Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Research Paper

Transforming Legacy Fabrics into Advanced Polymer Composites

Sobhan Sadeghi [1], Helma Vakili [1,*]

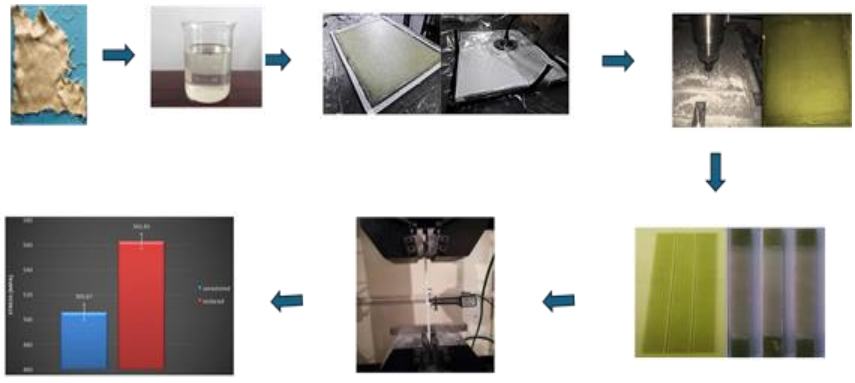
[1] *School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

ARTICLE INFO

Received 2025-06-02
Accepted 2026-05-21
Available online 2026-05-25
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Mechanical Properties
Composite
Chemical Method
Fiber Regeneration
Circular Economy

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

Research subject: This research aims to revive outdated Kevlar fabrics for reuse in the manufacturing of polymer-based composite parts. As a polymer fiber with high tensile strength and significant resistance to impact and heat, Kevlar is used in various industries, including automotive, aerospace, and protective equipment manufacturing. This type of reinforcement alone does not give a good bond with polymer resins, and to create a strong bond, a conciliator (sizing agent) is used, which has a useful life. The physical and mechanical properties change over time due to environmental influences such as humidity, ultra-violet rays, and high temperature.

Research approach: In this research, among the thermal, mechanical, chemical, plasma, nanoparticles, and layering methods, the chemical method was chosen to revive outdated Kevlar fabrics. For this purpose, at first, three waste fabric samples were selected and finally, the tensile properties of regenerated and non-regenerated fabrics were compared according to the ASTM D638 standard tensile test.

Main results: The results showed that the chemically regenerated fabric had about 11.3% more tensile strength than non-regenerated fabrics, and the chemical regeneration process positively improved the mechanical properties of old Kevlar fibers. This achievement paves the way for the reutilization of aged fibers in advanced structures. This shows that the chemical regeneration process not only increases the mechanical strength of materials, but can also positively affect their durability and stability against environmental factors. In addition, this research provides an economic and ecological method for reviving old fibers, providing a basis for reducing industrial waste and reusing polymer materials.

* Corresponding author: vakili.helma@ut.ac.ir

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله تحقیقاتی

تبدیل الیاف قدیمی به کامپوزیت‌های پلیمری پیشرفته

سبحان صادقی [۱]، هلما وکیلی [۱,*]

[۱] دانشکده مهندسی شیمی،دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

موضوع تحقیق: در این پژوهش، راهکاری نوین برای احیای پارچه‌های قدیمی کولار و بازآفرینی آن‌ها برای استفاده مجدد در ساخت قطعات پیشرفته کامپوزیتی پلیمری ارائه شده است. کولار به‌عنوان لیف پلیمری با استحکام کششی بالا و مقاومت چشمگیر در برابر ضربه و حرارت، در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و ساخت تجهیزات حفاظتی به‌کار می‌رود. این تقویت‌کننده به‌تنهایی پیوند مناسبی با رزین‌های پلیمری به‌دست نمی‌دهد و برای ایجاد پیوند قوی از سازگارکننده استفاده می‌شود که دارای عمری مفید بوده، خواص فیزیکی و مکانیکی آن به مرور زمان به‌علت تأثیرات محیطی مانند رطوبت، پرتو فرابنفش و دمای بالا تضعیف می‌شود.

