



Experimental investigation of the flexural and compressive behavior of LVL beams manufactured from poplar veneer waste reinforced with GFRP fabrics and rebars

Mahbobeh Zoor¹ | Mohammad Arabi^{2*} | Ali Bayat Kashkoli³

1. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: mahboobehzoor.pgs@uoz.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: marabi@uoz.ac.ir
3. Department of Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran. Email: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 07 June 2025

Revised: 02 April 2026

Accepted: 24 April 2026

Published online: 10 June 2026

Keywords:

Bending strength,

Compressive strength,

GFRP,

Mechanical reinforcement,

Laminated Veneer Lumber (LVL),

Poplar wood peeling waste.

ABSTRACT

Introduction: In recent decades, engineered wood products such as Laminated Veneer Lumber (LVL) have gained significant prominence in the construction industry owing to their uniform mechanical properties, engineered design capability, and reduced influence of natural wood defects. Despite these technical advantages, the production of LVL and other engineered laminated beams is associated with challenges including high consumption of premium raw materials and the generation of substantial volumes of wood waste during peeling, layering, and edging operations. Studies have indicated that between 15% and 30% of the initial wood volume remains as unusable waste. This waste holds particular significance in fast-growing species such as poplar due to their low density, limited dimensional stability, and susceptibility to natural defects. Accordingly, the present study was conducted to evaluate the feasibility of manufacturing large cross-section LVL beams from poplar veneer edging and layering waste, and to investigate the effect of reinforcement with fabric and GFRP rebars on the mechanical properties and failure modes of these beams. It is anticipated that the findings of this research will provide a practical solution for wood waste recycling while contributing to the advancement of technical knowledge in the field of reinforced engineered wood beams and promoting their broader application in sustainable structures.

Method: The layers of poplar wood (*Populus deltoides*) were supplied from the waste of a veneer and plywood factory in Neyshabur, Iran. The layers were cut to dimensions of 500 x 2 mm (length and thickness, respectively) and a minimum width of 250 mm. In the process of manufacturing LVL panels, urea-formaldehyde adhesive with 60% solids (Samad Company) was used. After telescoping, LVL panels of dimensions of 450 x 2 mm and different widths (minimum width 250 mm) were prepared. In order to produce beams with larger dimensions, four LVL blocks with a cross-section of 20 x 20 mm and a length of 450 mm were placed next to each other, and beams with a square cross-section of 40 x 40 mm and a length of 450 mm were made. The connection of the four small beams was such that in each treatment, adjacent beams were connected to each other from the sides only with epoxy adhesive, while on the facing surfaces of the beams, in addition to epoxy adhesive, a reinforcing agent was also used. In the glass fiber reinforcement treatment, a layer of GFRP fabric was placed continuously across the entire mid-section, while in the composite rebar reinforcement treatment, two 6 mm diameter GFRP rebars were placed in pre-installed grooves and after being impregnated with epoxy adhesive, the opposing beams were connected to each other in pairs. Flexural and compressive strength tests were performed in accordance with EN 408 standard.

Results: The results of the bending test showed that reinforcement with GFRP fabric and GFRP rebar increased the flexural strength by 11% and 19%, respectively, compared to the control sample. Also, changing the fabric from unidirectional to bidirectional reduced flexural strength by 26%, which indicates the decisive role of fiber orientation in the path of flexural stresses. The modulus of elasticity was also improved by about 11% and 19% in the samples reinforced with GFRP fabric and GFRP rebar, respectively. Overall, one-way fabric showed better performance than bidirectional type and GFRP ribbed rebar showed better performance than flat type. In the parallel compressive strength test of the fibers, reinforcement with GFRP fabric and GFRP rebar increased by 17% and 33%, respectively, compared to the control sample. These results show that GFRP rebars, especially the ribbed type, have a more significant effect on improving both flexural and compressive properties.

Conclusion: This study clearly demonstrated that poplar wood peeling waste has high potential for producing LVL with acceptable performance and reinforcement with GFRP composites can significantly enhance the mechanical properties of this product. The best performance was observed in samples reinforced with GFRP ribbed rebar, which provided a 19% increase in flexural strength and 33% in compressive strength. According to the findings, the use of unidirectional fabric and GFRP ribbed rebars for structural applications of this type of LVLs is recommended. This approach can be an effective step towards recycling wood waste and producing high value-added products in the wood-polymer composites industry.

Cite this article: Zoor, M., Arabi, M., Bayat Kashkoli, A. (2026). Experimental investigation of the flexural and compressive behavior of LVL beams manufactured from poplar veneer waste reinforced with GFRP fabrics and rebars. *Journal of Forest and Wood Products*, 79 (1), 81-94. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2026.409592.1388>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2026.409592.1388>

بررسی تجربی رفتار خمشی و فشاری تیرهای LVL ساخته شده از

ضایعات روکش صنوبر تقویت شده با پارچه و میلگرد GFRP

محبوبه زور^۱ | محمد عربی^{۲*} | علی بیات کشکولی^۳

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mahboobehzoor.pgs@uoz.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: marabi@uoz.ac.ir
۳. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: ali.bayatkashkoli@uoz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقدمه: در دهه‌های اخیر، تیرهای مهندسی لایه‌ای نظیر (LVL) Laminated Veneer Lumber به دلیل یکنواختی خواص مکانیکی، قابلیت طراحی مهندسی شده و کاهش اثر عیوب طبیعی چوب، جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت‌وساز یافته‌اند. ساختار چندلایه این تیرها امکان جهت‌دهی کنترل شده الیاف چوب را فراهم کرده و منجر به بهبود مقاومت خمشی، کششی و مدول الاستیسیته در مقایسه با چوب ماسیو می‌شود. با وجود مزایای فنی، تولید LVL و سایر تیرهای لایه‌ای مهندسی شده با چالش‌هایی نظیر مصرف بالای مواد اولیه مرغوب و ایجاد حجم قابل توجهی از ضایعات چوبی در فرآیندهای روکش‌گیری، لایه‌گیری و کناره‌بری همراه است. مطالعات نشان داده‌اند که بین ۱۵ تا ۳۰ درصد از حجم اولیه چوب به صورت ضایعات غیرقابل استفاده باقی می‌ماند. این ضایعات در گونه‌های تندرشد مانند صنوبر به دلیل دانسیته پایین، پایداری ابعادی محدود و حساسیت به عیوب طبیعی، اهمیت بیشتری دارند. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی امکان تولید تیرهای LVL با سطح مقطع بزرگ از ضایعات کناره‌بری روکش و لایه‌های صنوبر و بررسی تأثیر تقویت با پارچه و میلگردهای GFRP بر خواص مکانیکی و مد شکست این تیرها انجام شد. انتظار می‌رود نتایج این تحقیق ضمن ارائه راهکاری عملی برای بازیافت ضایعات چوبی، به توسعه دانش فنی در زمینه تقویت تیرهای چوبی مهندسی شده و کاربرد گسترده‌تر آنها در سازه‌های پایدار کمک نماید.

نوع مقاله:

پژوهشی

روش پژوهش: لایه‌های چوب صنوبر (*Populus deltoides*) مورد استفاده در این پژوهش از ضایعات کارخانه روکش و تخته‌لایه در نیشابور تأمین شدند. لایه‌ها به ابعاد ۵۰۰ در ۲ میلی‌متر (به ترتیب طول و ضخامت) و حداقل عرض ۲۵۰ میلی‌متر برش داده شدند. در فرآیند ساخت صفحه‌های LVL از چسب اوره-فرمالدهید با ۶۰ درصد ماده جامد (شرکت سامد) مورد استفاده قرار گرفت. پس از دوربری، صفحه‌های LVL به ابعاد ۴۵۰×۲۰ میلی‌متر و عرض‌های متفاوت (حداقل عرض ۲۵۰ میلی‌متر) تهیه شدند. به منظور تولید تیرهای با ابعاد بزرگ‌تر، چهار بلوک LVL با سطح مقطع ۲۰×۲۰ میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر کنار یکدیگر قرار داده شدند و تیرهایی با سطح مقطع مربعی ۴۰×۴۰ میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نحوه اتصال چهار تیر کوچک به این صورت بود که در هر تیمار، تیرهای مجاور از پهلو صرفاً با چسب اپوکسی به یکدیگر متصل شدند، در حالی که در سطوح روبه‌روی تیرها، علاوه بر چسب اپوکسی، عامل تقویتی نیز به کار رفت. در تیمار تقویت با الیاف شیشه، یک لایه پارچه GFRP به صورت پیوسته در سراسر سطح مقطع میانی قرار داده شد، در حالی که در تیمار تقویت با میلگرد کامپوزیتی، دو میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی‌متر در شیارهای از پیش تعبیه شده جای‌گذاری و پس از آغشته شدن به چسب اپوکسی، تیرهای مقابل به صورت دو به دو به یکدیگر متصل شدند. آزمون‌های مقاومت خمشی و فشاری مطابق با استاندارد EN 408 انجام شدند.

