Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 17, No. 1, Page 1 - 19 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2059284.1709

Investigation of mechanical and physical properties of epoxy hybrid composites reinforced with lignocellulosic materials (roselle stem, reed stem, and palm leaf)

Mohammad Arabi[1*], Sadegh Sarabi[2]

1- Corresponding authors, Assistant Professor, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, email: marabi@uoz.ac.ir
2- PhD Student, Department of Science and Wood and Paper Industries, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: May 2025 Accepted: August 2025

Abstract

Problem definition and objectives: Currently, due to high prices and non-biodegradability of synthetic fibers, there has been a significant increase in using natural fibers as reinforcement in polymer composites. Natural fibers have been welcomed by engineers and researchers as suitable alternatives to synthetic fibers, considering their unique characteristics such as low density, low production cost, good modulus and strength, abundance, accessibility, renewability, recyclability, biodegradability, and environmental compatibility. The type and proportion of lignocellulosic materials in combination with polymer resins play a crucial role in determining the final properties of these composites and significantly influence their ultimate applications. Therefore, this study aims to explore the possibility of manufacturing and reinforcing polymer composites (epoxy resin) using different proportions of lignocellulosic materials (reed stem, roselle stem, and palm leaf) and analyze their physical and mechanical properties.

Methodology: Reed stem, roselle stem, and palm leaf were obtained from the Chahnameh Nursery and Baqiyatallah Educational and Research Complex at Zabol University. The materials were dried in a laboratory oven at 103°C for 24 hours. Epoxy resin (AD-301) and epoxy hardener (HA-12) from Mokarrar Company were used in a 100:10 ratio. The study variables initially included three lignocellulosic materials: roselle stem (TS), reed stem (RS), and palm leaf (PL) at three levels: 10, 30, and 50 percent (weight ratio of lignocellulosic materials to epoxy resin). Lignocellulosic-reinforced epoxy composites were manufactured using a manual layup method with a wooden mold (300 × 300 × 50 mm) under press conditions (80°C and 6.2 MPa pressure for 3 hours). Tensile, flexural, and water absorption tests were conducted according to ASTM D3033, ASTM D790, and ASTM D570 standards, respectively. The best treatment was subsequently alkaline-treated at 5 and 10 percent levels to improve physical and mechanical properties, and the impact of alkaline treatment was evaluated.

Results: Epoxy composites reinforced with 10% roselle stem exhibited the lowest tensile strength, flexural strength, and water absorption. Mechanical properties increased with lignocellulosic material proportion up to 30%, with palm leaf composites at 30% showing the highest mechanical properties. Increasing the lignocellulosic material proportion from 30% to 50% resulted in decreased tensile and flexural strength. The highest water absorption was observed in samples with 50% roselle stem, while the lowest was found in samples with 10% palm leaf. The optimal treatment, based on physical and mechanical properties, was identified as 30% palm leaf reinforcement. Alkaline treatment at 3% and 5% improved the mechanical and physical properties

of epoxy composites, with flexural strength, flexural modulus, and tensile strength increasing by 11.9%, 12.7%, and 15%, respectively, compared to untreated samples.

Conclusion: The study demonstrated that incorporating lignocellulosic materials in epoxy resin enhances the mechanical properties of hybrid epoxy-lignocellulosic composites. Utilizing these renewable resources not only reduces dependence on petroleum-based materials and costs but also contributes to natural resource conservation and environmental pollution reduction. The findings underscore the potential of these composites as lightweight, robust, and environmentally friendly materials in various industries, including automotive, construction, and packaging.

Keywords: Epoxy Composites, Lignocellulosic Materials, Natural Fibers, Mechanical Properties, Alkaline Treatment.

بررسی خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی (ساقه چای ترش، ساقه نی و برگ نخل)

محمد عربی[۱*]، صادق سرابی[۲]

۱- نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، دانشکده منابع طبیعی، زابل، ایران، رایانامه: marabi@uoz.ac.ir
۲- دانشجوی مقطع دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل، دانشکده منابع طبیعی، زابل، ایران.

تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: در حال حاضر، به علت قیمت بالا و تجزیه ناپذیری الیاف مصنوعی گرایش به استفاده از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌های پلیمری به طور قابل‌توجهی افزایش‌یافته است. الیاف طبیعی با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مثل دانسیته پایین، هزینه تولید کم، مدول کششی و مقاومت خوب، فراوانی و در دسترس بودن، تجدید پذیری، قابلیت بازیافت، تجزیه بیولوژیکی و سازگاری با محیطزیست به عنوان جایگزینی مناسب با الیاف مصنوعی در کامپوزیت‌های پلیمری مورد استقبال مهندسین و محققین قرار گرفتند. نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی در ترکیب با رزین‌های پلیمری نقش بسزایی در تعیین خواص نهایی این نوع کامپوزیت‌ها دارد و تا حد زیادی تعیین‌کننده کاربرد نهایی آن‌ها خواهد بود. از این رو در این مطالعه نیز تلاش بر این است که امکان ساخت و تقویت کامپوزیت‌های پلیمری (رزین اپوکسی) با استفاده از نسبت‌های مختلف مواد لیگنوسلولزی (ساقه نی، ساقه چای ترش و برگ نخل) بررسی و خواص فیزیکی و مکانیکی آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

مواد و روشها: ساقه نی، ساقه چای ترش و برگ نخل از نهالستان چاه نیمه و مجتمع آموزشی و تحقیقاتی بقیه الله دانشگاه زابل تهیه و در یک آون آزمایشگاهی و در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. برای ساخت نمونه‌ها از رزین اپوکسی با کد AD-301 و هاردنر اپوکسی با کد HA-12 (ساخت شرکت چسب مکرر) به نسبت ۱۰۰ به ۱۰ استفاده شد. متغیرهای این مطالعه ابتدا شامل نوع ماده اولیه ساقه گیاه چای ترش (TS)، ساقه نی (RS) و برگ نخل (PL) در سه سطح ۱۰ ۳۰ و ۵۰ درصد (نسبت وزنی مواد لیگنوسلولزی به رزین اپوکسی) بودند. کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی به روش لایه چینی دستی، با استفاده از قالب چوبی با ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ در ۵۰ میلی‌متر تحت فشار و دمای پرس (دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۶ مگا پاسکال به مدت ۳ ساعت) ساخته شدند. پس از عمل‌آوری نمونه‌ها، آزمون کششی، خمشی و جذب آب به ترتیب بر اساس استاندارد ASTMD3033، ASTMD790 و ASTEMD570 انجام شد. در ادامه بهترین تیمار از نظر نوع و نسبت وزنی ماده لیگنوسلولزی به منظور بهبود و ارتقا خواص فیزیکی و مکانیکی در دو سطح ۵ و ۱۰ درصد تیمار قلیایی شد و تأثیر تیمار قلیایی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج: کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با ساقه چای ترش و با نسبت ۱۰ درصد کم‌ترین مقدار مقاومت کششی و خمشی و جذب آب را نشان دادند و با افزایش نسبت مواد لیگنوسلولزی در ترکیب با رزین اپوکسی تا ۳۰ درصد خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده افزایش یافت، به طوری که کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳۰ درصد برگ نخل بیشترین مقادیر خواص مکانیکی را نشان دادن. با افزایش نسبت مواد لیگنوسلولزی از ۳۰ به ۵۰ درصد مقاومت کششی و خمشی کامپوزیت‌ها کاهش یافت. بیشترین مقادیر جذب آب در نمونه‌های تقویت شده با ۵۰ درصد ساقه چای ترش و کمترین مقدار جذب آب در نمونه‌های ساخته شده با ۱۰ درصد برگ نخل مشاهده شد. بهترین تیمار با توجه خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های تقویت شده با ۳۰ درصد برگ نخل شناخته شدند. تیمار قلیایی ۳ و ۵ درصد برگ نخل منجر به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت‌های اپوکسی گردید. به طوری که مقاومت خمشی، مدول

خمشی و مقاومت کششی کامپوزیت‌های ساخته شده با برگ نخل تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد (کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل تیمار نشده) به ترتیب ۱۱/۹، ۱۲/۷ و ۱۵ درصد افزایش یافت. همچنین با افزایش غلظت تیمار قلیایی به ۵ درصد مقدار مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به ترتیب ۳ و ۲ درصد افزایش نشان دادند و مقدار مقاومت خمشی حدود ۳ درصد کاهش یافت.

نتیجه‌گیری: به‌طورکلی نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مواد لیگنوسلولزی در ترکیب با رزین اپوکسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی–مواد لیگنوسلولزی را افزایش می‌دهد. استفاده از این منابع تجدید شونده، علاوه بر کاهش وابستگی به مواد نفتی و کاهش هزینه‌ها، به حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند و ضرورت توسعه و امکان به‌کارگیری این نوع کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف همچون خودروسازی، ساختمان‌سازی و بسته‌بندی، به عنوان مواد سبک، مقاوم و دوستدار محیط‌زیست وجود دارد.

واژه های کلیدی: رزین اپوکسی، مواد لیگنوسلولزی، کامپوزیت، خواص فیزیکی و مکانیکی.

مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (PMC) از ترکیب یک ماتریس پلیمری با الیاف یا ذرات تقویت‌کننده ساخته می‌شوند. این کامپوزیت‌ها باهدف بهبود خواص مکانیکی ماتریس‌های پلیمری ضعیف، طراحی می‌شوند، به‌طوری‌که ماتریس نقش انتقال بار و محافظت از الیاف را دارد و الیاف بارهای وارده را تحمل می‌کنند. عملکرد این کامپوزیت‌ها به ویژگی‌های ماتریس، نوع و نسبت تقویت‌کننده و نحوه توزیع آن بستگی دارد. اگر چه، الیاف مصنوعی مثل الیاف شیشه، کربن و آرامید از رایج‌ترین الیاف تقویت کننده در ساختار کامپوزیت‌های زمینه پلیمری هستند [۱]؛ اما به دلیل مشکلات زیست‌محیطی، در سال‌های اخیر الیاف طبیعی به دلیل زیست‌تخریب‌پذیری، دانسیته پایین، خواص عایقی و دسترس‌پذیری، توجه زیادی را در ساخت کامپوزیت‌های پلیمری به خود جلب کرده‌اند. [۵-۲]. کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی تقویت‌شده با الیاف طبیعی به‌عنوان جایگزینی پایدار و کارآمد برای مواد سنتی در کاربردهای مهندسی و صنعتی، به‌ویژه در صنایع خودروسازی، ساختمانی و هوافضا، موردتوجه گسترده قرار گرفته‌اند. استفاده از الیاف طبیعی در کنار رزین اپوکسی، علاوه بر کاهش وزن و هزینه، منجر به بهبود خواص مکانیکی همچون استحکام کششی، مدول خمشی و مقاومت به ضربه می‌شود.

از این رو در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه استفاده از انواع الیاف طبیعی و مواد لیگنوسلولزی در ساخت کامپوزیت‌های پلیمری و نقش آن‌ها به عنوان تقویت کننده بر خواص مکانیکی آن‌ها صورت گرفته است [۷-۶]، زیرا نوع مواد لیگنوسلولزی و حتی اجزای مختلف یک گیاه به دلیل تفاوت در ساختار شیمیایی می‌توانند عملکرد متفاوتی بر خواص نهایی کامپوزیت‌های پلیمری داشته باشند. Sarikaya و همکاران ۲۰۱۹ به کامپوزیت‌های رزین اپوکسی و تقویت شده با الیاف توس، نخل و اکالیپتوس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقاومت کششی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف توس، نخل و اکالیپتوس به ترتیب ۲۹/۵۳، ۴۲/۲۴ و ۴۵/۲۸ مگا پاسکال و مقاومت خمشی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف توس، نخل و اکالیپتوس به ترتیب ۵۸/۸۳، ۶۸/۵۸ و ۷۹/۹۲ مگا پاسکال است [۸]؛ بنابراین وجود الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها بسیار مؤثر است. در مطالعه دیگری تأثیر پسمانده‌های کشاورزی مثل ذرات پوسته برنج و گشنیز برای تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی بررسی شد نتایج این مطالعه نیز نشان داد که امکان معرفی این نوع پسماندهای کشاورزی، برای تقویت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری وجود دارد [۹]. Sajith و همکاران ۲۰۱۷ امکان استفاده از پرکننده‌های لیگنوسلولزی (پوسته نارگیل، پوسته برنج و چوب ساج) به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت اپوکسی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کامپوزیت‌های ساخته شده با ذرات پوسته نارگیل به دلیل محتوای لیگنین بالاتر چقرمگی بهتری دارند و کامپوزیت‌های ساخته شده با پوسته برنج به دلیل محتوای سلولز بیشتر

تمایل بیشتری به آغشته شدن به رزین دارند و به دلیل تعداد زیاد پیوندهای هیدروژنی و درهم تنیدگی مکانیکی بالا، امکان چسبندگی و پیوند مکانیکی بهتری را فراهم می‌کنند [۱۰].

یکی دیگر از فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر خواص نهایی کامپوزیت‌های پلیمری نسبت اختلاط مواد لیگنوسلولزی با رزین‌های پلیمری است [۱۱]. درصد اختلاط کم مواد لیگنوسلولزی تأثیر چندانی بر خواص محصول نهایی ندارد و کامپوزیت حاصله خواصی شبیه خواص پانل ساخته شده با رزین خالص را نشان خواهد داد و استفاده از مقادیر بالای مواد لیگنوسلولزی باعث کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت پلیمری تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی می‌شود [۱۲]. طی سال-های اخیر مطالعات زیادی در مورد نسبت بهینه انواع مواد لیگنوسلولزی در ترکیب با رزین‌های پلیمری انجام‌شده است و بسته به ماهیت ماده نسبت بهینه مواد لیگنوسلولزی از ۲۵ تا ۳۵ درصد وزنی گزارش شدند. Betelie و همکاران (۲۰۱۸) مکانیسم شکست را برای کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف سیسال در سطوح مختلف ۱۵، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ وزنی (نسبت وزنی الیاف به رزین اپوکسی) را مورد مطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که چقرمگی شکست کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف سیسال با افزایش نسبت الیاف سیسال تا ۳۰ درصد به‌طور خطی افزایش می‌یابد [۱۳]. Nguyen and Nauyen (۲۰۲۱)، از الیاف پوست موز به عنوان تقویت کننده کامپوزیت اپوکسی استفاده کردند. آن‌ها ابتدا الیاف پوست را با NaOH 5% پیش تیمار کردند و سپس الیاف را به طول متوسط ۳۰ میلی‌متر برش دادند و به نسبت‌های وزنی ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ درصد برای تقویت کامپوزیت‌های اپوکسی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با تقویت کامپوزیت‌های اپوکسی با ۲۰ درصد الیاف پوست موز، مقاومت کششی، فشاری، ضربه و همچنین خواص ضد حرارتی کامپوزیت‌های حاصله نسبت به کامپوزیت‌های اپوکسی خالص به‌طور قابل‌توجهی بهبود یافتند [۱۴]. Bhuvaneshwaran و همکاران (۲۰۱۹)، اثر طول فیبر و نسبت فیبر ساقه Coccinia indica را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده را مطالعه کردند. در این مطالعه، با استفاده از روش قالب‌گیری فشرده و لایه چینی دستی، کامپوزیت‌های اپوکسی با چهار طول مختلف ساقه (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ میلی‌متر) و چهار نسبت وزنی مختلف (۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد) تقویت شدند. بر اساس نتایج این مطالعه، کامپوزیت‌های اپوکسی متشکل از ساقه با طول ۳۰ میلی‌متر و ۳۵ درصد وزنی بهترین خواص مکانیکی را دارا بودند [۱۵]. Ward و همکاران (۲۰۱۹) امکان استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری و تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی را برای استفاده در صنعت خودرو سازی را مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها بیان کردند که کامپوزیت‌های با ۶۰ درصد پرکننده الیاف سلولزی حدود ۶۰ درصد مقاومت ضربه بالاتری را نسبت به کامپوزیت‌های خالص پلیمری خالص دارند. همچنین خواص دی‌الکتریک و رسانایی الکتریکی این نوع کامپوزیت‌های هیبریدی، نتایج امیدوارکننده‌ای را برای کاربرد آن‌ها در صنایع خودروسازی نشان داد [۱۶].

علیرغم همه مؤلفه‌های خوب مواد لیگنوسلولزی برای تقویت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، ماهیت آبدوستی و چسبندگی ضعیف بین سطح الیاف و ماتریس از مهم‌ترین معایب آن‌ها در ساخت و کاربرد این نوع کامپوزیت‌ها به شمار می‌رود [۱۷]. یکی از راه‌حل‌های مناسب برای از بین بردن عیوب الیاف طبیعی، اصلاح سطحی آن‌ها به کمک روش‌های شیمیایی است که به چسبندگی بین سطوح الیاف و ماتریس پلیمری کمک می‌کند (۲۱-۱۸). Vinod و همکاران (۲۰۲۲)، گزارش کردند که تیمار سیلان، اسید اگزالیک و تیمار قلیایی روی الیاف ساقه سویا به ترتیب بهترین عملکرد را در افزایش کیفیت چسبندگی بین الیاف و ماتریس پلیمری و همچنین کاهش جذب آب کامپوزیت‌های هیبریدی حاصله نشان دادند [۲۲]. Cionita و همکاران (۲۰۲۲)، بیان داشتند که تیمار قلیایی الیاف برگ نخل می‌تواند به بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس پلیمری با کاهش گروه‌های شیمیایی آبدوست موجود در الیاف نخل مؤثر واقع شود [۲۳].

بر پایه آمارهای اخیر در ایران، استفاده از منابع لیگنوسلولزی نظیر ساقه چای ترش، ساقه نی و برگ نخل، به دلیل حجم بالای ضایعات کشاورزی، از منظر زیست‌محیطی و اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است. به‌عنوان نمونه، هر درخت نخل به‌طور متوسط سالانه حدود ۳۴ کیلوگرم ضایعات حاصل از هرس تولید می‌کند. با توجه به وجود ۲۰ تا ۲۷ میلیون اصله درخت نخل در کشور، سالانه حداقل ۲۰۰ هزار تن ماده‌ی لیگنوسلولزی با

پتانسیل استفاده صنعتی تولید می‌شود (۲۴). افزون بر این، فقط از نیزارهای بخش ایرانی تالاب هورالعظیم سالانه نزدیک به ۳۰۰ هزار تن زیست‌توده خشک قابل برداشت فراهم می‌کنند که بخش عمده‌ای از آن تاکنون بهره‌برداری نشده است (۲۵). هرچند آمار دقیقی از ضایعات حاصل از کشت چای ترش در ایران در دست نیست، اما با توجه به کشت این گیاه در برخی مناطق جنوبی و جنوب شرقی کشور، می‌توان انتظار تولید مقدار قابل‌توجهی ضایعات لیگنوسلولزی با ارزش افزوده بالا را داشت. از این رو هدف از این مطالعه نیز بررسی امکان ساخت کامپوزیت‌های هیبریدی رزین اپوکسی- مواد لیگنوسلولزی از ساقه نی، ساقه چای ترش و برگ نخل و همچنین بررسی تأثیر نسبت مواد لیگنوسلولزی و تیمار شیمایی آن‌ها بر خواص فیزیکی و مکانیکی این نوع کامپوزیت‌ها است.

