Science Popularization

Foundation of Composite Waste Recycling in Iran's Industries

Roham Rafiee*,[1], Faeze Safaei[1]

Article Info

Article type:
Popularization of Science

Article history:

Receive Date:
01 May 2026

Revise Date:
06 May 2026

Accept Date:
08 May 2026

Available online:
21 June 2026

Keywords:

Recycling

Composite wastes

Multi-criteria decision making model

Prioritizing

National policy-making

Advanced composite materials and structures, particularly thermoset resin-based composites reinforced with fibers, play a crucial role in Iran's key industries. These materials have become preferred alternatives to traditional metals due to their superior mechanical properties and low weight. However, composite waste generated across various industries poses serious environmental, economic, and technical challenges due to its complex crosslinked structure and biological non-degradability. The accumulation of such waste not only occupies landfill space but also represents significant resource loss. Research activities in Iran have shown progress in composite technologies, especially in additively manufacturing procedures known as 3D printing; however, the systematic use of recycled materials in this segment of the industry as feedstock has not yet received adequate attention. This paper comprehensively examines large-scale recycling methods for these wastes along with their advantages and limitations. Five principal composite recycling approaches are analyzed: reuse/repurpose, resize/reshape, mechanical/thermal/chemical and hybrid conversion processes, aggregates, and recovery. Subsequently, key performance indicators are extracted for these methods based on Iran's local conditions, weighted, and prioritized using the SMART multi-criteria decision-making model. This study emphasizes the imperative need for establishing a circular economy in composite waste management and positions recycling as a strategic opportunity for industrial self-sufficiency and sustainable development.

Cite this article: Rafiee,R and Safaei,F . (2026). Foundation of Composite Waste Recycling in Iran's Industries. *Science Cultivation*, 16 (1).78-87.

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights.
Publisher: Foundation for the Advancement of Science and Technology in Iran (FAST-IRAN) and Iran Society of Biophysical Chemistry (ISOBC)

* Corresponding Author. Professor. Tel: +982186093046, Fax: +982188497324, E-mail: Roham.Rafiee@ut.ac.ir
[1] Composites Research Laboratory (COMRESLAB), College of Interdisicplinay Science and Technology, University of Tehran, Tehran, Iran

Print ISSN 2008-935X Online ISSN 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

بسترسازی بازیافت ضایعات مواد کامپوزیتی در صنایع ایران

رهام رفیعی*[1]، فائزه صفایی[1]

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله ترویجی

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت:
۱۱ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ بازنگری:
۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ پذیرش:
۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۵
تاریخ انتشار:
۳۱ خرداد ۱۴۰۵

کلیدواژه‌ها:
بازیافت، پسماندهای کامپوزیتی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، اولویت‌بندی، سیاست‌گذاری ملی.

چکیده

مواد کامپوزیتی پیشرفته، به‌ویژه انواع مبتنی بر رزین‌های گرماسخت و تقویت‌کننده‌های الیاف، در صنایع کلیدی ایران نقش محوری ایفا می‌کنند. این مواد به دلیل خواص مکانیکی برتر جایگزین مناسبی برای فلزات شده‌اند. بااین‌حال، پسماندهای کامپوزیتی تولیدشده در صنایع مختلف کشور، به دلیل ساختار شبکه‌ای پیچیده و غیرقابل‌تجزیه بیولوژیکی، چالش‌های زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی ایجاد کرده‌اند. انباشت این پسماندها، فضای دفن زباله‌ها را اشغال می‌کند، و از نظر اقتصادی نیز اتلاف منابع با ارزش را به دنبال دارد. فعالیت‌های تحقیقاتی در ایران در حوزه کامپوزیت‌ها به‌ویژه در چاپ سه‌بعدی پیشرفت‌هایی داشته است؛ اما استفاده مناسب از مواد بازیافتی به‌صورت جدی مورد توجه قرار نگرفته است. این مقاله به بررسی روش‌های کلان بازیافت این پسماندها و مزایا و معایب هر روش می‌پردازد. پنج روش اصلی بازیافت کامپوزیت‌ها شامل باز استفاده مستقیم، ساخت سازه‌های ثانویه، تبدیل‌های مکانیکی/حرارتی/شیمیایی و ترکیبی، روش متراکم‌سازی و تولید الیاف بلند قابل‌استفاده مجدد مورد تحلیل قرار می‌گیرند. سپس، برای این روش‌ها بر اساس شرایط بومی کشور، شاخص‌های کلیدی استخراج و با استفاده از مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره SMART وزن‌دهی و اولویت‌بندی می‌شوند. این مطالعه بر لزوم استقرار اقتصاد چرخشی در مدیریت پسماندهای کامپوزیتی تأکید دارد و بازیافت را فرصتی راهبردی برای خودکفایی صنعتی و توسعه پایدار می‌داند.

استناد: رفیعی,رهام و صفایی,فائزه . (۱۴۰۵). بسترسازی بازیافت ضایعات مواد کامپوزیتی در صنایع ایران.. *نشاء علم*، ۱۶ (۱)، ۷۸-۸۷.

ناشر: بنیاد پیشبرد علم و فناوری در ایران و انجمن بیوشیمی فیزیک ایران

© نویسندگان حق نشر و کلیه حقوق انتشار را برای خود حفظ می‌کنند.

* عهده‌دار مکاتبات: استاد. تلفن: ۸۶۰۹۳۰۴۶ (۹۸۲۱+)، دورنگار: ۸۸۴۹۷۳۲۴ (۹۸۲۱+)، آدرس الکترونیکی: Roham.Rafiee@ut.ac.ir

[1] آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی، به‌عنوان یکی از پیشروترین دستاوردهای مهندسی مواد در دهه‌های اخیر، نقش محوری در صنایع پیشرفته ایفا می‌کنند. این مواد که از ترکیب الیاف تقویت‌کننده با ماتریس‌های پلیمری تشکیل شده‌اند، خواص مکانیکی بالا، وزن سبک و مقاومت عالی در برابر خوردگی ارائه می‌دهند. کاربرد گسترده کامپوزیت‌ها در صنایع هوافضا، خودروسازی، دریایی و انرژی‌های تجدیدپذیر، حجم تولید آنها را به طور چشمگیری افزایش داده است. بااین‌حال، تولید انبوه کامپوزیت‌ها، چالش‌های جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی به بار آورده است. پسماندهای کامپوزیتی مبتنی بر رزین‌های گرماسخت به دلیل پیوندهای کووالانسی قوی و ساختار لایه‌ای، از نظر زیستی کاملاً غیرقابل‌تجزیه هستند و فضای دفن وسیعی اشغال می‌کنند. دفن آن‌ها منجر به نشت میکروپلاستیک‌ها و مواد سمی به خاک و آب‌های زیرزمینی می‌شود، درحالی‌که سوزاندن نامناسب، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق را تشدید می‌کند. از منظر اقتصادی، این پسماندها حاوی الیاف و رزین هستند و دفن آنها معادل هدررفت سرمایه ملی است و هزینه‌های مدیریت زباله را افزایش می‌دهد [۱].