روش تحقیق: در این پژوهش از بین روش‌های حرارتی، مکانیکی، شیمیایی، پلاسمایی، نانوذرات و لایه‌نشانی برای احیای پارچه‌های کولار تاریخ‌گذشته، روش شیمیایی انتخاب شد. برای این منظور، در ابتدا سه نمونه پارچه تاریخ‌گذشته انتخاب و در نهایت، خواص کششی سه نمونه از پارچه‌های احیاشده با احیانشده طبق استاندارد ASTM D638 مقایسه شد.

نتایج اصلی: نتایج نشان داد که پارچه احیاشده به روش شیمیایی، حدود۱۱/۳٪ استحکام کششی بیشتری نسبت به پارچه‌های احیانشده داشته و فرایند احیای شیمیایی تأثیر مثبتی در بهبود خواص مکانیکی الیاف تاریخ‌گذشته کولار داشته است. این دستاورد، راه را برای بهره‌برداری مجدد از الیاف تاریخ‌گذشته در ساختارهای پیشرفته هموار می‌کند و نشان می‌دهد که فرایند احیای شیمیایی نه‌تنها موجب افزایش استحکام مکانیکی مواد می‌شود، بلکه می‌تواند تأثیرات مثبتی بر دوام و پایداری آن‌ها در برابر عوامل محیطی داشته باشد. به‌علاوه، این تحقیق با ارائه روشی اقتصادی و زیست‌محیطی برای احیای الیاف تاریخ‌گذشته، زمینه‌ای برای کاهش ضایعات صنعتی و استفاده مجدد از مواد پلیمری فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها

خواص مکانیکی
کامپوزیت
روش شیمیایی
احیای الیاف
اقتصاد چرخشی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۳۱
دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: Vakili.helma@ut.ac.ir

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان . این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

۱ مقدمه

الیاف کولار، توسعه‌یافته توسط شرکت دوپونت در دهه ۱۹۶۰، به‌دلیل ویژگی‌هایی نظیر استحکام کششی بالا، چگالی پایین و مقاومت در برابر حرارت و مواد شیمیایی، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الیاف مهندسی در صنایع پیشرفته نظیر هوافضا، خودروسازی، و تجهیزات ایمنی شناخته می‌شود[۱-۳]. بااین‌حال، در شرایط محیطی مهاجم همچون رطوبت بالا، پرتو فرابنفش و دمای زیاد، خواص مکانیکی کولار به مرور تضعیف می‌شود. علت اصلی این کاهش عملکرد، تخریب تدریجی سازگارکننده‌ها (Sizing Agents) و ضعف در پیوندهای بین سطحی میان الیاف و رزین‌های پلیمری است[۴-۶].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی با هدف بررسی رفتار مکانیکی، تقویت سطحی و افزایش طول عمر کولار انجام شده‌است. در مطالعه‌ی Tabiei وNilakantan، رفتار پارچه‌های خشک کولار مورد بررسی قرار گرفته، نقش اصطکاک نخ‌ها در جذب انرژی تحلیل شده است[۱]. Dong و Sun با استفاده از آزمایش بیرون‌کشیدن نخ، سازوکار انتقال تنش بین نخ‌های بافته‌شده را مدل‌سازی کرده‌اند[۵] .Gawandi و Gillespie نیز اثر پوشش‌های پلیمری جدید بر بهبود رفتار بیرون کششی کولار را بررسی کرده، به نتایجی در خصوص بهبود چسبندگی سطحی دست یافته‌اند[۱۱].

در مطالعه‌ی Sadegh وCavallaro ، مدلی تحلیلی برای توصیف جذب انرژی در ساختارهای بافت ساده‌ی کولار ارائه شده که عمدتاً بر سازوکارهای اصطکاکی متمرکز است[۶]. همچنین، Valizadeh و همکاران پارامترهای داخلی مکانیکی کولار را با استفاده از تحلیل نیرو–تعادل در آزمون بیرون‌کشیدن نخ به‌دست آورده‌اند[۷]. در پژوهش Bilisik و Korkmaz نیز تأثیر ساختار چندلایه و چندجهته کولار بر رفتار آن، با تمرکز بر آزمایش‌های بیرون‌کششی، مطالعه شده است[۸]. هرچند این مطالعات تصویر دقیقی از ویژگی‌های مکانیکی کولار ارائه می‌دهند، اما بیشتر بر مواد نو متمرکزند یا تنها با پوشش‌دهی سطحی تلاش در بهبود چسبندگی داشته‌اند. آنچه در اغلب این پژوهش‌ها مغفول مانده، بررسی امکان بازیابی خواص ازدست‌رفته‌ی پارچه‌های تاریخ گذشته‌ی کولار و بازگرداندن آن‌ها به چرخه مصرف صنعتی است؛ مسئله‌ای که در شرایط محدودیت تأمین خارجی، به‌ویژه در ایران، اهمیتی مضاعف می‌یابد.

