Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Science Research
Vol. 39, No. 2, Page 95-110 (2024) DOI: 10.22092/IJWPR.2024.363404.1761

Investigating the reinforcement of parallel strand lumber (PSL) obtained from reed residue and laminated veneer lumber (LVL) made of spruce with fiber reinforced polymer (FRP)

Hanieh Shurvazi[1*], Mohammad Shamsian[2] Ali Bayat Kashkoli[3] and Mohammad Dehmardeh Ghalehno[2]

1*- Corresponding author, Ph.D. Student in Lignocellulosic Composites, Zabol University, Iran, Email: haniye.shurvazi@gmail.com
2- Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Industries, Zabol University, Zabol, Iran
3- Professor, Department of Wood and Paper Science and Industries, Zabol, Iran

Received: September 2023 Revised: February 2024 Accepted: February 2024

Abstract

Background and purpose: This study was conducted with the aim of investigating parallel strand lumber (PSL) made from reed residue and laminated veneer lumber (LVL) obtained from poplar wood reinforced with glass fiber reinforced polymer (FRP) using epoxy resin.

Materials and methods: The independent variable was FRP reinforcement for either LVL or PSL and control sample either LVL or LSL without FRP. The mechanical properties of the manufactured boards including bending strength (MOR) and modulus of elasticity (MOE) in the width and edge of the test sample, shear strength, compression strength parallel to the grain, internal bonding and screw withdrawal strengths were investigated as dependent variables. The obtained results were analyzed using completely randomized design and SPSS software.

Results: Results showed that for all studied mechanical properties, the use of FRP increased the strength the PSL and LVL panels. For LVL, the effect of strengthening the samples with FRP was significant at the level of 1% and also for the modulus of rupture of the width and edge samples showed an increase of 93% and 59%, respectively. The value of MOE for samples reinforced with FRP showed an increase of 89.6 and 132% for the width and length of the PSL samples, respectively. For LVL, the MOE value of the width and edge of the samples increased by 54 and 95.5% with reinforcement. Reinforced PSL samples have improved shear strength by 31%, while this value was only 2.5% for LVL. In case of internal bonding, reinforcement with FRP improved the internal bonding strength of the samples by 92%. Screw withdrawal strengths improved by 27% due to the strengthening of the test samples by FRP.

Conclusion: According to the results, it can be stated that the use of glass fibers and epoxy resin has a significant positive effect on the mechanical strength of PSL made of reed and LVL and it is possible to use low quality raw materials such as reed and low quality poplar wood layers.

Key words: Parallel strand lumber (PSL), laminated veneer lumber (LVL), polymer reinforced with glass fibers and epoxy resin (FRP), mechanical properties.

بررسی تقویت الوار تراشه موازی (PSL) حاصل از ضایعات نی و الوار روکش لایه‌ای (LVL) ساخته شده از صنوبر با پلیمر تقویت‌شده با الیاف (GFRP)

حانیه شوروزی[۱*]، محمد شمسیان[۲]، علی بیات کشکولی[۳] و محمد دهمرده قلعه نو[۲]

*۱-دانشجوی مقطع دکتری کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی و نویسنده مسئول، دانشگاه زابل، ایران. پست الکترونیک:haniye.shurvazi@gmail.com

۲-دانشیار، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، زابل، ایران

۳-استاد، گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، زابل، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۲ تاریخ اصلاح نهایی: بهمن ۱۴۰۲ تاریخ پذیرش: اسفند ۱۴۰۲

چکیده

سابقه و هدف: این مطالعه با هدف بررسی الوار تراشه موازی (PSL) ساخته شده از ضایعات نی و الوار روکش لایه‌ای (LVL) حاصل از چوب صنوبر با پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (FRP) و رزین اپوکسی انجام شده است.

مواد و روش‌ها: متغیرمستقل افزودن الیاف GFRP در LVL و PSL و مقایسه آنها با حالت بدون استفاده از GFRP بود. ویژگی‌های مکانیکی تخته‌های ساخته‌شده شامل مقاومت خمشی (MOR) و مدول‌الاستیسیته (MOE) در پهنا و لبه نمونه آزمونی، مقاومت برشی، مقاومت فشاری موازی با الیاف، مقاومت فشاری عمود بر الیاف، چسبندگی داخلی و مقاومت نگهداری پیچ به‌عنوان متغیرهای وابسته بررسی شدند. نتایج به‌دست‌آمده در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار (SPSS) تجزیه‌وتحلیل شد.

نتایج: نتایج نشان داد در همه ویژگی‌های مکانیکی مورد مطالعه، استفاده از GFRP موجب تقویت ویژگی‌های مکانیکی در پانل‌های PSL و LVL گردید. برای LVL اثر تقویت نمونه‌ها با GFRP برای مدول گسیختگی در سطح یک درصد معنی دارشد و MOR برای پهنا و لبه نمونه‌های آزمونی به ترتیب افزایش ۹۳٪ و ۵۹٪ را نشان داد. مقدار MOE در صورت تقویت با GFRP برای پهنا و لبه نمونه‌های آزمونی PSL به ترتیب افزایش ۸۹/۶ و ۱۳۲ درصدی را نشان داد. برای LVL، مقدار MOE پهنا و لبه نمونه آزمونی پس از تقویت افزایش ۵۴ و ۹۵/۵ درصدی داشته است. تقویت نمونه‌های آزمونی PSL موجب بهبود مقاومت برشی آنها به میزان ۳۱ درصد شده است، در حالی‌که این مقدار برای LVL تنها ۲/۵ درصد است. در آزمون چسبندگی داخلی تقویت با GFRP موجب بهبودی ۹۲ درصدی مقاومت چسبندگی داخلی نمونه‌ها شد. به‌نحوی‌که مقاومت نگهداری پیچ در اثر تقویت نمونه‌های آزمونی با GFRP تا ۲۷ درصد بهبود یافت.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان کرد که استفاده از الیاف شیشه و رزین اپوکسی به نحو چشم‌گیری بر مقاومت‌های مکانیکی تخته تراشه ساخته شده از نی و تخته الوار لایه‌ای تأثیر مثبت داشته و امکان بهره‌گیری از مواد اولیه نه‌چندان مرغوب مانند نی و ضایعات لایه‌های چوبی صنوبر را فراهم کرده است.

واژه‌های کلیدی: الوار تراشه موازی (PSL)، الوار روکش لایه (LVL)، پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی (GFRP) ویژگی‌های مکانیکی.

