

(OPEN ACCESS)

Fabrication, Characterization and Evaluation of Technical Performance of Glass Fiber Reinforced (GFRP) Sandwich Panels with an Approach to Furniture Applications

Mohammad Javad Hassani¹, Mosayeb Dalvand ^{2*}, Meysam Mehdinia^{3*}
and Hamid Zare ⁴

1- M.Sc. Wood industries, Department of wood industries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2*- Corresponding author, Assistant Prof., Department of wood industries and sciences, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: dalvand3@gmail.com

3*- Corresponding author, Assistant Prof., Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran, E-mail: Mehdinia@rifr-ac.ir

4-Assistant Prof., Department of wood industries and sciences, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Article Info

Article type:

Full Length Research Paper

Article history:

Received: 28 April 2026

Revised: 23 May 2026

Accepted: 25 May 2026

Published online: 21

September 2026

Keywords:

Sandwich panel;

Glass fiber (GFRP);

Panel furniture;

Epoxy resin;

Mechanical properties;

Wood-based composites;

Structural lightening.

ABSTRACT

Background and objectives: The furniture industry, as one of the strategic sectors in the value chain of wood products, faces challenges such as increasing functional quality, reducing structural weight, increasing durability and reducing environmental impacts. The use of advanced materials and engineered structures can provide an effective solution to respond to these challenges. Glass fiber reinforced Polymer (GFRP) sandwich panels are considered a promising option for furniture applications due to their high strength-to-weight ratio and ability to improve mechanical performance. The aim of this research is to investigate the manufacturing process and evaluate the technical performance of glass fiber reinforced sandwich panels and to assess the feasibility of their application in the panel furniture industry.

Methodology: For this purpose, the effect of parameters including the type of glass fibers, dosage fiber, type of resin used (two-component polyester and epoxy), and the arrangement of reinforcing layers (symmetrical and asymmetric) on the mechanical properties of the panels was investigated. The panels were produced with a honeycomb paper core and the reinforcing layers were attached to the surfaces using a lamination process.

The samples were subjected to standard ASTM mechanical tests including bulk density, modulus of rupture, modulus of elasticity, edge pressure resistance, surface pressure resistance and shear strength.

Results: The results showed that reinforcing sandwich panels with glass fibers significantly improved mechanical properties, especially flexural strength, modulus of elasticity and compressive and shear strengths. Also, the symmetrical arrangement of the reinforcing layers showed better structural

performance than the asymmetrical arrangement due to a more uniform distribution of stresses.

Conclusion: In summary, glass fiber reinforced sandwich panels using epoxy resin, especially in symmetrical arrangements are a suitable option for application in lightweight and durable panel furniture structures. In addition to improving mechanical performance, this approach can be effective in achieving sustainable development goals and optimizing resource consumption in the furniture industry by reducing raw material consumption and structural weight.

Cite this article: Mohammad Javad Hassani, Mosayeb Dalvand, Meysam Mehdinia and Hamid Zare. 2026. Fabrication, Characterization and Evaluation of Technical Performance of Glass Fiber Reinforced (GFRP) Sandwich Panels with an Approach to Furniture Applications. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 41(3), 235-260. <https://doi.org/10.22092/ijwpr.2026.372645.1836>



Copyright: © 2025 by the authors. This is an open access, peer-reviewed article published by Research Institute of Forests and Rangelands (<http://ijwpr.areeo.ac.ir/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

ساخت، مشخصه‌یابی و ارزیابی عملکرد فنی پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) با رویکرد کاربرد در مبلمان

محمدجواد حسنی^۱، مسیب دالوند^{۲*}، میثم مهدی نیا^{۳*} و حمید زارع^۴

۱- کارشناس ارشد صنایع چوب، گروه صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، پست الکترونیک: dalvand3@gmail.com

۳- نویسنده مسئول، استادیار، مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران،

پست الکترونیک: Mehndinia@rifr-ac.ir

۴- استادیار، گروه صنایع چوب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: صنعت مبلمان به‌عنوان یکی از بخش‌های راهبردی در زنجیره ارزش محصولات چوبی، با چالش‌هایی مانند افزایش کیفیت عملکردی، کاهش وزن سازه‌ای، افزایش دوام و کاهش آثار زیست‌محیطی مواجه است. بهره‌گیری از مواد پیشرفته و ساختارهای مهندسی‌شده می‌تواند راهکاری مؤثر برای پاسخ به این چالش‌ها فراهم نماید. در این میان، پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت بهبود عملکرد مکانیکی، گزینه‌ای نویدبخش برای کاربردهای مبلمانی محسوب می‌شوند. هدف از این پژوهش، بررسی فرایند ساخت و ارزیابی عملکرد فنی پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه و امکان‌سنجی کاربرد آن‌ها در صنعت مبلمان صفحه‌ای است. بدین منظور، تأثیر پارامترهایی مانند نوع الیاف شیشه، گرماژ الیاف، نوع رزین مصرفی (پلی‌استر دو جزئی و اپوکسی) و آرایش لایه‌های تقویتی (مقارن و نامقارن) بر خواص مکانیکی پانل‌ها مورد بررسی قرار گرفت.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۰۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰	
واژه‌های کلیدی: پانل ساندویچی، الیاف شیشه (GFRP)، مبلمان صفحه‌ای، رزین اپوکسی، خواص مکانیکی، کامپوزیت‌های چوب پایه، سبک‌سازی سازه‌ای.	مواد و روش‌ها: پانل‌ها با هسته کاغذ شان‌عسلی تولید و لایه‌های تقویتی با استفاده از فرایند لمیناسیون به سطوح متصل شدند. نمونه‌ها تحت آزمون‌های مکانیکی استاندارد ASTM شامل دانسیته ظاهری، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته، مقاومت به فشار لبه‌ای، مقاومت به فشار سطحی و مقاومت برشی قرار گرفتند. نتایج: نتایج نشان داد تقویت پانل‌های ساندویچی با الیاف شیشه موجب بهبود معنی‌دار خواص مکانیکی، به‌ویژه استحکام خمشی، مدول الاستیسیته و مقاومت‌های فشاری و برشی می‌شود. همچنین آرایش مقارن لایه‌های تقویتی به دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها، عملکرد سازه‌ای بهتری نسبت به آرایش نامقارن از خود نشان داد. نتیجه‌گیری: درمجموع، پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه، به‌ویژه در آرایش‌های مقارن و با استفاده از رزین اپوکسی، گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در سازه‌های سبک و مقاوم مبلمان صفحه‌ای محسوب می‌شوند. این رویکرد علاوه بر ارتقای عملکرد مکانیکی، با کاهش مصرف مواد اولیه و وزن سازه، می‌تواند در راستای اهداف توسعه پایدار و بهینه‌سازی مصرف منابع در صنعت مبلمان مؤثر واقع شود.

استناد به این مقاله: محمدجواد حسنی، مسیب دالوند، میثم مهدی نیا و حمید زارع. ۱۴۰۵. ساخت، مشخصه‌یابی و ارزیابی عملکرد فنی پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) با رویکرد کاربرد در مبلمان. نشریه تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران، ۴۱(۳)، ۲۳۵-۲۶۰.

مقدمه

صنعت مبلمان به‌عنوان یکی از بخش‌های کلیدی زنجیره صنایع چوب و فراورده‌های مهندسی‌شده چوب، همواره با چالش‌های چندگانه‌ای از جمله کاهش وزن سازه‌ها، افزایش استحکام مکانیکی، بهبود دوام عملکردی، کاهش مصرف مواد اولیه و حرکت به سمت تولید پایدار مواجه بوده است. در دهه‌های اخیر، نیاز بازار به مبلمان سبک، مقاوم و قابل حمل، به‌ویژه در محصولات صفحه‌ای مانند میز، کابینت، قفسه و سازه‌های دکوراتیو، موجب گرایش روزافزون به استفاده از ساختارهای نوین مهندسی‌شده شده است. یکی از راهکارهای مؤثر در پاسخ به این نیازها، به‌کارگیری پانل‌های ساندویچی، به‌عنوان یک کامپوزیت سبک با نسبت استحکام به وزن بالا است (Smardzewski & Prekrat, 2019; Vinson, 2018).

پانل‌های ساندویچی نوعی کامپوزیت لایه‌ای هستند که از دو رویه نازک و نسبتاً سخت و یک هسته سبک و ضخیم تشکیل شده‌اند. رویه‌ها عمدتاً وظیفه تحمل تنش‌های خمشی و فشاری را بر عهده دارند، درحالی‌که هسته مرکزی با وزن کم، نقش انتقال تنش‌های برشی و حفظ فاصله هندسی بین رویه‌ها را ایفا می‌کند. این طراحی منجر به افزایش قابل توجه سختی خمشی بدون افزایش محسوس جرم می‌شود (Zenkert, 1997; Allen, 2013).

در صنعت مبلمان، هسته‌های سبک مانند کاغذ شانه‌عسلی کرافت و چوب‌های سبک مانند پالونیا کاربرد گسترده‌ای دارند، درحالی‌که رویه‌ها اغلب از تخته فیبر با چگالی متوسط (MDF) یا تخته خرده‌چوب ساخته می‌شوند (Busch, 2004; Hafele, 2004).

فلسفه اصلی استفاده از پانل‌های ساندویچی در مبلمان صفحه‌ای، سبک‌سازی همراه با حفظ یا ارتقای مقاومت مکانیکی است. با این حال، ضخامت کم رویه‌ها در این پانل‌ها موجب می‌شود که در بارگذاری خمشی و متمرکز، مستعد خیز و شکست موضعی باشند، به‌ویژه در دهانه‌های بلند یا کاربردهایی که تحمل بار نقطه‌ای بالا مورد انتظار است. از این‌رو، تقویت رویه‌های پانل‌های ساندویچی به‌عنوان یک

راهکار مهندسی برای افزایش ظرفیت باربری و کاهش خیز مطرح شده است (Wang, 2006).

در این راستا، بهره‌گیری از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه (Glass fiber-reinforced polymers) (GFRP) به‌عنوان لایه‌های تقویتی روی سطوح پانل‌های ساندویچی، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. کامپوزیت‌ها به‌طور کلی از ترکیب حداقل دو بخش متمایز تشکیل شده‌اند که خواص نهایی آن‌ها برآیندی از عملکرد اجزا است و معمولاً از خواص هر یک از بخش‌ها به‌تنهایی فراتر می‌رود (Anderson & Lux, 1985). در این ساختار، الیاف نقش تقویت‌کننده باربر و ماتریس پلیمری نقش انتقال تنش، حفاظت از الیاف و ایجاد یکپارچگی ساختاری را ایفا می‌کند (Callister Jr & Rethwisch, 2020; Hull & Clyne, 1981).

در میان تقویت‌کننده‌ها، الیاف شیشه به دلیل نسبت مناسب استحکام به وزن، مقاومت شیمیایی بالا، قیمت اقتصادی و سهولت فراوری، به‌طور گسترده در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Amer et al., 2018; Bunsell, 2018) و بیش از ۹۰ درصد الیاف مصرفی در صنایع مهندسی، از نوع الیاف شیشه هستند (Liu et al., 2023). به‌کارگیری الیاف شیشه در قالب پارچه‌های بافته‌شده، نمدی یا تیشو در ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای، امکان کنترل خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی را فراهم می‌کند (Pothen et al., 2005; Motz & Bordia, 2009).

