



University of Tehran

Enhancing the bending performance of cross-laminated timber using densified eucalyptus wood and wood-based composite (oriented strand board and plywood)

Mehdi Jahantigh¹ | Mohammad Arabi^{2*} | Mohammad Dahmardehqhaleno³ | Babak Nosati⁴ | Akbar Rostampour Haftkhani⁵ | Sadegh Sarabi⁶

1. Department of Science and Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Zabol, Iran. Email: mahdijahantigh.pgs@uoz.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Science and Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran. Email: marabi@uoz.ac.ir

3. Department of Science and Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran. Email: mmdahmardeh@uoz.ac.ir

4. Department of Science and Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Iran. Email: nosrati.babak@uoz.ac.ir

5. Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. Email: arostampour@uma.ac.ir

6. Department of Science and Wood and Paper Industries, Faculty of Natural Resources, Zabol University, Zabol, Iran. Email: sadegh.sarabi@uoz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 11 February 2025

Revised: 27 April 2025

Accepted: 14 May 2025

Published online: 17 June 2025

Keywords:

Bending Strength,
Cross laminated timber,
Plywood,
Shear strength.

ABSTRACT

This study aimed to improve the bending performance of cross-laminated timber (CLT) panels using two methods: compression of eucalyptus wood layers and the incorporation of wood-based composite panels—plywood (PW) and oriented strand board (OSB)—in the middle layer. Small-diameter logs from fast-growing *Eucalyptus camaldulensis* were used to manufacture hybrid CLT panels. Variables included the outer layer material (uncompressed eucalyptus [OLCR0], compressed to 5% [OLCR5], and 10% [OLCR10]), middle layer material (uncompressed [CR0], compressed to 5% [CR5], compressed to 10% [CR10], PW, and OSB), and adhesive type (polyvinyl acetate [PVA] and polyurethane [PU]). Bending and shear tests were performed according to ASTM D198. As compression increased, the bending performance of hybrid CLT panels improved. Increasing the middle layer compression from 0% to 5% and 10% led to 14.15% and 13% increases in bending strength, and 13.9% and 15.2% increases in modulus of elasticity, respectively. Replacing PW and OSB with uncompressed eucalyptus blocks in the middle layer increased bending strength by 11% and 15.8%, and modulus of elasticity by 10.2% and 14.3%, respectively. Panels compressed to 10% showed the best bending performance. Failure mode analysis showed that replacing engineered and compressed panels with uncompressed eucalyptus shifted the failure mode from shear failure in the middle layer to tensile failure in the bottom layer of the hybrid CLT.

Cite this article: Jahantigh, M., Arabi, M., Dahmardehqhaleno, M., Nosati, B., Rostampour Haftkhani, A., Sarabi, S. (2025). Enhancing the bending performance of cross-laminated timber using densified eucalyptus wood and wood-based composite (oriented strand board and plywood). *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (1), 11-24. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.390222.1335>



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

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.390222.1335>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده های چوب

شاپا الکترونیکی: ۰۵۳۰-۲۳۸۳

سایت نشریه: <https://jfwpp.ut.ac.ir>

تقویت عملکرد خمشی و برشی پانل های CLT هیبریدی با استفاده از چوب فشرده شده اکالیپتوس و کامپوزیت های چوبی تخته لایه و تخته تراشه جهت دار

مهدی جهانتیغ^۱ | محمد عربی^{۲*} | محمد دهمرده قلعه نو^۳ | بابک نصرتی^۴ | اکبر رستم پور هفت خوانی^۵ | صادق سرابی^۶