مواد و روش‌ها

جمع‌آوری و آماده‌سازی مواد لیگنوسلولزی

ساقه نی (Phragmites australis) ، ساقه چای ترش (Hibiscus sabdariffa) و برگ نخل (Phoenix dactyliferous L) پس از جمع‌آوری از مزارع و نهالستان چاه نیمه، برای از بین بردن آلودگی و گرد و غبار از سطوح ساقه و برگ‌ها در آب مقطر شسته شدند. سپس به منظور خشک شدن و رسیدن به رطوبت کمتر از ۵ درصد (بر اساس وزن خشک) در آون آزمایشگاهی و در دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند. ساقه-های چای ترش و نی و همچنین برگ‌های خرما به‌صورت دستی و با چاقو به ذراتی با ابعادی به طول ۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت حدود ۲ میلی‌متر خرد شدند (شکل ۱).

شکل۱- آماده‌سازی و برش مواد اولیه

مشخصات چسب مصرفی

رزین اپوکسی با کد AD-301 و هاردنر اپوکسی با کد HA-12 که بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول (Epoxy Bisphenol A) و هاردنر پلی آمینی (Polyamine Hardener) بودند از شرکت چسب مکرر تهیه شدند و مطابق کاتالوگ شرکت به نسبت وزنی ۱۰۰ به ۱۰ (رزین به هاردنر) با یکدیگر مخلوط شدند. جدول ۱ مشخصات چسب مصرفی را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات رزین اپوکسی بر پایه کاتالوگ شرکت تولیدکننده (شرکت چسب مکرر)

مشخصات	مقادیر
وضعیت حالت	مایع
دانسیته	۱/۱۳ g/cm3
ویسکوزیته (۲۵ درجه سانتی‌گراد)	۸۸۰۰ سانتی پوآز
درصد ترکیب رزین به هاردنر (وزنی)	۱۰۰ به ۱۰
مقاومت خمشی	۳۳۸Kgf/cm2 (ASTMD790M)
مقاومت کششی	۱۶۷Kgf/cm2 (ASTMD3638M)

تعریف متغیر و ساخت نمونه‌های آزمونی

متغیرهای این مطالعه ابتدا شامل سه نوع مواد لیگنوسلولزی (برگ نخل، ساقه چای ترش و ساقه نی) و در سه سطح ۱۰،۳۰ و ۵۰ درصد نسبت به وزن کل کامپوزیت هیبریدی است. تأثیر تیمار قلیایی در دو سطح ۵ و ۱۰ درصد برای بهترین تیمار از نظر نوع و مقدار مواد لیگنوسلولزی با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت

برای ساخت کامپوزیت با روش لایه چینی دستی، ابتدا یک قالب چوبی به ابعاد ۳۰۰ در ۳۰۰ در ۵۰ میلی-متر ساخته شد. سپس سطح زیرین قالب چوبی پس از پاک شدن از هرگونه آلودگی، برای جلوگیری از نچسبیدن کیک کامپوزیت به سطح قالب کاملاً واکس‌زده شد. رزین اپوکسی و هاردنر مربوطه بر اساس فرمول پیشنهادی شرکت سازنده (شرکت چسب مکرر) با نسبت ۱۰۰ به ۱۰ با هم ترکیب شده مقدار لازم چسب اپوکسی برای هر درصد ترکیب از مواد لیگنوسلولزی در یک بشر آزمایشگاهی ذخیره شد. در مرحله بعد توسط یک قلم مو لایه‌ای نازک از چسب اپوکسی به آرامی روی سطح قالب پخش شد و بعد از آن اولین لایه از مواد لیگنوسلولزی روی رزین قرار گرفت [۲۴]. سپس مجدداً لایه دیگری از چسب بر روی ساقه مواد لیگنوسلولزی پخش شده و پس از آن لایه بعدی روی کامپوزیت چیده گذاشته شد فرآیند لایه چینی دستی و چسب زنی ۶ بار تکرار می‌شود تا پس از فشرده‌سازی و تحت فشار و دمای پرس (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۶ مگا پاسکال به مدت ۳ ساعت) ضخامت کامپوزیت مورد به حدود ۱۰ میلی‌متر برسد.

شکل۲- مراحل ساخت پانل‌های آزمایشگاهی

آزمون نمونه‌ها

نمونه‌های آزمون کششی بر اساس استاندارد ASTMD3039 با ابعاد ۲۰۰ در ۲۵ و ۱۰ میلی‌متر (طول، پهنا و ضخامت) و نمونه‌های آزمون خمشی بر اساس استاندارد ASTMD 790 با ابعاد ۱۳۰ در ۲۵ در ۱۰ میلی‌متر آماده و سپس هر دو نمونه آزمونی با استفاده از دستگاه هانسفیلد مدل KS25 با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه تست شدند. آزمون جذب آب نیز بر اساس استاندارد ASTEMD570 انجام شد.

شکل۳- انجام تست خمش و کشش

تحلیل داده‌ها

نتایج تست نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS 26 تجزیه و تحلیل شدند. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.

نتایج

تأثیر نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی رزین اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی

نتایج آنالیز واریانس و تأثیر نوع و نسبت هر یک از مواد لیگنوسلولزی بر میانگین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت‌های هیبریدی چسب اپوکسی

- مواد لیگنوسلولزی برگ نخل، ساقه نی و ساقه چای ترش در جدول ۱ ارائه‌شده است. همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است اثر مستقل و متقابل نوع و نسبت ماده لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی کامپوزیت‌های هیبریدی معنی‌دار است. همچنین اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی و اثر متقابل نوع و درصد ماده لیگنوسلولزی بر مدول الاستیسیته کامپوزیت‌های هیبریدی چسب اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی معنی‌دار است.

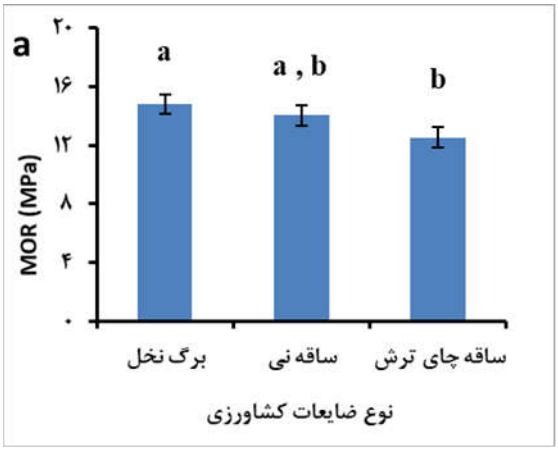
شکل ۳-a تا ۳-f به ترتیب اثر مستقل نوع و درصد مواد لیگنوسلولزی را بر مقدار میانگین مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۳-a و ۳-b مشاهده می‌شود کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با ساقه چای ترش کم‌ترین و کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل بیشترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را نشان دادند. با تغییر نوع ماده لیگنوسلولزی از ساقه چای ترش به ساقه نی و سپس برگ نخل مقدار مقاومت خمشی به ترتیب ۷/۷ و ۷/۱۴ درصد و مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۳ و ۴ درصد افزایش یافت. همچنین با تغییر نسبت وزنی مواد لیگنوسلولزی از ۱۰ به ۳۰ درصد مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسته به ترتیب ۴۶ و ۵۹ درصد افزایش و با افزایش نسبت وزنی از ۳۰ به ۵۰ مقدار این دو ویژگی مکانیکی به ترتیب ۷ و ۸ درصد کاهش یافتند (c-۳ و d-۳). شکل e-3 و f-3 اثر مستقل نوع و درصد مواد لیگنوسلولزی را بر مقاومت کششی کامپوزیت هیبریدی نشان می‌دهد. مطابق نتایج بین میانگین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت هیبریدی برگ نخل و ساقه نی– چسب اپوکسی اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. نوع ماده لیگنوسلولزی و حتی اجزای مختلف یک نوع ماده مثل ساقه، برگ و میوه به دلیل داشتن ترکیب شیمیایی متفاوت می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص کلی کامپوزیت هیبریدی مواد لیگنوسلولزی رزین‌های ترمو پلاستیک داشته باشد [۷].