پسماندهای کامپوزیتی عمدتاً از دو منبع اصلی نشئت می‌گیرند: ضایعات فرایند تولید و قطعات پایان‌عمر. در ایران، با رشد سریع صنایع کامپوزیتی، سالانه حجم زیادی پسماند کامپوزیتی تولید می‌شود که بخش عمده آن به دفن یا سوزاندن نامناسب می‌انجامد که نه‌تنها با اصول اقتصاد چرخشی مغایرت دارد، بلکه منجر به وابستگی به واردات الیاف خام می‌شود. بازیافت مؤثر این پسماندها، فرصتی طلایی برای کاهش آلودگی، صرفه‌جویی ارزی، ایجاد اشتغال و همسویی با اهداف توسعه پایدار است [۲].

چالش‌های فنی بازیافت کامپوزیت‌ها ریشه در پیوندهای شیمیایی قوی بین الیاف و ماتریس و جداسازی دشوار آنها دارد. روش‌های مکانیکی مانند خرد کردن، کیفیت الیاف را کاهش می‌دهند، روش‌های حرارتی نیازمند انرژی بالا و روش‌های شیمیایی نیز هزینه‌بر و آلاینده هستند. توسعه فناوری‌های نوین مانند متراکم‌سازی، بازیافت فوق حرارتی و تبدیل ترکیبی نیز نیازمند حمایت‌های سیاستی است. در سطح جهانی، کشورهایی مانند آلمان و ژاپن با سیاست‌های تشویقی و الزامات قانونی، نرخ بازیافت کامپوزیت‌ها را به بیش از ۵۰ درصد رسانده‌اند و از این پسماندها برای تولید مواد ثانویه سود می‌برند؛ این تجربیات نشان‌دهنده پتانسیل اقتصادی بالای بازیافت است، جایی که ارزش افزوده الیاف بازیافتی می‌تواند هزینه‌های اولیه را جبران کند.

در ایران، باتوجه‌به رشد صنایع کلیدی مانند لوله و مخازن، توربین‌های بادی و خودروسازی، حجم پسماندهای کامپوزیتی روبه‌افزایش است و فقدان سیاست‌های منسجم، فرصت‌های بالقوه را به تهدید زیست‌محیطی تبدیل کرده است؛ اتخاذ رویکردهای سیاستی هدفمند، کلید دستیابی به خودکفایی در زنجیره تأمین مواد کامپوزیتی و هم‌راستایی با اقتصاد چرخشی ملی به شمار می‌رود.

۲- بررسی کلان روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها

پسماندهای کامپوزیتی، به‌ویژه انواع پلیمری مبتنی بر رزین‌های گرماسخت، به دلیل حجم روبه‌رشد تولید در صنایع ایران مانند صنایع لوله و مخازن و توربین بادی، نیازمند روش‌های بازیافت کلان و کارآمد هستند. این بخش با هدف شناسایی، طبقه‌بندی و ارزیابی روش‌های متداول بازیافت، پنج رویکرد اصلی را بررسی می‌کند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند. این روش‌ها بر اساس تجربیات جهانی، مزایا/معایب و امکان‌پذیری بومی تحلیل شده و زمینه را برای اولویت‌بندی در بخش‌های بعدی فراهم می‌سازند [۳].

شکل ۱: دسته‌بندی بازیافت مواد کامپوزیتی

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

۲-۱- باز استفاده[1] یا تغییر کاربری[2]

این روش در واقع نوعی استفاده مجدد از ساختارهای کامپوزیتی بدون تخریب شیمیایی یا حرارتی هستند. در این روش، قطعات بزرگ پس از بازرسی و اصلاح، به‌عنوان سازه‌های ثانویه مانند پل‌های عابر، سرپناه‌ها، دیواره‌های صوتی، مبلمان شهری یا پانل‌های ساختمانی استفاده می‌شوند. یکی از کاربردهای مهم و عملی ضایعات لوله‌های کامپوزیتی، استفاده از آن‌ها در ساخت قطعات اتصالات مانند زانو، سه‌راهی، انشعاب گیر و اتصالات تقویتی است. در این رویکرد، انرژی نهفته در تولید الیاف و رزین حفظ می‌شود، هزینه سرمایه‌گذاری ناچیز است و آلودگی ناشی از پردازش حرارتی از بین می‌رود. بااین‌حال، چالش‌هایی مانند حمل‌ونقل دشوار قطعات بزرگ و الزامات استانداردهای ساختمانی وجود دارد [۶-۴].

۲-۲- استفاده از بخش‌هایی از سازه برای کاربری‌های مجدد[3]

در این شیوه، سازه‌های کامپوزیتی موردنظر بدون هیچ واکنش شیمیایی و صرفاً از طریق فرایندهای فیزیکی به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. این قطعات سپس با حداقل عملیات تکمیلی در کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. تفاوت اصلی این روش با بازاستفاده در آن است که در شیوه بازاستفاده، هدف بهره‌گیری مجدد از بخش عمده سازه بازیافتی با کمترین تغییرات ممکن است؛ درحالی‌که در این روش برش‌کاری جدی‌تر و قابل‌ملاحظه‌ای بر روی سازه صورت می‌گیرد تا به اجزای کوچک‌تر و قابل‌استفاده تبدیل شود. مزایای روش مکانیکی در سادگی فرایند، نیاز اندک به سرمایه‌گذاری اولیه، قابلیت اجرا در محل، مصرف پایین انرژی و قابلیت پردازش حجم بالای پسماند است. افزون بر این، این روش حساسیت کمی نسبت به ناخالصی‌هایی مانند رنگ، چسب یا وجود فلزات دارد و به‌راحتی قابل صنعتی‌سازی است. همچنین، این روش آلودگی شیمیایی ندارد و از منظر زیست‌محیطی مطلوب است. عیب اصلی این روش، کاهش طول الیاف و یا تخریب آن است. همچنین، سطح الیاف با رزین باقی‌مانده پوشیده می‌شود. در نتیجه، مقاومت کششی و چسبندگی سطحی کاهش می‌یابد و الیاف بازیافتی تنها در کاربردهای غیرسازه‌ای قابل‌استفاده هستند [۵, ۷].