پژوهش حاضر با بهره‌گیری از رویکرد شیمیایی هدفمند، به‌جای افزودن لایه جدید، بر بازآرایی پیوندهای شیمیایی موجود در سطح الیاف تمرکز دارد؛ روشی که نه‌تنها موجب بازیابی استحکام کششی، بلکه منجر به بهبود دوام در برابر عوامل محیطی می‌شود. افزایش تنش کششی پس از اعمال فرایند احیا، نشان‌دهنده‌ی موفقیت این فن در فعال‌سازی مجدد ساختار فیزیکی _ شیمیایی کولار آسیب‌دیده است.

از منظر کاربردی، این روش راهکاری کم‌هزینه، قابل پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی و سازگار با الزامات زیست‌محیطی است. در بسیاری از واحدهای خودروسازی و تولید تجهیزات ایمنی، پارچه‌های کولار تاریخ‌گذشته به دلایل قانونی یا فنی غیرقابل‌استفاده تلقی می‌شوند. با اجرای این فرایند احیا، می‌توان آن‌ها را با اطمینان در محصولات مهندسی مجدداً به‌کار گرفت؛ که گامی مؤثر در کاهش وابستگی به واردات، کاهش ضایعات صنعتی و حرکت به سمت اقتصاد چرخه‌ای در کشور است.

در ادامه، ابتدا مراحل تجربی فرایند احیای شیمیایی کولار و سپس تحلیل داده‌های مکانیکی حاصل از آزمون کشش ارائه می‌شود.

۲ بخش تجربی

در این بخش به بیان روش تجربی به‌منظور ساخت نمونه‌ها پرداخته شده است.

۲-۱ مواد اولیه

مواد اولیه مورداستفاده در این تحقیق، شامل: الیاف تقویت‌کننده‌ی کولار ۴۹ از شرکت دوپونت و رزین اپولام ۸۲۸ به همراه سخت‌کننده HY۹۱۷ و شتاب‌دهنده DY۰۷۰ و دیگر حلال‌ها و افزودنی‌ها (اسیدسولفوریک رقیق‌شده تهیه‌شده از شرکت صنایع شیمیایی پارس، هیدروژن‌پراکسید تهیه‌شده از شرکت شیمیایی ایران، محلول نیتریک‌اسید تهیه‌شده از پتروشیمی رازی، آب یون‌زدوده تهیه‌شده از شرکت تصفیه آب ایران، سدیم بی‌کربنات تهیه‌شده از شرکت دارویی و شیمیایی سمرقند، آب مقطر تهیه‌شده از شرکت آب مقطر صنعت، اتانول تهیه‌شده از شرکت الکل‌سازی خراسان، ایزوپروپانول تهیه‌شده از شرکت کیمیا الکل پارس) است.

۲-۲ ساخت نمونه

در ابتدا، پارچه‌های کولار تاریخ‌گذشته از تمامی آلاینده‌های فیزیکی و شیمیایی پاک‌سازی می‌شوند. این مرحله بسیار مهم است؛ زیرا هرگونه آلودگی سطحی می‌تواند مانع از تأثیرگذاری کامل فرایند احیا شود.

مواد استفاده‌شده:

الف) حلال‌های آلی (اتانول) برای شستشوی اولیه پارچه و حذف روغن‌ها و آلودگی‌های سطحی.

ب) آب مقطر برای شستشوی نهایی و حذف حلال‌های باقی‌مانده.