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۲۰

نتایج: نتایج آزمون خمشی نشان داد که تقویت با پارچه GFRP و میلگرد کامپوزیتی به ترتیب موجب افزایش ۱۱ و ۱۹ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد شد. همچنین، تغییر پارچه از نوع یک‌جهته به دو‌جهته باعث کاهش ۲۶ درصدی مقاومت خمشی گردید که حاکی از نقش تعیین‌کننده جهت‌گیری الیاف در مسیر تنش‌های خمشی است. مدول الاستیسیته نیز در نمونه‌های تقویت شده با پارچه و میلگرد GFRP به ترتیب حدود ۱۱ و ۱۹ درصد بهبود یافت. در مجموع، پارچه یک‌جهته عملکرد بهتری نسبت به نوع دو‌جهته و میلگرد آجدار عملکرد بهتری نسبت به نوع صاف از خود نشان دادند. در آزمون مقاومت فشاری موازی الیاف، تقویت با پارچه GFRP و میلگرد GFRP به ترتیب افزایش ۱۷ و ۳۳ درصدی را نسبت به نمونه شاهد به همراه داشت. این نتایج نشان می‌دهد که میلگردهای GFRP، به‌ویژه نوع آجدار، تأثیر چشمگیرتری در بهبود هر دو خاصیت خمشی و فشاری دارند.

کلیدواژه:

پارچه الیاف شیشه،

تیرهای LVL،

تقویت تیر،

ضایعات روکش چوب صنوبر،

مقاومت خمشی،

میلگرد آجدار.

نتیجه‌گیری: این مطالعه به وضوح نشان داد که ضایعات حاصل از لایه‌گیری چوب صنوبر پتانسیل بالایی برای تولید LVL با کارایی قابل قبول دارند و تقویت با کامپوزیت‌های GFRP می‌تواند خواص مکانیکی این فرآورده را به طور قابل توجهی افزایش دهد. بهترین عملکرد در نمونه‌های تقویت شده با میلگرد آجدار GFRP مشاهده شد که افزایش ۱۹ درصدی در مقاومت خمشی و ۳۳ درصدی در مقاومت فشاری را فراهم کرد. با توجه به یافته‌ها، استفاده از پارچه یک‌جهته و میلگردهای آجدار GFRP برای کاربردهای سازه‌ای این نوع LVL ها توصیه می‌شود. این رویکرد می‌تواند گامی مؤثر در جهت بازیابی ضایعات چوبی و تولید محصولات با ارزش افزوده بالا در صنعت کامپوزیت‌های چوب-پلیمر باشد.

استناد: زور؛ محبوبه، عربی؛ محمد، بیات کشکولی؛ علی (۱۴۰۵). بررسی تجربی رفتار خمشی و فشاری تیرهای LVL ساخته شده از ضایعات روکش صنوبر تقویت شده با پارچه و میلگرد GFRP. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۹ (۱)، ۹۴-۸۱. DOI: <https://10.22059/jfwf.2026.409592.1388>

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، توسعه و به کارگیری چوب‌های مهندسی شده به عنوان جایگزینی پایدار برای مصالح ساختمانی متداول، به ویژه در سازه‌های سبک و نیمه سنگین، با رشد قابل توجهی همراه بوده است. تیرهای مهندسی لایه‌ای^۱ نظیر (LVL) به دلیل یکنواختی خواص مکانیکی، قابلیت طراحی مهندسی شده و کاهش اثر عیوب طبیعی چوب، جایگاه ویژه‌ای در صنعت ساخت و ساز یافته‌اند [۱، ۲]. ساختار چندلایه این تیرها امکان جهت‌دهی کنترل شده الیاف چوب را فراهم کرده و منجر به بهبود مقاومت خمشی، کششی و مدول الاستیسیته در مقایسه با چوب ماسیو می‌شود [۲]. با وجود مزایای فنی، تولید LVL و سایر تیرهای لایه‌ای مهندسی شده با چالش‌هایی نظیر مصرف بالای مواد اولیه مرغوب و ایجاد حجم قابل توجهی از ضایعات چوبی در فرآیندهای روکش‌گیری، لایه‌گیری و کناره‌بری همراه است [۳]. مطالعات نشان داده‌اند که بین ۱۵ تا ۳۰ درصد از حجم اولیه چوب به صورت ضایعات غیرقابل استفاده مستقیم باقی می‌ماند [۴، ۵]. این ضایعات در گونه‌های تندرشد مانند صنوبر به دلیل دانسیته پایین، پایداری ابعادی محدود و حساسیت به عیوب طبیعی، اهمیت بیشتری دارند [۶-۸].

گونه‌های تندرشد به طور گسترده در صنایع روکش و تخته‌لایه استفاده می‌شوند، اما وجود عیوبی نظیر گره‌های زنده و مرده، انحراف الیاف، ترک‌ها و ناهمگنی بافت، موجب افت کیفیت روکش‌های تولیدی و افزایش ضایعات در فرآیند تولید می‌شود [۶، ۷]. بخش قابل توجهی از این ضایعات هنوز دارای ظرفیت مکانیکی بالقوه هستند و با مهندسی مجدد و تقویت مناسب، می‌توانند به محصولات سازه‌ای با ارزش افزوده تبدیل شوند [۸]. یکی از راهکارهای مؤثر برای جبران ضعف‌های مکانیکی تیرهای لایه‌ای ساخته شده از ضایعات، استفاده از مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) است [۹، ۱۰]. در میان انواع FRP، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) به دلیل نسبت مناسب استحکام به وزن، مقاومت در برابر خوردگی، دسترسی بالا و هزینه کمتر نسبت به CFRP، کاربرد گسترده‌ای در بهسازی و تقویت اعضای چوبی یافته‌اند [۱۱-۱۳]. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که استفاده از GFRP می‌تواند ظرفیت باربری، سختی خمشی و رفتار پس از گسیختگی تیرهای چوبی را به طور قابل توجهی بهبود دهد [۱۴، ۱۵].

تقویت تیرهای چوبی با GFRP به اشکال مختلفی نظیر پارچه یا ورق خارجی، نصب یا کاشت میلگردهای کامپوزیتی نزدیک سطح (NSM) و تقویت داخلی در حین ساخت تیرهای لایه‌ای انجام می‌شود [۱۶-۱۸]. هر یک از این روش‌ها مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند و عملکرد نهایی آنها به عواملی نظیر کیفیت چسبندگی، محل قرارگیری تقویت کننده، جهت‌گیری الیاف و نوع رزین وابسته است [۱۷]. پارچه‌های GFRP به دلیل انعطاف‌پذیری بالا و توزیع یکنواخت تنش، امکان هم‌افزایی مناسبی با ساختار لایه‌ای LVL فراهم می‌کنند [۱۳، ۱۵، ۱۷]. جهت‌بندی الیاف در پارچه‌های GFRP پارامتر کلیدی عملکرد تقویتی است [۲۱-۱۹]. پارچه‌های تک‌جهته عمده‌تاً مقاومت خمشی در راستای طول تیر را افزایش می‌دهند، در حالی که پارچه‌های دوجته (بافته) علاوه بر بهبود مقاومت، نقش مهمی در کنترل ترک‌ها و افزایش یکپارچگی بین لایه‌ای ایفا می‌کنند [۲۲، ۲۳]. استفاده از میلگردهای کامپوزیتی GFRP به عنوان تقویت کننده داخلی یا نزدیک سطح، سهم قابل توجهی در تحمل تنش‌های کششی دارد و از گسترش ترک‌های بحرانی جلوگیری می‌کند [۱۶]. نوع سطح میلگرد (صاف یا آجدار) نیز نقش تعیین کننده‌ای در کیفیت اتصال و انتقال تنش دارد؛ میلگردهای آجدار به دلیل درگیری مکانیکی بیشتر، عملکرد سازه‌ای بهتری نسبت به انواع صاف ارائه می‌دهند [۲۴، ۲۵].