مقدمه

کمبود مواد خام لیگنوسلولزی برای تولید محصولات چوبی مهندسی شده به یک نگرانی بزرگ در سال‌های اخیر تبدیل شده است (Pędzik *et al*., 2021). این کمبود به دلیل تعدادی از عوامل ازجمله جنگل‌زدایی، شهرنشینی و تغییرات آب و هوایی است. تقاضا برای چوب نیز در صنایع ساخت‌وساز و مبلمان افزایش یافته است که منجر به از بین رفتن جنگل‌های طبیعی و از سویی کاهش سطح جنگل‌ها برای کاشت سایر محصولات شده است (Worku *et al*., 2023). محصولات مهندسی شده چوبی با

چسباندن رشته‌ها، ذرات یا لایه‌ها و یا روکش‌های چوب به یکدیگر با استفاده از چسب، حرارت و فشار ساخته می‌شوند. این محصولات به دلیل دوام، مقاومت و مقرون به‌صرفه بودن در مقایسه با محصولات چوبی متداول محبوبیت بیشتری پیدا کرده است (Sotayo *et al*., 2020). بااین‌حال، کمبود مواد اولیه منجر به افزایش قیمت محصولات چوبی مهندسی شده است. قیمت مواد اولیه مانند خاک اره، خرده چوب و تراشه به دلیل عرضه کم افزایش یافته است. این موضوع برقیمت محصولات نهایی مانند تخته سه‌لا، تخته خرده چوب و تخته فیبر با دانسیته متوسط (MDF) (Medium-density fiberboard) تأثیر منفی گذاشته است. به‌طورکلی، کمبود مواد خام لیگنوسلولزی برای تولید محصولات چوبی مهندسی شده موضوعی پیچیده است که نیازمند رویکردی چندوجهی است. با اجرای ترکیبی از راهبردها، ممکن است بتوان به این چالش پرداخت و از تأمین پایدار مواد خام برای صنعت اطمینان حاصل کرد. محصولات مهندسی شده چوب خانواده‌ای از مواد مبتنی بر چوب هستند که با چسباندن ذرات یا الیاف چوب با چسب به یکدیگر تولید می‌شوند. این مواد به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در مقایسه با چوب ماسیو خواص بهبود یافته‌ای داشته باشند و برای طیف وسیعی از کاربردها مناسب باشند. انواع مختلفی از محصولات چوبی مهندسی شده وجود دارد که هر یک خواص و کاربردهای منحصربه‌فرد خود را دارند. برخی از پرکاربردترین انواع آن عبارت است از: تخته لایه، تخته تراشه جهت‌دار(OSB)(Oriented strand board)، الوار روکش لایه (LVL) (Laminated veneer lumber) و تخته خرده چوب، هر یک از این مواد دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند که آنها را برای کاربردهای مختلف مناسب می‌کند (Gong *et al*., 2021; Sotayo *et al*., 2020; Sun *et al*., 2020). محصولات مهندسی شده چوبی نیز نسبت به چوب ماسیو سنتی سازگارتر با محیط‌زیست هستند. این مواد با استفاده از قطعات کوچک‌تر چوب و محصولات جانبی دیگر صنایع، قادر به کاهش ضایعات و استفاده مؤثرتر از منابع طبیعی هستند. علاوه بر این، بسیاری از محصولات چوبی مهندسی شده با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر تولید می شوند و اثرهای زیست‌محیطی آن‌ها را کاهش می‌دهند (Markström *et al*., 2018; Milner, 2009). تخته تراشه جهت‌دار از کنار هم قرار گرفتن تراشه‌های چوبی و اتصال آنها با چسب پدید می‌آید، درحالی‌که تخته الوار لایه‌ای از قرار گرفتن لایه‌های چوبی به‌صورت موازی برروی یکدیگر به‌وسیله یک رزین متصل می‌شوند، درنتیجه محصولات چوبی مهندسی شده جایگزینی همه کاره و پایدار برای چوب به‌صورت توده (ماسیو) سنتی هستند. آنها مقاومت، ثبات و پایداری محیطی بهبود یافته‌ای را ارائه می‌دهند و آنها را به انتخابی جذاب برای طیف وسیعی از کاربردها تبدیل می‌کنند. با تحقیق و توسعه مداوم، این احتمال وجود دارد که در سال های آینده کاربردهای جدید و نوآورانه از این مواد وجود داشته باشند.

صنوبر که به‌دلیل رشد سریع و در دسترس بودن فراوان شناخته شده است، به‌عنوان یک منبع چوبی مناسب برای تولید کامپوزیت‌های چوبی مورد توجه قرار گرفته است. سرعت رشد سریع و خواص مطلوب چوب، آن را برای کاربردهای مختلف در صنایع چوب و کاغذ مناسب می‌کند (Kurt *et al*., 2012). درنتیجه، صنوبر به‌عنوان یک‌گونه چوبی با رشد سریع با ظرفیت بالا برای تولید کامپوزیت‌های چوب شناخته می شود. بنابراین کاربردهای گونه صنوبر به دلیل خواص چوبی مطلوب و رشد سریع این درخت مناسب است. در دسترس-پذیری چوب صنوبر با رشد سریع، عرضه ثابت و فراوان مواد اولیه را تضمین می‌کند و آن را به گزینه‌ای جذاب برای تولید کامپوزیت‌های چوبی در صنایع مختلف تبدیل می‌کند (Dumitrascu *et al*., 2020). نی (*Arundo donax* L) متعلق به خانواده Poaceae از تیره Arundinae است، گیاهی است که به‌صورت خودرو در محیط‌های مختلف رشد می‌کند و بیشتر در مناطق نیمه گرمسیری و معتدل گرم یافت می‌شود. گیاه نی به دلیل عملکرد بالای زیست‌توده در هکتار و ترکیب فیبری آن، ظرفیت بالایی برای تولید محصولات مختلف دارد. این گیاه با وجود داشتن چرخه فتوسنتزی C3، سرعت فتوسنتز بالایی دارد و عملکرد آن مشابه گیاهان C4 است

(Shafaei *et al*., 2023; Nazarpour *et al*., 2021). اخیراً گیاه نی ظرفیت قابل‌توجهی را به‌عنوان یک پسماند لیگنوسلولزی مهم برای تولید کامپوزیت‌های مهندسی شده چوبی نشان داده است. این گیاه دارای چندین مزیت ازجمله دسترس‌پذیری گسترده، رشد سریع و پایداری است. درحالی‌که مطالعات خاص در مورد استفاده از گیاه نی در تولید کامپوزیت‌های چوبی به‌ویژه الوار تراشه موازی (PSL) (Parallel strand lumber) بسیار محدود است. تحقیقات انجام شده بیانگر ظرفیت مناسب گیاه نی برای استفاده در پانل‌های مهندسی شده ساختمانی است. تحقیق و توسعه بیشتر در این زمینه به استفاده کامل از ظرفیت گیاه نی در تولید کامپوزیت‌های چوبی کمک می‌کند (Mentrasti *et al*., 2021; Fiore *et al*., 2014).

