همراه، کاورهای

لپ‌تاپ، تیغه‌های توربین‌های بادی و سایر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷-۲۹].

بحث و نتیجه‌گیری

باتوجه به نیاز روزافزون به قطعات ساخته‌شده از کامپوزیت با استحکام بالا و وزن کم، استفاده از الیاف کربن روبه گسترش است؛ بنابراین، بازیافت این ماده اولیه از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بازیافت کامپوزیت‌ها با سه روش مکانیکی، شیمیایی و حرارتی انجام می‌گیرد. هرکدام از روش‌ها دارای برتری‌های خاص خود هستند. در روش مکانیکی، قطعات کامپوزیتی آسیاب شده و بدون حذف رزین به شکل‌های پرنکنده یا تقویت‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند. از محدودیت‌های این روش استفاده از آسیاب‌های پیشرفته برای خرد و آسیاب کردن کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن است؛ همچنین، در این روش، الیاف پیوسته به دست نمی‌آیند و استحکام الیاف کاهش می‌یابد. در روش‌های بازیافت شیمیایی، الیاف کربن با استحکام بالا به دست می‌آیند؛ اما، هزینه‌های مرتبط با مواد شیمیایی و فرآیندی بازیافت بسیار بالا است. همچنین، استفاده از مواد و حلال‌های آلی، باعث آلودگی محیط‌زیست می‌شود. در روش بازیافت حرارتی، هزینه‌های اقتصادی کاهش‌یافته و بنابراین شرکت‌های بزرگ بازیافت کربن بیشتر از این روش بهره می‌گیرند. در این روش، برای تأمین سوخت کوره نیز از ترکیبات حاصل از سوختن پلیمر کامپوزیت که شامل مواد کربن‌دار هستند استفاده می‌شود. روش پیرولیز در صورتی که از ورود ترکیبات کربن‌دار به محیط زیست جلوگیری شود روش اقتصادی مناسبی برای بازیافت کربن در شرکت‌های بزرگ بازیافت محسوب می‌شود. بازیافت الیاف در زمان‌های کوتاه صورت می‌گیرد که با کنترل محیط بازیافت، دما و زمان، الیاف بازیافتی با کیفیت مناسب به دست می‌آیند. الیاف بازیافت شده در شکل‌های مختلف برای کاربردهای گوناگون استفاده می‌شوند. امید

²¹ Non-woven

²² Veil

¹⁷ Milled

¹⁸ Chopped

¹⁹ Fiberball

²⁰ Fibertube

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **2006**, 37, 1206–1215.
- [10] Pimenta S., Pinho ST., Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: technology review and market outlook. *Waste management* **2011**, 31, 378-392.
- [11] Liu Y., Meng L., Huang Y., Du J., Recycling of carbon/epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science*, **2004**, 94, 1912-1916.
- [12] Xu P., Li J., Ding J., Chemical recycling of carbon fibre/epoxy composites in a mixed solution of peroxide hydrogen and N,N-dimethylformamide, *Composites Science and Technology* **2013**, 82, 54-59.
- [13] Yu K., Shi Q., Dunn ML., Wang T., Qi HJ., Carbon fiber reinforced thermoset composite with near 100% recyclability, *Advanced functional materials*, **2016**, 26, 6098-6106.
- [14] Yang P., Zhou Q., Li XY., Yang KK., Wang YZ., Chemical recycling of fiber-reinforced epoxy resin using a polyethylene glycol/NaOH system, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **2014**, 33, 2106-2114.
- [15] Oliveux G., Bailleul JL., Gillet A., Mantaux O., Leeke GA., Recovery and reuse of discontinuous carbon fibres by solvolysis: realignment and properties of remanufactured materials, *Composites Science and Technology*, **2017**, 139, 99-108.
- [16] Yan H., Lu C., Jing D., Chang C., Liu N., Hou X., Recycling of carbon fibers in epoxy resin composites using supercritical 1-propanol, *New Carbon Materials*, **2016**, 31, 46-54.
- [17] Liu T., Zhang M., Guo X., Liu C., Liu T., Xin J., Zhang J., Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin, *Polymer Degradation and Stability* **2017**, 139, 20-27.
- [18] Naqvi SR., Mysore Prabhakara H., Bramer E.A., Dierkes W., Akkerman R., Brem G., A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced

است در کشور ایران مانند سایر کشورهای پیشرفته به پدیده بازیافت الیاف کربن از قطعات نظامی، هوایی و سانتریفیوژهای هسته‌ای توجه شایانی گردد تا نیاز به این ماده با ارزش و استراتژیک برای استفاده در صنایع مختلف مورد نیاز کشور برطرف گردد.

منابع

- [1] Karataş MA., Gökaya H., A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, *Def. Technol.* **2018**, 14, 318-326.
- [2] Hegde S., Shenoy BS., Chethan KN., Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance, *Materials Today: Proceedings* **2019**, 19, 658-662.
- [3] Gangineni PK., Yandrapu S., Ghosh SK., Anand A., Prusty RK., Ray BC., Mechanical behavior of graphene decorated carbon fiber reinforced polymer composites: an assessment of the influence of functional groups, *Composites Part A* **2019**, 122, 36-44
- [4] Asmatulu E., Twomey J., Overcash M., Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept. *J. Compos. Mater.* **2014**, 48, 593–608.
- [5] Wang B., Ma S., Yan S., Zhu J., Readily recyclable carbon fiber reinforced composites based on degradable thermosets: a review, *Green Chem.* **2019**, 21, 5781–5796.
- [6] Das S., Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites, *Int. J. Life Cycle Assess* **2011**, 16, 268-282.
- [7] Palmer J, Ghita OR, Savage L, Evans KE, Successful closed-loop recycling of thermoset composites, *Composites: Part A* **2009**, 40, 490–498.
- [8] Gopalraj SK., Karki T., A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties and life-cycle analysis, *SN Applied Sciences*, **2020**, 2, 433-454.
- [9] Pickering SJ., Recycling technologies for thermoset composite materials-current status,

- [29] Oliveux G., Dandy LO., Leeke GA., Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties, *Progress in Materials Science* **2015**, 72, 61–99.
- composites waste using pyrolysis towards a circular economy, *Resources, Conservation and Recycling* **2018**, 136, 118–129.
- [19] Meyer LO., Schulte K., CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials, *Journal of composite materials*, 2009, 43, 1121-1132.
- [20] Terrasi GP., McIntyre ERE., Bisby LA., Lämmlein TD., Lura P., Transient thermal tensile behaviour of novel pitch-based ultra-high modulus cfrp tendons, *Polymers* **2016**, 8, 446-461.
- [21] Kim KW., Lee HM., An JH., Chung DC., An KH., Kim BJ., Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method, *Journal of Environmental Management* **2017**, 203, 872-879.
- [22] Obunai K., Fukuta T., Ozaki K., Carbon fiber extraction from waste CFRP by microwave irradiation, *Composites: Part A* **2015**, 78, 160–165.
- [23] Yang J., Liu J., Liu W., Wang J., Tang T., Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen–oxygen atmosphere, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2015**, 112, 253–261.
- [24] Holmes M., Recycled carbon fiber composites become a reality, *Reinforced Plastics*, **2018**, 62, 148-153.
- [25] Job S., Recycling composites commercially, *Reinforced Plastics*, **2014**, 58, 32-38.
- [26] <https://www.carbonxt.de/en/products/>
- [27] Balaji AB., Rudd C., Liu X., Recycled carbon fibers (rcf) in automobiles: towards circular economy, *Materials Circular Economy*, **2020**, 4, DOI: <https://doi.org/10.1007/s42824-020-00004-0>
- [28] Rani M., Choudhary P., Krishnan V., Zafar S., A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades, *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215, 108768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108768>