پژوهش‌های متعدد در زمینه تقویت OSB، تخته خرده چوب، تیرهای چندلایه، گلولام و LVL با FRP بهبود قابل توجهی در ظرفیت باربری، مدول الاستیسیته و شکل‌پذیری گزارش کرده‌اند [۳۱-۲۶]. با این حال، اکثر این پژوهش‌ها بر استفاده از مواد اولیه نسبتاً مرغوب یا تقویت خارجی متمرکز بوده و مطالعات محدودی به استفاده همزمان از ضایعات روکش و لایه‌گیری صنوبر همراه با تقویت ترکیبی پارچه و میلگرد GFRP پرداخته‌اند [۳۲، ۳۳]. همچنین بررسی اثر نوع پارچه (تک‌جهته و دوجته) و نوع میلگرد (صاف و آجدار) بر رفتار خمشی و فشاری تیرهای LVL ساخته شده از ضایعات، هنوز به طور جامع مورد توجه قرار نگرفته است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی امکان تولید تیرهای LVL با سطح مقطع بزرگ از ضایعات کناره‌بری روکش و لایه‌های صنوبر و بررسی تأثیر تقویت با پارچه و میلگردهای GFRP بر خواص مکانیکی و حالت شکست این تیرها انجام شده است. انتظار

^۱ Laminated Veneer Lumber

می‌رود نتایج این تحقیق ضمن ارائه راهکاری عملی برای بازیافت ضایعات چوبی، به توسعه دانش فنی در زمینه تقویت تیرهای چوبی مهندسی شده و کاربرد گسترده‌تر آنها در سازه‌های پایدار کمک نماید.

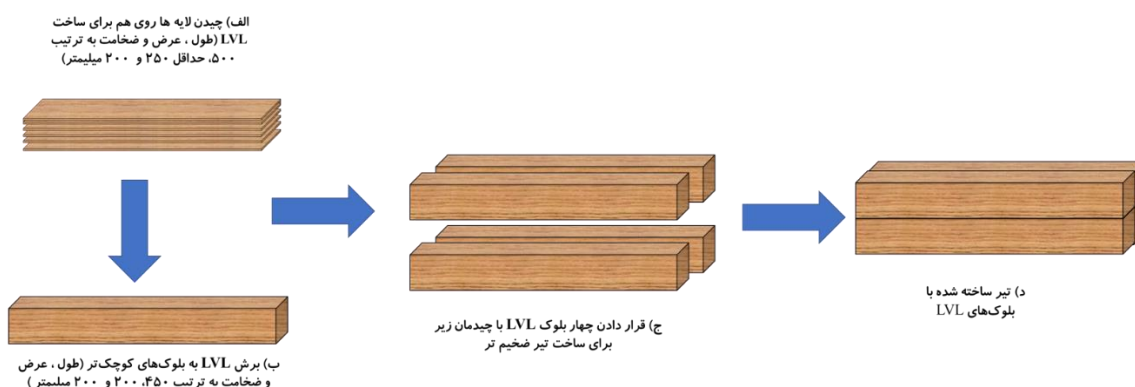
۰۲ روش شناسی پژوهش

۰۱-۲ مواد

لایه‌های چوب صنوبر (*Populus deltoides*) مورد استفاده در این پژوهش از ضایعات کارخانه روکش و تخته‌لایه در نیشابور تأمین شد. لایه‌ها به ضخامت ۲ میلی‌متر ابتدا از نظر هرگونه عیب ساختاری مانند ترک، گره و پوسیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. سپس لایه‌های مناسب به طول ۵۰ و عرض ۲۵۰ سانتی‌متر برش داده شد و به مدت ۲۴ ساعت در آن آزمایشگاهی و دمای ۱۰۳ درجه سانتی‌گراد تا حدود ۳ درصد (براساس وزن خشک) خشک شدند و سپس به مدت دو هفته در شرایط کنترل‌شده محیطی (کلیما) نگهداری شدند تا رطوبت آنها یکنواخت شود و برای فرآیند ساخت تیرهای لایه‌ای آماده شوند. در فرآیند ساخت الوارهای LVL از چسب اوره-فرمالدهید با ۶۰ درصد ماده جامد (شرکت سامد) همراه کلرید آمونیوم به‌عنوان هاردنر (یک درصد وزنی ماده جامد چسب) استفاده شد. برای اتصال و تقویت تیرها، از چسب اپوکسی AD-309 به‌همراه هاردنر اپوکسی HA-12 استفاده شد. این سیستم چسبی شامل رزین اپوکسی بیسفنول A و هاردنر پلی‌آمیونی بوده و مطابق دستورالعمل ارائه‌شده توسط سازنده، با نسبت ۳۰ درصد هاردنر به ۷۰ درصد رزین مخلوط شد. چسب آماده‌شده به‌عنوان ماده اتصال‌دهنده در تمامی مراحل ساخت و تقویت نمونه‌های آزمایشی به کار گرفته شد تا یکنواختی شرایط اتصال در تمامی تیمارها حفظ شود. الیاف شیشه در دو نوع تک‌جهته و دو جهته (حصیری) با گراماژ ۶۰۰ گرم بر متر مربع و میلگردهای کامپوزیتی GFRP ساده و آجدار با قطر ۶ میلی‌متر، به ترتیب از شرکت مقاوم سازه افزیر و شرکت اپوراد خوزستان تهیه شدند. این میلگردها با پوشش‌های رزینی اپوکسی، پلی‌استر و ونیل استر تولید شده و دارای مقاومت کششی حدود ۱۶۰۰ مگاپاسکال و چگالی ۲/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب هستند. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند تا میلگردهای GFRP گزینه‌ای مناسب برای افزایش مقاومت تیرهای سبک و مقاوم باشند.

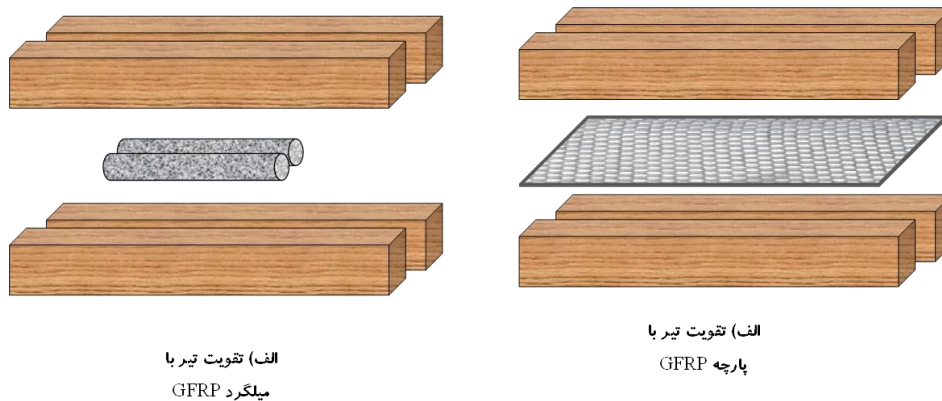
۰۲-۲ ساخت تیرهای لایه‌ای (LVL)

پس از تثبیت رطوبت، لایه‌ها براساس ابعاد مورد نظر تفکیک و هر لایه با قلم مو به‌میزان ۲۰۰ گرم بر متر مربع به چسب آغشته شد. سپس ده لایه روکش روی هم قرار گرفتند و تحت فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ دقیقه پرس شدند تا در نهایت تخته‌هایی به طول ۵۰۰ میلی‌متر، ضخامت ۲۰ میلی‌متر و در عرض‌های حداقل ۲۵ میلی‌متر تولید گردد. پس از فرآیند پلیمر شدن چسب، تخته‌ها به ابعاد ۴۵۰×۲۰×۲۰ میلی‌متر (به ترتیب طول، عرض و ضخامت) برش داده شدند (شکل ۲).