۲-۳- تبدیل[4] به موادی دیگر برای سایر کاربری‌ها

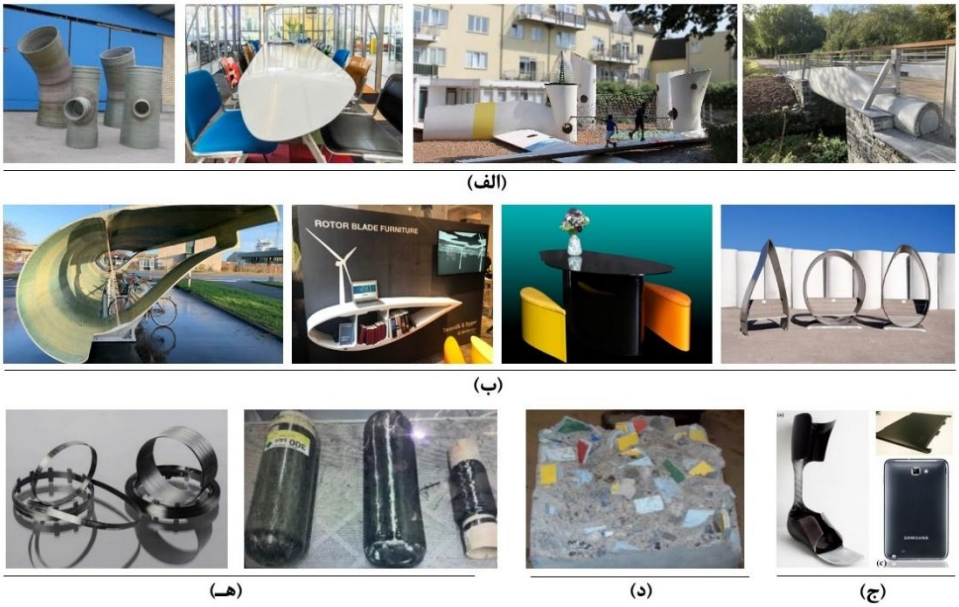
روش تبدیل مواد سازنده یک سازه کامپوزیتی به مواد قابل‌استفاده در فرایندهای تولید سازه کامپوزیتی به چهار زیرگروه تبدیل مکانیکی، شیمیایی، حرارتی و ترکیبی تقسیم می‌شود. در روش بازیافت مکانیکی، کامپوزیت‌ها به‌صورت فیزیکی به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌شوند. این فرایند برای تبدیل سریع حجم گسترده‌ای از ضایعات به مواد قابل‌استفاده مناسب است؛ اما دامنه کاربرد مواد خروجی محدود خواهد بود [۶, ۸-۱۰]. در روش‌های تبدیل حرارتی، هدف حذف ماتریس پلیمری از طریق گرما و بازیابی الیاف است. این روش‌ها قابلیت پردازش مقادیر زیاد پسماند را دارند؛ اما باید توجه داشت در این روش‌ها کنترل دما و زمان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند [۱۳-۱۱]. تبدیل شیمیایی بر اساس شکستن پیوندهای عرضی رزین گرماسخت انجام می‌شود. در این روش، الیاف باکیفیت بسیار بالایی بازیابی می‌شوند و محصولات جانبی نیز قابل‌استفاده مجدد در صنعت هستند [۸, ۱۴, ۱۵]. در روش‌های ترکیبی ابتدا فرایند مکانیکی انجام می‌شود و سپس بخش‌های غنی از الیاف تحت عملیات حرارتی یا شیمیایی قرار می‌گیرند. این روش باعث افزایش بازدهی و کاهش هزینه حمل‌ونقل می‌شود، اما به سرمایه‌گذاری اولیه بالاتری نیاز دارد [۱۶-۲۱].

۲-۴- استفاده به‌صورت ماده متراکم[5]

در این روش، مواد خرد شده به‌دست‌آمده در شیوه تبدیل مکانیکی در بتن یا آسفالت استفاده می‌شوند. در این حالت، ذرات کامپوزیتی جایگزین بخشی از ماسه یا شن در بتن می‌شوند. مزیت این روش، جذب حجم بالای پسماند و سازگاری با فرایندهای موجود در صنعت ساخت‌وساز است. البته، باید رفتار مکانیکی و دوام بلندمدت بتن حاوی این ذرات مورد آزمایش قرار گیرد تا از عدم بروز واکنش قلیایی - سیلیسی و کاهش مقاومت اطمینان حاصل شود. تمرکز فنی این مسیر روی طراحی ترکیب، کارایی و آزمون

[1] Reuse
[2] Repurpose
[3] Resize/Reshape
[4] Conversion
[5] Aggregates

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی



شکل ۲: بازیافت پسماندهای کامپوزیتی به روش‌های **(الف)** باز استفاده یا تغییر کاربری، **(ب)** استفاده از بخش‌هایی از سازه برای کاربری‌های مجدد، **(ج)** تبدیل به موادی دیگر برای سایرکاربری‌ها، **(د)** بازیافت برای استفاده به‌صورت ماده متراکم و **(ه)** استفاده مجدد از الیاف باکیفیت مناسب [۳۱، ۳۰، ۲۵]

دوام است. در این روش کنترل اندازه ذرات اهمیت زیادی دارد [۲۵-۲۲].

۲-۵- استفاده مجدد از الیاف باکیفیت مناسب[1]

در حوزه بازیافت کامپوزیت‌ها، یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر مربوط به بازیابی و استفاده مجدد از الیاف پیوسته کربن و نوارهای کربن به‌کاررفته در سازه‌هایی مانند مخازن تحت‌فشار، لوله‌های کامپوزیتی و کاربردهای الکتریکی است. اهمیت این دستاورد در آن است که برخلاف روش‌های مرسوم بازیافت که تنها الیاف کوتاه با خواص مکانیکی کاهش‌یافته تولید می‌کردند، در این روش الیاف با طول و استحکام اولیه خود حفظ می‌شوند و قابلیت استفاده در محصولات با عملکرد بالا را دارند. همچنین نوارهای کربن نیز خواص خود را تا حد زیادی حفظ می‌کنند [۲۶].

تفاوت اصلی این روش با روش ترکیبی شیمیایی - حرارتی این است که در روش ترکیبی الیاف خروجی معمولاً کوتاه، خردشده و حتی آلوده به مقدار کمی از بقایای رزین باقی می‌مانند؛ اما در روش حاضر هدف اصلی حفظ ساختار الیاف به‌صورت بلند، سالم و تقریباً بدون آسیب است؛ به‌خصوص در مورد الیاف کربن که ارزش اقتصادی بسیار بالایی دارند و خرد شدن آن‌ها از کاربردشان کم می‌کند.

در شکل (۲) نمونه‌هایی از بازیافت کامپوزیت‌ها به روش‌های مختلف نشان داده شده‌اند.