۲-۳ غوطه‌وری در محلول احیاکننده شیمیایی

پس از تمیزکاری اولیه، پارچه‌های کولار ۴۹ در محلول‌های شیمیایی ویژه‌ای غوطه‌ور می‌شوند که به بازسازی پیوندهای مولکولی کمک کرده، خواص کششی و مقاومت به ضربه پارچه را بازیابی می‌کنند. مواد و شرایط این مرحله عبارت‌اند از:

الف) اسیدسولفوریک رقیق‌شده: این اسید به‌عنوان کاتالیزور عمل می‌کند و باعث شکستن زنجیره‌های معیوب و بازآرایی آن‌ها می‌شود. در فرایند احیای کولار ۴۹، رقیق‌بودن اسید از آسیب‌های شدیدتر به ساختار پلیمر جلوگیری می‌کند و تنها زنجیره‌های ضعیف را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد.

ب) هیدروژن پراکسید: این اکسیدان ملایم به بازیابی پیوندهای تخریب‌شده در اثر تخریب محیطی کمک می‌کند. نقش مهم آن در بازسازی پیوندهای کششی پارچه کولار ۴۹ است که باعث تقویت مقاومت به ضربه و کشش می‌شود.

ج) محلول اسیدنیتریک با غلظت پایین: این محلول به حذف اکسیدها و ناخالصی‌هایی که ممکن است در طول زمان روی سطح پارچه ایجاد شده باشند، کمک می‌کند و سطح کولار را آماده احیا می‌سازد.

د) آب یون‌زدوده: برای اطمینان از خلوص بالای محلول و حذف هرگونه

مواد معدنی ناخواسته، استفاده از آب یون‌زدوده ضروری است. این آب مانع از ایجاد ناخالصی‌هایی می‌شود که ممکن است در فرایند احیا تداخل ایجاد کنند.

ه) زمان غوطه‌وری: مدت‌زمان غوطه‌وری بسته به شرایط پارچه و میزان آسیب‌دیدگی متفاوت است. برای کولار ۴۹، زمان استاندارد بین ۴ تا ۶ ساعت در نظر گرفته می‌شود. این زمان به فرایند بازسازی کامل زنجیره‌های مولکولی پارچه کمک می‌کند.

و) شستشو و خنثی‌سازی: پس از پایان مرحله غوطه‌وری، پارچه‌ها از محلول خارج می‌شوند و بلافاصله تحت شستشو و خنثی‌سازی قرار می‌گیرند تا اسیدها و مواد شیمیایی باقی‌مانده از روی آن‌ها پاک شوند. این مرحله بسیار حیاتی است؛ زیرا باقی‌ماندن اسیدها می‌تواند باعث تخریب بیشتر پارچه شود.

مواد استفاده‌شده:

الف) سدیم بی‌کربنات: به‌عنوان محلول قلیایی ملایم استفاده می‌شود تا اسیدهای باقی‌مانده را خنثی کند و از هرگونه واکنش شیمیایی مخرب در آینده جلوگیری شود.

ب) آب مقطر: برای شستشوی نهایی و حذف هرگونه بقایای مواد شیمیایی روی پارچه استفاده می‌شود تا خلوص بالایی تضمین شود.

۲-۴ خشک‌سازی

پس از شستشو و خنثی‌سازی، پارچه‌های کولار ۴۹ باید به‌دقت خشک شوند. این مرحله نیز نیازمند شرایط خاصی است تا از آسیب‌های حرارتی جلوگیری شود.

شرایط خشک‌سازی:

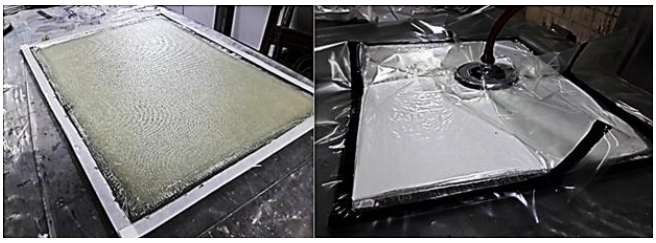
الف) دمای خشک‌سازی معمولاً بین ۶۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد است. این دما به‌طور دقیق کنترل می‌شود تا از تغییرات ناخواسته در ساختار پلیمر کولار جلوگیری شود.

ب) مدت‌زمان خشک‌سازی: حدود ۱۲ ساعت است تا اطمینان حاصل شود که تمامی رطوبت از پارچه‌ها خارج شده و آن‌ها به دمای محیط بازگشته‌اند.