۱. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: mahdijahantigh.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: mmdahmardeh@uoz.ac.ir
۴. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: nosrati.babak@uoz.ac.ir
۵. گروه منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی و کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: arostampour@uma.ac.ir
۶. گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران. رایانامه: sadegh.sarabi@uoz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مطالعه، برای بهبود عملکرد خمشی پانل های چند لایه چوبی متقاطع (CLT)، از دو روش فشرده سازی و استفاده از اوراق فشرده چوبی (تخته لایه و تخته تراشه جهت دار در لایه میانی) استفاده شد. بدین منظور، از گرده بینه های کم قطر گونه تند رشد اکالیپتوس (*Eucalyptus. camaldulensis*) برای ساخت CLT هیبریدی استفاده شد. متغیرهای مطالعه شامل جنس لایه های بیرونی (چوب معمولی اکالیپتوس (OLCR0)، فشرده شده تا ۵ درصد (OLCR5) و فشرده شده تا ۱۰ درصد (OLCR10)، جنس لایه میانی (چوب معمولی اکالیپتوس (CR0)، فشرده شده تا ۵ درصد (CR5) و فشرده شده تا ۱۰ درصد (CR10)، تخته لایه (PW) و تخته تراشه جهت دار (OSB)) و نوع چسب (چسب سفید (PVA) و چسب پلی اورتان (PU)) بود. آزمون مقاومت خمشی و مقاومت برشی براساس استاندارد ASTM D198 انجام شد. با افزایش میزان فشردگی بلوک های چوبی، عملکرد خمشی پانل های CLT هیبریدی بهبود یافت. همچنین با افزایش درصد فشردگی لایه میانی از صفر به ۵ و ۱۰ درصد، به ترتیب مقاومت خمشی ۱۴/۱۵ و ۱۳ درصد و مدول الاستیسته ۱۳/۹ و ۱۵/۲ درصد افزایش یافت. با جایگزینی تخته تراشه جهت دار و تخته لایه در لایه میانی با بلوک های چوبی فشرده نشده مقاومت خمشی و مدول الاستیسته به ترتیب ۱۱ و ۱۵/۸ و ۱۰/۲ و ۱۴/۳ درصد افزایش یافتند. نمونه های ساخته شده با فشردگی ۱۰ درصد بهترین عملکرد خمشی را از خود نشان دادند. بررسی مدهای شکست نشان داد با جایگزینی پانل های تخته لایه و OSB و چوب فشرده شده با چوب اکالیپتوس معمولی، مد شکست از شکست برشی در لایه های میانی به شکست کششی در لایه زیرین CLT هیبریدی تغییر پیدا کرد.

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۲۷

کلیدواژه:

تخته لایه،

تخته الوار متقاطع،

مقاومت برشی،

مقاومت خمشی.

استناد: جهانتیغ؛ مهدی؛ عربی؛ محمد، دهمرده قلعه نو؛ محمد، نصرتی؛ بابک، رستم پور هفت خوانی؛ اکبر، سرابی؛ صادق (۱۴۰۴). تقویت عملکرد خمشی و برشی پانل های CLT هیبریدی با استفاده از چوب فشرده شده اکالیپتوس و کامپوزیت های چوبی تخته لایه و تخته تراشه جهت دار. نشریه جنگل و فرآورده های چوب، ۷۸ (۱)، ۲۴-۱۱.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.390222.1335>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfwpp.2025.390222.1335>