۳- پسماند صنعت کامپوزیت ایران

صنعت کامپوزیت در ایران طی دو دهه گذشته رشد قابل‌توجهی را تجربه کرده است. این رشد به‌ویژه در دو حوزه پره‌های توربین بادی و لوله‌ها و مخازن کامپوزیتی باعث افزایش چشمگیر مصرف مواد اولیه و در نتیجه انباشت قابل‌توجه ضایعات کامپوزیتی شده است [۲۷, ۲۸]. بزرگ‌ترین بخش صنعت کامپوزیت کشور، صنعت لوله کامپوزیت است [۲۹]. پره‌های توربین بادی نیز به علت نزدیک‌شدن به عمر نامی خود بخش قابل‌توجهی از دیدگاه میزان ضایعات هستند. ضایعات سایر صنایع کامپوزیت در مقایسه با این دو بخش ناچیز است و تخمین نهایی مبتنی بر این دو بخش را دستخوش تغییر بسیار ناچیزی می‌نماید.

۳-۱- ضایعات بخش لوله و مخازن کامپوزیت

[1] Recovery

شاپا چاپی 2008-935X شاپا الکترونیکی 2783-0934 https:/www.sciencecultivation.ir

صنعت ساخت لوله کامپوزیت در ایران بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان الیاف شیشه و رزین‌های گرماسخت است که رتبه اول تناژ محصول تولیدی را به خود اختصاص می‌دهد. لوله‌های کامپوزیتی در سامانه‌های انتقال آب، فاضلاب، دستگاه‌های آتش‌نشانی، نیروگاه‌ها و صنایع نفت، گاز و پتروشیمی کاربرد دارند. میزان تولید گسترده و نیاز به آزمون‌های کنترل کیفیت باعث شده است که ضایعات تولیدی این بخش سهم قابل‌توجهی در پسماند کامپوزیتی کشور داشته باشد. این حوزه یکی از پایدارترین منابع ضایعات کامپوزیتی در کشور است و بدون وجود دستگاه‌های جمع‌آوری، پردازش و بازیافت، این حجم از پسماند در حال تبدیل شدن به چالش زیست‌محیطی جدی است.

حدود ۱۱ شرکت شناخته‌شده به‌عنوان تولیدکنندگان اصلی لوله‌های کامپوزیتی در ایران فعالیت داشته‌اند. این شرکت‌ها عمدتاً در شهرهای شیراز، قزوین، زنجان، همدان، مشهد، تبریز و قم واقع شده‌اند. چنانچه تمامی تولیدکنندگان موجود در کشور در ظرفیت نامی خود به تولید بپردازند، ظرفیت عرضه لوله کامپوزیتی در کشور حدود ۱۲۴ هزار تن و یا ۲۷۴۵ کیلومتر تخمین زده می‌شود. از طرفی در حال حاضر، تمامی شرکت‌ها در حال تولید با ۴۰ الی ۵۰ درصد ظرفیت نامی خود هستند؛ لذا با درنظرگرفتن ضریب ۵۰ درصد، شمار کل تولید سالیانه لوله کامپوزیت در کشور به‌صورت واقعی به مقدار ۶۲ هزار تن در سال است. درصورتی‌که ظرفیت استفاده‌شده کاهش یا افزایش یابد، میزان ضایعات نیز به‌صورت مستقیم تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین منابع ضایعات در این صنعت، آزمون‌های مخرب است [۳۰]. مطابق دستورالعمل‌های استاندارد، از هر صد شاخه لوله، یک شاخه باید تحت آزمون‌های مخرب استحکامی در قالب آزمون کنترل کیفیت محصول تولیدی قرار گیرد. این شاخه پس از آزمون به طور کامل از بین می‌رود و قابل‌استفاده مجدد نیست. به‌جز ضایعات مربوط به آزمون‌های مخرب، مقدار دیگری از ضایعات نیز مربوط به مشکلات فرایندی، خطاهای اپراتوری، نقص در آغشته‌سازی الیاف، حباب‌زایی، الیاف کم‌تراکم، اشکالات قطر یا ضخامت و عدم انطباق با استانداردها است. این بخش از ضایعات معمولاً حدود یک درصد کل تولید را تشکیل می‌دهد. با جمع‌کردن ضایعات آزمون و ضایعات فرایندی، می‌توان گفت که حدود دو درصد از کل تولید لوله‌های کامپوزیتی به‌عنوان پسماند ثبت می‌شود. باتوجه‌به تولید ۶۲ هزارتنی، مقدار ضایعات سالانه حدود ۱۲۴۰ تن خواهد بود. موضوعی که اهمیت دارد، افزایش تولید لوله‌ها به دلیل توسعه شبکه‌های آب‌رسانی، طرح‌های انتقال آب، پروژه‌های پتروشیمی و صنایع مختلف است. با توجه به رشد تقاضا، پیش‌بینی می‌شود که ضایعات سالانه در این بخش در ۵ سال آینده به بیش از ۲۰۰۰ تن برسد.

۳-۲- ضایعات پره‌های توربین بادی

پره‌های توربین بادی از ترکیب الیاف شیشه و رزین اپوکسی ساخته می‌شوند. با پایان عمر طراحی توربین‌ها، این پره‌ها به پسماندهایی بسیار حجیم تبدیل می‌شوند. در ایران، تعداد ۱۸۶ توربین با محور افقی و توان ۶۶۰ و ۷۱۰ کیلوواتی در سایت‌های منجیل، هرزویل، سیاهپوش و بینالود در بین سال‌های ۸۲ الی ۸۰ نصب شده‌اند. عمر طراحی پره توربین‌ها، بر اساس استاندارد بین‌المللی حدود ۲۰ سال است؛ لذا پره‌های مربوط به ۱۸۶ توربین مذکور در حال حاضر به پایان عمر نامی خود رسیده‌اند. این موضوع باعث شده که موجی از پسماند کامپوزیتی جدید در کشور ایجاد شود. هر توربین سه پره با طول ۲۳ متر دارد، بنابراین مجموعه توربین‌های مذکور شامل ۵۵۸ پره می‌شود. با فرض خروج ۹۰ درصد از پره‌ها، تعداد پره‌هایی که به پایان عمر خود رسیده‌اند؛ حدود ۵۰۲ عدد است. این مقدار نشان‌دهنده یکی از بزرگ‌ترین انباشت‌های پسماندهای کامپوزیتی در کشور طی یک دوره زمانی کوتاه است. وزن پره‌های این توربین‌ها بالغ بر ۱/۲ تن است. با ضرب این مقدار در تعداد پره‌های پایان عمر، مقدار ضایعات پره‌های توربین بادی، معادل ۶۰۲ تن خواهد بود. این حجم از پسماند، تنها مربوط به توربین‌های نصب شده توسط شرکت صبانیرو است توربین‌های بادی دیگر نیز توسط مجموعه مپنا بعد از سال ۹۰ نصب گردیده‌اند که دارای پره‌هایی با طول ۴۰ متر یا بیشتر هستند که وزنی معادل ۲ تن دارند. با خروج از سرویس این توربین‌ها در دهه آینده، حجم ضایعات به طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. پره‌های توربین بادی ماهیتاً دشوار برای بازیافت هستند. به همین دلیل، بسیاری کشورها به دنبال روش‌های حرارتی یا مکانیکی برای بازیافت این پره‌ها هستند. دفن پره‌ها در زمین نیز مشکلاتی مثل اشغال فضای زیاد، پایداری طولانی‌مدت مواد و ایجاد مانع برای تجزیه طبیعی ایجاد می‌کند. به همین دلیل، دفن به‌عنوان گزینه نهایی و نامطلوب در نظر گرفته می‌شود. برخی کشورها از روش‌های بازیافت انرژی مثل تبدیل به سوخت در کوره‌های سیمان استفاده می‌کنند. باوجود این،