تقویت این چندسازه مهندسی شده در خاصیت مواد اولیه کم ارزش مورد استفاده آن نهفته است. زیرا نمی‌توان انتظار داشت که چندسازه تولید شده فقط با استفاده از نی و بدون تقویت مناسب قابلیت به‌کارگیری را داشته باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های GFRP به دلیل امکان جایگزینی مواد سنتی در کاربردهای مختلف، به‌سرعت افزایش یافته است. GFRP یک ماده کامپوزیتی است که دارای ماتریس پلیمری بوده و با الیاف تقویت‌شده (از جنس شیشه، کربن، آرامید، یا بازالت) است. جنس پلیمر نیز معمولاً اپوکسی، رزین استر وینیل، یا پلی‌استر ترموست است، هرچند از رزین‌های فنیل فرمالدئیدی نیز استفاده می‌شود (Singh *et al*., 2022; Hollaway, 2010). مواد GFRP توجه و شناخت قابل‌توجهی را برای ظرفیت خود در تقویت کامپوزیت‌های چوبی به دست آورده‌اند. آنها مزایای متعددی نسبت به مواد تقویت کننده متداول دارند و کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. یکی از مزایای اصلی FRPها نسبت مقاومت به وزن بالای آنهاست. الیاف مورد استفاده در FRPها، به‌ویژه الیاف کربن، دارای خواص مکانیکی استثنایی ازجمله مقاومت کششی و سختی بالا هستند. هنگامی‌که این الیاف در یک ماتریس پلیمری قرار می‌گیرند، مقاومت خود را به مواد کامپوزیت منتقل کرده و عملکرد مکانیکی افزایش می‌یابد. FRPها در مقایسه با مواد سنتی مانند فولاد یا آلومینیوم می‌توانند مقاومت و سفتی بالاتری از خود نشان دهند، درحالی‌که وزن آنها بسیار سبک تر است (Ling *et al*., 2020). با توجه به اهمیت استفاده از پسماندهای کشاورزی در ساخت فراورده‌های مهندسی‌شده چوب، در این تحقیق در نظر است که PSL و LVL ساخته شده از ضایعات نی و صنوبر در دو حالت بدون تقویت و تقویت‌شده با الیاف شیشه و رزین اپوکسی (FRP) مورد مطالعه قرار گیرد. با توجه به اینکه گیاه نی دارای برخی ضعف‌ها (مانند سطح مومی و براق) است، چسبندگی کمی از خود نشان می‌دهد و متناسب با این ضعف بر روی مقاومت های مکانیکی مانند خمشی و برشی تأثیرگذار است. بنابراین هدف اصلی، بهبود چسبندگی گیاه نی با کاربرد GFRP است.

مواد و روش‌ها

مواد اولیه

لایه‌های چوب صنوبر از یک کارخانه چوب‌بری با نام پویا چوب با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر و درصد رطوبت ۷/۷ درصد و ساقه‌های نی از نیزارهای واقع در اطراف شهرستان نیشابور تهیه و تراشه‌گیری به‌صورت دستی با ابعاد نسبی در حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر و با ضخامت یک تا سه میلی‌متر انجام شد. رطوبت تراشه‌های مورد استفاده پس از محاسبه هفت درصد گزارش شد. همچنین، رزین اپوکسی، الیاف شیشه از شرکت مقاوم‌سازان افزیر تهران و با ضخامت ۰/۱۶ میلی متر با دانسیته ۴۲۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مقاومت کششی ۲۳۰۰ مگاپاسکال تهیه شد. چسب اپوکسی با نام تجاری EPIKOTE 828 و هاردنر مورد استفاده با نام تجاری EPIKURE F205 از شرکت مقاوم‌سازان افزیر تهران تهیه گردید. میزان ویسکوزیته رزین اپوکسی در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۱۲–۱۴ سانتی‌پوآز بود. میزان اپوکسی موجود در رزین در حدود ۵۲۶۰ تا ۵۴۲۰ میلی‌مول بر کیلوگرم از سوی سازنده گزارش شد. چسب اوره فرمالدهید به‌صورت پودر از شرکت سامد خریداری و به‌صورت محلول ۶۰٪ استفاده شد. برای هاردنر از آمونیوم کلراید دو درصد استفاده شد (از

شرکت کیمیا طب تهران تهیه گردید).

ساخت LVL

برای تشکیل کیک از یک قالب چوبی با ابعاد ۲۲×۶۰ سانتی‌متر و شابلون ۲ سانتی‌متر استفاده گردید. ابتدا لایه‌های مورد نیاز به ابعاد ۲۲×۶۰ سانتی‌متر برش خورده که ضخامت لایه‌ها ۱/۵ میلی‌متر بود. ابتدا لایه‌ای از صنوبر در جهت طول قالب و موازی با الیاف داخل قالب قرار داده شده، سپس چسب اوره فرم‌آلدئید مصرفی به‌طور ثابت و برابر با ۲۰۰ گرم بر مترمربع بر روی لایه‌ها توسط پیستوله در داخل یک قالب اسپری شد. بعد ازآن به همین ترتیب لایه‌های بعدی صنوبر به تعداد ۱۴ لایه روی هم قرار گرفتند و درنهایت کیک تشکیل شد. ارتفاع تقریبی کیک تشکیل شده به ۲۰ میلی‌متر رسید. در فرایند ساخت تخته LVL با الیاف شیشه و رزین اپوکسی، روش ساخت به همین ترتیب با این تفاوت که در لایه وسط به جای لایه صنوبر، الیاف GFRP قرار گرفت. بنابراین تقویت لایه میانی با رزین اپوکسی و الیاف شیشه انجام شده است و برای بقیه لایه‌ها از چسب اوره فرمالدهید استفاده شده است. میزان درصد اختلاط رزین اپوکسی با هاردنر، ۷۰٪ به ۳۰٪ بود. پس از آماده‌سازی لایه‌ها کیک تشکیل شده پس از پرس سرد به پرس گرم منتقل شد. در این بررسی، از دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد، زمان پرس ۱۰ دقیقه و فشار پرس ۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع استفاده گردید.

ساخت PSL

ابتدا چسب مصرفی به میزان ۴ درصد وزن خشک تراشه های نی با غلظت ۴۵ درصد آماده‌سازی شد. برای هاردنر از آمونیوم کلراید به میزان دو درصد وزن خشک چسب استفاده گردید. چسب آماده شده به‌وسیله پیستوله بر روی تراشه‌های نی اسپری شد. سپس تراشه‌های نی آغشته به چسب با هم مخلوط شدند. مدت زمان اختلاط، برای هر تخته حدود ۲۰ دقیقه بود. پس از خارج کردن تراشه‌ها از داخل تشت چسب-زنی، تشکیل کیک به‌صورت دستی و در یک قالب ۲۲×۶۰ سانتی‌متر انجام شد. کیک تشکیل شده پس از انجام پرس سرد به داخل پرس گرم آزمایشگاه منتقل شد و به تخته تبدیل گردید. برای جلوگیری از چسبیدن کیک تراشه به صفحات پرس هیدرولیکی گرم، از ورق‌های فلزی استفاده شد. میله شابلون فلزی و کیک تراشه، بین دو ورق فلزی قرار داده شد. پس از خروج کامل، محصول ساخته شده به‌تدریج در محیط سرد گردید. دمای محصول به‌تدریج کاهش یافته تا اینکه با محیط اطراف خود هم‌دما شد و در ادامه اندازه‌بری گردید. دانسیته مورد نیاز تخته‌ها ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. بعد از خروج تخته‌ها از پرس گرم، نمونه‌ها به مدت دو هفته به‌منظور رسیدن به رطوبت تعادل با محیط و یکسان‌سازی تنش‌های محیطی در شرایط آزمایشگاهی قرار داده شدند. ضخامت تخته‌ها بعد از پرس ۲۰ میلی‌متر بود و رطوبت نمونه ها در هنگام آزمون حدود ۷ درصد بود. برای تقویت تخته‌های PSL ساخته شده، از الیاف FRP و رزین اپوکسی استفاده شد بدین‌صورت که سطح و کف تخته‌ها با یک لایه از الیاف و رزین اپوکسی پوشش داده شد (شکل ۱).