۱. مقدمه

پانل‌های CLT^۱ به دلیل آرایش و چیدمان مختلف لایه‌ها، رفتار بسیار متفاوتی تحت بار خمش استاتیک از خود نشان می‌دهند. دلیل این نوع پاسخ و رفتار متفاوت پانل‌های CLT تحت بار خمش را می‌توان به ارتوتروپیک بودن چوب نسبت داد، به‌طوری‌که خواص مکانیکی آن در سه جهت اصلی طولی، شعاعی و مماسی متفاوت است. به‌طور معمول، لایه‌های پانل‌های CLT به‌صورت یک درمیان هم‌راستا هستند، به‌طوری‌که برای CLT سه لایه، لایه‌های بیرونی در جهت طولی و لایه میانی در جهت عرضی قرار می‌گیرد یا برای CLT پنج لایه، لایه‌های اول، سوم و پنج در جهت طولی و لایه‌های دوم، سوم و چهارم در جهت عرضی قرار می‌گیرند. این جهت‌گیری، به دلیل ضعیف‌تر بودن مدول الاستیسیته چوب در جهات شعاعی و مماسی نسبت به جهت طولی سبب ایجاد تفاوت چشمگیری بین مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی پانل CLT در جهات مختلف می‌شود. در پانل‌هایی با دهانه‌های کوتاه (نمونه‌هایی که نسبت طول دهانه به ضخامت نمونه کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد) تحت بارهای متمرکز، تمرکز نیروی برشی در لایه‌های میانی بیشتر خواهد شد و با توجه به مقاومت برشی نسبتاً کم لایه‌های عرضی، می‌تواند منجر به شکست برشی^۲ در امتداد دوایر رویش شود. این پدیده را می‌توان به مدول و استحکام برشی کمتر در صفحه شعاعی-مماسی بلوک‌های چوبی نسبت داد [۱]. برای بهبود مقاومت برشی لغزشی در پانل‌های CLT با دهانه کوتاه، مطالعات زیادی انجام شده است. در تمامی این مطالعات، تمرکز بر استفاده از ترکیب گونه با دانسیته‌های مختلف، فشرده‌سازی چوب (به‌منظور افزایش دانسیته و افزایش ضریب ظاهری بلوک‌های چوبی) و یا استفاده از محصولات چوبی مهندسی شده مثل LVL، OSB، Plywood، LSL و سایر صفحات چوبی مهندسی شده در لایه میانی و یا عرضی پانل‌های CLT بوده است. Liew و Feng (۲۰۲۰) به بررسی رابطه بین فشرده‌سازی بلوک‌های چوبی و مقاومت مکانیکی پانل CLT پرداختند [۲]. نتایج آنها نشان داد که فشرده‌سازی به بهبود استحکام و سفتی CLT کمک می‌کند. Liew و Tan (۲۰۲۰) خواص مورفولوژیک و خمشی CLT‌های ساخته شده با چوب فشرده شده *Paraserianthes falcataria* را بررسی کردند. آنها بیان داشتند که فشرده‌سازی، به‌طور قابل توجهی سطح منافذ را بدون هیچ آسیبی به دیواره سلولی کاهش می‌دهد و می‌تواند مقادیر مدول الاستیسیته خمشی (MOE) و مدول گسیختگی (MOR) نمونه‌های CLT را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۳]. Gui و همکاران (۲۰۲۰) نشان دادند که با افزایش ضریب ظاهری بلوک‌های مورد استفاده در ساخت CLT‌های تهیه شده با چوب‌های کم قطر اکالیپتوس، مقاومت و مدول برشی لغزشی نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۴].

Pradhan و همکاران (۲۰۲۳) تأثیر فشرده‌سازی را بر عملکرد برشی لغزشی پانل‌های CLT ساخته شده از کاج زرد جنوبی (*Southern yellow pine*) را بررسی کردند. نتایج بیانگر این بود که با افزایش ضریب فشرده‌سازی چوب کاج زرد جنوبی، مقاومت برشی لغزشی به‌طور خطی افزایش می‌یابد [۵]. همچنین در مطالعه دیگری Pradhan و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که با فشرده‌سازی بلوک‌های چوبی لایه میانی به مقدار ۵۰ درصد، مقاومت برشی لغزشی حدود ۱۰۸ درصد افزایش یافت و همچنین مد شکست از شکست برشی در لایه‌های عرضی به‌خصوص در ناحیه میانی پانل‌های CLT به شکست کششی در ناحیه زیرین آن تغییر می‌کند [۶]. Li و همکاران (۲۰۱۹) و Nero و همکاران (۲۰۲۲) نیز گزارش دادند که همواره همبستگی مثبت و معنی‌داری بین ضریب فشرده‌سازی و مقاومت برشی لغزشی پانل‌های CLT وجود دارد و اغلب نسبت‌های بزرگتر ضریب ظاهری، منجر به مقاومت بهتر در برابر نیروهای برشی لغزشی می‌شوند [۷، ۸]. Pradhan و همکاران (۲۰۲۳) نیز نشان دادند که با افزایش چگالی چوب با فشرده‌سازی، مقاومت برشی لغزشی بهبود یافته و منجر به عملکرد بهتر پانل‌های CLT تحت بارهای برشی می‌شود [۵]. در مورد تأثیر مستقل دانسیته و تأثیر همزمان فشرده‌سازی (افزایش دانسیته) و نوع چسب بر خواص مکانیکی پانل‌های چوبی، مطالعات گسترده‌ای انجام شده است و در تمامی مطالعات گزارش شده است که افزایش دانسیته و به‌ویژه تأثیر افزایش همزمان دانسیته و کیفیت خط چسب، تأثیر مثبت و معنی‌داری بر خواص مکانیکی پانل‌های چوبی دارد [۹-۱۳]. مقاومت برشی لغزشی پانل‌های CLT نیز از این قضیه مستثنی نیست. در تحقیقات قبلی نشان داده شده است که خواص تنش برشی، می‌تواند بین گونه‌ها با دانسیته‌های