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

در ایران این فناوری‌ها هنوز توسعه نیافته‌اند و زیرساخت لازم برای چنین فرایندهایی وجود ندارد. در مجموع، بخش توربین‌های بادی یکی از منابع مهم پسماند کامپوزیتی در کشور است و اگر از همین امروز برنامه‌ریزی برای مدیریت ضایعات آن انجام نشود، در ۱۰ سال آینده کشور با یک چالش جدی زیست‌محیطی مواجه خواهد شد.

۴- اولویت‌بندی روش‌های بازیافت کامپوزیت

باتوجه‌به شناسایی روش‌های مختلف بازیافت کامپوزیت‌ها، برای اولویت‌بندی روش‌های شناسایی شده بر اساس شرایط بومی کشور، بایستی شاخص‌های موردنیاز جهت اولویت‌بندی استخراج گردد. پس از تبیین شاخص‌ها، وزن‌دهی شاخص‌ها صورت گرفته و روش‌های شناسایی شده اولویت‌بندی خواهد شد.

توسعه فناوری بازیافت کامپوزیت‌ها در کشور علاوه بر ضروری بودن به‌منظور اتخاذ تمهید مناسب برای پسماند کامپوزیت‌ها در کشور، مزایای مختلفی هم در بازه‌های میان‌مدت مدت و درازمدت از این رهگذر ارائه خواهند نمود. توسعه فناوری بازیافت کامپوزیت‌ها در کشور، علاوه بر مزایای خاصی که برای صنعت کامپوزیت کشور به دنبال خواهد داشت، می‌تواند مزایای عامی در سطح بین‌المللی و ملی برای کشور به دنبال داشته باشد.

۴-۱- اهداف عام توسعه صنعت بازیافت کامپوزیت

بازیافت کامپوزیت‌ها در سطح بین‌المللی به‌عنوان یک اولویت زیست‌محیطی و اقتصادی و در سطح ملی به‌عنوان یک راهکار چندبعدی مطرح است که به کاهش پسماندهای صنعتی کمک می‌کند و اثرات مثبت اقتصادی و اجتماعی به همراه دارد. اهداف عام و افق‌های قابل حصول به واسطه بازیافت کامپوزیت‌ها در سطح بین‌المللی و ملی کشور را می‌توان در موارد ذیل برشمرد:

- کاهش مصرف منابع اولیه، کاهش مصرف معادن و منابع طبیعی و کاهش مصرف انرژی
- کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از فرایندهای استخراج مانند آلودگی خاک و آب و مدیریت هزینه‌های پسماند
- تحقق اهداف توسعه پایدار سازمان ملل
- افزایش نرخ تولید محصولات کامپوزیت در کشور و امکان ایجاد فرصت‌های شغلی بیشتر در صنایع مربوطه
- توسعه شبکه‌های علمی و فناوری بین‌المللی مبتنی بر دانش بازیافت و کامپوزیت
- حمایت از توسعه صنایع ماشین‌سازی و تجهیزات موجود در کشور و افزایش بهره‌وری آنها
- توسعه صنعت مبلمان شهری با روش‌های بسیار ارزان‌تر نسبت به ساخت آنها

۴-۲- اهداف خاص توسعه صنعت بازیافت کامپوزیت

مزایای خاص ایجاد بستر مناسب برای بازیافت کامپوزیت در کشور، در قالب موارد زیر متصور می‌باشند:

- کاهش هزینه‌های عملیاتی در صنایع و کاهش قیمت تمام شده محصول
- کاهش وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی، افزایش انعطاف‌پذیری در زنجیره تأمین و تقویت امنیت تأمین مواد اولیه
- ایجاد اشتغال و ارتقای مهارت‌های فنی و افزایش رفاه اجتماعی
- توسعه فناوری بومی، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری در فرایند بازیافت
- افزایش رقابت‌پذیری در بازارهای جهانی به‌واسطه کاهش هزینه‌های تولید
- ایجاد یک بازار جهانی برای محصولات کامپوزیتی بازیافتی و تشویق به خرید سبز به کمک افزایش کیفیت مواد بازیافتی
- امکان دستیابی به مواد اولیه بومی برای مصرف تعمیرات سازه‌های کامپوزیتی موجود با قیمت بسیار مناسب
- توسعه اقتصاد چرخشی در برابر اقتصاد خطی و کمک به توسعه پایدار
- رونق صنایع رده متوسط و رده‌پایین کامپوزیت کشور

۴-۳- تبیین شاخص‌های اساسی برای اولویت‌بندی

بازیافت کامپوزیت‌ها فارغ از روش مورد استفاده موجب کاهش مصرف منابع طبیعی می‌گردد. همچنین هم‌راستایی با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل، توسعه روابط بین‌المللی و تحکیم جایگاه سیاسی، امکان صادرات و افزایش صادرات غیرنفتی را کم‌وبیش به‌صورت یکسان موجب خواهند شد؛ بنابراین از میان اهداف عام تعریف شده، برخی از اهداف در مورد همه روش‌های بازیافت یکسان بوده، درنظرگرفتن آنها در مورد روش‌ها باعث ایجاد برتری نخواهد شد. لذا در این مرحله، شاخص‌هایی که برای همه روش‌ها

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

یکسان عمل می‌نمایند از گردونه تعیین شاخص حذف می‌شوند و تنها مواردی باقی می‌مانند که برای روش‌های بازیافت به‌صورت یکسان نمی‌باشند و به شرح ذیل به آنها اشاره می‌شود:

۱- کاهش مصرف انرژی
۲- کاهش آلودگی محیط‌زیست
۳- توسعه صنعت ماشین‌سازی و تجهیزات
۴- افزایش کارآیی، عمر و عملکرد در سایر صنایع
۵- توسعه صنعت مبلمان شهری