برای ساخت نمونه‌های آزمون کشش، ابتدا دو لمینیت مجزا با تعداد ۱۳ لایه پارچه کولار ۴۹، با زاویه الیاف [۹۰-۰] درجه به‌صورت دستی لایه‌چینی شدند. برای تعیین تعداد لایه‌های پارچه کولار ۴۹ روی هم به‌منظور دستیابی به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر، لازم است ضخامت هر لایه پارچه کولار ۴۹ اندازه‌گیری شود. ضخامت هر لایه پارچه کولار ۴۹ حدود ۰/۲ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. تعداد لایه‌ها از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$D = \frac{0.179K}{\beta \cos\theta} \qquad (۱)$$

مشاهده می‌شود به حدود ۱۳ لایه پارچه کولار ۴۹ نیاز است تا ضخامت ۲/۵ میلی‌متر حاصل شود. البته، این مقدار ممکن است بسته به ضخامت دقیق هر لایه کمی متفاوت باشد. پس از اتمام لایه‌چینی چندلایه (شکل۱)، نمونه‌ها توسط کیسه و پمپ، تحت خلأ قرار می‌گیرند و در دمای محیط به‌مدت ۸ ساعت پخت می‌شوند.



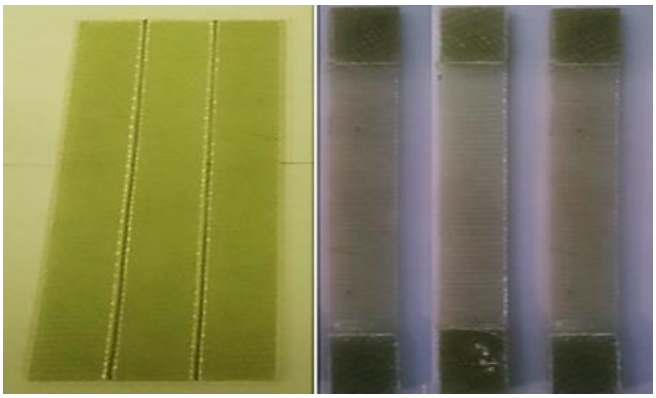
شکل ۱ نمونه کامپوزیت لایه‌چینی‌شده به روش لایه‌چینی دستی (Hand Layup) تحت خلأ

Figure 1 layer composite sample with Hand Layup method under vacuum

پس از پخت کامل نمونه‌ها، کوپن آزمون‌ها طبق ابعاد پیشنهادی استاندارد (۲/۵ سانتی‌متر در ۲۵ سانتی‌متر) توسط دستگاه CNC برش داده شد (شکل۲). برای هر مورد از چندلایه‌ها سه جفت آزمون (درمجموع شش عدد شامل سه عدد از پارچه کولار ۴۹ تاریخ‌گذشته و سه عدد از پارچه کولار ۴۹ احیاشده) بریده شد. سپس نمونه‌ها آماده آزمون کشش شدند (شکل۳).

شکل۲ چندلایه پخت‌شده (راست) و برش‌کاری نمونه‌ها برای آزمون کشش توسط دستگاه CNC (چپ)

Figure 2 Cured laminate (right), and cutting of samples for tensile test by CNC machine (left)



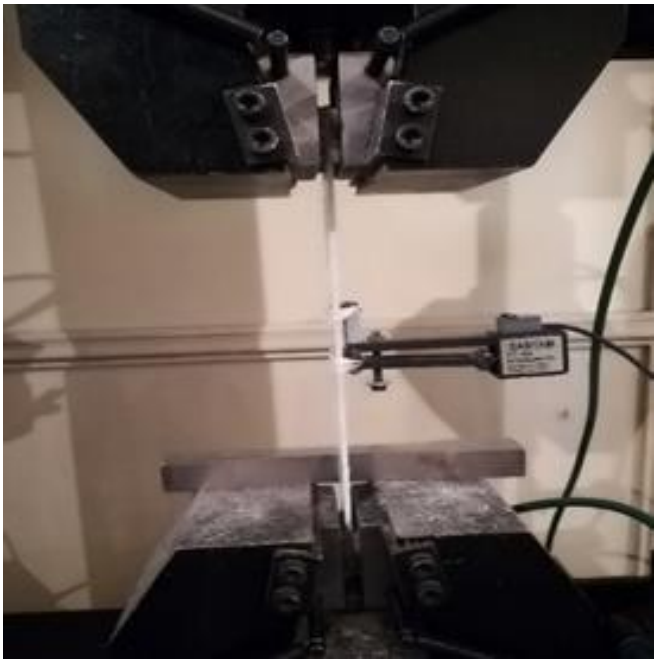
شکل ۳ نمونه‌های آزمون کشش

Figure 3 Tensile test samples

۲-۵ آزمون کشش

روش D638 علاوه بر این که به‌عنوان استاندارد معتبر بین‌المللی در بسیاری از صنایع استفاده می‌شود، دارای مزیت‌هایی همچون سادگی در