^۱ Cross Laminated Timber^۲ Rolling shear

متفاوت، متغیر باشد. Aicher و همکاران (۲۰۱۶) و Ehrhart و همکاران (۲۰۱۸) نیز گزارش کردند که چوب‌های متراکم در مقایسه با چوب‌های نرم و سبک‌تر دارای خواص برشی لغزشی بالاتری هستند [۴، ۱۵]. یکی دیگر از راه‌های بهبود تنش برشی لغزشی پانل‌های CLT، استفاده از الوارهای کامپوزیتی (SCL)، مانند الوارهای رشته‌ای چند لایه (LSL)، الوارهای روکش چند لایه (LVL) و الوارهای رشته‌ای جهت‌دار (OSL) و تخته‌لایه برای ساخت CLT‌های هیبریدی (HCLT) با هدف بهبود خواص مکانیکی است. Li و همکاران (۲۰۲۰) از تخته‌های رشته‌ای جهت‌دار (OSB) در لایه عرضی پانل‌های CLT استفاده کردند و نشان دادند که استحکام برشی الوار هیبریدی متقاطع چند لایه (HCLT) در مقایسه با CLT استاندارد (یعنی ساخته شده از الوار گونه‌های چوبی مشابه) ۸۷ درصد افزایش یافته است [۱۶]. در مطالعه Wang و همکاران (۲۰۱۵ و ۲۰۱۷)، از LVL و LSL برای ساخت نمونه‌های سه لایه HCLT استفاده شد. در مقایسه با CLT معمولی، MOE و MOR با استفاده از LSL یا LVL به‌عنوان لایه‌های بیرونی و میانی افزایش یافت [۱۷، ۱۸].

در مطالعه Davids و همکاران (۲۰۱۷)، آزمایش‌های خمشی سه نقطه‌ای برای ارزیابی خواص برشی لغزشی نمونه‌های HCLT، که دارای LSL به‌عنوان لایه بیرونی و میانی بودند، انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از LSL در لایه میانی پانل‌های CLT، می‌تواند میانگین تنش خمشی پانل‌های CLT هیبریدی را در هنگام شکست تا ۲۳ درصد از طریق کاهش شکست برشی لغزشی افزایش دهد [۲۰]. Yang و همکاران (۲۰۲۱)، اثر چهار نوع پانل صفحه‌ای شامل تخته‌لایه، LVB، OSB و تخته خرده چوب را به‌عنوان لایه عرضی CLT استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که CLT هیبریدی ساخته شده توسط هر کدام از پانل‌های مذکور عملکرد خمشی، برشی لغزشی و مقاومت فشاری بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد CLT دارد. CLT‌های هیبریدی ساخته شده با LVB و تخته‌لایه بهترین عملکرد خمشی را نشان دادند [۲۱].

در سال‌های اخیر، به دلیل کمبود منابع جنگلی و افزایش تقاضا برای محصولات چوبی، استفاده از گونه‌های مقاوم به خشکسالی و تند رشد برای تولید محصولات، مزیت‌هایی به‌همراه دارد و از نظر هزینه نهایی ساخت و حفظ منابع طبیعی نسبت به گونه‌های چوبی غیر بومی و جنگلی برتری دارد. یکی از این گونه‌های چوبی تند رشد، اکالیپتوس (نام علمی اینجا آورده شود) است. اکالیپتوس کامالدولنسیس (*Eucalyptus. camaldulensis*) در منطقه سیستان و بلوچستان برای حفاظت از خاک در برابر فرسایش بادی کشت می‌شود. دانسیته بحرانی و خشک این گونه چوبی به ترتیب ۰/۵۵۲ و ۰/۷۰۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شده است [۲۲، ۲۳]. چوب اکالیپتوس از لحاظ اقتصادی (به دلیل در دسترس بودن و هزینه‌های کم) و ویژگی‌های مکانیکی (سختی و مقاومت‌های مکانیکی نسبتاً بالا)، قابلیت استفاده در محصولات چوبی مهندسی‌شده، مانند گلولام و پانل CLT، و همچنین در صنعت مبلمان را دارد و مطمئناً می‌تواند به حفظ گونه‌های ارزشمند جنگلی کشور کمک کند [۲۴]. بنابراین، هدف از این مطالعه، بررسی امکان ساخت CLT هیبریدی از چوب اکالیپتوس و تقویت مقاومت خمشی و برشی لغزشی آن با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی و به‌کارگیری پانل‌های فشرده چوبی در لایه میانی می‌باشد.