از میان اهداف خاص بازیافت کامپوزیت، کاهش ریسک‌های زنجیره تأمین مواد اولیه، کاهش وابستگی به واردات الیاف، افزایش توان رقابتی صنعت کامپوزیت کشور در بازار جهانی، توسعه و ترویج استفاده از کامپوزیت‌های سبز و ترویج اقتصاد چرخشی و پایدار به‌صورت یکسان برای همه روش‌ها عمل می‌نمایند؛ لذا این شاخص‌ها از گردونه رتبه‌بندی حذف خواهند شد. بنابراین؛ در امتداد ۵ شاخص ناشی از اهداف عام، ۵ شاخص ذیل نیز از اهداف خاص به مجموعه شاخص‌ها برای اولویت‌بندی روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها افزوده می‌شود:

۶- کاهش قیمت تمام شده محصول
۷- افزایش اشتغال
۸- افزایش توان فنی – مهندسی
۹- سهولت تعمیر و نگهداری سازه‌های کامپوزیت
۱۰- رونق صنایع کامپوزیت رده پایین

علاوه بر موارد فوق، به‌منظور اولویت‌بندی و رتبه‌دهی روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها، می‌بایستی به شاخص‌های مهم دیگری از منظر زیرساختی و تجارب صنعتی خبرگان توجه نمود. شاخص‌های ناشی از توجه به مسائل زیرساختی و تجارب صنعتی که در این تحقیق برای رتبه‌بندی فرایندهای بازیافت تعریف می‌گردد و در امتداد شاخص‌های قبلی موردنظر قرار خواهند گرفت؛ به شرح ذیل است:

۱۱- سهولت دستیابی به فناوری و بومی‌سازی آن
۱۲- وجود تجربه مشابه در کشور
۱۳- میزان سرمایه‌گذاری اولیه فرایند بازیافت
۱۴- سهولت مقیاس‌پذیری فرایند بازیافت (استفاده در تناژ بالای پسماند)
۱۵- مدت زمان فرایند بازیافت
۱۶- میزان نیاز به نیروی متخصص

در ادامه، بر اساس استفاده از ۱۶ شاخص فوق به اولویت‌بندی روش‌های بازیافت کامپوزیت‌های مربوط به پره توربین بادی و لوله‌ومخازن پرداخته خواهد شد.

۴-۴- رتبه‌بندی حوزه‌های جذاب به روش تعاملی

روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها به کمک ۱۶ شاخص کلیدی اولویت‌بندی می‌شوند. وزن‌دهی این شاخص‌ها بر اساس اهمیت آنها صورت می‌گیرد. به این منظور، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره SMART به کار برده می‌شود [۳۱]. گام‌های طی شده در این روش به‌قرار ذیل هستند:

گام ۱) شاخص‌ها بر اساس اهمیت رتبه‌بندی می‌گردند. در این اولویت‌دهی شاخص‌های عام در مراتب پایین اهمیت و به‌صورت مشخص شاخص‌هایی که با حوزه پره توربین بادی و لوله و مخازن مرتبط است، اولویت بالاتر را به خود اختصاص داده‌اند. شاخص‌های تبیین شده به شرح ذیل از اولویت بالا به پایین مرتب شده‌اند:

- کاهش مصرف انرژی
- کاهش آلودگی محیط‌زیست
- کاهش قیمت تمام‌شده محصول
- افزایش اشتغال
- سهولت مقیاس‌پذیری فرایند بازیافت
- افزایش توان فنی – مهندسی
- سهولت دستیابی به فناوری و بومی‌سازی آن
- وجود تجربه مشابه در کشور
- میزان سرمایه‌گذاری اولیه فرایند بازیافت
- رونق صنایع کامپوزیت رده پایین
- توسعه صنعت مبلمان شهری
- سهولت تعمیر و نگهداری سازه‌های کامپوزیت
- توسعه صنعت ماشین‌سازی و تجهیزات
- افزایش کارآیی، عمر و عملکرد در سایر صنایع
- مدت زمان فرایند بازیافت
- میزان نیاز به نیروی متخصص

گام ۲) به کم‌اهمیت‌ترین شاخص، یعنی شاخص شماره ۱۶، عدد ۱۰ واگذار می‌شود.

گام ۳) سایر شاخص‌ها متناسب با اهمیتشان نسبت به شاخص ۱۶ به ترتیب ذیل عدد می‌گیرند:

https://www.sciencecultivation.ir 2783-0934 شاپا الکترونیکی 2008-935X شاپا چاپی

- شاخص ۱۵ = ۲۰
- شاخص ۱۴ = ۳۰
- .
- .
- .
- شاخص ۱ = ۱۶۰

گام ۴) با تقسیم عدد هر شاخص به جمع کل اعداد، وزن نرمالایز شده هر شاخص محاسبه می‌گردد.

گام ۵) به هر شاخص بین عدد ۱ تا ۵ برای هرکدام از روش‌های بازیافت کامپوزیت‌ها به‌صورت مقایسه‌ای، امتیاز داده می‌شود.

گام ۶) امتیاز هر شاخص در وزن آن ضرب شده، مجموع امتیاز برای هر قطعه محاسبه می‌گردد.

در امتیازدهی شاخص‌ها، برای تمام شاخص‌ها، امتیاز ۴ یا ۵، برای درجه تأثیر بسیار بالا و بالا، امتیاز ۳ یا ۲ برای درجه تأثیر متوسط و امتیاز ۱ برای درجه اهمیت پایین در نظر گرفته می‌شود که در جدول (۱) نشان داده شده است:

جدول ۱: اولویت‌بندی فرایندهای بازیافت کامپوزیت‌ها در کشور

شاخص وزن / فرآیند بازیافت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	جمع
	۰.۱۱۸	۰.۱۱	۰.۱۰۳	۰.۰۹۶	۰.۰۸۸	۰.۰۸۱	۰.۰۷۴	۰.۰۶۶	۰.۰۵۹	۰.۰۵۱	۰.۰۴۴	۰.۰۳۷	۰.۰۲۹	۰.۰۲۲	۰.۰۱۵	۰.۰۰۷	
باز استفاده با تغییر کاربری	۵	۵	۵	۱	۱	۱	۵	۱	۵	۱	۵	۲	۱	۱	۵	۵	۳.۱۵
تغییر شکل و اندازه برای کاربردهای ثانویه	۵	۵	۵	۱	۱	۱	۵	۱	۵	۱	۵	۲	۱	۱	۵	۵	۳.۱۵
استفاده به صورت ماده متراکم	۳	۴	۳	۳	۴	۴	۴	۵	۳	۵	۳	۴	۳	۵	۳	۳	۳.۶۷
تبدیل – روش‌های مکانیکی	۴	۴	۴	۵	۵	۳	۴	۴	۳	۵	۳	۵	۵	۵	۳	۳	۴.۱۲
تبدیل – روش‌های حرارتی	۱	۳	۴	۵	۳	۳	۳	۱	۵	۵	۳	۴	۵	۴	۲	۲	۳.۳۴
تبدیل – روش‌های شیمیایی	۲	۳	۴	۴	۲	۳	۲	۱	۴	۵	۳	۴	۳	۴	۲	۲	۲.۹۹
تبدیل – روش‌های ترکیبی	۳	۳	۳	۵	۴	۴	۴	۱	۴	۵	۳	۴	۵	۵	۲	۲	۳.۵۸
بازیابی الیاف با کیفیت بالا	۳	۳	۴	۳	۳	۵	۲	۱	۵	۳	۱	۵	۳	۳	۲	۲	۳.۱۴