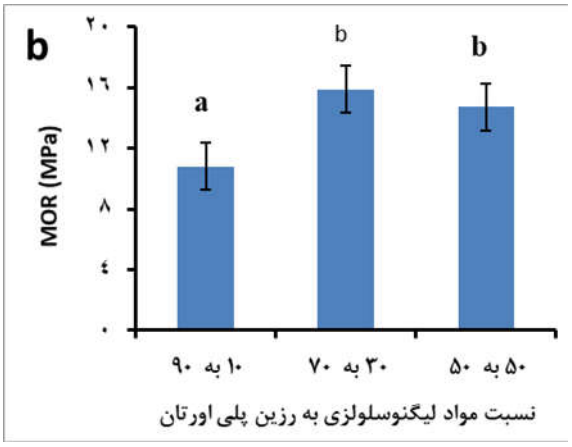
جدول ۱- تجزیه واریانس و اثر مستقل و متقابل نوع و نسبت ماده لیگنوسلولزی بر برخی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت¬های هیبریدی رزین اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی

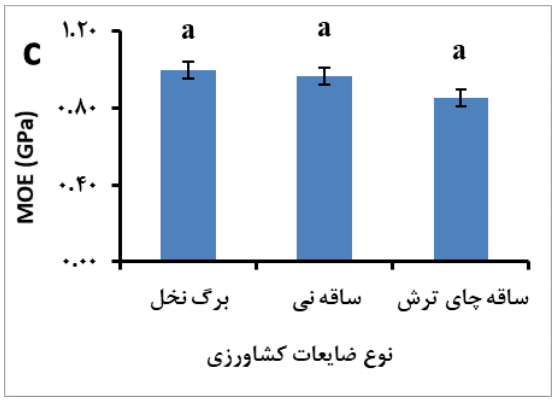
گروه‌ها		درجه آزادی (DF)	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	معنی‌داری (Sig)
مقاومت خمشی (MOR)	اثر مستقل نوع مواد لیگنوسلولزی	۲	۴۸/۷۲	۲۴/۳۶	۳/۰۳	۰/۰۴۹*
	اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی	۲	۲۵۹/۱۸	۱۲۶/۵۹	۳۱/۵۱	۰/۰۰**
	اثر متقابل درصد و نوع مواد لیگنوسلولزی	۸	۳۰۵/۷۲	۳۸/۱۵	۱۱/۲۸	۰/۰۰**
مدول الاستیسیته (MOE)	اثر مستقل نوع مواد لیگنوسلولزی	۲	۰/۲۰۸	۰/۱۰۴	۱/۸	۰/۱۷ ns
	اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی	۲	۱/۷۰	۰/۸۵	۳۰/۱۶	۰/۰۰**
	اثر متقابل درصد و نوع مواد لیگنوسلولزی	۸	۱/۹۵	۰/۲۴	۹/۲۳	۰/۰۰**
مقاومت کششی (TS)	اثر مستقل نوع مواد لیگنوسلولزی	۲	۳۵۲/۳۳	۱۷۶/۳۷	۲۱/۱۸	۰/۰۰**
	اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی	۲	۲۰۴/۴۳	۱۰۲/۷۳	۹/۸۳	۰/۰۰**
	اثر متقابل درصد و نوع مواد لیگنوسلولزی	۸	۵۶۳/۸۲۲	۷۰/۴۷	۱۵/۱۳	۰/۰۰**
جذب آب ۲ ساعت	اثر مستقل نوع مواد لیگنوسلولزی	۲	۱۲/۶۹	۶/۳۴	۱۳/۲۵	۰/۰۰**
	اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی	۲	۲۰/۱۷	۱۰/۹۰	۳۰/۴۵	۰/۰۰**
	اثر متقابل درصد و نوع مواد لیگنوسلولزی	۸	۳۵/۱۳	۴/۴۹	۱۰۰/۴	۰/۰۰**
جذب آب ۲۴ ساعت	اثر مستقل نوع مواد لیگنوسلولزی	۲	۱۴/۲۲	۷/۱۱	۱۴/۸۵	۰/۰۰**
	اثر مستقل درصد مواد لیگنوسلولزی	۲	۲۰/۱۷	۱۰/۰۹۰	۲۷/۸۸	۰/۰۰**
	اثر متقابل درصد و نوع مواد لیگنوسلولزی	۸	۳۶/۶۶	۴/۵۸	۱۰۴/۸	۰/۰۰**

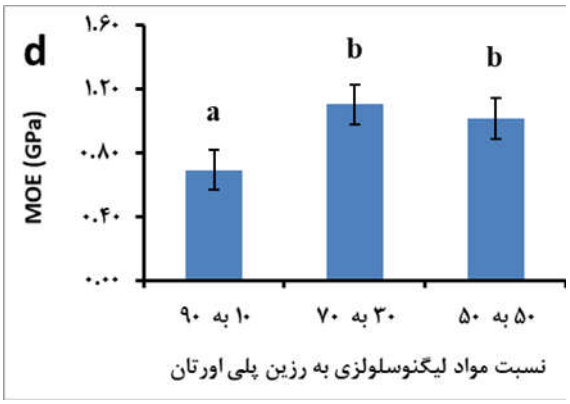
* معنی‌داری در سطح ۹۹٪، ** معنی‌داری در سطح ۹۵٪ و ns عدم معنی‌داری

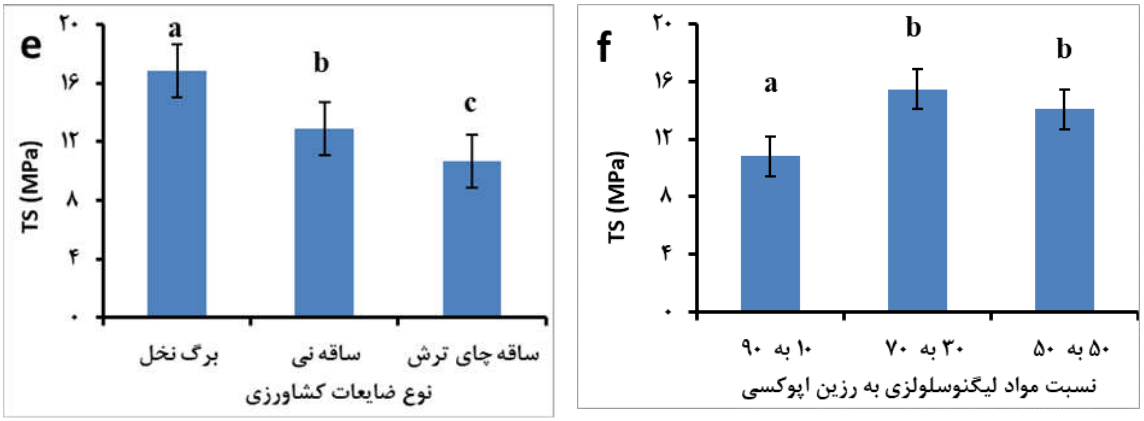
محتوای سلولز هر یک از مواد لیگنوسلولزی تأثیر قابل‌توجهی بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت حاصله از آن دارد. سلولز به عنوان یک جزء ساختاری حیاتی در الیاف لیگنوسلولزی عمل می‌کند که دوام خوب و یکپارچگی ساختاری بهتری را فراهم می‌کند. درصد دقیق سلولز در ساقه‌های چای ترش در منابع علمی گزارش نشده است ولی به طور کلی، محتوای سلولز در ساقه گیاهان می‌تواند از ۳۰٪ تا ۵۰٪ وزن خشک آن‌ها متغیر باشد، ولی در برخی مطالعات محتوای سلولز برگ نخل ۳۵ تا ۴۰ درصد و ساقه نی حدود ۵۰ درصد گزارش‌شده است [۶]. علاوه بر محتوای سلولز یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار به‌شدت خواص و کیفیت چسبندگی بین الیاف و رزین‌های ترموپلاستیک را تحت تأثیر قرار می‌دهد کیفیت سطح الیاف است. ساقه نی معمولاً دارای سطحی صاف و یکنواخت است و در مقابل برگ درخت خرما معمولاً دارای سطحی بافت‌دار و ناهموار است که می‌تواند چسبندگی بیشتری با رزین‌ها ایجاد کند. Engin Sarikaya و همکاران ۲۰۱۹ نیز گزارش کردند که نوع الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی و تقویت شده با الیاف توس، نخل و اکالیپتوس بسیار مؤثر است [۸]. یکی دیگر از عوامل مهم و تأثیرگذار بر خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های ترموپلاستیک تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی نسبت مواد لیگنوسلولزی به رزین‌های ترموپلاستیک است. مقدار بسیار کم مواد لیگنوسلولزی تأثیر چندانی بر خواص محصول و کامپوزیت ندارد و کامپوزیت خواصی مانند خواص پانل ساخته شده با رزین خالص را نشان خواهد داد. استفاده از مقادیر بالای مواد لیگنوسلولزی باعث کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت می‌شود؛ زیرا با افزایش درصد مواد لیگنوسلولزی در یک مقدار مشخص رزین، فضاهای خالی بین الیاف کاهش می‌یابد و مانع نفوذ و پخش رزین در بین آن‌ها می‌شود درنتیجه فرصت تر شوندگی و خیس خوردگی همه الیاف ۳۰ درصد وزنی کاهش می‌یابد [۱۶-۱۳].