شکل ۱– PSL ساخته شده از نی و LVL ساخته‌شده از صنوبر
Figure 1. PSL made of Reed and LVL made of poplar

تهیه نمونه‌های آزمونی

کلیه چندسازه‌های ساخته شده قبل از انجام آزمون‌های مکانیکی توسط اره گرد کناره‌بری و به ابعاد ۲۲×۵۵ سانتی‌متر تبدیل شدند. پس از کناره‌بری، نمونه‌های آزمونی مطابق استانداردهای مندرج در جدول ۱ برش داده شدند. نمونه‌های آزمونی پس از برش در شرایط کلیما (رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۱±۲۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲ هفته نگه داری گردیدند تا به رطوبت تعادل محیط برسد.

جدول ۱– استاندارد نمونه‌های آزمونی
Table 1- The standards of the test samples

Test type	Standard type
modulus of rupture surface	ASTM D 5456-99
modulus of rupture thickness	ASTM D 1037-94
Tension Perpendicular to Surface (Internal Bond)	EN 319 (1993)
Compression strength parallel to the grain	EN 300 (1997)
Compression strength perpendicular to the grain	EN 300 (1997)
Screw Withdrawal	EN 300 (1997)

اندازه‌گیری مقاومت‌های مکانیکی

مقاومت خمشی و مدول‌الاستیسیته تیرها طبق استاندارد ASTM ۵۴۵۶ با دستگاه آزمون مکانیکی H25KS مدل HOUNSFILD (شکل ۲) واقع در آزمایشگاه مکانیک اندازه‌گیری شدند. قدرت نگهداری پیچ با استفاده از دستگاه مکانیکی با سرعت بارگذاری ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه در جهت عمود بر سطح (ضخامت) مطابق با استاندارد BS EN 320:2011 اندازه‌گیری شد.

شکل ۲- PSL و LVL ساخته‌شده تحت آزمون خمش استاتیک

Figure 2. PSL and LVL of the fabricated under static bending test

روش تجزیه‌وتحلیل آماری

این تحقیق در قالب طرح کاملاً تصادفی طرح‌ریزی شد. به‌منظور تجزیه‌وتحلیل اطلاعات به‌دست آمده ضمن رعایت پیش‌فرض‌های لازم مانند نرمال بودن داده‌ها، از آنالیز واریانس توسط نرم‌افزار SPSS استفاده شد.

نتایج

در ادامه جدول‌های تجزیه واریانس مربوط به تخته‌های LVL و PSL برای تمامی آزمون‌های انجام شده قابل ملاحظه است.

جدول ۲- تجزیه واریانس مقاومت‌های مکانیکی تخته PSL

Table 2- Variance analysis table of mechanical resistances of PSL board

Source	df	MOR		MOE		Compression strength parallel to the grain	Compression strength perpendicular to the grain	Tension Perpendicular to Surface (Internal Bond)	Screw Withdrawal
		MORS	MORT	MOES	MOET				
GFRP	1	235.3**	347.09**	19957256**	72913435**	.068**	1.805**	.068**	619.637**
Error	16	1.498	6.117	674285.762	2392523.14	.002	.077	.002	5.285
Total	18	4351.37	2974.17	239246689	568600002	.440	85.898	.440	45635.230

** Significance at the one percent level

جدول ۳- تجزیه واریانس مقاومت‌های مکانیکی تخته LVL

Table 3- Variance analysis table of mechanical resistance of LVL board

Source	df	MOR		MOE		Compression strength parallel to the grain	Compression strength perpendicular to the grain	Tension Perpendicular to Surface (Internal Bond)	Screw Withdrawal
		MORS	MORT	MOES	MOET				
GFRP	1	2658.**	3002**	123733963**	633685458**	9.346**	5.746**	.994**	639.38**
Error	16	32.173	33.092	1535973.682	28114816.78	.339	.187	.023	2.931
Total	18	54502.8	33166.2	2885529144	7148745090	330.356	219.336	11.388	11270.43

** Significance at the one percent level

مقاومت خمشی (MOR)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت خمشی لبه و سطح پهن PSL و LVL در سطح ۱درصد معنی‌دار است. جدول ۴، مقایسه میانگین نتایج تأثیر GFRP را بر مقاومت خمشی لبه و سطح پهن PSL و LVL نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها معیارهای مقاومت ماده در برابر خمش و شکست تحت بار هستند. تقویت PSL و LVL با GFRP به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی آنها را در مقایسه با حالت غیرتقویت شده بهبود می‌بخشد. برای PSL، مقدار MOR لبه از ۷/۴۶ مگاپاسکال به ۱۶/۲۵ مگاپاسکال در هنگام تقویت با GFRP افزایش یافت، درحالی‌که مقدار MOR سطح پهن از ۱۱/۴۶ به ۱۸/۶۹ مگاپاسکال افزایش یافت. این موضوع نشان‌دهنده افزایش ۱۱۷ و ۶۳ درصدی در مقاومت‌های خمشی مواد است. برای LVL، مقدار MOR لبه از ۲۷/۶۶ مگاپاسکال به ۵۳/۴۹ مگاپاسکال در هنگام تقویت با GFRP افزایش یافت، درحالی‌که مقدار MOR سطح پهن از ۴۱/۲ مگاپاسکال به ۶۵/۵۵ مگاپاسکال افزایش یافت. این مقادیر بیانگر افزایش ۹۳٪ و ۵۹٪ در این مقاومت است. به‌طورکلی، نتایج این مطالعه نشان داد که تقویت مواد مبتنی بر چوب با GFRP می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی آنها را بهبود بخشد، به‌ویژه مقاومت آنها در برابر خمش و شکستن تحت بار. این پیامدهای مهمی برای استفاده از این مواد در ساخت‌وساز و سایر کاربردها دارد که در آن مقاومت و دوام از عوامل مهم هستند.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف FRP بر مقاومت خمشی PSL و LVL

Table 4- Comparison of the average effect of using FRP fibers on the bending strength of PSL and LVL

Panel type	MORT (MPa)	MORS (MPa)
PSL	7.46[d]	11.46[d]
PSL-GFRP	16.25[c]	18.69[c]
LVL	27.66[b]	41.2[b]
LVL-GFRP	53.49[a]	65.55[a]

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level.