شکل ۱. نحوه ساخت تیر لایه‌ای در اندازه ۴۵۰×۴۰×۴۰ میلی‌متر (طول، عرض و ضخامت)

به منظور تولید تیرهای با ابعاد بزرگتر، چهار بلوک LVL با سطح مقطع 20×20 میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر کنار یکدیگر قرار داده شدند و تیرهایی با سطح مقطع مربعی 40×40 میلی‌متر و طول ۴۵۰ میلی‌متر ساخته شد. نحوه اتصال چهار تیر کوچک به این صورت بود که در هر دو تیمار، تیرهای مجاور از پهلو صرفاً با چسب اپوکسی به یکدیگر متصل شدند، در حالی که در سطوح روبه‌روی تیرها، علاوه بر چسب اپوکسی، عامل تقویتی نیز به کار رفت. در تیمار تقویت با الیاف شیشه، یک لایه پارچه GFRP به صورت پیوسته در سراسر سطح مقطع میانی قرار داده شد، در حالی که در تیمار تقویت با میلگرد کامپوزیتی، دو میلگرد GFRP با قطر ۶ میلی‌متر در شیارهای از پیش تعبیه شده جای‌گذاری و پس از آغشته شدن به چسب اپوکسی، تیرهای مقابل به صورت دو به دو به یکدیگر متصل شدند (شکل ۲). این روش اجرا موجب ایجاد یک سیستم تقویتی پیوسته و یکپارچه در تیر نهایی شد. مخلوط چسب اپوکسی و هاردنر به مدت ۵ دقیقه هم زده شد و سپس به میزان ۲۰۰ گرم بر متر مربع روی سطح لایه‌ها اعمال شد. تیرها به مدت ۶۰ دقیقه با فشار ۱ نیوتن بر میلی‌متر مربع در دمای محیط پرس شدند. در نهایت، تیرها به ابعاد نهایی با استفاده از دستگاه پانل برش داده شدند (شکل ۲). این فرآیند تضمین می‌کند که انتقال بار بین لایه‌ها به صورت مؤثر انجام شده و تیرهای تولیدی توانایی تحمل بارهای کششی و خمشی را دارا باشند.



شکل ۲. محل قرار گیری تقویت کننده‌ها در تیرهای لایه ای. شکل سمت چپ (میلگرد GFRP)، شکل سمت راست (پارچه GFRP).

۲-۳. آزمون‌های مکانیکی

مقاومت خمشی تیرها مطابق استاندارد BS EN 408 (2010) و با دستگاه Hansfield H25KS در دانشگاه زابل و آزمون فشاری موازی الیاف با دستگاه مطابق استاندارد STM-D143 با ابعاد $200 \times 50 \times 5$ میلی‌متر، به ترتیب طول، عرض و ضخامت و با دستگاه ELE_200KN در آزمایشگاه مکانیک دانشگاه بیرجند انجام شد. سرعت بارگذاری برابر با ۲ میلی‌متر بر دقیقه مطابق استاندارد در نظر گرفته شد. مطابق جدول ۱ به طور کلی ۱۰ تیمار و برای هر تیمار ۳ تکرار برای بررسی اثر نوع تقویت کننده دو آزمون مقاومت و مدول خمشی و مقاومت فشاری موازی الیاف در نظر گرفته شد (در مجموع ۳۰ نمونه آزمون).

۲-۴. تجزیه و تحلیل آماری

پس از بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها، تأثیر عوامل مستقل مورد بررسی بر مقاومت خمشی و فشاری تیرهای لایه‌ای با سطح اطمینان ۹۵ درصد و با استفاده از نرم‌افزار SPSS و به کمک تحلیل واریانس و مقایسه میانگین دانکن مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج تحلیل واریانس مربوط به اثرات مستقل و متقابل متغیرهای مورد بررسی، شامل نوع تقویت کننده، نوع پارچه GFRP و نوع میلگرد GFRP بر مقاومت خمشی (MOR)، مدول الاستیسیته خمشی (MOE) و مقاومت فشاری موازی الیاف کامپوزیتی تیرهای

LVL در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اثرات مستقل و متقابل تمامی این متغیرها بر مقاومت خمشی (MOR)، مدول الاستیسیته خمشی (MOE) و همچنین مقاومت فشاری، در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار هستند.

جدول ۱. جدول تیمار و تکرار داده‌ها

تکرار	تیمار	مشخصه مکانیکی
۳	نمونه شاهد	مقاومت و مدول خمشی
۳	پارچه الیاف شیشه یک‌جهته	
۳	پارچه الیاف شیشه دو‌جهته	
۳	میلگرد بدون آج	
۳	میلگرد آجدار	
۳	نمونه شاهد	
۳	پارچه الیاف شیشه یک‌جهته	
۳	پارچه الیاف شیشه دو‌جهته	
۳	میلگرد بدون آج	
۳	میلگرد آجدار	

جدول ۲. جدول آنالیز واریانس اثرات مستقل و متقابل نوع تقویت‌کننده، نوع پارچه و نوع میلگرد GFRP بر برخی خواص مکانیکی تیرهای LVL

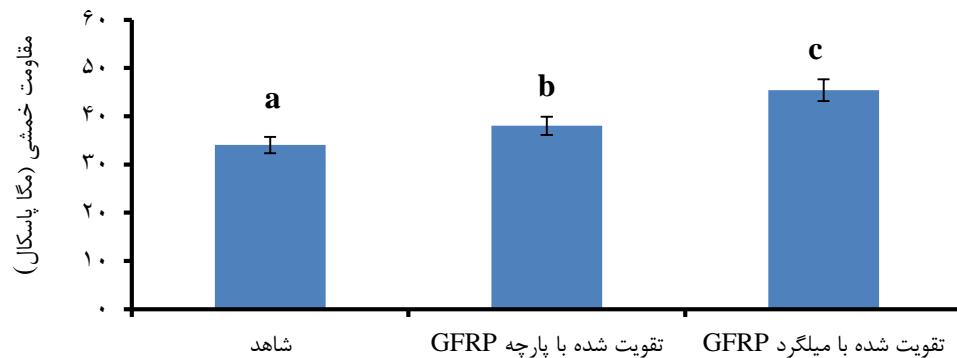
معنی‌داری %	f	میانگین مربعات	درجه آزادی	اثرات مستقل	مشخصه مکانیکی
۰/۰۰۰	۶۶/۶۰۲	۴۴۰/۶۷۹	۲	اثر مستقل نوع تقویت‌کننده	مقاومت خمشی
۰/۰۲۱۷	۱/۵۸	۴۹	۱	اثر مستقل نوع پارچه GFRP	
۰/۰۰۲	۴/۸۹	۴۶/۲۴	۱	اثر مستقل نوع سطح میلگرد GFRP	
۰/۰۰۱	۳۲/۹۳	۷۰۶۵۷۷۱۰/۶۸۳	۲	اثر مستقل نوع تقویت‌کننده	مدول الاستیسیته
۰/۰۴۸	۴/۲۰	۲۳۳۶۱۱۱۱/۱۱۱	۱	اثر مستقل نوع پارچه GFRP	
۰/۰۴۴	۲/۱۱	۱۹۷۸۴۲۱/۶۵	۱	اثر مستقل نوع سطح میلگرد GFRP	
۰/۰۰۰	۳۳/۷۳	۲۷/۰۰۸	۲	اثر مستقل نوع تقویت‌کننده	مقاومت فشاری موازی الیاف
۰/۱۴۲	۴/۴۴	۹/۳۰	۱	اثر مستقل نوع پارچه GFRP	
۰/۰۴۷	۴/۲۳	۸/۹۰۰	۱	اثر مستقل نوع سطح میلگرد GFRP	

۳-۱. اثر مستقل و متقابل متغیرها مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی تیرهای LVL

۳-۱-۱. اثر مستقل نوع تقویت‌کننده

نتایج پژوهش درباره اثرگذاری مستقل نوع تقویت‌کننده بر استحکام خمشی تیرهای لایه‌ای چوبی (LVL) نشان‌دهنده دستاوردهای معنی‌داری است. تحلیل آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصد گویای تفاوت معنی‌دار در مقاومت خمشی بین گروه‌های مختلف است (جدول ۲). طبق آزمون مقایسه میانگین دانکن، نمونه‌ها به سه دسته متمایز تقسیم شدند. نمونه‌های شاهد (فاقد تقویت) کمترین مقاومت خمشی را دارا بودند (شکل ۳). در مقابل، تقویت تیرها با الیاف شیشه (GFRP) به دو روش پارچه و میلگرد، بهبود قابل توجهی در مقاومت خمشی ایجاد کرد. به‌طور مشخص، استفاده از پارچه GFRP موجب افزایش ۱۱ درصدی و کاربرد میلگرد GFRP سبب ارتقای ۱۹ درصدی مقاومت خمشی نسبت به نمونه‌های بدون تقویت شد. در این مطالعه، استفاده از پارچه GFRP به‌طور میانگین موجب افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد شد، در حالی که کاشت میلگردهای کامپوزیتی GFRP، افزایش قابل توجهی در حدود ۳۰-۲۵ درصدی را به‌همراه داشت. نتایج مشابهی در مطالعات Huang و همکاران (۲۰۲۲) و Miao و همکاران (۲۰۲۲) گزارش شده است؛ آنها نشان دادند که تقویت با پارچه GFRP توانست حدود ۳۰-