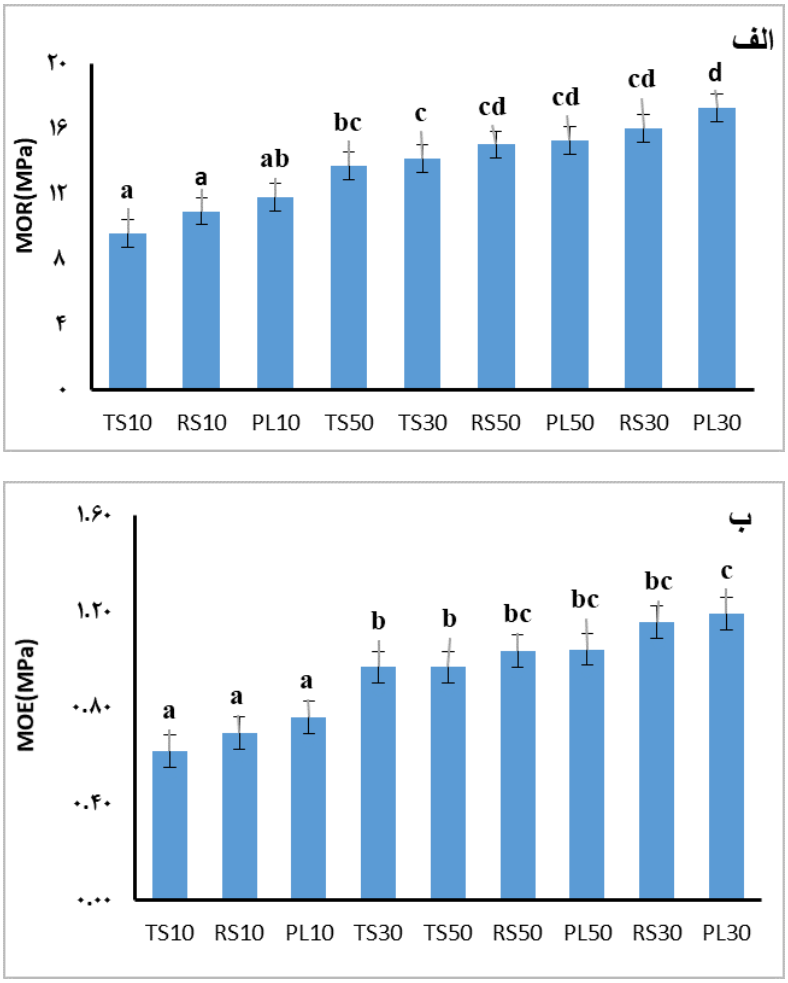
شکل ۳- اثر مستقل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی کامپوزیت هیبرید اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی. a، تأثیر مستقل نوع ماده لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی، b، تأثیر مستقل نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی، c، تأثیر مستقل نوع ماده لیگنوسلولزی بر مدول الاستیسته، d، تأثیر مستقل نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مدول الاستیسته، e، تأثیر مستقل نوع ماده لیگنوسلولزی بر مقاومت کششی، f، تأثیر مستقل نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقاومت کششی.

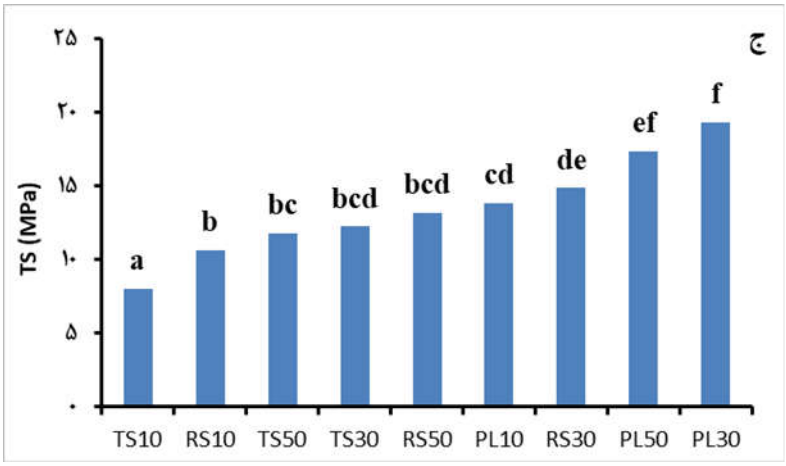
اثر متقابل درصد و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقدار میانگین مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی از لحاظ آماری و در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است (جدول ۱). همچنین اثر تعاملی نوع و درصد مواد لیگنوسلولزی بر عملکرد خمشی کامپوزیت هیبریدی اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی در شکل a-۴ و b-۴ بیان شده است. مطابق شکل a-۴ و b-۴، نمونه‌های ساخته شده با ساقه چای ترش و با نسبت وزنی ۱۰ درصد کمترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسته و نمونه‌های ساخته شده برگ نخل و با نسبت وزنی ۳۰ درصد است بیشترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسته دارند، طوری که با تغییر هم‌زمان نوع و نسبت الیاف از ساقه چای ترش و نسبت وزنی ۱۰ درصد به برگ نخل و نسبت وزنی ۳۰ درصد به ترتیب مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته ۸۰ و ۹۲ درصد افزایش یافتند. با افزایش نسبت مواد لیگنوسلولزی به ۵۰ درصد، مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۴ و ۲/۸ درصد برای ساقه چای ترش و ۲۸ و ۱۱ درصد برای برگ نخل کاهش یافت. این نتیجه بیانگر این مهم است که انتخاب نوع ماده اولیه و درصد اختلاط آن با چسب اپوکسی در تقویت مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با ماده لیگنوسلولزی مؤثر عمل می-کند.

تأثیر نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت اپوکسی- مواد لیگنوسلولزی

نتایج بررسی تحلیل واریانس اثر نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر میانگین جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت نمونه‌های مختلف آزمونی در جدول ۱ ارائه‌شده است. با توجه به نتایج جدول ۱ اثر مستقل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌های رزین اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی در سطح اعتماد ۹۵ درصد، معنی‌دار است. همچنین در شکل a-۵ تا d-۵ میانگین جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌های رزین اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی نشان داده شده است. مطابق شکل a-5 تا d-5 با افزایش درصد مواد لیگنوسلولزی جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت نمونه‌ها افزایش می‌یابد به طوری که کمترین مقدار جذب آب در نمونه-های تقویت شده با ۱۰ درصد ماده لیگنوسلولزی و بیشترین مقدار جذب آب در نمونه‌های تقویت شده با ۵۰ درصد ماده لیگنوسلولزی مشاهده شد. با تغییر نوع ماده لیگنوسلولزی از ساقه چای ترش به ساقه نی و سپس برگ نخل مقدار جذب آب ۲ ساعت به ترتیب ۳۰ و ۱۶ درصد و مقدار جذب آب ۲۴ ساعت به ترتیب ۲۹ و ۱۴ درصد کاهش یافت. نوع ماده لیگنوسلولزی به دلیل تفاوت در

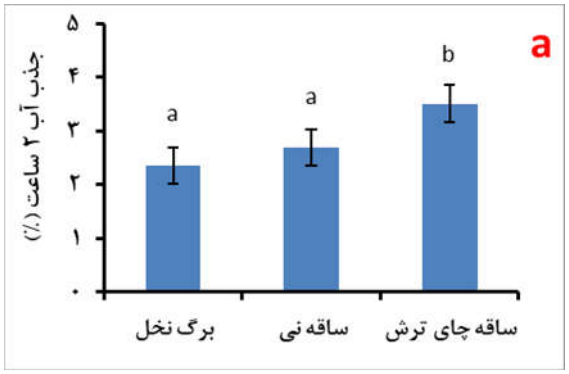
ماهیت ترکیب شیمیایی و نسبت اجزای تشکیل‌دهنده بر میزان جذب آب نمونه‌های تقویت شده مؤثر است. همان‌طور که در شکل ۵-a و ۵-b نیز مشاهده می‌شود، کمترین مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت مربوطه کامپوزیت‌های تقویت شده با برگ نخل و بیشترین مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب مربوط به کامپوزیت-های تقویت شده با ساقه نی و ساقه چای ترش است. دلیل این دامنه تغییرات در میزان جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی را می‌توان به مقدار ترکیبات سلولز و همی سلولز و گروه‌های هیدروکسیل در دسترس در ساختار این سه نوع ماده نسبت داد. محتوای سلولز در ساقه گیاهان می‌تواند از ۳۰ تا ۵۰ وزن خشک آن‌ها متغیر باشد [۱۸]، اما در مطالعات محتوای سلولز برگ نخل ۳۵ تا ۴۰ درصد گزارش‌شده است [۶].