۲. روش شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

چوب اکالیپتوس مورد استفاده در این پژوهش از مجتمع تحقیقاتی بقیه‌الله مستقر در شهرستان زهک تهیه شد (شکل ۱). ابتدا گرده‌بینه‌های کم‌قطر و راست‌تار مشخص و جدا شد و سپس برای ادامه مراحل به کارگاه صنایع چوب دانشگاه زابل منتقل گردید (شکل ۱). برای سهولت در انجام کار ابتدا گرده‌بینه‌ها به طول یک متر توسط دستگاه اره نواری برشکاری شد. بعد از خشک کردن چوب‌ها در هوای آزاد در فصل بهار به مدت ۲ ماه و رسیدن رطوبت چوب‌ها به حد ۱۲ درصد، با استفاده از رنده در دو جهت رنده‌کاری شدند و مجدداً به‌صورت طولی به‌وسیله اره نواری برشکاری شدند. سپس اندازه بری نهایی توسط اره دورکن انجام شد. ابعاد نهایی بلوک‌های چوبی جهت ساخت صفحه CLT ۳۰ در ۵ در ۱/۵ سانتی‌متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت) و ابعاد نهایی پانل CLT سه لایه ساخته شده از آن ۳۰ در ۳۰ در ۴/۵ سانتی‌متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت) بود. جهت اندازه‌گیری دانسیته نمونه‌هایی به ابعاد ۲×۲×۲ سانتی‌متر برشکاری و در آزمایشگاه چوب‌شناسی دانشگاه زابل به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۳±۲

سانتی‌گراد خشک شده و سپس به وسیله ترازو با دقت $0/001$ گرم توزین شدند. ابعاد نمونه مورد نظر با کولیس با دقت $0/001$ میلی‌متر اندازه‌گیری و دانسیته محاسبه شد. بر همین اساس دانسیته چوب اکالیپتوس $0/8$ گرم بر سانتی‌متر مکعب برآورد شد.



شکل ۱. نهالستان مجتمع تحقیقاتی بقیه‌الله دانشگاه زابل

۲-۲. فشرده‌سازی نمونه‌های اکالیپتوس

نمونه‌های برشکاری شده سپس به مدت دو هفته در شرایط کلیما قرار گرفته و نمونه‌های دارای عیوب مانند گره یا شکستگی سطحی جداسازی و نمونه‌های سالم و فاقد عیب جهت ادامه فرآیند پژوهش به کارگاه پرس دانشگاه زابل منتقل شدند (شکل ۲). با توجه به دانسیته چوب اکالیپتوس، فشرده‌سازی نمونه‌ها در دو سطح پنج و ده درصد انجام گرفت. برای انجام فشرده‌سازی از دستگاه پرس شرکت رنجبر دانشگاه زابل استفاده شد. فشار پرس، زمان پرس و دمای پرس به ترتیب Bar ۱۰۰، ۳۰ دقیقه و ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پس از انجام فشرده‌سازی تمامی نمونه‌ها با کولیس دیجیتال از چندین نقطه مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. این کار مجدداً پس از ۴۸ ساعت به جهت اطمینان از بازگشت ضخامت در نمونه‌ها انجام شد.