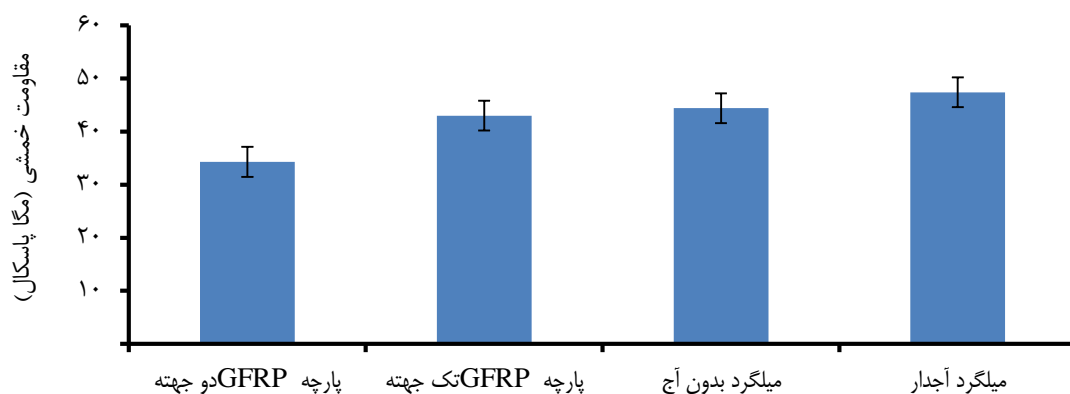
۱۵ در صد مقاومت خمشی تیرهای LVL را بهبود بخشید [۱۷، ۲۲]، در حالی که استفاده از میلگردهای کامپوزیتی، به ویژه در نزدیکی سطح کششی، افزایش های ۳۰-۴۵ درصدی را ایجاد کردند. دلیل این تفاوت آن است که میلگردهای GFRP به طور مستقیم در تحمل تنش کششی در تار کششی مشارکت می کنند و علاوه بر افزایش ظرفیت خمشی، مقاومت فشاری موازی الیاف کلی تیر را نیز بهبود می دهند. در مقابل، پارچه ها بیشتر بر بهبود مقاومت کششی سطحی و کنترل ترک مؤثرند.



شکل ۳. اثر مستقل نوع تقویت کننده بر مقاومت خمشی

۳-۱-۲. اثر مستقل نوع پارچه GFRP

نتایج مطالعه درباره اثرگذاری مستقل نوع پارچه الیاف شیشه (GFRP) بر مقاومت خمشی تیرهای LVL در شکل ۴ و جدول ۲ ارائه شده است. بررسی های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نشان دهنده تأثیر معنی دار نوع پارچه بر استحکام خمشی نمونه ها است. همسو با پیش بینی های اولیه، تغییر در آرایش پارچه GFRP منجر به افزایش قابل توجه مقاومت خمشی شد. به طوری که با تعویض پارچه از حالت یک جهته به دو جهته، مقاومت خمشی تیرها حدود ۲۶/۲۹ درصد کاهش یافت. این نتیجه اهمیت چیدمان و جهت گیری الیاف در بهبود خواص مکانیکی مصالح مرکب را برجسته می سازد. پارچه تک جهته بیشترین درصد الیاف را در جهت طولی دارد؛ بنابراین وقتی در تار کششی قرار گیرد، بار کششی به طور مؤثری وارد الیاف می شود و مدول و مقاومت خمشی ناحیه کششی را به طرز چشمگیری افزایش می دهد. پارچه های تک جهته (unidirectional GFRP) نسبت پارچه های دو جهته (biaxial / woven) به طور میانگین حدود ۱۵-۱۰ درصد افزایش در ظرفیت خمشی تیرهای LVL ایجاد کردند. به عنوان مثال در مطالعاتی که چند نوع پارچه (uniaxial vs woven vs biaxial) را مقایسه کرده اند، گزارش شده است که پارچه یک جهته در ارتقای مقاومت کششی/خمشی محور طولی نسبت به سایر پارچه ها عملکرد بهتری نشان داده است [۲۲]. این روند همچنین با یافته های Bal (۲۰۱۹) و Saad و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد که گزارش کردند الیاف تک جهته به دلیل تمرکز حداکثری الیاف در جهت طولی تیر، بیشترین افزایش در مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی را ایجاد می کنند [۲۰، ۲۳].



شکل ۴. اثر مستقل نوع پارچه و نوع میلگرد GFRP بر مقاومت خمشی LVL های ساخته شده

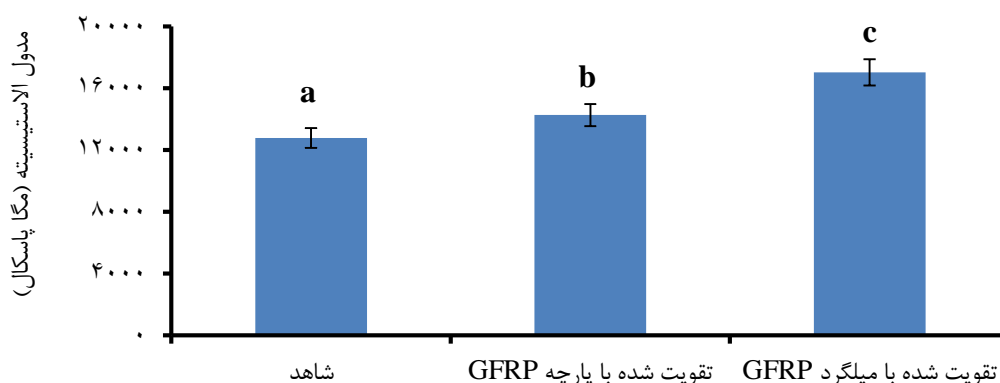
۳-۱-۳. اثر مستقل نوع میلگرد GFRP

اثر مستقل وضعیت سطح میلگرد بر مقاومت خمشی تیرهای LVL در شکل ۴ و جدول آنالیز واریانس ارائه شده است. تحلیل‌های آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد، معنی‌داری تأثیر آج میلگرد بر استحکام خمشی نمونه‌ها را تأیید می‌کند. مطابق با انتظارات پژوهشگران، میلگرد کامپوزیتی آجدار در مقایسه با نمونه‌های بدون آج و صاف، عملکرد بهتری در افزایش مقاومت خمشی نشان داد. به گونه‌ای که تغییر نوع میلگرد از حالت ساده به آجدار، موجب ارتقای ۹/۴ درصدی مقاومت خمشی شد. این یافته اهمیت طراحی سطحی میلگردها و نقش آن در بهبود پیوستگی و انتقال نیرو در مصالح مرکب را برجسته می‌سازد. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش بافت سطحی در افزایش چسبندگی مکانیکی میان چوب و میلگرد است. مشابه این موضوع در پژوهش‌های Bakalarz (۲۰۲۴) و Song و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش شده است؛ آنها نشان دادند که میلگردهای با سطح آجدار نه تنها مقاومت نهایی بیشتری ایجاد می‌کنند بلکه رفتار پس پیک (post-peak) بهتری نیز دارند، زیرا از لغزش میلگرد داخل بستر چوب جلوگیری می‌شود [۲۴، ۲۵]. میلگردهای صاف در شرایط بارگذاری نزدیک به حد نهایی، دچار pull-out سریع می‌شوند، در حالی که آجدارها به دلیل درگیری مکانیکی، بار را بهتر منتقل کرده و باعث شکست تدریجی‌تر تیر می‌شوند [۲۴].