نتایج مشابهی توسط Morales-Conde و همکاران (۲۰۱۵)، Campilho و همکاران (۲۰۱۰) و de la Rosa García و همکاران (۲۰۱۳) در مورد تقویت سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات GFRP گزارش شده است که با نتایج این تحقیق همسو است. با مقایسه میانگین افزایش مقاومت خمشی LVL تقویت‌شده و تقویت نشده با GFRP می‌توان دریافت که در صورت استفاده از LVL تقویت‌شده GFRP می‌توان مقاومت خمشی را بهبود داد. این نتایج مشهود است که صفحات GFRP هنگامی‌که در تیر قرار می‌گیرد می‌تواند به حذف تنش‌ها به دور از مقاومت بحرانی کمک کند که باعث کاهش عیوب در چوب می‌شود (Raftery and Rodd, 2015). همچنین پیش‌بینی‌هایی برای رفع نقص از ناحیه تنش بسیار شدید و پیش‌بینی خرابی‌ها در مقاومت مرتبط با چوب LVL تقویت نشده با GFRP انجام شد. نتایج نشان داد ویژگی‌های مکانیکی PSL و LVL تقویت‌شده با GFRP نسبت به نوع تقویت نشده آن بیشتر بود. وجود ترک‌ها و نقص‌های ذاتی چوب در زمان باربری سازوکار رفتار چوب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به شکست سریع می‌گردد. در نمونه‌های LVL تقویت‌شده با GFRP، استفاده از این پوشش مانع تکثیر و رشد این نقایص می‌شود و عملکرد بسیار بهتری هم ازلحاظ باربری و هم ازلحاظ شکل‌پذیری خواهد داشت. با توجه به اینکه چوب ساخته دست طبیعت و ماده‌ای ذاتاً ارتوتروپ (تفاوت خواص مکانیکی در جهات مختلف) است، در خواص آن تغییرات گسترده‌ای دیده می‌شود. علاوه بر موارد ذکرشده، میزان درصد رطوبت چوب، عمر چوب و عیوب ظاهری و غیره در خواص مکانیکی آن مؤثرند. تحقیقات زیادی درباره ترمیم و تقویت سازه‌های چوبی با FRP انجام‌شده است که نتایج این مطالعه با نتایج به‌دست‌آمده توسط آنان مطابقت دارد (Corradi *et al*., 2021; Borri *et al*., 2003, 2005; Raftery and Rodd, 2015). الیاف FRP یک ماده کامپوزیت ساخته‌شده از الیاف و یک ماتریس پلیمری است. هنگامی‌که برای تقویت چوب استفاده می‌شود، کامپوزیت‌های FRP می‌توانند به افزایش مقاومت، سختی و دوام ساختار چوب کمک کنند (Corradi *et al*., 2021; Borri *et al*., 2005). سازوکار اصلی FRP برای تقویت چوب، انتقال تنش بین چوب و کامپوزیت FRP است؛ به‌طوری‌که کامپوزیت FRP به‌عنوان یک تقویت‌کننده خارجی عمل می‌کند و به توزیع یکنواخت بار در ساختار چوب کمک می‌کند (Kliger *et al*., 2016). این موضوع باعث کاهش نقاط تمرکز تنش در چوب می‌شود که می‌تواند به جلوگیری از ترک‌خوری، ایجاد شکاف یا سایر انواع تغییر شکل کمک نماید (Vahedian *et al*., 2019). یکی دیگر از سازوکارهای FRP برای تقویت چوب، جلوگیری از رطوبت و آسیب‌های شیمیایی است. ماتریس پلیمری در کامپوزیت FRP معمولاً در برابر آب، مواد شیمیایی و سایر عوامل محیطی مقاوم است که می‌تواند باعث تخریب چوب در طول زمان شود. با محافظت از چوب در برابر این عناصر مضر، کامپوزیت FRP می‌تواند به افزایش طول عمر ساختار چوب کمک کند (Huang *et al*., 2023).

مدول‌الاستیسیته خمشی (MOE)

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر MOE لبه و سطح پهن PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی دار است. جدول ۵، مقایسه میانگین نتایج تأثیر GFRP را بر MOE لبه و سطح پهن PSL و LVL نشان می‌دهد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که تقویت PSL و LVL با GFRP به‌طور قابل‌توجهی MOE را در مقایسه با حالت غیرتقویت شده بهبود می‌بخشد. برای PSL، مقدار MOE لبه از ۳۰۲۸ مگاپاسکال به ۷۰۵۳ مگاپاسکال در هنگام تقویت با GFRP افزایش یافت، درحالی‌که مقدار MOE سطح از ۲۳۵۰ به ۴۴۵۶ مگاپاسکال افزایش یافت. این موضوع بیانگر افزایش ۱۳۲ و ۸۹/۶ درصدی در MOE است. برای LVL، مقدار MOE لبه از ۱۲۴۲۳ مگاپاسکال به ۲۴۲۸۹ مگاپاسکال در هنگام تقویت با GFRP افزایش یافت، درحالی‌که مقدار MOE سطح از ۹۷۰۹ مگاپاسکال به ۱۴۹۵۳ مگاپاسکال افزایش یافت. این مقادیر بیانگر افزایش ۹۵/۵ و ۵۴ درصدی MOE است.

در سال‌های اخیر، علاقه فزاینده‌ای به استفاده از GFRP برای

افزایش MOE چوب وجود داشته است. نتایج مشابهی توسط Cheng و Hu (۲۰۱۱)، Dagher و Lindyberg (۲۰۰۰) و Morales-Conde و همکاران (۲۰۱۵) در مورد بهبود MOE سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات FRP گزارش شده است که با نتایج این تحقیق همسو است. هنگامی‌که GFRP برای تقویت چوب استفاده می‌شود، به‌عنوان یک تقویت‌کننده عمل می‌کند و به‌طور قابل‌توجهی MOE آن را بهبود می‌بخشد. الیاف موجود در کامپوزیت GFRP سفتی چوب را افزایش داده و آن را در برابر تغییر شکل مقاوم‌تر می‌کند. با ترکیب خواص سودمند چوب و FRP، کامپوزیت به دست آمده مقاومت، دوام و ثبات ابعادی بیشتری را نشان می‌دهد (Wdowiak-Postulak, 2020). ادغام FRP در چوب مقاومت و سفتی آن را افزایش داده و آن را قادر می‌سازد بارها و تنش‌های بالاتر را تحمل کند (Cheng and Lindyberg, 2000). این بهبود به‌ویژه در کاربردهای سازه‌ای که در آن نسبت‌های مقاومت به وزن بالا مورد نظر است، سودمند می‌باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف FRP بر مدول‌الاستیسیته PSL و LVL

Table 5- Comparison of the average effect of using FRP fibers on the modulus of elasticity of PSL and LVL

Panel	MOET (MPa)	MOES (MPa)
PSL	3028[d]	2350[d]
PSL-GFRP	7053[c]	4456[c]
LVL	12423[b]	9709[b]
LVL_GFRP	24298[a]	14953[a]

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level

مقاومت برشی موازی با سطح

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت برشی موازی با سطح PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. مقاومت برشی معیاری از توانایی یک ماده برای مقاومت در برابر نیروهایی است که موازی با سطح عمل می‌کنند و باعث لغزش یا تغییر شکل مواد می‌شوند. نتایج این مطالعه در مورد مقاومت برشی نشان داد که تقویت PSL با GFRP مقاومت برشی آن را از ۰/۱۳ به ۰/۱۷ مگاپاسکال افزایش می‌دهد که بیانگر افزایش ۳۱ درصدی است. بااین‌حال، افزایش مقاومت برشی برای LVL تقویت شده با GFRP بسیار کمتر است، به‌نحوی‌که تنها افزایش ۲/۵ درصدی از ۶/۵۰ به ۶/۶۶ مگاپاسکال است (جدول ۶). نتایج مشابهی توسط Corradi و همکاران (۲۰۰۶) و Ribeiro و همکاران (۲۰۱۹) در مورد بهبود مقاومت برشی سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات GFRP گزارش شده است که با نتایج این تحقیق همسو است. به نظر می‌رسد تفاوت در اثر استفاده از GFRP بر مقاومت برشی PSL و LVL می‌تواند به تفاوت در ویژگی‌های ساختاری آنها مرتبط باشد. PSL در مقایسه با LVL دارای چگالی کمتر و مقاومت برشی کمتری است، به این معنی که در برابر بارگذاری بیشتر مستعد تغییر شکل است. بنابراین، تقویت PSL با GFRP در مقایسه با LVL می‌تواند تأثیر بیشتری بر مقاومت برشی آن داشته باشد. به‌طورکلی، نتایج مطالعه نشان داد که تقویت مواد مبتنی بر چوب با FRP می‌تواند مقاومت برشی آنها را بهبود ببخشد، با تأثیر بیشتری برای PSL در مقایسه با LVL. این موضوع پیامدهای مهمی برای استفاده از این مواد در ساخت‌وساز و سایر کاربردها دارد که در آن مقاومت برشی یک عامل مهم است. یکی از سازوکارهای مواد FRP در تقویت چوب، انتقال بار برشی است (Zhou *et al*., 2020). بار برشی زمانی اتفاق می‌افتد که دو قسمت از سازه در جهات مختلف حرکت کنند. کامپوزیت