اجرا، هزینه‌های کمتر نسبت به برخی روش‌های پیچیده‌تر و دقت بالای نتایج است. با استفاده از این روش می‌توان میزان بازگشت استحکام کششی الیاف کولار احیاشده را با نمونه‌های تازه مقایسه کرد و به نتایج قطعی درباره کارایی فرایندهای احیا دست یافت. بنابراین، به‌عنوان نتیجه تحقیقات اولیه و با توجه به محدودیت‌ها و نیازهای خاص پروژه، روش D638 به‌عنوان بهترین و مناسب‌ترین روش برای آزمون و ارزیابی الیاف کولار احیاشده انتخاب شد. برای انجام آزمون کشش از استاندارد D638 و دستگاه کشش مدل S150 (مطابق شکل ۴) با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. در طی آزمون، کرنش‌سنج بر روی دستگاه نصب شد تا نرخ دقیق کرنش را اندازه‌گیری کند (شکل ۵).



شکل ۴ دستگاه آزمون کشش سنتام S150

Figure 4 Santam tensile testing machine (150S) with extensiometer

با واردکردن ابعاد هر نمونه (ضخامت، پهنا و طول اولیه) در رایانه، نرم‌افزار مربوط، منحنی نیرو- جابه‌جایی را محاسبه و ارائه می‌کند.

۳ نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌های تهیه‌شده با کولارهای احیاشده و احیانشده بررسی و تحلیل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌های احیاشده پس از انجام فرایند بازسازی شیمیایی، تنش نهایی شکست بالاتری از نمونه‌های کنترل (غیر احیاشده) نشان داده‌اند. مقدار تنش نهایی در نمونه احیانشده برابر با ۵۰۵/۶۸ مگاپاسکال و در نمونه احیاشده برابر با ۵۶۲/۷۹ مگاپاسکال به‌دست آمده است که معادل افزایش ۱۱/۷ درصدی در استحکام کششی است.

این افزایش قابل‌توجه در استحکام مکانیکی را می‌توان به بازسازی پیوندهای شیمیایی بین سطح الیاف کولار و ماتریس رزینی نسبت داد. در الیاف تاریخ‌گذشته، تخریب سازگارکننده اولیه و زنجیره‌های سطحی باعث تضعیف چسبندگی و کاستی در عملکرد مکانیکی شده بود. با استفاده از فرایند شیمیایی تعریف‌شده در این تحقیق، پیوندهای ضعیف‌شده تا حد زیادی ترمیم و ساختار مولکولی در سطح الیاف بازآرایی شده که این موضوع مستقیماً منجر به افزایش مقاومت کششی شده است.

همچنین، بهبود پایداری در برابر عوامل محیطی از جمله رطوبت و حرارت نیز پس از احیا قابل‌مشاهده است. بررسی سطحی نمونه‌ها نشان داده که منافذ و ترک‌های سطحی که در کولارهای آسیب‌دیده قابل‌مشاهده بودند، پس از احیا کاهش یافته و یکنواختی ساختاری بهبود یافته است. این موضوع نقش قابل‌توجهی در افزایش دوام و تأخیر در گسیختگی مکانیکی دارد.

رفتار شکست در نمونه‌های احیانشده عمدتاً به‌صورت ترد و همراه با تمرکز تنش در نقاط مشخص مشاهده شد، درحالی‌که در نمونه‌های احیاشده، شکست تدریجی‌تر و با جذب انرژی بیشتر همراه بود. این پدیده نشان‌دهنده افزایش چقرمگی (Toughness) نسبی و عملکرد بهتر ساختار در برابر نیروهای وارده است. همچنین، در بررسی نیروی جابه‌جایی ثبت‌شده توسط نرم‌افزار دستگاه آزمون، نمونه‌های احیاشده شیب اولیه بالاتر و انرژی شکست بیشتری را نسبت به نمونه‌های خام نشان داده‌اند که موید افزایش سفتی (Stiffness) مؤثر کامپوزیت است.