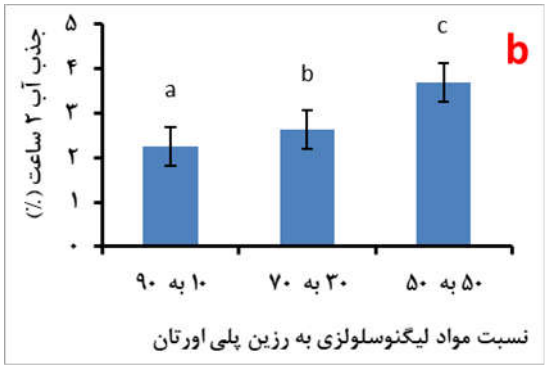


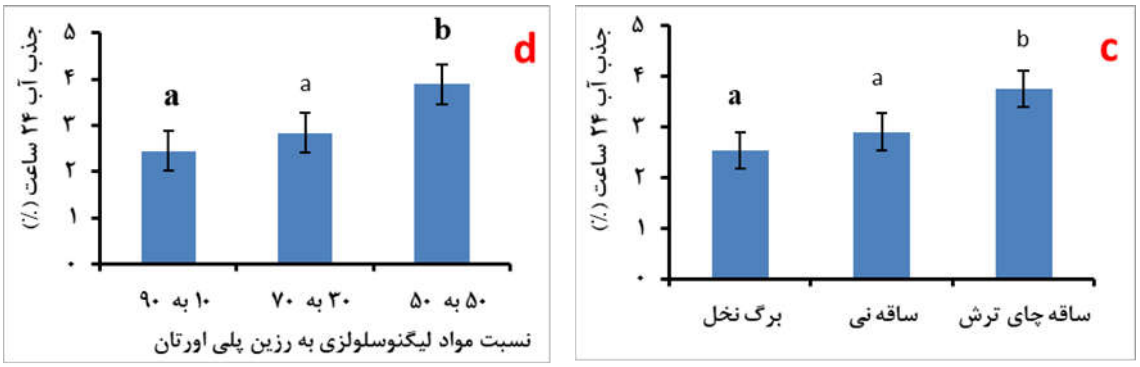


شکل۴- اثر متقابل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی کامپوزیت هیبرید اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی الف) تأثیر متقابل نوع و نسبت ماده لیگنوسلولزی بر مقاومت خمشی، ب) تأثیر متقابل نوع و نسبت ماده لیگنوسلولزی بر مدول الاستیسیته، ج) تأثیر متقابل نوع و نسبت ماده لیگنوسلولزی بر مقاومت کششی).

با افزایش درصد مواد لیگنوسلولزی جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌ها نیز افزایش یافت به طوری که با افزایش نسبت مواد لیگنوسلولزی از ۱۰ به ۳۰ و سپس ۵۰ درصد، مقدار جذب آب ۲ ساعت به ترتیب ۱۶ و ۳۷ درصد و مقدار جذب آب ۲۴ ساعت به ترتیب ۳۹ و ۱۷ درصد افزایش یافت. این پدیده را می‌توان به افزایش تمایل کامپوزیت‌ها به رطوبت به دلیل افزایش تعداد گروه-های هیدروکسیل و آبدوست نسبت داد؛ زیرا با افزایش نسبت مواد لیگنوسلولزی، حجم گروه‌های هیدروکسیل و هیدروفیل در کامپوزیت‌های اپوکسی در افزایش می‌یابد که درنتیجه منجر به جذب آب بیشتر می‌شود [۲۱-۲۰].

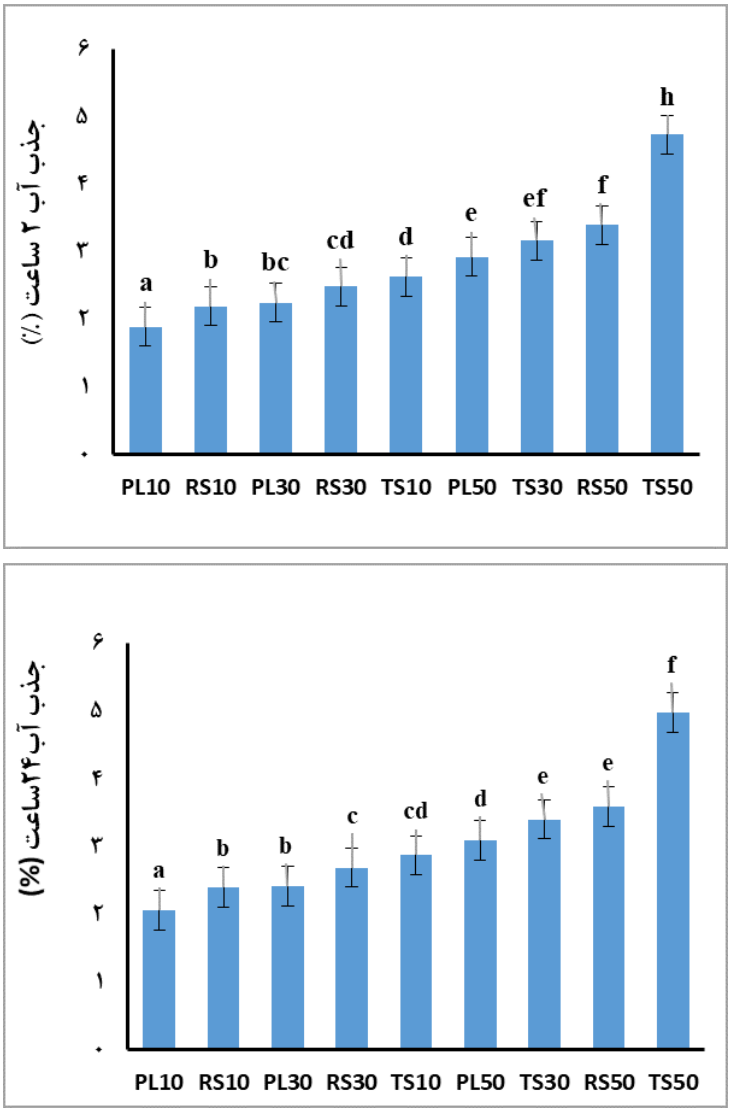






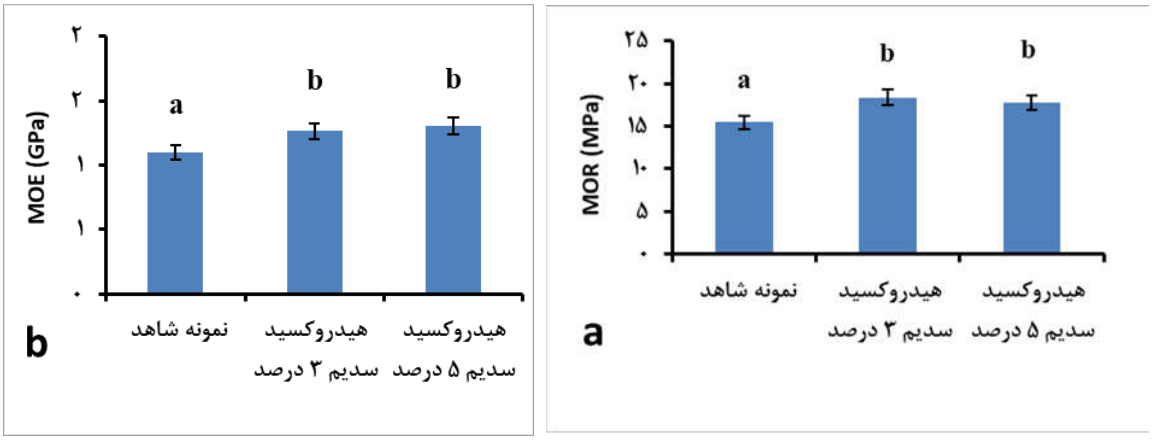
شکل ۵- اثر مستقل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقادیر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت هیبرید اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی (a، تأثیر مستقل نوع ماده لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲ ساعت، b، تأثیر مستقل نسبت مواد لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲ ساعت، c، تأثیر مستقل نوع ماده لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲۴ ساعت، d، تأثیر مستقل نسبت مواد لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲۴ ساعت).

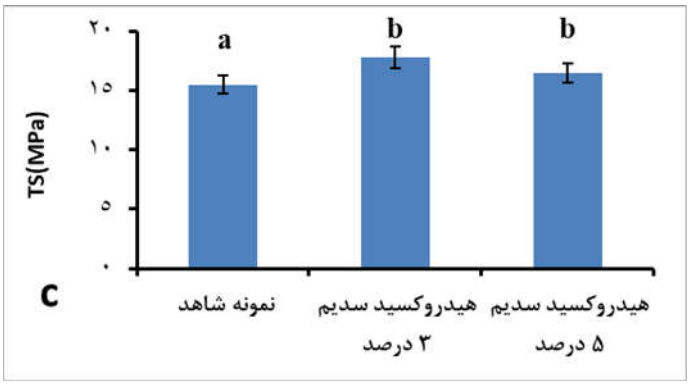
مطابق جدول ۱، اثر متقابل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقدار میانگین جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌های رزین اپوکسی - مواد لیگنوسلولزی از لحاظ آماری و در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت هیبریدی اپوکسی-مواد لیگنوسلولزی در شکل a-۶ و b-۶ بیان شده است. همان‌طور که در شکل‌های a-۶ و b-۶ نشان داده شده است، کمترین مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت مربوط به کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل و با نسبت وزنی ۱۰ درصد است و اختلاف مقدار میانگین آن نیز با سایر تیمارها از لحاظ آماری و در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. کامپوزیت‌های اپوکسی ساخته شده با ساقه چای ترش و با نسبت وزنی ۵۰ درصد بیشترین مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت را نشان دادند و همچنین اختلاف مقدار میانگین جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت آن‌ها با سایر تیمارها را لحاظ آماری معنی‌دار شد. مواد لیگنوسلولزی ذاتاً مواد هیدروفیلیک هستند که باعث جلب آب می‌شوند و مقدار جذب آب در آن‌ها بسته به نوع ماده لیگنوسلولزی و ساختار و ماهیت آن می‌تواند متفاوت باشد [۷] نسبت سلولز و سایر ترکیبات آبدوست در برگ نخل نسبت به ساقه گیاهان نی و چای ترش کمتر است و به همین دلیل مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت-های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل نسبت به نمونه‌های ساخته شده با ساقه نی و ساقه چای ترش کمتر است. مقدار مواد لیگنوسلولزی به دلیل ترکیبی از عوامل ساختاری و شیمیایی (ازجمله کاهش سطح تماس و ساختار متخلخل مواد لیگنوسلولزی) بر مقدار جذب آب کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده تأثیرگذار است. افزایش نسبت ماده لیگنوسلولزی و کاهش نسبت چسب در ساختار کامپوزیت اپوکسی منجر به عدم پوشش کافی مواد لیگنوسلولزی با چسب و همچنین افزایش ساختار متخلخل کامپوزیت می‌شود و افزایش نرخ جذب آب کامپوزیت‌ها را در پی دارد. همان‌طور که در شکل a-۶ و b-۶ نیز مشخص است تأثیر متقابل اجزای مختلف یک نوع پسماند مثل ساقه، برگ به دلیل داشتن ترکیب شیمیایی متفاوت و مقدار آن تأثیر معنی‌داری بر مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی دارد.