در ساخت لایه‌های تقویتی، انتخاب ماده زمینه پلیمری نیز نقشی تعیین‌کننده دارد. رزین‌های پلی‌استر غیراشباع و رزین‌های اپوکسی به‌عنوان دو ماتریس پرکاربرد در صنعت کامپوزیت شناخته می‌شوند. رزین‌های پلی‌استر به دلیل قیمت پایین‌تر، سهولت پخت در دمای محیط و فرایندپذیری مناسب، در تولیدات صنعتی انبوه رایج‌اند (Anderson & lux, 1985)، درحالی‌که رزین‌های اپوکسی به دلیل چسبندگی بالا، مقاومت مکانیکی و شیمیایی برتر و پایداری حرارتی بیشتر، برای کاربردهای مهندسی پیشرفته ترجیح داده می‌شوند (Lee &

الیاف شیشه موجب افزایش مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و ظرفیت جذب انرژی می‌شود. همچنین [Zhang](#) و [Matinlinna](#) (۲۰۱۲) به مقاومت بالای این کامپوزیت‌ها در برابر عوامل محیطی و خوردگی اشاره کرده‌اند که این ویژگی می‌تواند برای کاربردهای مبلمان در شرایط رطوبتی یا محیط‌های نیمه‌خورنده حائز اهمیت باشد.

باوجود پژوهش‌های انجام‌شده، بخش عمده مطالعات موجود یا بر روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی و پلیمری متمرکز بوده‌اند، یا تقویت GFRP را در کاربردهای سازه‌ای غیرچوبی بررسی کرده‌اند. بررسی سیستماتیک اثر نوع رزین (اپوکسی در مقایسه با پلی‌استر)، نوع و گراماژ الیاف شیشه و چیدمان متقارن و نامتقارن لایه‌های تقویتی بر خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی با رویه MDF نازک در حوزه مبلمان صفحه‌ای، در پژوهش‌های موجود کمتر گزارش شده است. بررسی منابع نشان می‌دهد اگرچه مطالعات متعددی به بررسی پانل‌های ساندویچی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداخته‌اند، اما پژوهش جامعی که به‌صورت هم‌زمان اثر نوع رزین (اپوکسی در برابر پلی‌استر)، نوع و گراماژ الیاف شیشه و نحوه چیدمان متقارن و نامتقارن لایه‌های تقویتی را بر خواص مکانیکی پانل‌های ساندویچی با هسته کاغذ شانه‌عسلی و رویه MDF نازک، با تمرکز ویژه بر کاربرد در مبلمان صفحه‌ای، بررسی کند، به‌طور نظام‌مند گزارش نشده است. همچنین، ارتباط بین بهبود خواص مکانیکی و قابلیت کاربرد صنعتی این پانل‌ها در سازه‌های مبلمان کمتر مورد تحلیل کاربردمحور قرار گرفته است. از این‌رو نوآوری اصلی این تحقیق در ارائه یک رویکرد کاربردی برای ارتقای عملکرد مکانیکی پانل‌های ساندویچی مورد استفاده در مبلمان صفحه‌ای از طریق لمینیت‌کاری لایه‌های GFRP بر روی رویه‌های MDF نازک (۳ میلی‌متر) است. این پژوهش با مقایسه مستقیم رزین اپوکسی و پلی‌استر، بررسی گراماژهای مختلف الیاف شیشه و تحلیل اثر چیدمان متقارن و نامتقارن لایه‌های تقویتی، چارچوبی مهندسی برای بهینه‌سازی طراحی پانل‌های سبک‌وزن اما مقاوم ارائه می‌دهد. نتایج این رویکرد

([Neville, 1967](#); [Fujinami et al., 2004](#)). تفاوت عملکرد

این دو رزین می‌تواند بر رفتار مکانیکی پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده تأثیرگذار باشد.

مطالعات متعددی به بررسی عملکرد مکانیکی پانل‌های ساندویچی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه پرداخته‌اند. [Velmurugan](#) و [Manikandan](#) (۲۰۰۵) رفتار مکانیکی پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه و الیاف طبیعی پالمیرا را مورد بررسی قرار دادند و گزارش کردند که افزودن الیاف شیشه موجب افزایش معنی‌دار مقاومت خمشی و فشاری در مقایسه با نمونه‌های تقویت‌شده فقط با الیاف طبیعی می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده نقش کلیدی الیاف شیشه در افزایش ظرفیت باربری سازه‌های ساندویچی است. [Zenkert](#) (۱۹۹۷) و [Gibson](#) (۲۰۰۷) نشان دادند که بهبود طراحی لایه‌های رویی در پانل‌های ساندویچی، بیشترین تأثیر را برافزایش سختی خمشی دارد و تقویت موضعی رویه‌ها می‌تواند بدون افزایش قابل‌توجه وزن، عملکرد سازه‌ای پانل را بهبود ببخشد. [Vinson](#) (۲۰۱۸) نیز تأکید می‌کند که انتخاب صحیح نوع تقویت‌کننده و چیدمان لایه‌ها (متقارن یا نامتقارن) می‌تواند توزیع تنش در پانل‌های ساندویچی را بهینه کرده و پایداری سازه را افزایش دهد.

در حوزه کاربرد پانل‌های سبک در مبلمان، [Busch](#) (۲۰۰۴) و [Hafele](#) (۲۰۰۴) گزارش کردند که پانل‌های ساندویچی با هسته کاغذ شانه‌عسلی، مزایایی مانند کاهش وزن، کاهش هزینه حمل‌ونقل و افزایش نسبت استحکام به وزن را برای تولیدکنندگان مبلمان فراهم می‌کنند. بااین‌حال، محدودیت اصلی این پانل‌ها در برابر خمش و بارگذاری موضعی، نیاز به تقویت رویه‌ها را برجسته می‌سازد. مطالعات [Wang](#) (۲۰۰۶) نیز نشان داد که تقویت رویه پانل‌های ساندویچی می‌تواند خیز مجاز سازه را کاهش داده و دامنه کاربرد این پانل‌ها را در سازه‌های صفحه‌ای افزایش دهد.

درزمینه کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه، پژوهش‌های [El-Wazery](#) و همکاران (۲۰۱۷) و [Mohammadi](#) و همکاران (۲۰۲۲) نشان داده‌اند که افزودن

شرایط تکرارپذیر در فرآیند ساخت نمونه‌ها و کاهش خطای آزمایشگاهی شد.

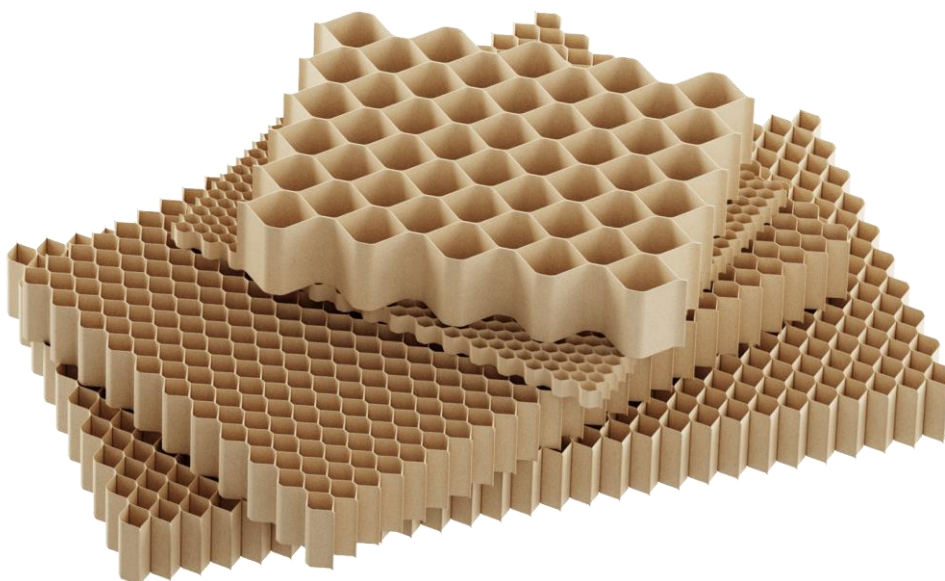
کاغذ شانه‌عسلی

کاغذ شانه‌عسلی مورد استفاده به‌عنوان هسته پانل‌های ساندویچی از شرکت پارس پانل تهیه شد. این کاغذ از نوع کرافت با ساختار شانه‌عسلی دارای دانسیته در بازه ۱۵۰ تا ۱۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. ساختار لانه‌زنبوری این هسته، ضمن کاهش وزن پانل، نقش مؤثری در انتقال تنش‌های برشی و افزایش سختی خمشی سازه ایفا می‌کند. همچنین استفاده از کاغذ کرافت به دلیل استحکام مناسب، یکنواختی ساختاری و دسترسی صنعتی، انتخابی مناسب برای کاربردهای مبلمان صفحه‌ای محسوب می‌شود.

می‌تواند دامنه کاربرد پانل‌های ساندویچی در مبلمان صفحه‌ای، دکوراسیون داخلی و سازه‌های سبک را به‌طور معناداری گسترش دهد و گامی عملی در جهت سبک‌سازی، افزایش دوام و توسعه پایدار در صنعت مبلمان محسوب شود.

مواد اولیه مصرفی ورق MDF

ورق‌های MDF مورد استفاده در این پژوهش با ضخامت ۳ میلی‌متر و تولید شرکت ادونس (تایلند) تهیه و به‌عنوان رویه‌های سطحی پانل‌های ساندویچی استفاده شدند. انتخاب این محصول به دلیل یکنواختی ساختاری، کیفیت سطح مناسب و قابلیت مطلوب در فرآیند لمیناسیون و پوشش‌دهی انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی یکنواخت MDF موجب ایجاد



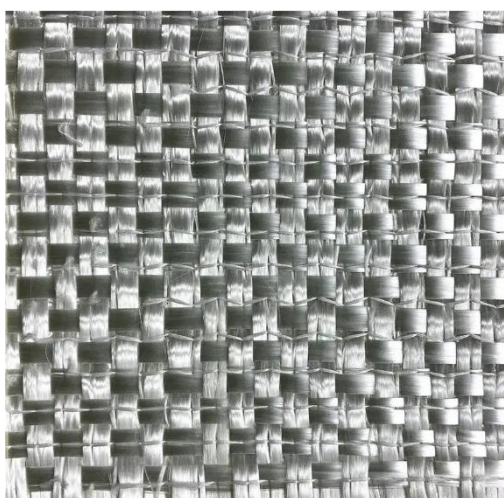
شکل ۱- نمایی از کاغذ شانه‌عسلی مورد استفاده در ساخت پانل‌های ساندویچی

Figure 1. View of honeycomb paper used in the manufacture of sandwich panels

مترمربع استفاده شد. هر دو نوع الیاف از نوع E-Glass انتخاب شدند که به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، پایداری شیمیایی مناسب و سازگاری با رزین‌های پلیمری، کاربرد گسترده‌ای در تقویت سازه‌های کامپوزیتی دارند.