۵- علم و فناوری در حوزه بازیافت کامپوزیت

فعالیت‌های تحقیقاتی و صنعتی در حوزه مواد کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی در ایران به‌ویژه از سال ۱۳۷۵، شاهد رشد قابل‌توجهی بوده است. این رشد فعالیت‌های تحقیقاتی به‌صورت مشخص نشأت گرفته از توسعه صنایع کامپوزیت در کشور و افزایش قابل‌توجه میزان مصرف مواد کامپوزیت در صنایع مختلف و به‌خصوص صنایع زیربنایی می‌باشد. ولیکن حوزه بازیافت پسماند تولید شده در این صنایع، همچنان نیازمند توجه جدی می‌باشد. پروژه‌های تحقیقاتی گسترده‌ای برای بازیافت کامپوزیت‌ها در کشورهای پیشرفته مانند آلمان، ژاپن، کانادا و هلند انجام شده است [۳۲, ۳۳]. در کشورهای اروپایی نیز به دلیل چالش بازیافت پره‌های طویل توربین بادی، سیاست‌های جامعی در این حوزه در نظر گرفته شده‌اند. این تفاوت در سطح تحقیق و اجرای عملی، نشان‌دهنده این است که ایران در این حوزه هنوز در مراحل اولیه و رتبه‌های جهانی و منطقه‌ای پایینی قرار دارد.

در این میان، چاپ سه‌بعدی با استفاده از مواد کامپوزیتی و نانوکامپوزیتی به‌عنوان یکی از روش‌های تولید نوین، در ایران مورد توجه قرار گرفته و تحقیقاتی در حوزه چاپ نمونه‌های آزمایشی نانوکامپوزیتی صورت گرفته است [۳۴-۳۶]. بااین‌حال، استفاده از مواد بازیافتی در چاپ سه‌بعدی به‌صورت جدی موردتوجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، حوزه مهندسی مکانیک و ماشین‌آلات نیز به‌ویژه در زمینه طراحی و ساخت دستگاه‌های مورد استفاده در بازیافت کامپوزیت‌ها نیازمند توجه بیشتری است و باید به‌عنوان پایه‌ای برای توسعه زنجیره بازیافت، باید به‌صورت یکپارچه در برنامه‌های تحقیقاتی ملی مورد پیگیری قرار گیرد [۳۷].

۶- جمع‌بندی

در این پژوهش، با تمرکز بر سیاست‌گذاری مؤثر در حوزه بازیافت پسماندهای کامپوزیتی، روش‌های مکانیکی و متراکم‌سازی به‌عنوان دو رویکرد برتر برای مدیریت ضایعات کلیدی صنعت کامپوزیت کشور اولویت‌بندی شدند. این روش‌ها بر اساس معیارهایی مانند

هزینه، نیاز به تجهیزات پیچیده، سرعت اجرا، زیرساخت‌های بومی، اثرات زیست‌محیطی و پذیرش بازار، بالاترین رتبه را کسب کردند. در مقایسه با سایر روش‌ها که با محدودیت‌های فناوری و انرژی کشور ناسازگارند، این رویکردها امکان بازیابی اقتصادی الیاف و رزین برای کاربردهای ثانویه مانند پرکننده‌های ساختمانی، بتن‌های کامپوزیتی و مواد جاده‌ای را فراهم می‌آورند. اجرای سیاست‌های مبتنی بر آن‌ها حجم پسماندهای انباشته‌شده را کاهش می‌دهد، چرخه بازیافت را تسریع می‌بخشد، صرفه‌جویی اقتصادی قابل‌توجهی ایجاد و تهدیدهای زیست‌محیطی را به فرصت‌های پایدار تبدیل می‌کند و زمینه‌ساز توسعه صنعت بازیافت ملی می‌گردد.

«این مقاله یا بخشی از آن پیش‌تر به چاپ نرسیده است و در فرایند نگارش آن از ماشین‌ها و ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است.»

منابع Reference

[1]. Z. U. A. Muhammad Yasir Khalid, Mokarram Hossain, Rehan Umer, "Recycling of wind turbine blades through modern recycling technologies: A road to zero waste," Renewable Energy Focus, vol. 44, p. 17, 2023, doi: 10.1016/j.ref.2023.02.001.

[2]. K. S. J.P. Jensen, "Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 97, p. 12, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.

[3]. P. C. Manjeet Rani, Venkata Krishnan, Sunny Zafar, "A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades," Composites Part B, vol. 215, p. 15, 2021, Art no. 108768, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108768.

[4]. B. F. Jelle Joustra, Ruud Balkenende, "Structural reuse of high end composite products: A design case study on wind turbine blades," Resources, Conservation & Recycling, vol. 167, p. 10, 2021, Art no. 105393, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105393.

[5]. M. S. Muhammad Ateeq, Anam Azam, Muhammad Rafiq, "A review of 3D printing of the recycled carbon fiber reinforced polymer composites: Processing, potential, and perspectives," Journal of Materials Research and Technology, vol. 26, p. 19, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.171.

[6]. Y. P. Yixue Zhang, Larry Lessard, Aart Willem van Vuure, "Recycling and valorization of glass fibre thermoset composite waste by cold incorporation into a sustainable inorganic polymer matrix," Composites Part B, vol. 223, p. 9, 2021, Art no. 109120, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109120.

[7]. B. F. Jelle Joustra, Ruud Balkenende, "Structural reuse of wind turbine blades through segmentation," Composites Part C: Open Access, vol. 5, p. 11, 2021, Art no. 100137, doi: 10.1016/j.jcomc.2021.100137.

[8]. L. O. D. Géraldine Oliveux, Gary A. Leeke, "Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties," Progress in Materials Science, vol. 72, p. 39, 2015, doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.