FRP را می‌توان به گونه‌ای روی چوب اعمال کرد که به مقاومت در برابر بار برشی کمک کند که می‌تواند به جلوگیری از تغییر شکل یا شکست ساختار چوب کمک نماید (Borri *et al*., 2005; Ribeiro *et al*., 2019).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف GFRP بر مقاومت برشی PSL و LVL

Table 6- Comparison of the average effect of using FRP fibers on the shear strength of PSL and LVL

Panel	Shear strength(MPa)
PSL	0.13[d]
PSL-GFRP	0.17[c]
LVL	6.5[b]
LVL-GFRP	6.66[a]

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level

مقاومت فشاری موازی با الیاف سطح

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت فشاری موازی با الیاف سطح PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. نتایج این مطالعه در مورد مقاومت فشاری موازی با الیاف سطح نشان می‌دهد که تقویت PSL با FRP فشاری موازی با الیاف آن را از ۱/۴۹ به ۲/۰۶ مگاپاسکال افزایش می‌دهد که بیانگر افزایش ۳۸/۲ درصدی است. بااین‌حال، افزایش مقاومت فشاری موازی با الیاف سطح برای LVL تقویت شده با GFRP بسیار کمتر است، به‌نحوی که با افزایش ۴۱/۹ درصدی از ۳/۴۶ به ۴/۹۱ مگاپاسکال است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت فشاری عمود بر الیاف PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. نتایج این مطالعه در مورد مقاومت فشاری موازی با الیاف نشان می‌دهد که تقویت PSL با GFRP فشاری عمود بر الیاف آن را از ۱/۸۳ به ۲/۴۶ مگاپاسکال افزایش می‌دهد که بیانگر افزایش ۳۴/۴ درصدی است. بااین‌حال، افزایش فشاری عمود بر الیاف برای LVL تقویت شده با GFRP بسیار کمتر است، به‌طوری‌که با افزایش ۳۹/۶ درصدی از ۲/۸۵ به ۳/۹۸ مگاپاسکال است (جدول ۷).

در مطالعات قبلی، به بهبود مقاومت فشاری سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات FRP اشاره شده است (Kliger *et al*., 2016; André and Kliger, 2009; O'Callaghan *et al*., 2022) که همسو با نتایج این بخش از تحقیق است. به‌طورکلی، استفاده از الیاف FRP می‌تواند تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری کامپوزیت داشته باشد. افزودن الیاف FRP به یک ماتریس کامپوزیتی می‌تواند مقاومت و سفتی کلی ماده ازجمله مقاومت فشاری آن را افزایش دهد. به نظر می‌رسد الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کنند، بار فشاری را به طور مؤثرتری توزیع می‌کنند و احتمال شکست یا تغییر شکل تحت فشار را کاهش می‌دهند (O'Callaghan *et al*., 2022; Saad and Lengyel, 2020). توجه به این نکته مهم است که اثرهای خاص الیاف GFRP بر مقاومت فشاری موازی با الیاف سطح PSL و LVL ممکن است با توجه به عواملی مانند نوع، جهت و کسر حجمی الیاف و ترکیب خاص و فرایند ساخت متفاوت باشد.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف **GFRP** بر مقاومت فشاری موازی با الیاف **PSL** و **LVL**

Table 7- Comparison of the average effect of using FRP fibers on parallel compressive strength with PSL and LVL fibers

Panel Type	Compression strength parallel to the grain (MPa)	Compression strength perpendicular to the grain (MPa)
PSL	1.49[d]	1.83[d]
PSL-GFRP	2.06[c]	2.46[c]
LVL	3.46[b]	2.85[b]
LVL-GFRP	4.91[a]	3.98[a]

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level

چسبندگی داخلی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت چسبندگی داخلی PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. در جدول ۸، میانگین مقاومت چسبندگی داخلی PSL و LVL قبل و بعد از تقویت با GFRP (پلیمر تقویت شده با الیاف) ارائه شده است. مقاومت چسبندگی داخلی معیاری از مقاومت و چسبندگی بین لایه‌های ذرات چوب یا روکش‌هایی است که مواد را تشکیل می‌دهند. با توجه به داده‌های جدول، مقاومت چسبندگی داخلی بدون الیاف GFRP ۰/۰۸ مگاپاسکال است. با این حال، هنگامی که PSL با GFRP تقویت می‌شود، مقاومت چسبندگی داخلی به‌طور قابل توجهی به ۰/۲ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده افزایش ۱۵۰ درصدی در مقاومت چسبندگی داخلی است. از سوی دیگر، مقاومت چسبندگی داخلی LVL بدون الیاف GFRP حدود ۰/۵۱ مگاپاسکال است که در حال حاضر به طور قابل توجهی بالاتر از PSL است. بااین‌حال، هنگامی که LVL با GFRP تقویت می‌شود، مقاومت چسبندگی داخلی به ۰/۹۸ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که برابر تقویت ۹۲ درصدی است.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف **GFRP** بر چسبندگی داخلی **PSL** و **LVL**

Table 8- Comparison of the average effect of using FRP fibers on the internal adhesion of PSL and LVL

Panel Type	Tension Perpendicular to Surface (Internal Bond) (MPa)
PSL	0.08
PSL-GFRP	0.2
LVL	0.51
LVL-GFRP	0.98

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level

در مطالعات قبلی، به بهبود مقاومت چسبندگی سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات FRP اشاره شده است (Lau *et al.*, 2016) که همسو با نتایج این بخش از تحقیق است. نتایج نشان داد که اثر تقویت FRP بر مقاومت چسبندگی داخلی در PSL بیشتر از LVL است. به نظر می‌رسد علت این تفاوت در ویژگی‌های ساختاری این دو ماده باشد. PSL از ذرات ریز چوب تشکیل شده است که با رزین به هم چسبیده‌اند، درحالی که LVL از روکش‌های نازک چوبی تشکیل شده است که در لایه‌ها به هم چسبیده‌اند. ذرات چوب کوچک‌تر در PSL ممکن است مشکل بیشتری برای اتصال به یکدیگر