الیاف شیشه

الیاف شیشه مورد استفاده از شرکت تیشو سینا تأمین شد. در این پژوهش دو نوع الیاف شامل الیاف شیشه مت سوزنی و الیاف شیشه حصیری با گرماژهای ۲۰۰ و ۳۰۰ گرم بر



الیاف حصیری

Woven glass fibers



تشک الیاف شیشه سوزنی

Needled glass fiber mat

شکل ۲- انواع الیاف شیشه‌ای استفاده شده

Figure 2 - Types of glass fibers used

رزین‌ها

رزین اپوکسی

رزین اپوکسی مورد استفاده از شرکت دانش‌بنیان سیل‌سازکو و از نوع ۸۱۳۲ دو جزئی انتخاب شد. این رزین به دلیل چسبندگی بالا به بسترهای چوبی و کامپوزیتی،

خواص مکانیکی مطلوب و پایداری مناسب پس از پخت، برای فرآیند لمیناسیون الیاف شیشه بر روی سطوح پانل استفاده شد. مشخصات فنی رزین اپوکسی مطابق برگه اطلاعات فنی شرکت سازنده در جدول ۱ ارائه شده است

جدول ۱- مشخصات فنی رزین اپوکسی مورد استفاده

Table 1- Technical specifications of the epoxy resin used

quantity	unit	characteristic
Epoxy group content	Mmol/kg	4900
Epoxy equivalent	g/eq	183
Viscosity	CPS/25°C	833
Color (gardener)	-	0.2

رزین پلی‌استر

رزین پلی‌استر مورد استفاده از گروه کارخانه‌های ایران کیتون با نام تجاری IK ۵۰۰۰ تهیه شد. این رزین مخصوص پوشش و لمیناسیون سطوح چوبی بوده و به دلیل ویسکوزیته

مناسب، چسبندگی مطلوب و زمان گیرش کوتاه، در فرآیند ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. برای سخت شدن رزین پلی‌استر، از کبالت ۱۰ درصد (۰/۱ گرم) و متیل‌اتیل‌کتن پراکساید نوع A60 (۱/۵ گرم در ۱۰۰ گرم رزین) در دمای

محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) استفاده شد. مشخصات فنی رزین پلی‌استر در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات فنی رزین پلی‌استر مورد استفاده

Table 2- Technical specifications of the polyester resin used

Quantity	Unit	Characteristic
Solid content	%	68±3
Viscosity	cps	100-150
Acid number	Mgr KOH/gr	30±5
Gel time	min	10-13
Time to reaching final temperature	min	18-20
Final temperature	°C	125±5
Pot life	moon	6
appearance	-	Colorless
density	gr/cm ³	1.05-1.1

روش‌ها

فرمالدهید)، مقدار مصرف رزین برای هر لایه تقویتی (۲۰۰ گرم بر مترمربع)، ابعاد نمونه‌ها مطابق استانداردهای ASTM و شرایط انجام آزمون‌ها (دما، زمان پرس و شرایط محیطی کارگاهی) و عوامل متغیر که در جدول ۳ خلاصه شده است.

عوامل مورد بررسی در این مطالعه شامل عوامل ثابت که در برگیرنده نوع پانل (پانل ساندویچی با هسته کاغذ شانه‌عسل)، نوع چسب اتصال MDF به هسته (چسب اوره-

جدول ۳- عوامل متغیر و سطوح آن‌ها

Table 3. Variable factors and their levels

Variables	Levels
Type of glass fibers	Needled glass fiber mat
Glass fiber grammage	Woven glass fibers mat 200 gr 300 gr
Resin	Two component polyesters Epoxy resin
Location of glass fiber coating on sandwich panel	One top layer and one bottom layer (symmetrical) One layer bottom (asymmetrical) One layer top (asymmetrical)

طرح آزمایش‌ها

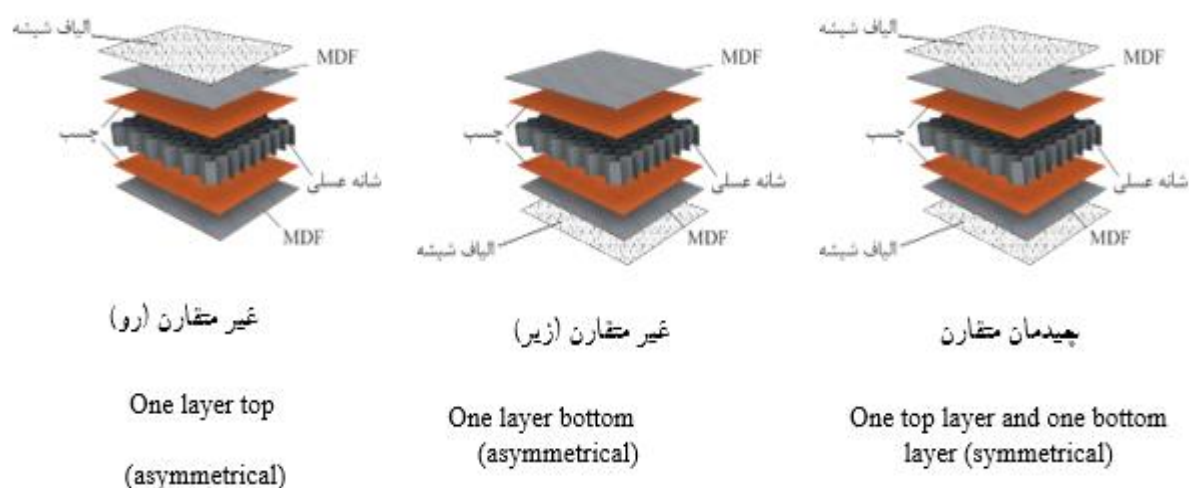
طرح آزمایش به صورت فاکتوریل کامل شامل چهار عامل (نوع الیاف شیشه، گرماژ الیاف، نوع رزین و آرایش لایه‌های تقویتی) در ۲۴ تیمار و سه تکرار طراحی شد.

مراحل ساخت نمونه‌ها

دسته‌بندی پانل‌های ساندویچی

پانل‌ها بر اساس نحوه قرارگیری لایه‌های تقویتی در سه گروه متقارن (تقویت در هر دو سطح)، غیرمتقارن با تقویت در

سطح زیرین و غیرمتقارن با تقویت در سطح رویی دسته‌بندی شدند.



شکل ۳- آرایش متقارن لایه‌های تقویتی

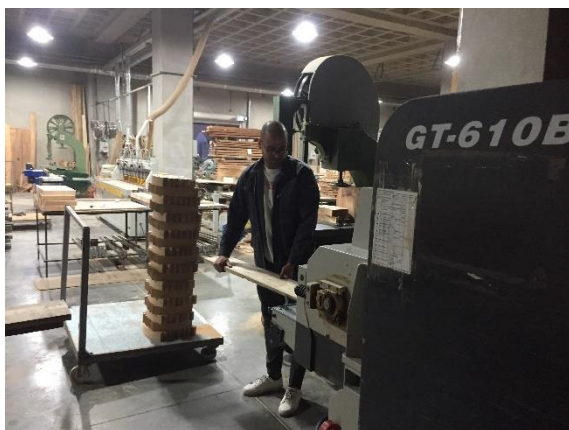
Figure 3. Symmetrical arrangement of reinforcement layers

ساخت پانل‌های ساندویچی

در ساخت پانل‌ها، ورق‌های MDF به‌عنوان رویه و کاغذ شانه‌عسلی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر به‌عنوان هسته استفاده شد. ابتدا یک قاب چوبی برای تثبیت هسته ساخته شد و کاغذ شانه‌عسلی درون آن قرار گرفت (شکل ۴).

محاسبات ابعادی و برآورد تعداد نمونه‌ها

بر اساس تعداد تیمارها و تکرار آزمون‌ها، دو گروه نمونه با ابعاد ۸۵۰×۵۳۰ میلی‌متر (نمونه ۱۷) و ۸۵۰×۴۰۰ میلی‌متر (نمونه ۹) در نظر گرفته شد. به‌منظور کاهش پرت مواد و بهینه‌سازی فرآیند برش، سه پانل مادر با ابعاد ۲۴۴۰×۱۸۳۰ میلی‌متر تولید شد که امکان برش تمامی نمونه‌ها با حداقل ضایعات را فراهم می‌کرد.



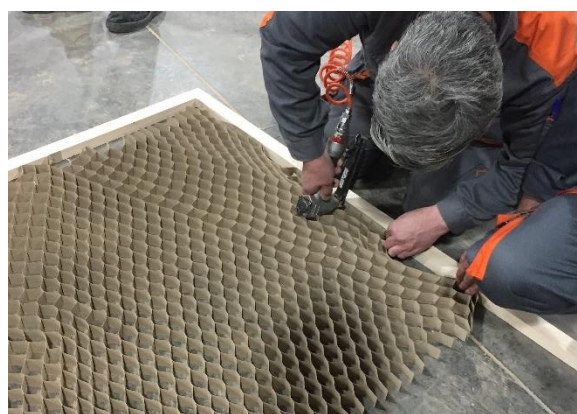
Frame planning



Preliminary cutting of wood for frame construction



Frame prepared for pressing



Placing honeycomb paper inside the frame

شکل ۴- مراحل آماده‌سازی قاب و جانمایی هسته شانه‌عسل

Figure 4. Steps for preparing the frame and placing the honeycomb

گرفتند تا پیوستگی یکنواخت بین لایه‌ها حاصل شود. سپس پانل‌های ساخته‌شده مطابق ابعاد مورد نیاز نمونه‌ها برش داده شدند (شکل ۵).

پرس و برش اولیه

پس از اتصال MDF به هسته با چسب اوره-فرمالدهید، پانل‌ها تحت شرایط یکسان دما و زمان در دستگاه پرس قرار



شکل ۵- پانل‌های ساندویچی برش خورده

Figure 5. Cut sandwich panels

سطح نمونه‌ها اعمال شده و الیاف شیشه بر روی آن لمینیت شدند. توزیع یکنواخت رزین به منظور جلوگیری از تشکیل نواحی خشک یا غنی از رزین به دقت کنترل شد (شکل ۶)

اعمال الیاف شیشه و رزین

پس از کدگذاری نمونه‌ها مطابق طرح آزمایش‌ها، الیاف شیشه بر اساس ابعاد مورد نیاز هر آزمون برش داده شد. رزین‌ها پس از توزین دقیق، به صورت دستی با قلم‌مو روی



Applying glass fibers with resin



Glass fiber cutting

شکل‌های ۶- برش الیاف شیشه و فرآیند لمیناسیون دستی

Figures 6. Glass fiber cutting and manual lamination process

عمل‌آوری و برش نهایی نمونه‌ها

پس از اعمال لایه‌های تقویتی، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در شرایط کارگاهی و دمای محیط نگهداری شدند تا فرآیند

پخت و پلیمریزاسیون رزین کامل شود. سپس نمونه‌ها مطابق استانداردهای مربوطه به ابعاد نهایی آزمون‌ها برش داده شده و کدگذاری شدند (شکل ۷).



شکل ۷- نمونه‌های آماده‌شده برای انجام آزمون‌ها

Figure 7. Samples prepared for testing

آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی

آزمون‌های انجام‌شده شامل تعیین مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته خمشی، مقاومت به فشار لبه‌ای، مقاومت به فشار سطحی، تنش برشی لایه میانی و دانسیته ظاهری بود که همگی مطابق استانداردهای ASTM انجام شدند. محل انجام آزمون خمش در مؤسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور و سایر آزمون‌ها در آزمایشگاه مکانیک گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران انجام شد.