نتایج این تحقیق با برخی از یافته‌های گزارش‌شده در منابع پیشین نیز هم راستا است. به‌عنوان‌مثال، در مطالعه‌ی Dong و Sun ، مشخص شده که اصطکاک بین نخ‌ها و چسبندگی سطحی نقش کلیدی در انتقال بار دارد و تضعیف آن منجر به کاهش کارایی مکانیکی می‌شود[5]. همچنین، طبق نتایج Gawandi و Gillespie ، استفاده از پوشش‌های اصلاح‌شده برای افزایش چسبندگی سطحی، بهبود قابل‌توجهی در مقاومت کششی الیاف کولار ایجاد کرده است[۱۱].

در این پژوهش نیز، بدون استفاده از پوشش‌های خارجی و تنها با بازسازی ساختار شیمیایی، نتایجی مشابه یا حتی بهتر حاصل شده که مزیت مهمی از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی به شمار می‌آید.

علاوه بر افزایش تنش نهایی، نمونه‌های احیاشده از نظر یکنواختی رفتار مکانیکی در طول آزمون نیز عملکرد باثبات‌تری داشتند. پراکندگی در نتایج سه نمونه احیاشده، کمتر از نمونه‌های احیانشده بود که این موضوع نشان از قابلیت اعتماد بالاتر و تکرارپذیری فرایند احیا دارد.

در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که فرایند احیای شیمیایی معرفی‌شده در این پژوهش، نه‌تنها موجب افزایش استحکام مکانیکی می‌شود، بلکه باعث بهبود پیوستگی ساختاری، یکنواختی شکست، جذب انرژی و عملکرد دینامیکی بهتر الیاف کولار می‌شود. این موضوع بیانگر قابلیت بالای این روش برای بازگرداندن پارچه‌های تاریخ‌گذشته به چرخه تولید و استفاده مجدد در ساختارهای کامپوزیتی است.

۴ نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که فرایند احیای شیمیایی ارائه‌شده می‌تواند به‌طور مؤثری خواص مکانیکی پارچه‌های کولار تاریخ‌گذشته را بازگرداند. افزایش بیش از ٪۱۱ در صد در تنش نهایی شکست نمونه‌های احیاشده، نشانگر موفقیت این روش در ترمیم پیوندهای ضعیف‌شده بین الیاف و ماتریس پلیمری است. بررسی‌های سطحی و رفتار شکست نیز حاکی از بهبود چقرمگی، یکنواختی ساختاری و جذب انرژی در نمونه‌های احیا شده بود.

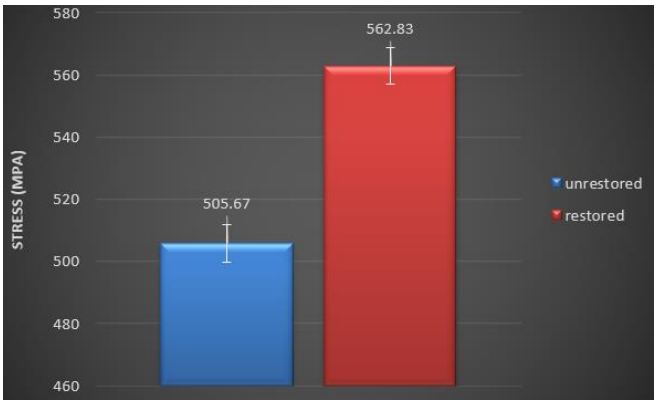
مزیت اصلی این روش در آن است که بدون استفاده از پوشش‌های گران‌قیمت یا تجهیزات پیشرفته، تنها با استفاده از فرایند شیمیایی ساده‌ای، عملکرد فنی پارچه‌های ازکارافتاده بازیابی می‌شود. این ویژگی، فرایند احیا را نه‌تنها از منظر علمی ارزشمند، بلکه از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی نیز بسیار مقرون‌به‌صرفه می‌سازد.