داشته باشند که باعث می‌شود با افزودن تقویت‌کننده FRP مستعد بهبود باشند. نتایج نشان داد که تقویت FRP می‌تواند به‌طور قابل توجهی چسبندگی داخلی مواد مبتنی بر چوب، به‌ویژه PSL را افزایش دهد. یکی از جنبه‌های مهم تقویت FRP مقاومت چسبندگی بین کامپوزیت FRP و چوب است (Lau *et al*., 2016). مقاومت چسبندگی بین کامپوزیت FRP و چوب برای اثربخشی کلی FRP بسیار مهم است، زیرا تعیین‌کننده مقدار بار بین دو ماده است. یکی دیگر از عواملی که باید در هنگام استفاده از FRP برای تقویت چوب در نظر گرفت، جهت‌گیری و قرارگیری کامپوزیت FRP است (Lyons and Ahmed, 2005). جهت‌گیری الیاف در کامپوزیت FRP می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مقاومت و سفتی ساختار چوب تقویت شده داشته باشد (Wang *et al*., 2014). برای نمونه، اگر الیاف به‌موازات جهت بار قرار گیرند، می‌توانند به مقاومت در برابر کشش و تنش‌های خمشی کمک کنند. از سوی دیگر، اگر الیاف عمود بر جهت بار قرار گیرند، می‌توانند به مقاومت در برابر تنش‌های فشاری کمک کنند. علاوه بر جهت‌گیری الیاف، قرارگیری کامپوزیت FRP نیز می‌تواند بر اثربخشی سازه تأثیر بگذارد. به‌عنوان‌مثال، قرار دادن کامپوزیت FRP در پایین تیر می‌تواند به مقاومت در برابر تنش‌های کششی کمک کند، درحالی‌که قرار دادن آن در بالای تیر می‌تواند به مقاومت در برابر تنش‌های فشاری کمک کند (Wang *et al*., 2014). قرارگیری کامپوزیت FRP باید براساس شرایط بار خاص و الزامات طراحی سازه چوبی به‌دقت در نظر گرفته شود. تقویت FRP عملکرد اتصال بین FRP و چوب را افزایش می‌دهد. چسب مورد استفاده برای چسباندن کامپوزیت FRP به سطح چوب نقش مهمی در دستیابی به یک اتصال بادوام و قابل‌اعتماد دارد. انتخاب مناسب مواد چسب و تکنیک‌های کاربرد، اتصال قوی بین FRP و چوب را تضمین می‌کند و عملکرد کلی کامپوزیت بر پایه چوب را بهبود می‌بخشد (Schober *et al*., 2015).

مقاومت نگهداری پیچ

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر الیاف GFRP بر مقاومت نگهداری پیچ PSL و LVL در سطح ۱ درصد معنی دار است. جدول ۹، مقاومت نگهداری پیچ را در PSL و LVL قبل و بعد از تقویت با GFRP (پلیمر تقویت شده با الیاف) نشان می‌دهد. این ویژگی معیاری از توانایی یک پیچ برای نگهداری یا مقاومت در برابر بیرون کشیدن از سازه ساخته شده است. مقاومت نگهداری پیچ در PSL بدون تقویت‌کننده GFRP ۱۸/۳ مگاپاسکال است. با این حال، هنگامی که PSL با GFRP تقویت می‌شود، مقاومت نگهداری پیچ به‌طور قابل توجهی به ۳۰/۲۱ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. این موضوع نشان دهنده افزایش ۶۵ درصدی مقاومت نگهداری پیچ است. از سوی دیگر، مقاومت نگهداری پیچ در LVL بدون GFRP حدود ۴۴/۱ مگاپاسکال است که در حال حاضر به‌طور قابل توجهی بالاتر از PSL است. بااین‌حال، هنگامی که LVL با GFRP تقویت می‌شود، مقاومت نگهداری پیچ به ۵۵/۸۳ مگاپاسکال افزایش می‌یابد که برابر افزایش ۲۷ درصدی است. گزارش‌های مشابهی توسط Yang و همکاران (۲۰۲۰) و Righetti و همکاران (۲۰۱۵) در مورد بهبود مقاومت نگهداری پیچ سازه‌های چوبی با کاربرد صفحات FRP گزارش شده است که با نتایج این تحقیق همسو است. به نظر می‌رسد که در مورد بهبود مقاومت نگهداری پیچ اثر تقویت FRP بر مقاومت نگهداری پیچ در PSL بیشتر از LVL است. این نتیجه را می‌توان به تفاوت در ویژگی‌های ساختاری این دو ماده مرتبط دانست. PSL از تراشه تشکیل شده است که با رزین به هم چسبیده‌اند، درحالی‌که LVL از روکش‌های نازک چوبی تشکیل شده است که در لایه‌ها به هم چسبیده‌اند. ذرات کوچک‌تر چوب در PSL ممکن است در نگهداری پیچ‌ها مشکل بیشتری داشته باشند که با افزودن تقویت‌کننده FRP، آن را مستعد بهبود می‌کند.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر استفاده از الیاف **GFRP** بر مقاومت نگهداری پیچ **PSL** و **LVL**

Table 9- Comparison of the average effect of using FRP fibers on the Screw Withdrawal of PSL and LVL screws

Panel Type	Screw Withdrawal (MPa)
PSL	18.3[d]
PSL-GFRP	30.21[c]
LVL	44.1[b]
LVL-GFRP	55.83[a]

Based on Duncan's grouping, the variables marked with separate English letters are significant at the one percent level

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تقویت چندسازه‌ها با GFRP می‌تواند روشی مؤثر برای تقویت مصالح مبتنی بر چوب مانند PSL و LVL باشد. استفاده از GFRP به‌نحو چشمگیری خواص مکانیکی پانل‌های LVL و PSL را بهبود بخشید. افزایش قابل‌توجه مقاومت چسبندگی داخلی و مقاومت نگهداری پیچ در هر دو ماده نشان می‌دهد که تقویت GFRP می‌تواند خواص مکانیکی و عملکرد این مواد را بهبود ببخشد. این نتایج نشان می‌دهد می‌توان با GFRP برخی عیوب گیاه نی مانند چسبندگی کم به دلیل سطح براق و مومی شکل را برطرف کرد. بااین‌حال، اثربخشی تقویت‌کننده GFRP ممکن است با توجه به ویژگی‌های خاص مواد مبتنی بر چوب تقویت‌شده متفاوت باشد. در مورد PSL و LVL، تفاوت‌های ساختاری بین دو ماده منجر به تأثیر برجسته‌تری از تقویت‌کننده GFRP بر PSL شد. این نتایج پیامدهای مهمی برای استفاده از مواد مبتنی بر چوب در ساخت‌وساز و سایر کاربردها دارد که در آن مقاومت و دوام عوامل مهمی به حساب می‌آیند، ازجمله تیرهای چوبی، پانل‌های ساندویچی و سایر محصولات مهندسی شده چوبی مورد استفاده در صنعت ساختمان کاربرد دارد به‌ویژه اینکه با این پانل‌های مقرون به‌صرفه می‌توان به کاهش هزینه‌های ساخت و ساز کمک شایانی کرد. این نتایج پیامدهای مهمی برای استفاده از مواد مبتنی بر چوب در ساخت‌وساز و سایر کاربردها دارد که در آن مقاومت و دوام عوامل مهمی هستند. تحقیقات آینده می‌تواند استفاده از مواد یا تکنیک‌های تقویت‌کننده دیگر را برای بهبود بیشتر خواص مکانیکی مواد مبتنی بر چوب بررسی کند. درنهایت شایان ذکر است که استفاده از GFRP برای تقویت چوب یک فناوری نسبتاً جدید است و هنوز تحقیق و توسعه در این زمینه ادامه دارد. به این ترتیب، رعایت استانداردهای صنعت و بهترین شیوه‌ها هنگام استفاده از کامپوزیت‌های GFRP برای تقویت چوب و همکاری با متخصصان با تجربه که در این زمینه تخصص دارند، مهم است.