آزمون خمش

آزمون خمش مطابق استاندارد ASTM D7249 بر روی نمونه‌هایی با ابعاد 820×100 میلی‌متر و طول دهانه ۷۲۰ میلی‌متر انجام شد. سرعت بارگذاری ۶ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم شد و آزمون‌ها با دستگاه یونیورسال تستینگ انجام گردید.

آزمون مقاومت به فشار لبه‌ای

آزمون مقاومت به فشار لبه‌ای مطابق استاندارد ASTM C364 روی نمونه‌هایی با ابعاد 70×100 میلی‌متر و با سرعت

بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. آزمون مقاومت به فشار سطحی مطابق استاندارد ASTM C365 روی نمونه‌هایی با ابعاد 50×50 میلی‌متر انجام شد.

آزمون تنش برشی و تنش فشاری سطحی در خمش سه‌نقطه‌ای

این آزمون مطابق استاندارد ASTM C393 روی نمونه‌هایی با ابعاد 75×200 میلی‌متر انجام شد.

دانسیته ظاهری

دانسیته ظاهری پانل‌ها مطابق استاندارد ASTM C271 بر روی نمونه‌هایی با ابعاد 100×100 میلی‌متر اندازه‌گیری شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

برای سازمان‌دهی داده‌ها، نتایج آزمون‌ها در نرم‌افزار Excel ثبت و میانگین‌گیری شد. تحلیل آماری بر اساس طرح فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار عامل، ۲۴ تیمار و سه تکرار انجام گردید. تجزیه و تحلیل واریانس و

لایه‌های تقویتی بر خواص مکانیکی و فیزیکی پانل‌ها و همچنین تبیین سازوکارهای مؤثر بر رفتار مکانیکی این سازه‌های ساندویچی است.

مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن در نرم‌افزار SPSS انجام شد تا اثرهای مستقل و متقابل عوامل متغیر بر خواص فیزیکی و مکانیکی پانل‌ها مشخص گردد.

نتایج

نتایج نمونه‌های آزمونی

در این پژوهش، نتایج حاصل از آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی به منظور ارزیابی عملکرد پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه مورد تحلیل قرار گرفت. هدف اصلی این بخش، بررسی اثر متغیرهای مختلف شامل نوع الیاف شیشه، گراماژ الیاف، نوع رزین و محل قرارگیری

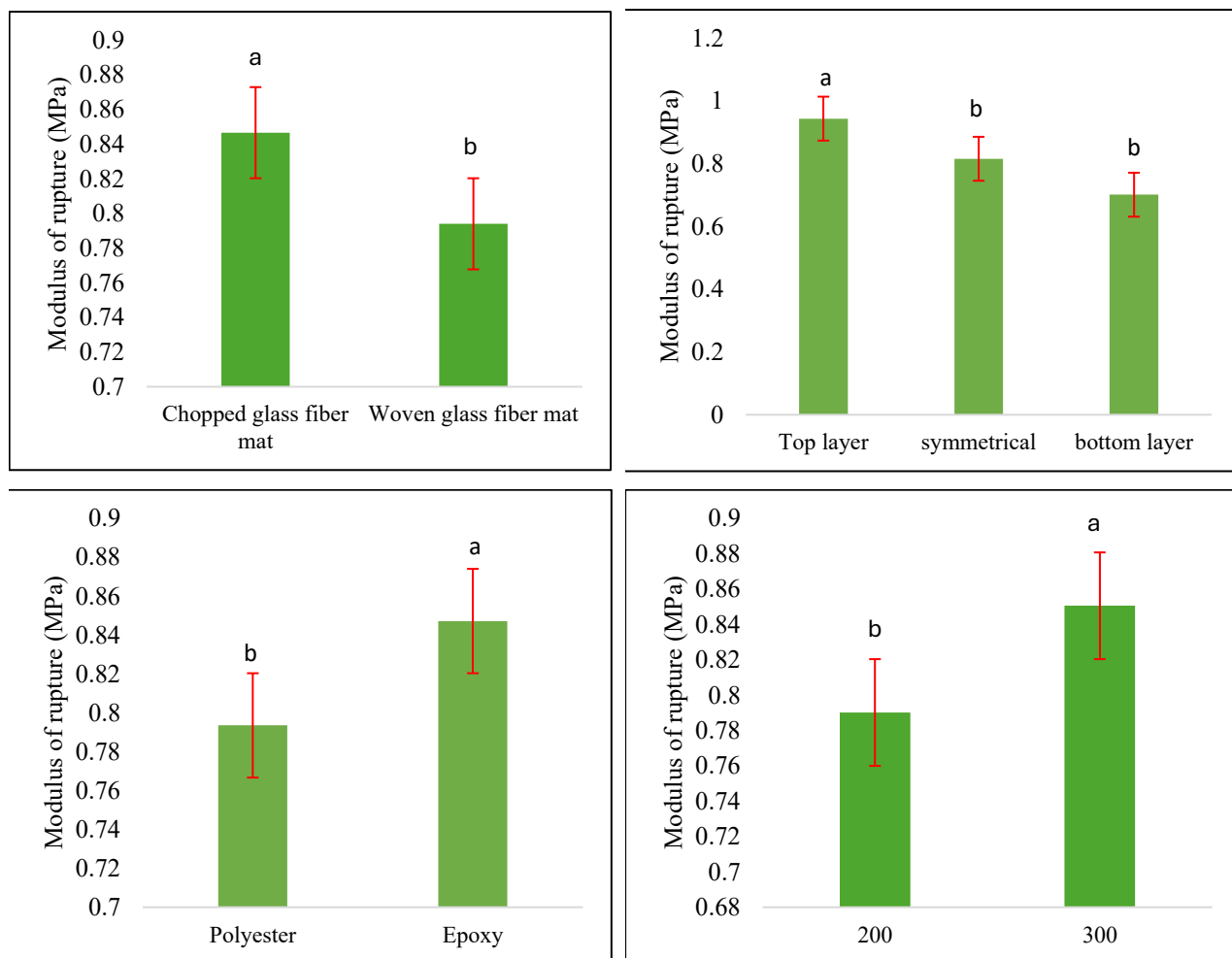
مدول گسیختگی (MOR)

نتایج تحلیل واریانس (جدول ۴ و شکل ۸) نشان داد که اثر مستقل نوع الیاف شیشه، نوع رزین، گراماژ الیاف و محل قرارگیری لایه‌های تقویتی بر مدول گسیختگی معنادار است. از سوی دیگر اثر متقابل فاکتورهای مختلف، به جز نوع الیاف-گراماژ- محل قرارگیری، نیز بر مقاومت خمشی معنادار است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس برای مقاومت خمشی

Table 4 - Results of analysis of variance for Modulus of Rupture

variables	Degrees of freedom	sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	0.0498	0.0498	3.08	0.0856
B-Grammage	1	0.0656	0.0656	4.06	0.0494
C-resin	1	0.0519	0.0519	3.21	0.0794
D- Covering area	2	0.7061	0.3531	21.86	0.0001
AB	1	0.1290	0.1290	7.99	0.0068
AC	1	0.5582	0.5582	34.57	0.0001
AD	2	0.2631	0.1315	8.15	0.0009
BC	1	0.4308	0.4308	26.68	0.0001
BD	2	0.1167	0.0583	3.61	0.0346
CD	2	0.2131	0.1065	6.60	0.0029
ABC	1	0.5047	0.5047	31.26	0.0001
ABD	2	0.0882	0.0441	2.73	0.0754
ACD	2	0.3593	0.1797	11.13	0.0001
BCD	2	0.2681	0.1341	8.30	0.0008
ABCD	2	0.2332	0.1166	7.22	0.0018



شکل ۸- تأثیر مستقل متغیرها بر مدول گسیختگی

Figure 8. Independent effect of variables on modulus of rupture

مربوط به پوشش لایه پایینی (۰/۷ MPa) بود که افزایشی ۳۴/۳ درصدی را نشان می‌دهد.

مدول الاستیسیته

نتایج نشان داده شده در جدول ۵ نشان‌دهنده اثر مستقل و متقابل فاکتورهای مختلف می‌باشد. همانند مقاومت خمشی، اثر متقابل فاکتورهای مختلف، به جز نوع الیاف-گرمایز-محل قرارگیری، بر مدول الاستیسیته معنادار است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین MOR برای الیاف حصیری (۰/۷۹ MPa) حدود ۷/۶ درصد کمتر از الیاف سوزنی (۰/۸۴ MPa) بود. از سوی دیگر، افزایش گرمایز از ۲۰۰ (۰/۷۹ MPa) به ۳۰۰ گرم بر مترمربع (۰/۸۵ MPa) موجب افزایش حدود ۷/۵ درصدی مدول گسیختگی شد. همچنین رزین اپوکسی (۰/۸۵ MPa) نسبت به پلی‌استر (۰/۷۹ MPa) موجب افزایش حدود ۶/۵ درصدی مدول الاستیسیته شد. نهایتاً بیشترین مقدار مدول گسیختگی مربوط به پوشش لایه بالایی (۰/۹۴ MPa) و کمترین مقدار

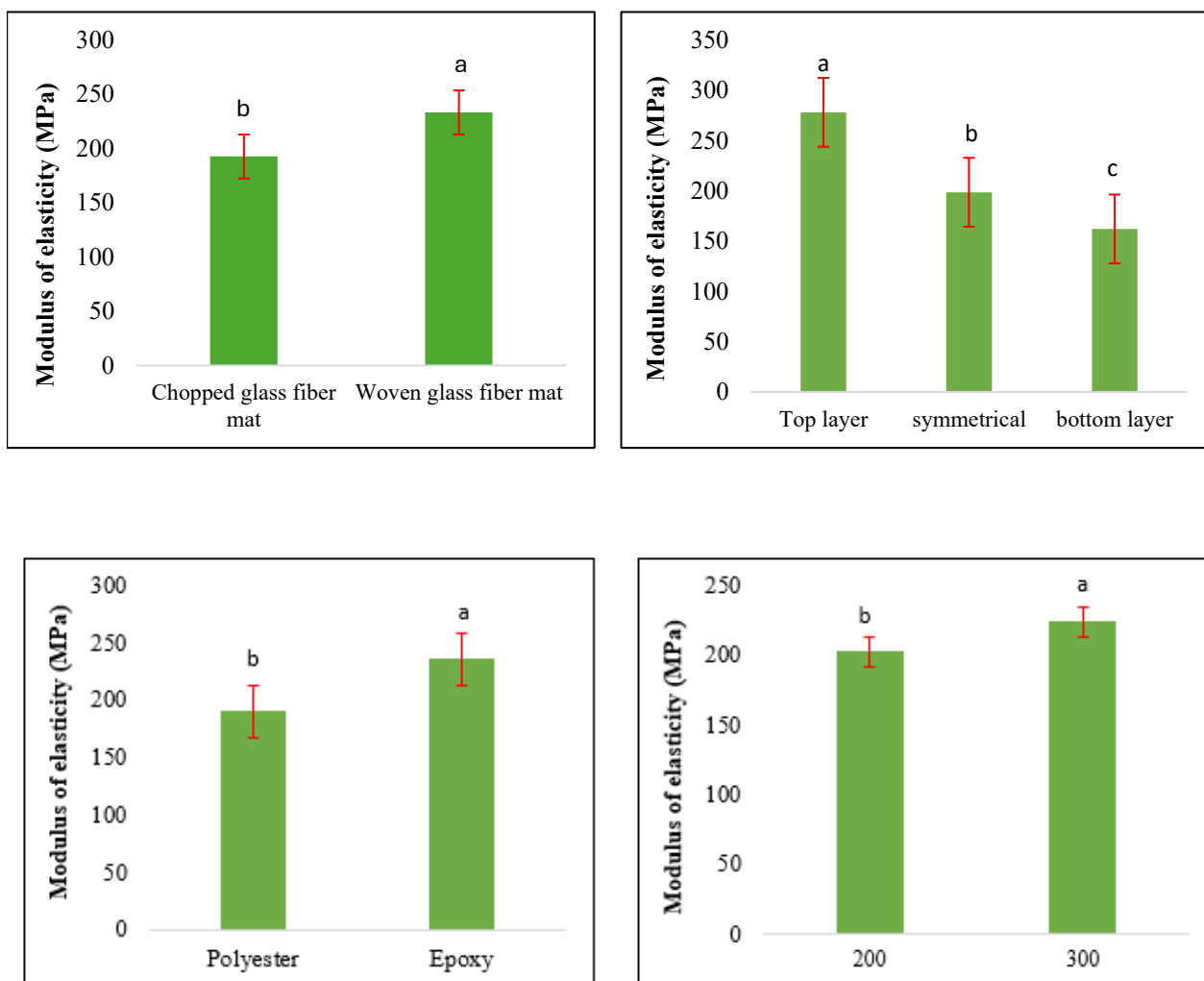
جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس برای مدول الاستیسیته