[9]. J. K. Amirmohammad Rahimizadeh, Rodolphe Henri, Kazem Fayazbakhsh, and Larry Lessard, "Recycled Glass Fiber Composites from Wind Turbine Waste for 3D Printing Feedstock: Effects of Fiber Content and Interface on Mechanical Performance," Materials, vol. 12, p. 18, 2019, Art no. 3929, doi: 10.3390/ma12233929.

[10]. M. T. Amirmohammad Rahimizadeh, Kazem Fayazbakhshb, Larry Lessarda, "Tensile properties and interfacial shear strength of recycled fibers from wind turbine waste," Composites Part A, vol. 131, p. 12, 2020, Art no. 105786, doi: 10.1016/j.compositesa.2020.105786.

[11]. A. R. Zhengshu Yan , Yixue Zhang , Yuheng Zhou , Larry Lessard, "A finite element model for 3D printed recycled parts from end-of-life wind turbine blades," Composite Structures, vol. 320, p. 13, 2023, Art no. 117177, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117177.

[12]. S. S. K. Hardik K. Jani, Garlapati Nagababu, Alok Das, "A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials," Materials Today: Proceedings, vol. 62, p. 7, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.049.

[13]. S. Y. Guangwen Cheng, Xiaoqian Wang, Zhongxu Guo, Ming Cai, "Study on the recycling of waste wind turbine blades," Journal of Engineering Research, vol. xxx, p. 5, 2023, Art no. xxx, doi: 10.1016/j.jer.2023.100070.

[14]. M. J. Leon, "Recycling of wind turbine blades: Recent developments," Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, vol. 39, p. 7, 2023, Art no. 100746, doi: 10.1016/j.cogsc.2022.100746.

[15]. J. K. Amirmohammad Rahimizadeh, Kazem Fayazbakhsh, Larry Lessard, "Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing," Composites Part B, vol. 175, p. 11, 2019, Art no. 107101, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107101.

[16]. Z.-H. G. Ming-Yuan Shen, Wan-Ting Feng, "A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar," Composites Part B, vol. 264, p.

12, 2023, Art no. 110878, doi: 10.1016/j.compositesb.2023.110878.

[17]. N. S. Nandini Ramawat, Pranaya Yamba, Madhavchary A T Sanidhi, "Recycling of polymer-matrix composites used in the aerospace industry- A comprehensive review," Materials Today: Proceedings, vol. xxx, p. 6, 2023, Art no. xxx, doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.386.

[18]. S. A. H. Y. Tao, Y. Wei, "Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis," Structures, vol. 53, p. 17, 2023, doi: 10.1016/j.istruc.2023.05.018.

[19]. Y. S. Dylan S. Cousins, Robynne E. Murray, Joseph R. Samaniuk, Aaron P. Stebner, "Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades," Journal of Cleaner Production, vol. 209, p. 12, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.286.

[20]. G. X. Rosario Fonte, "Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials," Journal of Environmental Management, vol. 287, p. 14, 2021, Art no. 112269, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.

[21]. S. B. Wenjian Guo, Yicong Ye and Li'an Zhu, "Recycling carbon fiber-reinforced polymers by pyrolysis and reused to prepare short-cut fiber C/C composite," Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 0, p. 9, 2019, doi: 10.1177/0731684418822144.

[22]. H. L. Seyed Hossein Mamanpush, Karl Englund, Azadeh Tavousi Tabatabaei, "Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites," Waste Management, vol. 76, p. 7, 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117177.

[23]. L. Y. K. Pender "Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade," Composites Part B, vol. 198, p. 10, 2020, Art no. 108230, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108230.

[24]. O. A. H. Dmitry Baturkin, Radhouane Masmoudi, Arezki Tagnit-Hamou, Luc Massicotte, "Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete," Resources, Conservation & Recycling, vol. 174, p. 10, 2021, Art no. 105807, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105807.

[25]. A. Y. a. L. C. Bank, "A Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction," polymers, vol. 6, p. 17, 2014, doi: 10.3390/polym6061810.

[26]. M. I. Edbert R. Lumbantobing, "Valorization of recycled GFRP fibers and flakes from decommissioned boats in concrete: Effects on mechanical and microstructural properties," Cleaner Waste Systems, vol. 13, p. 15, 2026, Art no. 100462, doi: 10.1016/j.clwas.2025.100462.

[۲۷]. گلپریان ن.، علاقه‌بند ا.، حجتی ر.، اسفندیاری ک.، هاشمی ح. (۱۳۸۷). راهنمای صنعت کامپوزیت، انجمن کامپزیت ایران، چاپ اول، ص ۳۳۴.

[۲۸]. شرکت گوریت (۱۴۰۴). راهنمای کامپوزیت‌ها، رحیمی ع.، چاپ اول، کتیبه نوین، ص ۱۲۶.

[۲۹]. "آشنایی با لوله‌های کامپوزیتی"، انجمن کامپوزیت ایران، ۱۳۹۵.

[30]. R. Rafiee, "On the mechanical performance of Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin pipes: A Review," Journal of Composite Structures, vol. 143, p. 14, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.02.037.

[۳۱]. مارکو ا. (۱۳۹۸). هنر هدف‌گذاری به روش اسمارت، موسسه آموزشی تالیفی ارشدان، چاپ اول، ص۶۰.

[۳۲]. رفیعی ر.، عموحاجی ه. (۱۴۰۴). مطالعه تجربی و پیش بینی استحکام کششی نمونه نانوکامپوزیتی تولید شده با چاپگر سه بعدی، مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، دوره ۱۲، شماره ۳، ص‌ص ۱ – ۹.

[۳۳]. رفیعی ر.، خزمه ه.، عموحاجی ه. (۱۴۰۴). بهینه سازی پارامترهای فرایند چاپ سه بعدی برای تولید نانوکامپوزیت‌های CNT/ABS با استفاده از روش تاگوچی، نشریه علمی پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، جلد ۱۲، شماره ۱، ص‌ص ۲۶۸۱-۲۶۹۲.

[34]. H. A. R. Rafiee, "Predicting strength of additively manufactured polymeric nanocomposites based on filament properties," Polymer Composites, vol. 46, no. 16, p. 13, 2025, doi: 10.1002/pc.30088.

[35]. H. K. R. Rafiee, "Analyzing the impact response of 3D printed polymeric nanocomposites," Materials Today Communications, vol. 51, 2026, Art no. 114658, doi: 10.1016/j.mtcomm.2026.114658.

[36]. H. A. Rafiee, H. Khezma, "Estimating strength of 3D-printed polymers based on the appraisal of available models," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 34, p. 11, 2025, doi: 10.1007/s11665-025-10880-9.

[۳۷]. هووا س. (۱۳۹۸). مبانی ساخت مواد مرکب (کامپوزیت)، طاهری بهروز ف.، هوشنگی ح، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاهی، ص۳۴۶.