منابع مورد استفاده

-André, A. and Kliger, R., 2009. Strengthening of timber beams using FRP, with emphasis on compression strength: a state of the art review. In Proceedings of the Second Official International Conference of International Institute for FRP in Construction for Asia-Pacific Region APFIS (pp. 193-202).

-Borri, A., Corradi, M. and Grazini, A., 2003. FRP reinforcement of wood elements under bending loads. In Proceedings of the 10th International Conference on Structural Faults+ Repair, London, UK (Vol. 13).

-Borri, A., Corradi, M. and Grazini, A., 2005. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. Composites Part B: Engineering, 36(2), 143-153.

-Campilho, R.D.S.G., De Moura, M.F.S.F., Barreto, A.M.J.P., Morais, J.J.L. and Domingues, J.J.M.S., 2010. Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. Construction and Building Materials, 24(4), 531-537.

-Cheng, F. and Hu, Y., 2011. Nondestructive test and prediction of MOE of FRP reinforced fast-growing poplar glulam. Composites science and technology, 71(8), 1163-1170.
-Corradi, M., Vemury, C.M., Edmondson, V., Poologanathan, K. and Nagaratnam, B., 2021. Local FRP reinforcement of existing timber beams. Composite Structures, 258, 113363.
-Corradi, M., Speranzini, E., Borri, A. and Vignoli, A., 2006. In-plane shear reinforcement of wood beam floors with FRP. Composites Part B: Engineering, 37(4-5), 310-319.
-Dagher, H.J. and Lindyberg, R., 2000. FRP-wood hybrids for bridges: a comparison of E-glass and carbon reinforcements. In Advanced Technology in Structural Engineering (pp. 1-8).
-De la Rosa García, P., Escamilla, A.C. and García, M.N.G., 2013. Bending reinforcement of timber beams with composite carbon fiber and basalt fiber materials. Composites Part B: Engineering, 55, 528-536.
-Dumitrascu, A.E., Lunguleasa, A., Salca, E.A. and Ciobanu, V.D., 2020. Evaluation of selected properties of oriented strand boards made from fast growing wood species. BioResources, 15(1), 199-210.
-Fiore, V., Scalici, T. and Valenza, A.J.C.P., 2014. Characterization of a new natural fiber from Arundo donax L. as potential reinforcement of polymer composites. Carbohydrate polymers, 106, 77-83.
-Gong, M., 2021. Wood and Engineered Wood Products: Stress and Deformation. In Engineered Wood Products for Construction. IntechOpen.
-Hollaway, L.C., 2010. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. Construction and building materials, 24(12), 2419-2445.
-Huang, S., Yan, L. and 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.
-Kliger, I. R., Haghani, R., Brunner, M., Harte, A.M. and Schober, K.U., 2016. Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. European Journal of Wood and Wood Products, 74, 319-330.
-Kurt, R., Meriç, H., Aslan, K. and Çil, M., 2012. Laminated veneer lumber (LVL) manufacturing using three hybrid poplar clones. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 36(2), 237-245.
-Lau, D., Qiu, Q., Zhou, A. and Chow, C.L., 2016. Long term performance and fire safety aspect of FRP composites used in building structures. Construction and building materials, 126, 573-585.
-Lyons, J.S. and Ahmed, M.R., 2005. Factors affecting the bond between polymer composites and wood. Journal of Reinforced Plastics and composites, 24(4), 405-412.
-Ling, Z., Liu, W. and Shao, J., 2020. Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites. Composite Structures, 240, 111989.
-Markström, E., Kuzman, M.K., Bystedt, A., Sandberg, D. and Fredriksson, M., 2018. Swedish architects view of engineered wood products in buildings. Journal of Cleaner Production, 181, 33-41.
-Mentrasti, L., Molari, L. and Fabiani, M., 2021. Poisson's ratio bounds in orthotropic materials. Application to natural composites: wood, bamboo and Arundo donax. Composites Part B: Engineering, 209, 108612.
-Milner, H.R., 2009. Sustainability of engineered wood products in construction. In Sustainability of construction materials (pp. 184-212). Woodhead Publishing.
-Morales-Conde, M.J., Rodríguez-Liñán, C. and Rubio-de Hita, P., 2015. Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates. Construction and Building Materials, 96, 461-472.
-Nazarpor, M., Tatari, A., Shafaei, H., Taghizadeh-Alisaraei, A. and Khalaghi, M., 2021. Pyrolysis of Arundo donax lignocellulosic wastes in a fixed bed reactor under CO_2 atmosphere. Fuel and Combustion, 14(1), 61-72. [In Persian]
-O'Callaghan, R.B., Lacroix, D. and Kim, K.E., 2022. Experimental investigation of the compressive behaviour of GFRP wrapped spruce-pine-fir square timber columns. Engineering Structures, 252, 113618.
-Pędzik, M., Janiszewska, D. and Rogoziński, T., 2021. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: A review. Industrial Crops and Products, 174, 114162.
-Raftery, G.M. and Rodd, P.D., 2015. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. Construction and building materials, 91, 116-125.
-Ribeiro, A.B. and Mascia, N.T., 2019. Numerical and experimental study of shear stress behavior of NBR and ASTM standard test specimens for FRP-wood bonds. Composite Structures, 224, 111066.
-Righetti, L., Corradi, M. and Borri, A., 2015. Basalt FRP spike repairing of wood beams. Fibers, 3(3), 323-

-Sun, X., He, M. and Li, Z., 2020. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation. Construction and Building Materials, 249, 118751.
-Vahedian, A., Shrestha, R. and Crews, K., 2019. Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. Composites Part B: Engineering, 164, 377-389.
-Wang, H.W., Zhou, H.W., Gui, L.L., Ji, H.W. and Zhang, X.C., 2014. Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites. Composites part B: engineering, 56, 733-739.
-Wdowiak-Postulak, A., 2020. Natural fibre as reinforcement for vintage wood. Materials, 13(21), 4799.
-Yang, J.Q., Smith, S.T., Wu, Y.F. and Feng, P., 2020. Strengthening single-bolt timber joints with externally bonded CFRP composites. In Structures (Vol. 28, pp. 2671-2685). Elsevier.
-Zhou, A., Qin, R., Chow, C.L. and Lau, D., 2020. Bond integrity of aramid, basalt and carbon fiber reinforced 337.
-Saad, K. and Lengyel, A., 2022. Strengthening timber structural members with CFRP and GFRP: A state-of-the-art review. Polymers, 14(12), 2381.
-Schober, K.U., Harte, A.M., Kliger, R., Jockwer, R., Xu, Q. and Chen, J.F., 2015. FRP reinforcement of timber structures. Construction and building materials, 97, 106-118.
-Shafaei, H., Taghizadeh-Alisaraei, A. and Abbaszadeh-Mayvan, A., 2023. Modeling and optimization of alkaline pretreatment conditions for the production of bioethanol from giant reed (Arundo donax L.) biomass using response surface methodology (RSM). Biomass Conv. Bioref. (2023). https://doi. org/ 10.1007/s13399-023-04152-6
-Singh, P., Singh, S., Ojha, R., Tiwari, P., Khan, S., Kumar, R. and Gupta, A., 2022. Characterization of Wear of FRP Composites: A review. Materials Today: Proceedings.
-Sotayo, A., Bradley, D., Bather, M., Sareh, P., Oudjene, M., El-Houjeyri, I. and Guan, Z., 2020. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. Developments in the Built Environment, 1, 100004.