Table 5 - Results of analysis of variance for Modulus of Elasticity

Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	0.0036	0.0036	0.2640	0.6098
B-Grammage	1	0.0092	0.0092	0.6802	0.4136
C-resin	1	0.0439	0.0439	3.26	0.0771
D- Covering area	2	0.3301	0.1650	12.26	0.0001
AB	1	0.1027	0.1027	7.63	0.0081
AC	1	0.2928	0.2928	21.76	0.0001
AD	2	0.2409	0.1205	8.95	0.0005
BC	1	0.7100	0.7100	52.76	0.0001
BD	2	0.0876	0.0438	3.26	0.0472
CD	2	0.3971	0.1986	14.75	0.0001
ABC	1	0.4716	0.4713	35.05	0.0001
ABD	2	0.0140	0.0070	0.5192	0.5983
ACD	2	0.2185	0.1093	8.12	0.0009
BCD	2	0.1372	0.0686	5.10	0.0098
ABCD	2	0.1676	0.0838	6.23	0.0039

است. همچنین رزین اپوکسی (۲۳۵/۸۶ MPa) نسبت به پلی‌استر (۱۹۰/۳ MPa) موجب افزایش حدود ۲۴ درصدی مدول الاستیسیته شد. نهایتاً بیشترین مقدار MOE مربوط به پوشش لایه بالایی (۲۷۸/۴ MPa) و کمترین مقدار مربوط به پوشش لایه پایینی (۱۶۲/۱۲ MPa) بود که افزایشی تقریباً ۷۲ درصدی را برای لایه بالایی نشان می‌دهد.

همچنین شکل ۹ نشان‌دهنده این است که میانگین MOE برای الیاف حصیری (۲۳۳/۳۶ MPa) حدود ۲۴/۹ درصد بیشتر از الیاف سوزنی (۱۹۲/۸ MPa) بود. از سوی دیگر، افزایش گرماژ از ۲۰۰ (۲۰۲/۳۸ MPa) به ۳۰۰ گرم بر مترمربع (۲۲۳/۷۷ MPa) موجب افزایش حدود ۱۰/۶ درصدی مدول الاستیسیته شد که نشان‌دهنده نقش میزان تقویت سطحی در افزایش سختی خمشی پانل‌های ساندویچی



شکل ۹- تأثیر مستقل متغیرها بر مدول الاستیسیته

Figure 9 - Independent effect of variables on the modulus of elasticity

مقاومت برشی لایه میانی
 به جز نوع رزین - محل قرارگیری، بر مقاومت برشی لایه میانی
 معنادار نیست.
 با توجه به جدول ۶ می‌توان دریافت که برخلاف مقاومت
 خمشی و مدول الاستیسیته، اثر متقابل فاکتورهای مختلف،

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس برای مقاومت برشی لایه میانی

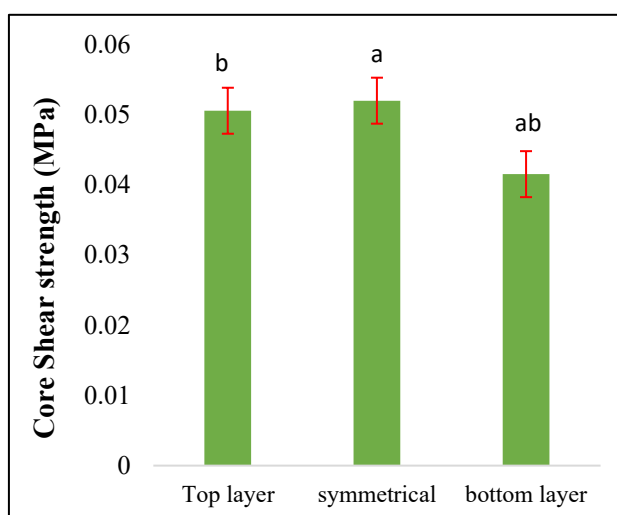
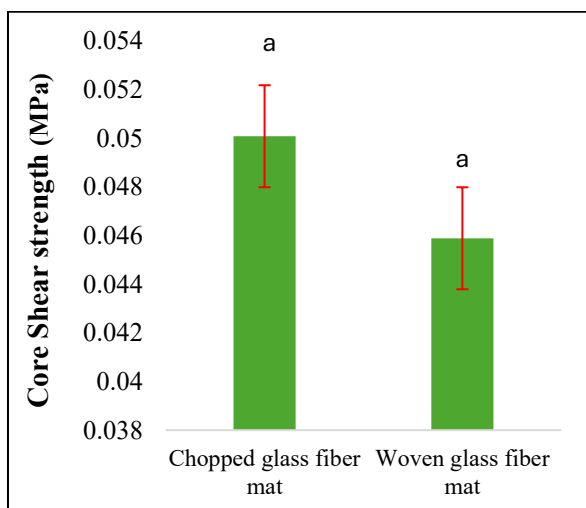
Table 6 - Results of analysis of variance for core shear strength

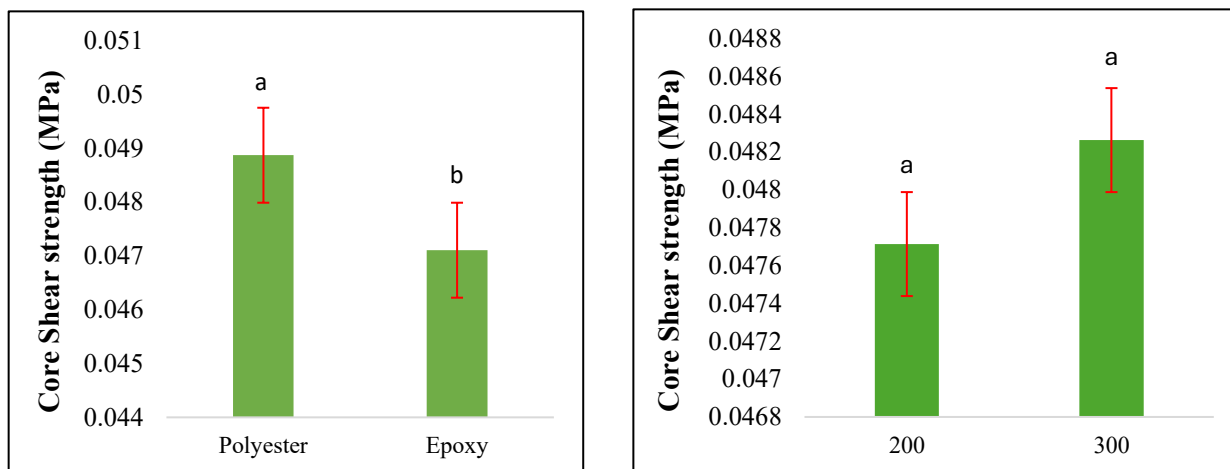
Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	0.0003	0.0003	6.66	0.130
B-Grammage	1	5.443E-06	5.443E-06	0.1144	0.7367
C-resin	1	0.0001	0.0001	1.18	0.02831

Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
D- Covering area	2	0.0015	0.0008	16.22	0.0001
AB	1	0.0003	0.0003	5.27	0.261
AC	1	0.0000	0.0000	0.4336	0.5134
AD	2	0.0005	0.0002	4.75	0.131
BC	1	1.823E-06	1.823E-06	0.0383	0.8456
BD	2	0.0000	0.0000	0.1144	0.8921
CD	2	0.0002	0.0001	2.01	0.01457
ABC	1	6.645E-06	6.645E-06	0.1397	0.7102
ABD	2	0.0009	0.0004	9.25	0.4215
ACD	2	0.0001	0.0001	1.07	0.3522
BCD	2	0.0001	0.0001	0.8422	0.4370
ABCD	2	0.0002	0.0000	1.72	0.1894

بر مترمکعب (۰/۰۴۸ MPa)، موجب افزایش حدود ۲ درصدی مقاومت برشی شد. رزین اپوکسی (۰/۰۴۷ MPa) نسبت به پلی استر (۰/۰۴۹ MPa) موجب افزایش حدود ۴/۳ درصدی مقاومت برشی شد. در پایان بیشترین مقدار مقاومت برشی مربوط به پوشش متقارن (۰/۰۵۲ MPa)، حدود ۲۶/۸ درصد بیشتر از لایه پایینی و کمترین مقدار مربوط به پوشش لایه پایینی (۰/۰۴۱ MPa) بود.

نتایج آزمون مقاومت برشی نشان داد که نوع رزین و محل قرارگیری الیاف شیشه اثر معنادار بر مقاومت برشی دارند، درحالی که اثر مستقل گرماژ الیاف و نوع الیاف از نظر آماری معنادار نبود. همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود میانگین مقاومت برشی برای الیاف حصیری (۰/۰۴۶ MPa) حدود ۸/۶ درصد بیشتر از الیاف سوزنی (۰/۰۵ MPa) بود. همچنین افزایش گرماژ از ۲۰۰ (۰/۰۴۷ MPa) به ۳۰۰ گرم





شکل ۱۰- تأثیر مستقل متغیرها بر تنش برشی لایه میانی

Figure 10. Independent effect of variables on the shear stress of the middle layer

تمامی فاکتورها، به جز نوع فیبر-رزین، نوع فیبر- محل قرارگیری و نوع فیبر- رزین- محل قرارگیری، بر تنش فشاری سطحی معنادار نمی‌باشد.