۳-۲. اثر مستقل متغیرها مورد مطالعه بر مقدار مدول الاستیسیته تیرهای لایه‌ای

۳-۲-۱. اثر مستقل نوع تقویت کننده بر مدول الاستیسیته

نتایج تحلیل واریانس و میانگین اثر مستقل تقویت کننده‌های پلیمری پارچه و میلگرد (GFRP) بر مدول الاستیسیته تیرهای LVL در جدول ۲ و شکل ۵ ارائه شده است. بررسی‌های آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصد، معنی‌داری تأثیر نوع تقویت کننده بر مدول الاستیسیته را تأیید می‌کند. مطابق شکل ۷، توزیع مدول الاستیسیته نشان می‌دهد که نمونه‌های شاهد (بدون تقویت) کمترین مقدار را دارند، در حالی که نمونه‌های تقویت شده با میلگرد کامپوزیتی الیاف شیشه بیشترین مقدار مدول الاستیسیته را به خود اختصاص داده‌اند. با تقویت تیرهای LVL و تغییر شکل تقویت کننده از پارچه به میلگرد کامپوزیتی، مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۱/۳ و ۱۹/۴ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. این نتایج نوع و اهمیت شکل تقویت کننده در بهبود خواص مکانیکی مصالح چوبی را برجسته می‌سازد. همچنین طبق نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن، اختلاف بین مقادیر میانگین نمونه‌های شاهد، تقویت شده با پارچه و میلگرد GFRP از لحاظ آماری معنی‌دار شدند.



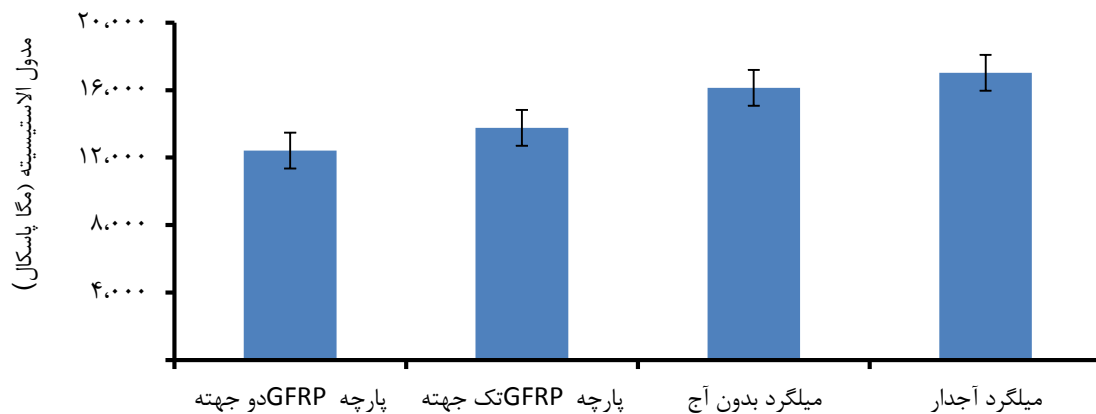
شکل ۵. اثر مستقل تقویت کننده بر مدول الاستیسیته

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که تیرهای LVL ساخته شده صرفاً با استفاده از چسب اپوکسی و بدون تقویت کننده دارای مدول الاستیسیته قابل قبولی هستند، اما افزودن عناصر تقویتی شامل پارچه GFRP و به ویژه میلگردهای کامپوزیتی GFRP کاشته شده، سبب افزایش مدول الاستیسیته شد. این یافته با نتایج بسیاری از مطالعات گذشته همخوانی دارد. به عنوان مثال، Song و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تقویت تیرهای LVL با لایه‌های FRP موجب افزایش مدول الاستیسیته و ظرفیت باربری نهایی می‌شود و نقش محل قرارگیری تقویت کننده در بهبود عملکرد بسیار حیاتی است [۲۵]. همچنین، Saad و همکاران (۲۰۲۲)

در یک مرور جامع تأکید کردند که قرارگیری تقویت کننده‌ها در نزدیک‌ترین فاصله به تار کششی باعث بیشترین اثرگذاری در افزایش ظرفیت خمشی اعضای چوبی می‌گردد [۲۳].

۳-۲-۲. اثر مستقل نوع پارچه GFRP

اثر مستقل نوع پارچه GFRP بر مقدار مدول الاستیسیته تیرهای LVL های ساخته شده در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ و جدول ۲ مشخص است اثر مستقل نوع پارچه GFRP بر مقدار مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار است. همان‌طور که انتظار می‌رفت با تغییر نوع پارچه GFRP مدول الاستیسیته تیرها افزایش یافت به طوری که با تغییر نوع پارچه GFRP از دو جهته به یک جهته مدول الاستیسیته ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. این یافته‌ها با پژوهش‌های اخیر همسو است؛ برای مثال، Cankal و همکاران (۲۰۲۳) و Song و همکاران (۲۰۲۲) گزارش کردند که تیرهای چوبی تقویت شده با GFRP افزایش چشمگیری در مدول الاستیسیته و ظرفیت خمشی نشان دادند [۲۹، ۲۵]. همچنین مطالعات عددی جدید نشان می‌دهد که GFRP می‌تواند رفتار الاستیک تیرهای چوبی را به صورت مؤثر و قابل پیش‌بینی بهبود بخشد [۲۸].



شکل ۶. اثر مستقل نوع پارچه و نوع میلگرد GFRP بر مدول الاستیسیته LVL های ساخته شده

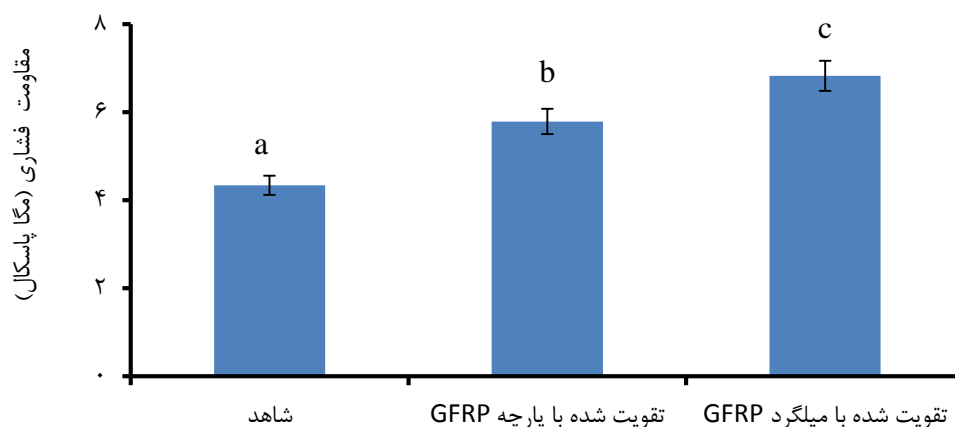
۳-۲-۳. اثر مستقل نوع میلگرد GFRP

تأثیر مستقل صاف یا آجدار بودن سطح میلگرد بر میزان مدول الاستیسیته تیرهای LVL در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل و همچنین جدول تحلیل واریانس مشخص است، وجود آج بر روی میلگرد در سطح اطمینان ۹۵ درصد تأثیر معنی‌داری بر مدول الاستیسیته نمونه‌ها دارد. همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد، میلگردهای کامپوزیتی آجدار نسبت به نمونه‌های صاف و بدون آج عملکرد بهتری در افزایش مدول الاستیسیته تیرهای LVL نشان می‌دهند؛ به طوری که تغییر میلگرد از نوع ساده به آجدار موجب افزایش ۸ درصدی مدول الاستیسیته شد. در محصولات چوبی نظیر Glulam، LVL و CLT آزمایش‌های pull-out و آزمون‌های خمشی نشان داده‌اند که گذاشتن میلگردهای FRP داخل شیار یا سوراخ چسب‌خورده می‌تواند به صورت مؤثری مقاومت کششی/خمشی تیرها را افزایش دهد و رفتار شکست را از ناگهانی به نسبتاً تدریجی‌تر (با انرژی جذب بیشتر) تغییر دهد به شرطی که پیوند بین رزین و چوب مناسب باشد و ضخامت لایه چسب کنترل شود. همچنین در کارهای منتشر شده توصیه شده که برای جلوگیری از splitting در چوب‌های سبک، یا از میله‌های آجدار با طراحی ملایم استفاده شود یا شیار طوری طراحی گردد که تنش‌های متمرکز کاهش یابند [۱۱]. میلگردهای آجدار، علاوه بر پیوند شیمیایی با رزین/اپوکسی، یک قفل مکانیکی در ماده اطراف (رزین و چوب) ایجاد می‌کنند؛ در نتیجه در مرحله‌هایی که چسب خط دچار لغزش موضعی می‌شود، آج‌ها می‌توانند بار را ادامه دهند و مقدار لغزش نهایی (slip) را کاهش دهند. این موضوع به ویژه وقتی اهمیت دارد که سطح مقطع میلگرد یا طول چسب‌خورده (bond length) زیاد باشد و مد شکست نیز در این دو نوع میلگرد نیز متفاوت است [۱۶].