باتوجه‌به محدودیت‌های واردات کولار، قیمت بالای نمونه‌های تازه و انباشت مقادیر قابل‌توجهی از پارچه‌های تاریخ‌گذشته در انبارهای صنعتی، اجرای این فرایند می‌تواند منجر به صرفه‌جویی مالی چشمگیر، کاهش تولید زباله‌های پلیمری و تقویت توان داخلی در صنایع خودروسازی و هوافضا شود.

از دیدگاه کلان، این پژوهش تنها گامی فنی در احیای ماده‌ای مهندسی نیست، بلکه الگویی از حرکت به سمت **اقتصاد چرخشی** و استفاده هوشمندانه از منابع موجود است. این فرایند می‌تواند به‌عنوان زیرساختی پایدار برای استفاده مجدد از الیاف پلیمری در کشور موردتوجه قرار گیرد و زمینه‌ساز طراحی سامانه‌های صنعتی بزرگ‌مقیاس برای بازسازی مواد مهندسی باارزش شود.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، این فرایند بر روی سایر انواع کولار، الیاف آرامید و ترکیبات چندلایه نیز بررسی شده و اثر آن در مقیاس عملیاتی صنعتی ارزیابی شود. همچنین ترکیب این فرایند با اصلاحات فیزیکی (مانند پلاسما یا حرارت‌دهی) می‌تواند مسیر بهینه‌ای برای بهبود بیشتر خواص ارائه دهد.

در پایان، این پروژه با ترکیب **دقت علمی، سادگی اجرایی و رویکردی زیست‌محیطی**، مسیری عملیاتی برای بازگشت پارچه‌های مهندسی گران‌قیمت به چرخه تولید گشوده است؛ مسیری که نه‌فقط از جنس مهندسی، بلکه از جنس آینده‌نگری است.



شکل۵ نمودار استحکام شکست نمونه‌ها

Figure 5 Diagram of final failure strength of samples

مراجع

1. Tabiei, A., & Nilakantan, G. (2008). Ballistic impact of dry woven fabric composites: A review. *Applied Mechanics Reviews*, 61(1), 1-13.
2. Nilakantan, G., & Gillespie, J. W., Jr. (2012). Ballistic impact modeling of woven fabrics considering yarn strength, friction, projectile impact location, and fabric boundary condition effects. *Composite Structures*, 94(12), 3624-34.
3. Wetzel, E. D., Kirkwood, K. M., Kirkwood, J. E., Lee, Y. S., Egres, R. G., Jr., & Wagner, N. J. (2004). Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM-2 fabric, Part I: Quasi-static characterization of yarn pull-out. *Textile Research Journal*, Volume 74(10), 920-928.
4. Kirkwood JE, Kirkwood KM, Lee YS, Egres RG, Wagner NJ, Wetzel ED. (2004) Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar® KM-2 fabric: Part II: Predicting ballistic performance: *Textile Research Journal*, 74(11):939-948.
5. Dong, Z., & Sun, C. T. (2009). Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(12), 1863-1869.
6. Sadegh, A. M., & Cavallaro, P. V. (2012). Mechanics of energy absorbability in plain-woven fabrics: an analytical approach. *Journal of Engineering Fibers and Fabrics*, 7(1), 10-25.
7. Valizadeh, M., Ravandi, S. A. H., Salimi, M., & Sheikhzadeh, M. (2008). Determination of internal mechanical characteristics of woven fabrics using the force-balance analysis of yarn pullout test. *Journal of the Textile Institute*, 99(1), 47-55.
8. Bilisik, K., & Korkmaz, M. (2010). Single and multiple yarn pull-outs on aramid woven fabric structures. *Textile Research Journal*, 81(8), 847-864.
9. Shockey, D. & Erlich, David & Simons, Jeff. (2001). Improved Barriers to Turbine Engine Fragments: Interim Report III. 105.
10. Bilisik, K., & Korkmaz, M. (2010). Multilayered and multi directionally-stitched aramid woven fabric structures: Experimental characterization of ballistic performance by considering the yarn pull-out test. *Textile Research Journal*, 80(16), 1697-1720.
11. Gawandi, A., Thostenson, E., & Gillespie, J. W., Jr. (2011). Tow pullout behavior of polymer-coated Kevlar fabric. *Journal of Materials Science*, 46(1), 77-89.