تنش فشاری سطحی
نتایج تحلیل آماری در جدول ۷ نشان‌دهنده معناداری اثر مستقل نوع رزین و نوع فیبر است، در حالی که اثر متقابل برای

جدول ۷- نتایج تجزیه واریانس برای تنش فشاری سطحی

Table 7 - Results of analysis of variance for Flatwise compressive strength

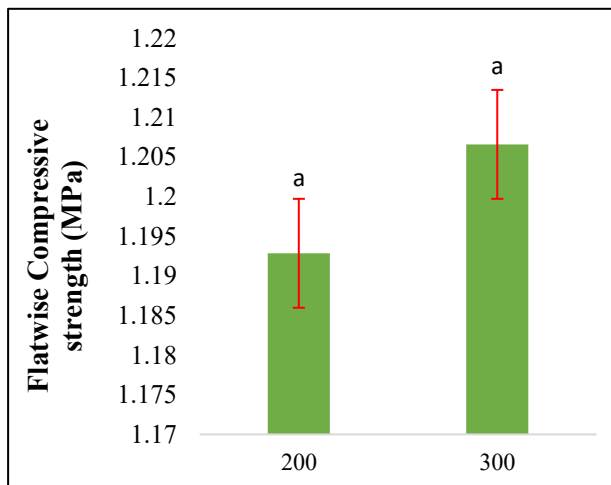
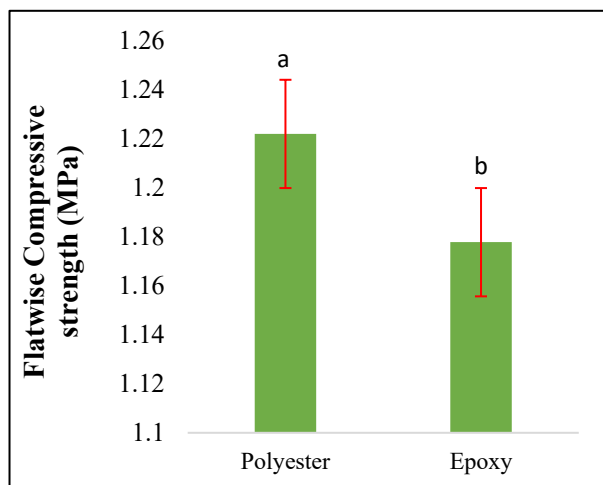
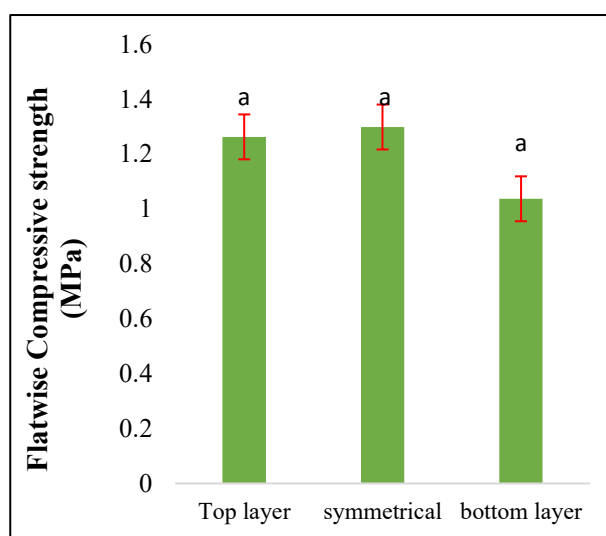
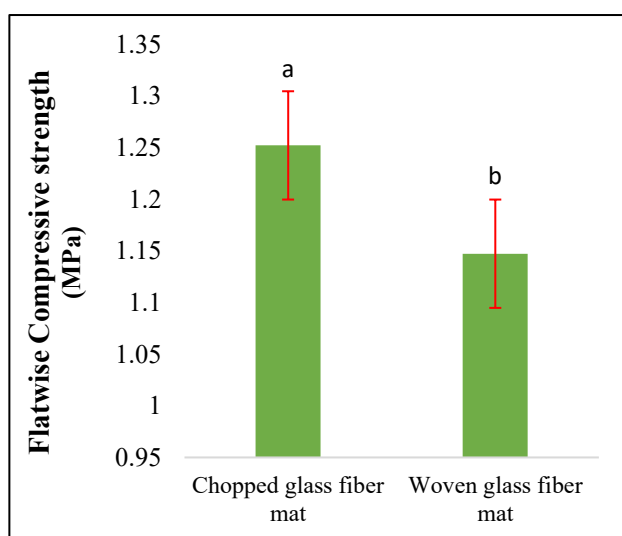
Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	0.1980	0.1980	6.66	0.0130
B-Grammage	1	0.0034	0.0034	0.1144	0.7367
C-resin	1	0.0350	0.0350	1.18	0.0283
D- Covering area	2	0.9648	0.4824	16.22	0.062
AB	1	0.567	0.567	5.27	0.261
AC	1	0.0129	0.0129	0.4336	0.0413
AD	2	0.2826	0.1413	4.75	0.0131
BC	1	0.0011	0.0011	0.0383	0.8456
BD	2	0.0068	0.0034	0.1144	0.8922
CD	2	0.1193	0.0596	2.01	0.1457
ABC	1	0.0042	0.0042	0.1397	0.7102
ABD	2	0.5504	0.2752	9.25	0.0541
ACD	2	0.0634	0.0317	1.07	0.0352
BCD	2	0.0501	0.0250	0.8423	0.4370
ABCD	2	0.1025	0.0512	1.72	0.1894

سطح پانل با الیاف شیشه موجب افزایش معنادار مقاومت به

نتایج آزمون تنش فشاری سطحی نشان داد که تقویت

تنش فشاری شد. رزین اپوکسی ($1/18$ MPa) نسبت به پلی‌استر ($1/22$ MPa) موجب افزایش حدود $3/4$ درصدی تنش فشاری شد. همچنین بیشترین مقدار تنش فشاری مربوط به پوشش متقارن ($1/3$ MPa) و کمترین مقدار مربوط به پوشش لایه پایینی ($1/04$ MPa) بود که یک افزایش ۲۵ درصدی را نشان می‌دهد.

فرورفتگی موضعی می‌شود. اثر مستقل نوع رزین، محل پوشش الیاف و نوع الیاف بر تنش فشاری سطحی معنادار گزارش شد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود میانگین تنش فشاری برای الیاف حصیری ($1/15$ MPa) حدود $8/7$ درصد بیشتر از الیاف سوزنی ($1/25$ MPa) بود. همچنین افزایش گرماژ از ۲۰۰ ($1/19$ MPa) به ۳۰۰ گرم بر مترمکعب ($1/21$ MPa)، موجب افزایش حدود $1/6$ درصدی



شکل ۱۱- تأثیر مستقل متغیرها بر تنش فشاری سطحی

Figure 11 - Independent effect of variables on surface compressive stress

مقاومت به فشار لبه‌ای
 نتایج آزمون واریانس مقاومت به فشار لبه‌ای نشان داد
 (جدول ۸) که اثر مستقل تمامی متغیرها به‌جز گراماژ بر
 مقاومت به فشار لبه‌ای معنادار است. ولی اثر متقابل این
 فاکتورها فقط در نوع فیبر-رزین، نوع فیبر-محل قرارگیری،
 رزین-محل قرارگیری، نوع فیبر-رزین-محل قرارگیری و
 نوع فیبر-گراماژ-رزین-محل قرارگیری بر مقاومت بر
 فشار لبه‌ای معنادار است.

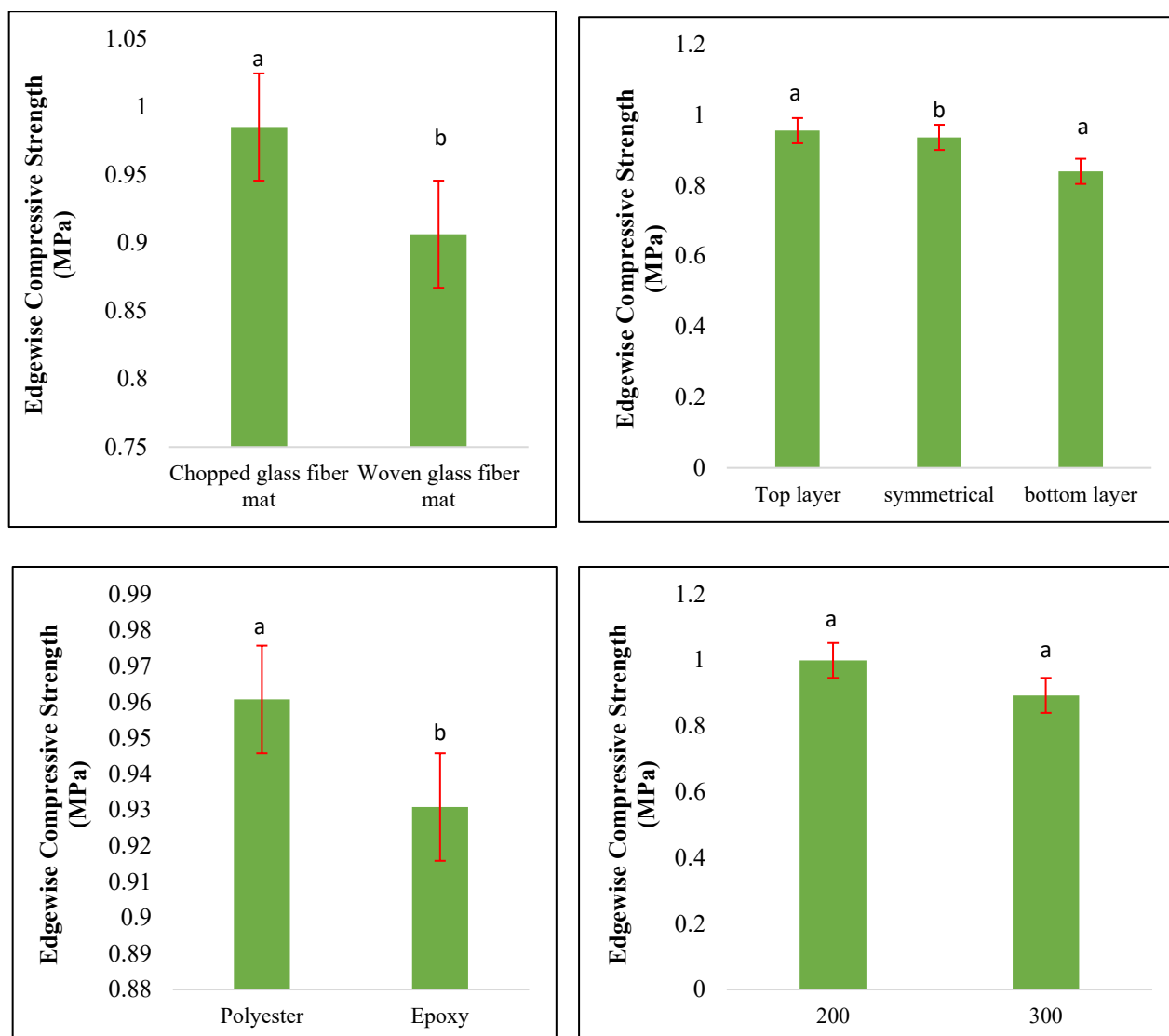
جدول ۸- نتایج تجزیه واریانس برای مقاومت به فشار لبه‌ای

Table 8 - Results of analysis of variance for Edgewise compressive strength

Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	0.0744	0.0744	3.31	0.0481
B-Grammage	1	0.1352	0.1352	6.02	0.1981
C-resin	1	0.0108	0.0108	0.4788	0.0440
D- Covering area	2	0.0043	0.0021	0.1902	0.0365
AB	1	0.2294	0.2294	10.21	0.3123
AC	1	0.0928	0.0928	4.13	0.0405
AD	2	0.0013	0.00065	0.0593	0.0492
BC	1	0.0145	0.0145	0.6432	0.4285
BD	2	0.0463	0.0231	2.06	0.1610
CD	2	0.0176	0.0088	0.7824	0.0383
ABC	1	0.0056	0.0056	0.2494	0.6209
ABD	2	0.1595	0.07975	7.10	0.5120
ACD	2	0.1942	0.0971	8.64	0.0061
BCD	2	0.0423	0.02115	1.88	0.1798
ABCD	2	0.3374	0.1687	15.02	0.0481

موجب کاهش حدود ۱۱/۲ درصدی مقاومت به فشار لبه‌ای
 شد. رزین اپوکسی (۰/۹۳ MPa) نسبت به پلی‌استر (MPa)
 ۰/۹۶) موجب کاهش حدود ۳/۲ درصدی مقاومت به فشار
 لبه‌ای شد. در پایان بیشترین مقدار مقاومت به فشار لبه‌ای
 مربوط به لایه بالایی (۰/۹۶ MPa) و کمترین مقدار مربوط
 به پوشش لایه پایینی (۰/۸۴ MPa) بود که یک افزایش
 ۱۴/۳ درصدی را نشان می‌دهد.