۳-۳-۳. اثر مستقل و متقابل متغیرهای مورد مطالعه بر مقدار مقاومت فشاری موازی الیاف تیرهای لایه‌ای

۳-۳-۳-۱. اثر مستقل تقویت‌کننده‌ها بر مقاومت فشاری موازی الیاف

براساس داده‌های جدول ۲ و شکل ۸، تأثیر تقویت‌کننده پلیمری بر میزان مقاومت فشاری موازی الیاف در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کمترین مقدار مقاومت فشاری موازی الیاف مربوط به نمونه‌های شاهد (بدون تقویت) و بیشترین مقدار آن مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با میلگرد کامپوزیتی الیاف شیشه است. به بیان دیگر، با اعمال تقویت در تیرهای LVL و سپس تغییر شکل تقویت‌کننده پلیمری از پارچه الیاف شیشه به میلگرد کامپوزیتی، مقدار مقاومت فشاری موازی الیاف به ترتیب ۱۷/۴ و ۳۳/۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد. در مورد استفاده از پارچه‌های GFRP، مطالعات متعددی نشان داده‌اند که این نوع تقویت‌کننده‌ها با افزایش مقاومت کششی در لایه‌های سطحی، ظرفیت خمشی و فشاری را بهبود داده و همچنین قابلیت شکل‌پذیری تیر را افزایش می‌دهند [۱۹، ۳۰]. از سوی دیگر، استفاده از میلگردهای کامپوزیتی GFRP درون تیرهای LVL موجب ایجاد یک سازوکار مرکب می‌شود که علاوه بر افزایش ظرفیت خمشی، ظرفیت فشاری تیرها را نیز بهبود می‌دهد. دلیل این امر، مشارکت مستقیم میلگردها در تحمل نیروهای کششی فشاری و جلوگیری از گسترش ترک‌ها است. یافته‌های این پژوهش با گزارش‌های Bal و همکاران (۲۰۱۴) و Miao و همکاران (۲۰۲۱) مطابقت دارد که نشان داده‌اند کاشت میلگردهای کامپوزیتی در چوب‌های مهندسی‌شده نظیر LVL و CLT موجب افزایش همزمان مقاومت خمشی و فشاری و ظرفیت جذب انرژی می‌شود [۳۱، ۱۷]. افزون بر این، قرارگیری میلگردها در نزدیکی سطح کششی به دلیل ایجاد بازوی اهرمی بزرگ‌تر (lever arm) بیشترین سهم را در افزایش ظرفیت خمشی و فشاری داشته است؛ موضوعی که در تحقیقات Bakalarz (۲۰۲۴) نیز مورد تأکید قرار گرفته است [۲۴].

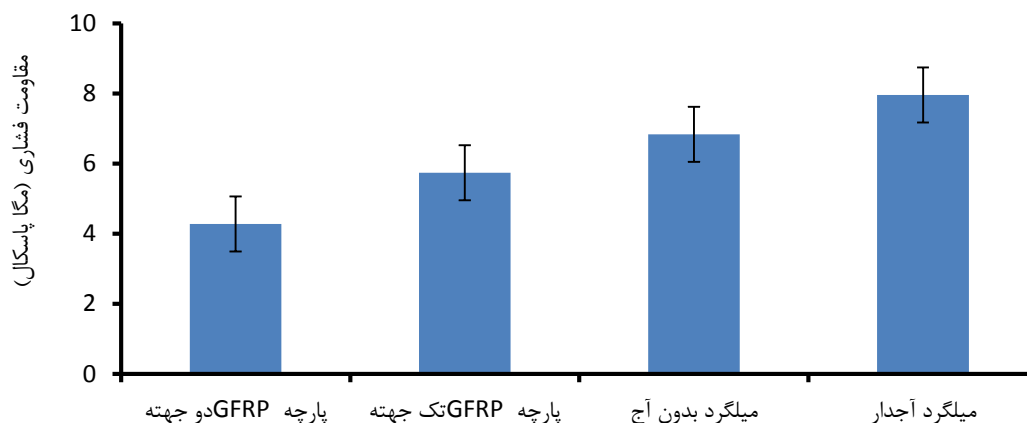


شکل ۷. اثر مستقل تقویت‌کننده‌ها بر مقاومت فشاری موازی الیاف

۳-۳-۲. اثر مستقل نوع پارچه GFRP

تأثیر مستقل نوع پارچه GFRP بر مقاومت فشاری موازی الیاف تیرهای LVL در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل و نیز جدول ۲ مشاهده می‌شود، نوع پارچه GFRP بر مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد اثر معنی‌داری دارد. مطابق انتظار، تغییر نوع پارچه GFRP موجب افزایش مقاومت فشاری موازی الیاف تیرها شد؛ به گونه‌ای که با جایگزینی پارچه یک‌جهته با پارچه دوجهته، مقاومت فشاری موازی الیاف حدود ۳ درصد افزایش یافت. اختلاف میانگین مقادیر مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها تقویت‌شده با پارچه‌های تقویت‌شده با الیاف یک‌جهته و دو‌جهته، مطابق جدول ۲ از لحاظ آماری معنی‌دار نیست هر چند که الیاف تک‌جهته به‌طور نسبی مقاومت بهتری نشان دادند. نمونه‌های فشاری تحت آزمون فشار موازی الیاف دچار برش و کمانش می‌شوند. در این نوع آزمون، پارچه‌های دوجهته عملکرد بهتری در کنترل ترک عرضی و از هم گسیختگی تحت کمانش نشان دادند. پارچه‌های دوجهته قادرند تنش‌های عرضی و برشی را نیز تحمل کنند و از انتشار

ترک‌های طولی یا delamination جلوگیری نمایند؛ بنابراین در شرایطی که ترک‌زایی یا تفکیک لایه‌ها (delamination) محتمل است، پارچه دو جهته می‌تواند دوام پس‌پیک (post-peak) سازه و رفتار غیرخطی را بهبود دهد [۲۷]. Liu و همکاران (۲۰۲۴) نیز دریافته‌اند که پارچه‌های بافته شده موجب کاهش چشمگیر پدیده delamination و افزایش نسبی مقاومت فشاری شدند، هرچند افزایش مقاومت خمشی آنها کمتر از پارچه‌های تک‌جهته بود [۳۰].



شکل ۸. اثر مستقل نوع پارچه و نوع میلگرد GFRP بر مقاومت فشاری LVL های ساخته شده

۳-۳-۳. اثر مستقل نوع میلگرد GFRP

تأثیر مستقل صاف یا آجدار بودن سطح میلگرد بر مقاومت فشاری موازی الیاف تیرهای LVL در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل و همچنین در جدول تحلیل واریانس قابل مشاهده است، وجود آج بر روی میلگرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد تأثیر معنی‌داری بر مقاومت فشاری موازی الیاف نمونه‌ها دارد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، استفاده از میلگرد کامپوزیتی آجدار نسبت به میلگرد صاف و بدون آج عملکرد بهتری در بهبود مقاومت فشاری موازی الیاف تیرهای LVL دارد؛ به طوری که با تغییر نوع میلگرد از ساده به آجدار، میزان مقاومت خمشی حدود ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. برای میلگرد صاف معمولاً شکست با لغزش نسبی بین میلگرد و چسب رخ می‌دهد؛ اما میلگرد آجدار می‌تواند شکست را به حالت splitting یا برشی در چوب منتقل کند، یعنی نقطه ضعف از خط چسب به خود چوب منتقل می‌شود که در برخی موارد مطلوب است (وقتی چسب ضعیف باشد) ولی ممکن است در گونه‌های چوب کم‌دانشسته یا لایه‌بندی شده (مثل برخی LVLها) به ترک‌های مخرب منجر شود [۲۴، ۱۶]. به طور کلی، میلگردهای FRP با سطح آجدار (ribbed) در کاربردهای چسب‌خورده (glued-in) و تعبیه‌شده در چوب، معمولاً قابلیت انتقال نیروی برشی/چسبی بالاتری نسبت به میلگردهای صاف یا فقط ساییده‌شده نشان می‌دهند؛ اما این افزایش مقاومت همراه با ریسک‌های مکانیزم شکست متفاوت (مثلاً گسیختگی از شعابی و splitting به‌ویژه در چوب‌های سبک) همراه است که نیاز به طراحی دقیق اتصال و تدابیر مهندسی (مانند محدودسازی/محصورسازی یا افزایش ضخامت چسب) دارد [۲۵].