شکل۶- اثر متقابل نوع و نسبت مواد لیگنوسلولزی بر مقادیر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت اپوکسی- برگ نخل (نسبت ۷۰ به ۳۰).

تأثیر تیمار قلیایی بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی- برگ نخل (نسبت ۷۰ به ۳۰)





شکل۷. تأثیر تیمار قلیایی بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسته کامپوزیت اپوکسی- برگ نخل (نسبت ۷۰ به ۳۰)
(a، تأثیر مستقل تیمار شیمیایی بر مقاومت خمشی، b، تأثیر مستقل تیمار شیمیایی بر مقاومت مدول الاستیسیه، c، تأثیر مستقل تیمار شیمیایی مقاومت کششی).

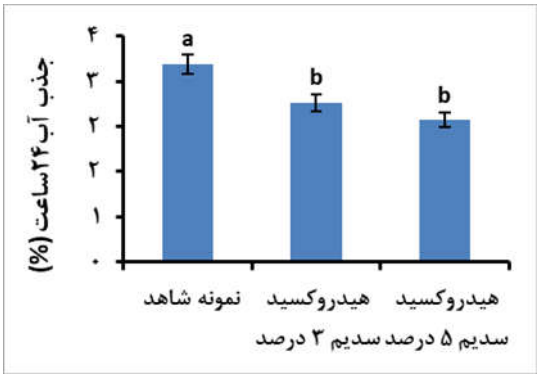
همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است، تأثیر تیمار قلیایی بر خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی مثبت است و کمترین مقدار مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های شاهد (برگ نخل تیمار نشده) است. به علت عدم سازگاری مواد لیگنوسلولزی ا ماتریس پلیمری اپوکسی امکان ایجاد پیوند سطحی بین مواد لیگنوسلولزی و ماتریس پلیمری وجود ندارد و این منجر به عملکرد مکانیکی پایین کامپوزیت‌های نهایی می‌شود. همچنین ماهیت آبگریز و غیر قطبی ماتریس پلیمری، پراکندگی مواد لیگنوسلولزی را که ماهیت آبدوست دارند، مختل می‌کند. این پدیده منجر به ایجاد چسبندگی سطحی کم، مقاومت ضعیف در برابر جذب رطوبت، نقطه ذوب پایین و ایجاد ترک‌های ریز در کامپوزیت نهایی می‌شود [۲۰-۱۹] با تیمار شیمیایی مواد لیگنوسلولزی به محلول هیدروکسید سدیم ۳ درصد و به مدت ۲ ساعت، خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی بهبود یافت، به طوری که مقاومت خمشی، مدول خمشی و مقاومت کششی کامپوزیت‌های ساخته شده با برگ نخل تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد (کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل تیمار نشده) به ترتیب ۱۱/۹، ۱۲/۷ و ۱۵ درصد افزایش یافت و از لحاظ آماری و در سطح اعتماد ۹۵ درصد اختلاف بین مقدر میانگین آن‌ها معنی‌دار بود. با افزایش غلظت تیمار قلیایی به ۵ درصد مقدار مدول الاستیسیته و مقاومت کششی به ترتیب ۳ و ۲ درصد افزایش نشان دادند و مقدار مقاومت خمشی حدود ۳ درصد کاهش یافت ولی اختلاف بین مقدار میانگین نمونه‌های ساخته شده با تیمار ۳ و ۵ درصد هیدروکسید سدیم در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار نشد. تیمار هیدروکسید سدیم (NaOH) می‌تواند به طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با مواد لیگنوسلولزی را تحت تأثیر قرار دهد. این نوع تیمار باعث کاهش محتوای لیگنین و همی سلولز در الیاف لیگنوسلولزی می‌شود، بنابراین چسبندگی فیبر ماتریس را بهبود می‌بخشد و ماهیت آبدوست الیاف را کاهش می‌دهد. همچنین تیمار قلیایی باعث می‌شود که دسته‌های فیبر به دسته‌های کوچک‌تر فیبریل تبدیل شوند که خود باعث کاهش قطر و افزایش نسبت ابعاد الیاف شوند [۲۹] حذف لیگنین باعث از بین بردن میکرو حفره‌ها در ساختار کریستالی سلولز می‌شود، از این رو لاملای میانی فیبریل‌ها همگن‌تر و پلاستیکی‌تر می‌شود و این امر ظرفیت تحمل تنش بین فیبریل‌ها افزایش می‌دهد. درنتیجه، کامپوزیت‌های تیمار شده اغلب استحکام کششی، مدول و دوام کلی بالاتری را در مقایسه با کامپوزیت‌های تیمار نشده نشان می‌دهند. با این حال، اثربخشی این نوع تیمار به عواملی مانند غلظت و مدت زمان غوطه‌وری این مواد در محلول هیدروکسید سدیم بستگی دارد. تیمار مواد لیگنوسلولزی با غلظت‌های بالاتر محلول هیدروکسید سدیم، به دلیل حذف بیش از حد همی سلولزها و لیگنین و تخریب ساختار کریستالی سلولز باعث کاهش خواص مکانیکی کامپوزیت نهایی می‌شود [۲۱-۱۹].

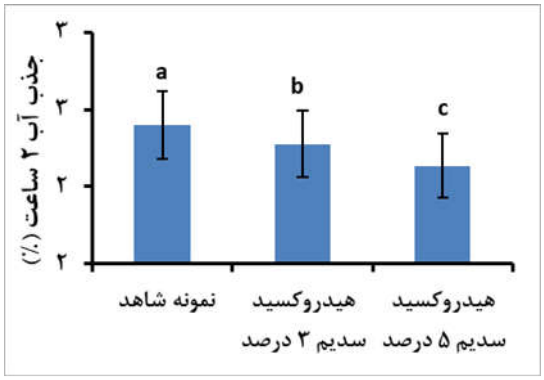
مقدار بهینه غلظت تیمار قلیایی برای الیاف نخل در ساختار کامپوزیت‌های پلی یورتان را ۶ درصد گزارش

کردند. Cai و همکاران ۲۰۱۶ نیز غلظت بهینه برای تیمار قلیایی الیاف آباکا را ۵ درصد دانستند و بیان کردند که با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم به ۱۰ و ۱۵ درصد مقدار مدول یانگ کامپوزیت‌های حاصله به مقدار ۳۴ و ۴۹ درصد کاهش می‌یابد. از این مطالعات می‌توان استنباط کرد که تیمار مواد لیگنوسلولزی با محلول هیدروکسید سدیم ۵ درصد منجر جریان مؤثر رزین بین الیاف و ایجاد درهم تنیدگی زیاد در ماتریس و مواد لیگنوسلولزی می‌شود که به چسبندگی سطحی بهتر و پیوند بین فیبر/ماتریس کمک شایانی می‌کند [۲۱].

تأثیر تیمار قلیایی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت پلی اورتان- برگ نخل (نسبت ۷۰ به ۳۰)

تأثیر تیمار قلیایی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با برگ نخل در نسبت ۷۰ به ۳۰ در شکل ۵ نشان داده شده است.





شکل ۸- تأثیر تیمار شیمیایی بر جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با برگ نخل تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد جذب آب کمتری را نشان دادند. به طوری که با تیمار هیدروکسید سدیم ۳ درصد، میزان جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت آن‌ها نسبت به نمونه شاهد ترتیب به مقدار ۱۳ و ۲۰ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش غلظت هیدروکسید سدیم از ۳ به ۵ درصد مقدار جذب آب ۲ و ۲۴ ساعت به ترتیب ۱۱ و ۱۸ درصد کاهش پیدا کرد. تیمار قلیایی باعث حذف تمام ناخالصی-های طبیعی و مصنوعی مثل موم، روغن‌ها، همی سلولز و لیگنین و همچنین حذف پیوندهای هیدروژنی موجود در ساختار شیمیایی مواد لیگنوسلولزی می‌شود. این ناخالصی‌ها و همچنین وجود گروه‌های هیدروکسیل مانع اتصال و پیوند بین مواد لیگنوسلولزی و رزین‌های پلیمری می‌شوند [۲۰]. نحوه تأثیر تیمار قلیایی بر ساختار کریستالی سلولز را می‌توان با رابطه ۱ توضیح داد [۶].

$$\text{Fibre - OH + NaOH} \rightarrow \text{Fibre - ONa+ + H2O}$$

همان‌طور که از رابطه ۱ مشخص است با غوطه‌وری مواد لیگنوسلولزی در آب یک شبکه Na-سلولز جدید تشکیل می‌شود که در آن گروه‌های OH سلولز به گروه-های ONa تبدیل می‌شوند در ادامه با شستشوی مواد لیگنوسلولزی در آب، یون‌های Na حذف می‌شوند و سلولز به یک ساختار کریستالی جدید که در آن گروه‌های هیدروکسیل کمتری وجود دارند، تبدیل می‌شود. حضور کمتر گروه‌های هیدروکسیل در ساختار سلولز باعث کاهش جذب آب کامپوزیت نهایی می‌شود.