تقویت لبه‌ها با الیاف شیشه تأثیر چشمگیری برافزایش
 ظرفیت تحمل بار در جهت عمود بر صفحه پانل دارد. تحلیل
 واریانس نشان داده شده در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که اثر
 محل پوشش، نوع رزین و نوع الیاف معنادار گزارش شد.
 همان‌گونه که مشاهده می‌شود میانگین مقاومت به فشار لبه‌ای
 برای الیاف حصیری (۰/۹۱ MPa) حدود ۷/۸ درصد کمتر از
 الیاف سوزنی (۰/۹۸ MPa) بود. همچنین افزایش گراماژ از
 ۲۰۰ (۰/۹۹ MPa) به ۳۰۰ گرم بر مترمکعب (۰/۸۹ MPa)،



شکل ۱۲- تأثیر مستقل متغیرها بر مقاومت به فشار لبه‌ای

Figure 12. Independent effect of variables on edge pressure resistance

دانشیته

متغیرهای نوع فیبر-گزاماژ، نوع فیبر- محل قرارگیری، گزاماژ- محل قرارگیری، نوع رزین- محل قرارگیری، نوع فیبر- گزاماژ- محل قرارگیری و نوع فیبر- گزاماژ- نوع رزین- محل قرارگیری بر دانشیته معنادار است.

جدول ۹ نتایج تحلیل آماری تأثیر عوامل مختلف بر دانشیته محصول نهایی را نشان می‌دهد. اثر مستقل تمامی متغیرها به جز نوع رزین بر دانشیته معنادار است. اثر متقابل

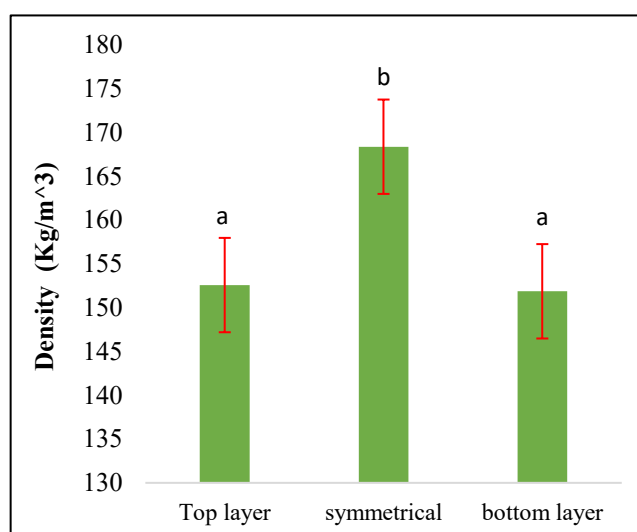
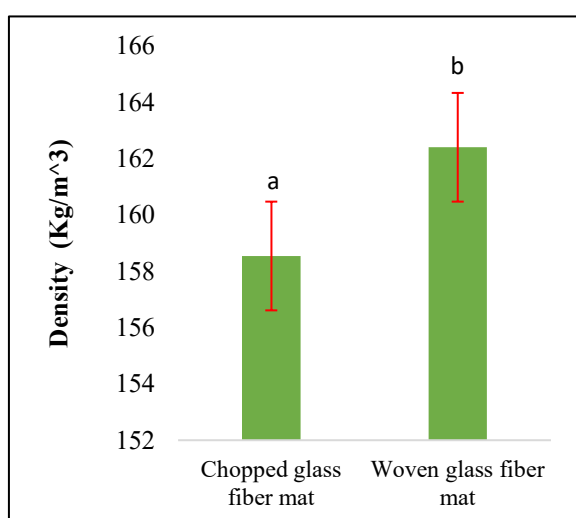
جدول ۹- نتایج تجزیه واریانس برای دانسیته

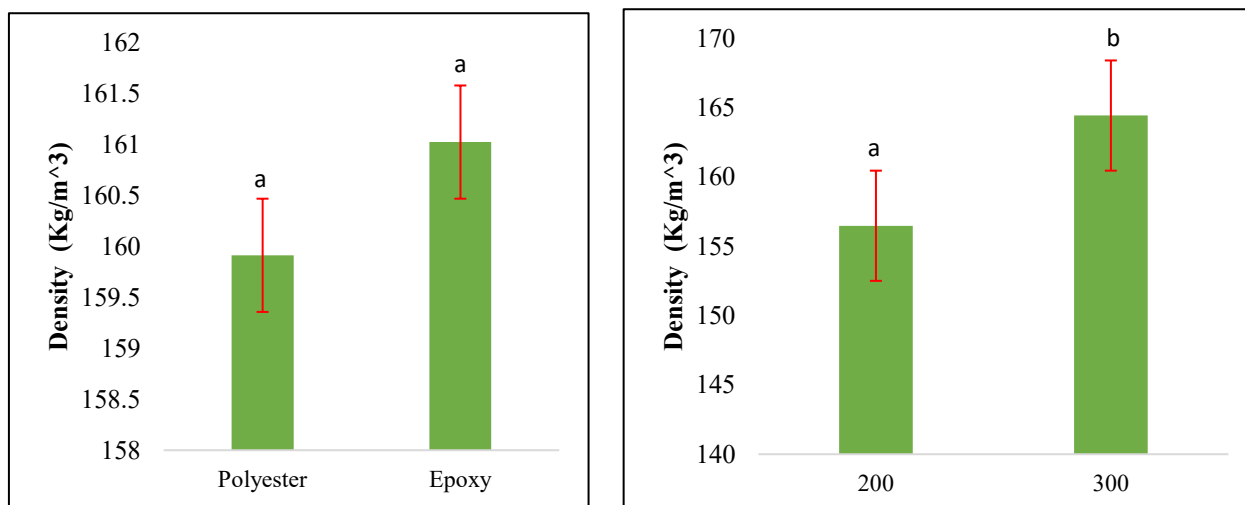
Table 9 - Results of analysis of variance for Density

Variables	Degrees of freedom	Sum of squares	Mean square	F	sig
A-fiber type	1	119.2	119.2	17.38	0.0001
B-Grammage	1	506.15	506.15	73.84	0.0001
C-resin	1	9.88	9.88	1.44	0.2359
D- Covering area	2	4.15E+05	2.075E+05	30268.41	0.0001
AB	1	130.94	130.94	19.10	0.0001
AC	1	15.12	15.12	2.21	0.1441
AD	2	81.45	40.73	5.94	0.0050
BC	1	4.89	4.89	0.7127	0.4027
BD	2	253.53	126.76	18.49	0.0001
CD	2	69.72	34.86	5.09	0.0099
ABC	1	3.26	3.26	0.4760	0.4936
ABD	2	113.07	56.53	8.25	0.0008
ACD	2	8.70	4.35	0.6347	0.5345
BCD	2	8.02	4.01	0.5852	0.5609
ABCD	2	198.94	99.47	14.51	0.0001

رزین اپوکسی ($161/02 \text{ kg/m}^3$) نسبت به پلی‌استر ($159/91 \text{ kg/m}^3$) موجب افزایش حدود ۰/۷ درصدی دانسیته شد. در پایان بیشترین دانسیته مربوط به لایه متقارن ($168/36 \text{ kg/m}^3$) و کمترین مقدار مربوط به پوشش لایه پایینی ($151/86 \text{ kg/m}^3$) بود که افزایشی ۱۰/۸ درصدی را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که در جدول و شکل ۱۳ مشاهده می‌شود میانگین دانسیته برای الیاف حصیری ($162/39 \text{ kg/m}^3$) حدود ۲/۴ درصد بیشتر از الیاف سوزنی ($160/54 \text{ kg/m}^3$) بود. همچنین افزایش گرماز از ۲۰۰ ($156/49 \text{ kg/m}^3$) به ۳۰۰ گرم بر مترمکعب ($164/44 \text{ kg/m}^3$) موجب افزایش حدود ۵ درصدی دانسیته شد.





شکل ۱۳- تأثیر مستقل متغیرها بر دانسیته

Figure 13 - Independent effect of variables on density

بحث

نتایج به دست آمده در مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نشان می دهد که این مشخصه ها برای پانل های ساندویچی نه تنها تابع میزان تقویت سطحی است، بلکه به شدت به کیفیت پیوند بین رزین و الیاف و محل قرارگیری لایه های تقویتی وابسته است. همان گونه که مشاهده شد مقاومت های پانل های ساخته شده با الیاف حصیری بالاتر از الیاف سوزنی بود که این اختلاف را می توان به توزیع یکنواخت تر تنش در ساختار بافت دار الیاف حصیری نسبت داد که منجر به افزایش سختی خمشی سازه می شود. از سوی دیگر با استفاده از چسب اپوکسی شاهد افزایش مقاومت های پانل بودیم که این افزایش را می توان به چسبندگی بهتر اپوکسی به الیاف شیشه و نفوذ مؤثرتر آن در ساختار الیاف نسبت داد که انتقال تنش را بهبود می بخشد و اگر لایه تقویت کننده در ناحیه کششی قرار بگیرد، بیشترین نقش را در افزایش سختی خمشی سازه دارد. در مقابل، تقویت لایه فشاری به تنهایی یا تقویت متقارن، به دلیل کاهش انعطاف پذیری کلی سازه و تغییر مسیر انتقال تنش، افزایش معناداری در سختی خمشی ایجاد نکرده است. در سازه های ساندویچی، شکست خمشی عمدتاً با گسیختگی لایه کششی آغاز می شود؛ از این رو، تقویت این لایه با الیاف

شیشه موجب افزایش قابل توجه مقاومت نهایی سازه می گردد. با توجه به یافته های به دست آمده در مقاومت برشی لایه میانی، می توان نتیجه گیری کرد که کیفیت پیوند لایه تقویتی با سطح پانل و استحکام فصل مشترک لایه سطحی-هسته، مهم ترین عامل در افزایش مقاومت برشی است. از این رو با توجه به نتایج، رزین پلی استر در مقایسه با رزین اپوکسی، مقاومت برشی بالاتری ایجاد کرد که به چسبندگی قوی تر پلی استر به زیر لایه چوب پایه و نفوذ بهتر آن در بافت الیاف شیشه نسبت داده می شود؛ و در نمونه هایی که تقویت به صورت متقارن انجام شده بود، توزیع یکنواخت تر تنش های برشی در فصل مشترک لایه ها مشاهده شد که موجب افزایش پایداری برشی و کاهش تمرکز تنش در یک سمت پانل گردید.