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، تأثیر انواع مختلف تقویت‌کننده‌ها شامل پارچه الیاف شیشه یک‌جهته، دو جهته، میلگرد بدون آج و میلگرد آجدار بر خواص مکانیکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های مقاومت و مدول خمشی و همچنین مقاومت فشاری موازی الیاف نشان داد که استفاده از تقویت‌کننده‌ها به‌طور معنی‌داری عملکرد مکانیکی نمونه‌ها را نسبت به نمونه شاهد بهبود می‌بخشد. در بخش خواص خمشی، نمونه‌های تقویت با پارچه الیاف شیشه، به‌ویژه نوع یک‌جهته، به دلیل جهت‌گیری منظم الیاف، افزایش قابل توجهی در مقاومت و مدول خمشی از خود نشان دادند. این در حالی است که پارچه دو جهته نیز عملکرد مطلوبی ارائه داد، اما به دلیل توزیع تنش در دو راستا، میزان بهبود در یک جهت خاص کمتر از حالت یک‌جهته بود. از سوی دیگر، استفاده از

میلگردها، به‌ویژه میلگرد آجدار، موجب افزایش استحکام خمشی شد که این امر به‌دلیل درگیری مکانیکی بهتر با ماتریس قابل توجیه است. در آزمون مقاومت فشاری موازی الیاف نیز روند مشابهی مشاهده شد و نمونه‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه شاهد عملکرد بهتری داشتند. در این میان، میلگرد آجدار و پارچه الیاف شیشه یک‌جهته بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری نشان دادند. به‌طور کلی، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب نوع تقویت‌کننده و جهت‌گیری آن نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود خواص مکانیکی دارد و می‌توان با انتخاب مناسب، عملکرد سازه‌ای مواد را بهینه‌سازی کرد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید آنهاست.

تعارض منافع

این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه زابل، دانشکده منابع طبیعی در قالب پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای سایر نویسندگان انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در تمام مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری داده‌ها، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله مشارکت داشتند.

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌های پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه زابل به‌خاطر حمایت مالی/حمایت معنوی و همکاری در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

References

- [1] Smith, J., Brown, L. & Taylor, M. (2022). Engineered wood products in modern construction. *Construction and Building Materials*, 320, 126234.
- [2] Jones, R. & Patel, K. (2021). Structural applications of laminated timber beams. *Journal of Structural Engineering*, 147(5), 04021045.
- [3] Kärkkäinen, L., Matala, J., Härkönen, K., Kellomäki, S. & Nuutinen, T. (2008). Potential recovery of industrial wood and energy wood raw material in different cutting and climate scenarios for Finland. *Biomass and Bioenergy*, 32(10), 934-943.
- [4] Ogunwusi, A.A. (2014). Wood waste generation in the forest industry in Nigeria and prospects for its industrial utilization.
- [5] Qian, J., Yue, K., Li, X., Pu, Y., Chen, K., Wu, P. and Zhang, Z. (2024). Strength grading of full-scale Chinese fast-growing poplar wood for structural building applications. *Forests*, 15(9), 1602.

- [6] Zhang, Z., Guo, Q., Huang, X., Zhang, Q., Fan, J. & Huang, J. (2023). Research progress of reinforced modification of fast-growing wood. *Coatings*, 14(1), 53.
- [7] Kamperidou, V., Aidinidis, E. & Barboutis, I. (2020). Physical and mechanical properties of poplar veneers. *Wood Material Science & Engineering*, 15(3), 174-182.
- [8] Guo, J., Zhao, Y., Zhu, S., Liu, X. & Feng, X. (2023). Defects and utilization potential of poplar veneers. *Journal of Wood Science*, 69, 12.
- [9] Zhang, Y., Li, H. & Wang, Q. (2023). Circular economy in wood-based materials. *Sustainability*, 15(4): 2156.
- [10] Raftery, G.M. & Harte, A.M. (2011). Low-grade glulam reinforced with FRP. *Construction and Building Materials*, 25(1), 266-275.
- [11] Toumpanaki, E. and Ramage, M.H. (2021). Bond characteristics of FRP bars in timber structures: Experimental and numerical investigations. *Engineering Structures*, 230, 111636.
- [12] Corradi, M., Vemury, C. M., Edmondson, V., Poologanathan, K., & Nagaratnam, B. (2021). Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 258, 113363.
- [13] Juvandes, L. F. P., & Barbosa, R. M. T. (2012). Bond analysis of timber structures strengthened with FRP systems. *Strain*, 48(2), 124-135.
- [14] Karaduman, N. S., Karaduman, Y., Ozdemir, H., & Ozdemir, G. (2017). Textile reinforced structural composites for advanced applications. *In Textiles for advanced applications*. IntechOpen.
- [15] Kiliçarslan, Ş. & Türker, T. (2020). Fiber-reinforced polymer strengthened timber beams. *Structures*, 28, 1964-1975.
- [16] Saad, A. & Polak, M. (2025). Pull-out behavior and flexural performance of FRP bars embedded in timber. *Journal of Structural Engineering*, 151(4), 04025012.
- [17] Miao, Y., Li, J. & Zhao, H. (2022). Mechanical performance of LVL beams reinforced with GFRP sheets and bars. *Composite Structures*, 295, 115823.
- [18] Bakalarz, M. M., & Kossakowski, P. G. (2024). Strengthening of laminated veneer lumber slabs with fiber-reinforced polymer sheets—Preliminary study. *Fibers*, 12(3), 22.
- [19] Kasal, B., & Yan, L. (2021). Fiber-reinforced polymers as reinforcement for timber structural elements. In *Reinforcement of Timber Elements in Existing Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 245* (51-78).
- [20] Bal, B. C. (2014). Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glass fiber. *Construction and Building Materials*, 51, 9-14.
- [21] Lacroix, D., & Doudak, G. (2020). Towards enhancing the post-peak performance of glued-laminated timber beams using multi-directional fibre reinforced polymers. *Engineering Structures*, 215, 110680.
- [22] Huang, S., Yan, L., & Kasal, B. (2023). Flexural behaviour of wood beams strengthened by flax-glass hybrid FRP subjected to hygrothermal and weathering exposures. *Construction and Building Materials*, 365, 130076.
- [23] Saad, S., Ahmed, H. & El-Hosseiny, F. (2022). Mechanical behavior of unidirectional and woven GFRP reinforced LVL beams. *Journal of Wood Science*, 68, 101.
- [24] Bakalarz, A. (2024). Mechanical performance of ribbed vs smooth GFRP bars in timber composites. *Construction and Building Materials*, 414, 131345.
- [25] Song, J. (2022). Influence of surface texture on the flexural behavior of GFRP-reinforced LVL beams. *Composites Part B: Engineering*, 242, 110092.
- [26] Kržan, D., et al. (2023). Flexural performance of timber beams from OSB and cement particle boards. *Journal of Building Engineering*, 65: 106904.
- [27] Lacroix, D., & Doudak, G. (2020). Towards enhancing the post-peak performance of glued-laminated timber beams using multi-directional fibre reinforced polymers. *Engineering Structures*, 215, 110680.
- [28] Kiliçarslan, S., Türker, Y. S., & Avcar, M. (2023). Numerical and experimental evaluation of FRP-reinforced laminated beams. *Journal of Structural Engineering*, 149(7), 04023078.

- [29] Çankal, D., Şakar, G., & Çelik, H. K. (2023). A criticism on strengthening glued laminated timber beams with fibre reinforcement polymers, numerical comparisons between different modelling techniques and strengthening configurations. *Revista De La Construcción*, 22(3), 661–678. <https://doi.org/10.7764/RDLC.22.3.661>
- [30] Liu, X., Zhang, Y. & Chen, L. (2024). Flexural and compressive performance of FRP-reinforced laminated veneer lumber. *Journal of Composites for Construction*, 28(1), 04024001.
- [31] Bal, A., Kumar, S. & Singh, R. (2014). Flexural behavior of GFRP-reinforced laminated veneer lumber beams. *Journal of Wood Science*, 60(2), 123-134.
- [32] Santos, J., Fernandes, R. A., Ferreira, N., Ferreira, I., Vieira, C., Magalhães, F. D., ... & de Carvalho, L. H. (2024). New particleboards for food-packaging from poplar peeling by-products using a circular economy approach. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 129, 103563.
- [33] Lee, I.H., Song, Y.J. and Hong, S.I. (2021). Evaluation of the compression strength performance of fiber-reinforced polymer (FRP) and steel-reinforced laminated timber composed of small-diameter timber. *BioResources*, 16(1).