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، افزایش نگرانی‌ها درباره اثرات مخرب زیست‌محیطی و هزینه‌های بالای الیاف مصنوعی، محققان را به سمت استفاده از الیاف طبیعی و سلولزی به عنوان جایگزینی پایدار برای تقویت‌کننده‌های پلیمری سوق داده است. استفاده از این الیاف نه‌تنها به کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه هزینه تولید کامپوزیت‌های پلیمری نیز کاهش می‌یابد. در این مطالعه، کامپوزیت‌های زمینه رزین اپوکسی با استفاده از مواد لیگنوسلولزی شامل ساقه گیاه چای ترش، ساقه نی و برگ نخل در نسبت‌های وزنی مختلف (۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) و با تیمار قلیایی جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، تهیه و بررسی شدند. نتایج نشان داد که کامپوزیت‌های

تقویت شده با برگ نخل بهترین عملکرد مکانیکی شامل بیشترین مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته را داشتند و افزایش نسبت الیاف تا ۳۰ درصد خواص مکانیکی را به طور قابل‌توجهی بهبود بخشید؛ اما افزایش بیش از این میزان، موجب کاهش عملکرد می‌شود. علاوه بر این، تیمار قلیایی برگ نخل باعث کاهش قابل‌توجه جذب آب کامپوزیت‌ها و بهبود ماندگاری و دوام آن‌ها گردید. حداقل ملزومات اوراق فشرده چوبی بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۹۰۴۴ برای مقاومت خمشی، مدول الاستیسته و میزان ضخامت به ترتیب ۱۳MPa، ۱/۸MPa و ۲۵ درصد در محدود ضخامتی ۳ تا ۶ میلی‌متر ذکرشده است. درحالی که صفحات پلیمری اپوکسی- مواد لیگنوسلولزی مقاومت خمشی (۱۸ MPa)، مقاومت کششی (۲۰ MPa) و جذب آب (کمتر از ۴ درصد) را نشان دادند. با توجه به این نتایج کاربرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف طبیعی در صنایع مختلف همچون خودروسازی، ساختمان‌سازی و بسته‌بندی، به عنوان مواد سبک، مقاوم و دوستدار محیط‌زیست بسیار مناسب به نظر می‌رسد.

منابع

[1] Prasad, L. Kumar, S. Patel, R.V. Yadav, A. Kumar, V. and Winczek, J. 2020. Physical and mechanical behaviour of sugarcane bagasse fibre-reinforced epoxy bio-composites. Materials, 13(23), p.5387.

[2] Devadiga, D.G. Bhat, K.S. and Mahesha, G.T. 2020. Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications. Cogent Engineering, 7(1), p.1823159.

[3] Vidyashri, V. Lewis, H. Narayanasamy, P. Mahesha, G.T. and Bhat, K.S. 2019. Preparation of chemically treated sugarcane bagasse fiber reinforced epoxy composites and their characterization. Cogent Engineering, 6(1), p.1708644.

[4] Sarikaya, E. Çallioğlu, H. and Demirel, H. 2019. Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. Composites Part B: Engineering, 167, pp.461-466.

[5] Chauhan, A.K. Singh, A. Kumar, D. and Mishra, K. 2021. Properties of composite materials. In Composite Materials (pp. 61-78). CRC Press.

[6] Asyraf, M.R.M. Syamsir, A. Supian, A.B.M. Usman, F. Ilyas, R.A. Nurazzi, N.M. Norrrahim, M.N.F. Razman, M.R. Zakaria, S.Z.S. Sharma, S. and Itam, Z. 2022. Sugar palm fibre-reinforced polymer composites: influence of chemical treatments on its mechanical properties. Materials, 15(11), p.3852.

[7] Alshammari, B.A. Saba, N. Alotaibi, M.D. Alotibi, M.F. Jawaid, M. and Alothman, O.Y. 2019. Evaluation of mechanical, physical, and morphological properties of epoxy composites reinforced with different date palm fillers. Materials, 12(13), p.2145.

[8] Sarikaya, E. Çallioğlu, H. and Demirel, H. 2019. Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. Composites Part B: Engineering, 167, pp.461-466.

[9] Prithivirajan, R. Jayabal, S. and Bharathiraja, G. 2015. Bio-based composites from waste agricultural residues: mechanical and morphological properties. Cellulose Chemistry and Technology, 49(1), pp.65-68.

[10] Sajith, S. Arumugam, V. and Dhakal, H.N. 2017. Comparison on mechanical properties of lignocellulosic flour epoxy composites prepared by using coconut shell, rice husk and teakwood as fillers. Polymer Testing, 58, pp.60-69.

[11] Huang, Z. Wang, N. Zhang, Y. Hu, H. and Luo, Y. 2012. Effect of mechanical activation pretreatment on the properties of sugarcane bagasse/poly (vinyl chloride) composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 43(1), pp.114-120.

[12] AlMaadeed, M.A. Nógellová, Z. Mičušík, M. Novák, I. and Krupa, I. 2014. Mechanical, sorption and adhesive properties of composites based on low density polyethylene filled with date palm wood powder. Materials & Design, 53, pp.29-37.

[13] Betelie, A.A. Megera, Y.T. Redda, D.T. and Sinclair, A. 2018. Experimental investigation of fracture toughness for treated sisal epoxy composite. AIMS Materials Science, 5(1), pp.93-104.

[14] Sreekumar, P.A. Joseph, K. Unnikrishnan, G. and Thomas, S. 2007. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composites prepared by resin transfer and compression moulding techniques. Composites science and technology, 67(3-4), pp.453-461.

[15] Bhuvaneshwaran, M. Sampath, P.S. and Sagadevan, S. 2019. Influence of fiber length, fiber content and alkali treatment on mechanical properties of natural fiber-reinforced epoxy composites. Polimery, 64(2), pp.93-99.

[16] Ward, A.A. Abd-El-Messieh, S.L. Ramadan, R.M. Abdelghany, A.M. Mansour, S.H. Asaad, J.N. and Rozik, N. 2019. High Performance Epoxy Resin/Agro Waste Composites for automotive Applications. Kgk-kautschuk gummi kunststoffe, 72(5), pp.55-60.

[17] Nguyen, T.A. and Nguyen, T.H. 2021. Banana fiber-reinforced epoxy composites: mechanical properties and fire retardancy. International Journal of Chemical Engineering, 2021(1), p.1973644

[19] Vinod, A. Tengsuthiwat, J. Gowda, Y. Vijay, R. Sanjay, M.R. Siengchin, S. and Dhakal, H.N. 2022.

Jute/Hemp bio-epoxy hybrid bio-composites: Influence of stacking sequence on adhesion of fiber-matrix. International Journal of Adhesion and Adhesives, 113, p.103050.

[20] Chaiwong, W. Samoh, N. Eksomtramage, T. and Kaewtatip, K. 2019. Surface-treated oil palm empty fruit bunch fiber improved tensile strength and water resistance of wheat gluten-based bioplastic. Composites Part B: Engineering, 176, p.107331.

[21] Mohammed, A.A. Bachtiar, D. Siregar, J.P. and Rejab, M.R.M. 2016. Effect of sodium hydroxide on the tensile properties of sugar palm fibre reinforced thermoplastic polyurethane composites. J. Mech. Eng. Sci.

[22] Atiqah, A. Jawaid, M. Sapuan, S.M. and Ishak, M.R. 2017. Effect of surface treatment on the mechanical properties of sugar palm/glass BioResources. 13(1):1174-1188

[23] Cai, M. Takagi, H. Nakagaito, A.N. Li, Y. Waterhouse, G.I. 2016. Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiberreinforced composites. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. 90, 589–597.

[24] Vinod, A. Tengsuthiwat, J. Gowda, Y. Vijay, R. Sanjay, M.R. Siengchin, S. and Dhakal, H.N. 2022. Jute/Hemp bio-epoxy hybrid bio-composites: Influence of stacking sequence on adhesion of fiber-matrix. International Journal of Adhesion and Adhesives, 113, p.103050.

[25] Cionita, T. Siregar, J.P. Shing, W.L. Hee, C.W. Fitriyana, D.F. Jaafar, J. Junid, R. Irawan, A.P. and Hadi, A.E. 2022. The influence of filler loading and alkaline treatment on the mechanical properties of palm kernel cake filler reinforced epoxy composites. Polymers, 14(15), p.3063.

[26] Hosseinkhani, H. 2015. MDF production from date palm pruning residues in pilot plant scale. Iranian journal of wood and paper science research, 29(4), 591-604. (In Persian).

[27] Khalili Baseri, M. Ghavami Jolandan, S. Soleymani, M. and Zarei, H. 2024. Estimating the amount of annual harvestable reed plant from Horul-Azim wetland for use in biomass power plants. Journal of Research in Mechanics of Agricultural Machinery, 13(1), 57-66. [3]