افزایش تنش فشاری سطحی در نمونه های تقویت شده را می توان به افزایش سختی موضعی لایه های رویی و توزیع بهتر تنش های فشاری روی سطح پانل نسبت داد که این سختی را الیاف سوزنی در مقایسه با الیاف حصیری بهتر بهبود می بخشد. در پانل های ساندویچی بدون تقویت، تمرکز تنش فشاری در ناحیه تماس ابزار بارگذاری با سطح پانل منجر به فرورفتگی سریع هسته لانه زنبوری می شود؛ در حالی که لایه تقویتی الیاف شیشه به عنوان یک پوسته سخت عمل کرده و تنش را در سطح

گسترده‌تری توزیع می‌کند. در رابطه با نوع چسب هم نمونه‌های لمینت‌شده با رزین پلی‌استر کمترین میزان تغییر شکل دائمی پس از بارگذاری را نشان دادند که این موضوع بیانگر پایداری ابعادی بالاتر و مقاومت بهتر در برابر آسیب‌های موضعی در کاربردهای مبلمان صفحه‌ای است.

مقاومت به فشار لبه‌ای بالاتر نمونه‌های تقویت‌شده را می‌توان به جلوگیری از کمانش موضعی دیواره‌های هسته لانه‌زنبوری در ناحیه لبه نسبت داد. البته الیاف شیشه سوزنی نقش سازنده‌تری در کاهش این کمانش در مقایسه با الیاف حصیری شکل داشتند. در نمونه‌های فاقد تقویت، شکست اغلب با خردشدگی سریع هسته در نزدیکی لبه‌ها آغاز می‌شود، درحالی‌که وجود لایه تقویتی به‌ویژه در لایه بالایی موجب افزایش یکپارچگی ساختاری لبه‌ها و تأخیر در شروع ناپایداری موضعی می‌گردد. از دیدگاه کاربردی، بهبود مقاومت به فشار لبه‌ای برای قطعات مبلمان صفحه‌ای مانند صفحات جانبی کمد، بدنه کابینت و قطعات عمودی که تحت بارهای فشاری موضعی قرار می‌گیرند، اهمیت ویژه‌ای دارد و استفاده از پانل‌های ساندویچی تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌تواند دوام سازه‌ای این قطعات را به‌طور محسوسی افزایش دهد.

یافته‌های مربوط به دانسیته نیز تأکید می‌کنند که الیاف حصیری به دلیل دانسیته بالاتر، لایه تقویتی متقارن نیز به دلیل داشتن دانسیته بالاتر موجب افزایش دانسیته محصول نهایی می‌شوند. همچنین این یافته‌ها نشان داد که گرماژ به‌طور مستقیم بر دانسیته تأثیر دارد و افزایش گرماژ می‌تواند موجب افزایش دانسیته مواد شود.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که پانل‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه توانسته‌اند در بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نسبت به نمونه‌های بدون تقویت، بهبود قابل توجهی ایجاد کنند که این موضوع ظرفیت بالای این مواد را برای استفاده به‌عنوان مصالحی پیشرفته و کارآمد در صنعت مبلمان نشان می‌دهد.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استفاده از الیاف شیشه موجب بهبود استحکام خمشی و افزایش مدول الاستیسیته در

نمونه‌های تقویت‌شده می‌شود. استفاده از لایه‌های GFRP در سطوح پانل‌های ساندویچی باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های وارد شده، کاهش تنش‌های موضعی و جلوگیری از تغییر شکل‌های ناخواسته در پانل‌ها گردید. این ویژگی به‌ویژه در طراحی و تولید مبلمان‌هایی که تحت بارهای مکرر یا وزن‌های زیاد قرار دارند، حائز اهمیت است. بهبود استحکام خمشی این پانل‌ها نشان‌دهنده توانایی آن‌ها در مقاومت در برابر نیروهای خمشی است که در برابر فشارهای ناشی از نشست یا فشارهای مکانیکی در ساختارهای مبلمان به‌ویژه در سطوح، حیاتی است. علاوه بر این، افزایش مدول الاستیسیته، نشان‌دهنده کاهش تغییر شکل‌های دائمی و بهبود پایداری کلی ساختار است که موجب می‌شود این پانل‌ها گزینه‌ای مناسب برای استفاده در محصولات با طول عمر بالا و عملکرد پایدار باشند (Allen, 2013; Bunsell, 2018; El-Wazery et al., 2017; liu et al., 2023; Mohammadi et al., 2022; Wang, 2006; Velmurugan & Manikandan, 2005).

در کنار این، مقاومت فشاری لبه‌ای و سطحی پانل‌های تقویت‌شده نیز در مقایسه با نمونه‌های شاهد افزایش یافته است. این ویژگی به‌ویژه در بخش‌هایی از مبلمان که در معرض بارهای موضعی قرار دارند، مانند لبه‌ها، پایه‌ها یا نقاط اتصال، اهمیت دارد. در این زمینه، بررسی‌ها نشان داد که افزایش مقاومت فشاری در پانل‌های تقویت‌شده موجب افزایش دوام و ایمنی محصول شده و خطر آسیب‌دیدگی در طول عمر مفید مبلمان را کاهش می‌دهد. این ویژگی باعث افزایش کارایی و رضایت مشتری از محصولات می‌شود که در شرایط استفاده روزمره و در برابر آسیب‌های احتمالی مقاوم‌تر خواهند بود (Anderson, and lux, 1985; Amer et al, 2018; Busch, 2004; Fujinami et al., 2004; Motz & Bordia, 2009; Zenkert, 1997; Vinson, 2018).

تحلیل‌های آماری نتایج نشان‌دهنده تأثیر معنادار متغیرهای مختلف از جمله نوع الیاف، گرماژ اعمال‌شده، نوع

بهبود فشار سطحی داشت که نشان‌دهنده انتخاب بهینه این نوع رزین برای تقویت ساختار پانل‌ها است. بررسی‌ها نشان داد که قرارگیری الیاف در لایه بالایی نسبت به سایر لایه‌ها تأثیر بیشتری بر فشار سطحی دارد که این یافته می‌تواند راهگشای طراحی بهینه‌تر ساختار پانل‌ها در صنایع مختلف باشد (Callister & Rethwisch, 2020; Gibson, 2007; Helfen, 2004; Hull & Clyne, 1981; Lee & Neville, 1967; Pothan *et al.*, 2005; Smardzewski & Prekrat, 2019; Zhang & Matinlinna, 2012).

رزین و محل پوشش الیاف شیشه بر مقاومت به فشار سطحی بودند. در این مطالعه، مشاهده شد که الیاف سوزنی نسبت به الیاف حصیری عملکرد بهتری در بهبود خواص مکانیکی داشتند. علاوه بر این، گرماژ کم‌تر (۲۰۰) به‌طور معناداری به افزایش فشار سطحی کمک کرد که این می‌تواند به دلیل توزیع بهتر بار در سطح و کاهش احتمال تغییر شکل‌های موضعی باشد. الیاف سوزنی‌شکل، نسبت به الیاف حصیری، با رزین ترکیب یکنواخت‌تری ایجاد کرده و موجب توزیع بهتر تنش‌ها و کاهش تمرکز تنش در نواحی ضعیف می‌شوند. همچنین، رزین پلی‌استر در مقایسه با رزین اپوکسی تأثیر بیشتری در

References

- Allen, H.G., 2013. Analysis and design of structural sandwich panels: the commonwealth and international library: structures and solid body mechanics division. Elsevier. 129p
- Amer, A., Abdullah, M., Ming, L. & Tahir, M., 2018. Performance and properties of glass fiber and its utilization in concrete. AIP Conf. Proc. 9 November 2018; 2030 (1): 020296. <https://doi.org/10.1063/1.5066937>
- Anderson, E. and lux, B., 1985. Technology and utilization of composites. Warely publication. 126 p
- Bunsell, A.R., 2018. Handbook of properties of textile and technical fibers. Elsevier Science & Technology, Woodhead Publishing. 212p
- Busch, K., 2004. Lightweight Panel Production Gets Real. Surface and Panel seminar, 62-68
- Callister Jr, W.D. & Rethwisch, D.G., 2020. Materials science and engineering: an introduction. John Wiley & Sons publication, 992 p
- El-Wazery, M., El-Elamy, M. & Zoalfakar, S., 2017. Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites. International journal of applied science and engineering, 14(3), 121-131.
- Fujinami, A., Ogata, S. & Shibutani, Y., 2004. Ab initio study of the tensile behavior of single polyimide molecular chain. Polymer, 45(26), 9023-9028. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.10.058>
- Gibson, R.F., 2007. Principles of composite material mechanics. CRC press .162 p
- Helfen, Z., 2004. Tab A cabinet connector from Häfele. <https://www.hafele.com/de/en/product/cabinet-connector-tab-18-with-tensioner/P-00861453/>
- Hull, D. & Clyne, T., 1981. An introduction to composite materials. Cambridge University Press . 211 p
- Lee, H. & Neville, K., 1967. Book Review - Handbook of Epoxy Resins. Industrial & Engineering Chemistry, 59(9): 16-170. <https://doi.org/10.1021/ie51403a600>
- Liu, Y., Li, J., Kuang, Y., Liu, Z., Zhang, Z. & Chen, X., 2023. Effect of carbon nanotubes modification on bending fatigue properties of carbon fiber reinforced polyimide composites. International Journal of Fatigue, 175, 107814. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107814>
- Mohammadi, H., Ahmad, Z., Mazlan, S.A., Faizal Johari, M.A., Siebert, G., Petru, M. & Rahimian Koloor, S.S., 2022. Lightweight glass fiber-reinforced polymer composite for automotive bumper applications: A review. Polymers, 15(1), 193. <https://doi.org/10.3390/polym15010193>
- Motz, G. & Bordia, R., 2009. Handbook of Textile Fibre Structure: Natural, Regenerated, Inorganic and Specialist Fibres. In: Woodhead Publishing. 365 p
- Pothan, L.A., Potschke, P., Habler, R. & Thomas, S., 2005. The static and dynamic mechanical properties of banana and glass fiber woven fabric-reinforced polyester composite. Journal of composite materials, 39(11), 1007-1025. <https://doi.org/10.1177/0021998305048737>
- Smardzewski, J. & Prekrat, S., 2019. Stiffness of case furniture made of layered cellular boards with an auxetic core-numerical approach. Conference of implementation of wood science in woodworking sector, Zagreb, Croatia.
- Velmurugan, R. & Manikandan, V., 2005. Mechanical

- properties of glass/palmyra fiber waste sandwich composites. Indian journal of engineering and material science 12: 563-570
- Vinson, J., 2018. The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials. Routledge publication. 378 p
- Wang, D., 2006. Compression breakage properties research on the honeycomb paperboard. Packag Eng, 27(1), 37-39.
- Zenkert, D., 1997. The handbook of sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services. Warley publication. 431 p
- Zhang, M. & Matinlinna, J.P., 2012. E-glass fiber reinforced composites in dental applications. Silicon, 4, 73-78. <https://doi.org/10.1007/s12633-011-9075-x>