شکل ۲. مراحل برشکاری، فشرده‌سازی و ساخت نمونه‌های CLT، کارگاه صنایع چوب دانشگاه زابل

۲-۳. چسب

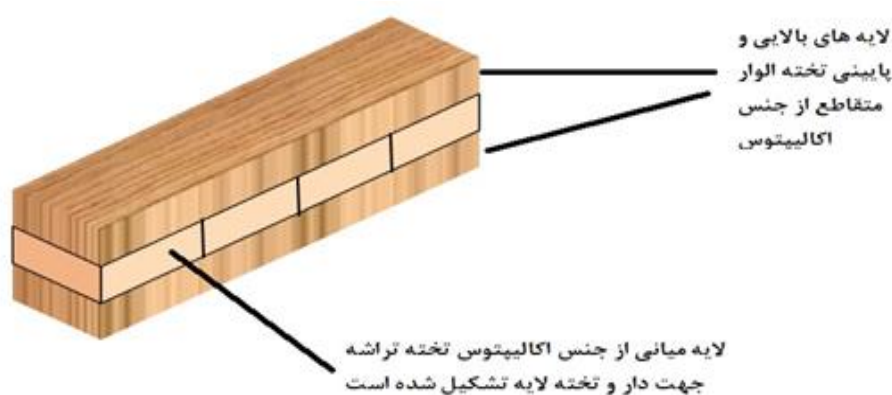
در این پژوهش، از دو نوع چسب سفید نجاری (پلی‌وینیل استات) و چسب پلی‌اورتان استفاده شد. چسب سفید نجاری با کد ۸۰۱ از شرکت تولیدی و صنعتی سامد مشهد و چسب پلی‌اورتان دو جزئی با کد ML518 و هاردنر HA418 با نسبت ۱۰۰ به ۳۰ (نسبت چسب به هاردنر) و سطح چسب خوری ۳۰۰ گرم بر متر مربع از شرکت چسب مکرر تهیه و استفاده شد.

۲-۴. تخته تراشه جهت‌دار و تخته‌لایه

برای ساخت CLT در بعضی از تیمارهای این پژوهش، از تخته‌لایه و تخته‌تراشه جهت‌دار استفاده شد. تخته‌لایه و تخته‌تراشه جهت‌دار از بازار با ابعاد 50×50 سانتی‌متر تهیه و در کارگاه صنایع چوب دانشگاه زابل به ابعاد مورد نظر برشکاری شد.

۲-۵. ساخت پانل CLT

برای ساخت CLT، ابتدا براساس تیمارهای تعیین شده، قطعات تفکیک و سپس چسب‌کاری شدند. میزان چسب مصرفی به‌ازای هر مترمربع 300 گرم می‌باشد. در خصوص چسب پلی‌اورتان مطابق دستورالعمل قید شده توسط شرکت در فاز آماده‌سازی به چسب افزوده شد. پس از انجام چسب‌کاری، نمونه‌ها به مدت حداقل 2 ساعت در داخل گیره نجاری قرار گرفت، سپس به مدت دو هفته در شرایط کیلما بوده و در نهایت برای انجام تست‌های مکانیکی به آزمایشگاه مکانیک چوب دانشگاه زابل منتقل شدند. شکل ۳ به‌طور مختصر نحوه قرار گرفتن لایه‌ها و همین‌طور ساخت CLT را نشان می‌دهد.



شکل ۳. نحوه چیدمان لایه‌ها در CLT

۲-۶. اندازه‌گیری مدول کسختگی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE)

در این تحقیق، آزمون خمش سه نقطه‌ای با بار متمرکز بر روی نمونه‌های CLT ساخته شده مطابق استاندارد ASTM آیین‌نامه D198 انجام شد. بارگذاری نمونه‌ها توسط دستگاه Hounsfield مدل 0308 با ظرفیت 25KN انجام شد و سرعت بارگذاری 2 میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد (شکل ۴).



شکل ۴. انجام آزمون خمش بر روی نمونه‌های CLT

۲-۶-۱. آزمون برش لغزشی در امتداد دواير رویش (Rolling shear test)

تست برشی لغزشی در امتداد دواير رویش مطابق استاندارد ASTM آیین‌نامه D198 انجام شد (شکل ۵). طرح آماری مطالعه، آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی بود. متغیرهای مطالعه شامل جنس لایه‌های بیرونی (چوب معمولی اکالیپتوس (OLCR0)، فشرده شده تا ۵ درصد (OLCR5) و فشرده شده تا ۱۰ درصد (OLCR10)، جنس لایه میانی (چوب معمولی اکالیپتوس (CR0)، فشرده شده تا ۵ درصد (CR5) و فشرده شده تا ۱۰ درصد (CR10)، تخته لایه (PW) و تخته تراشیده جهت‌دار (OSB) و نوع چسب سفید ((PVA) و چسب پلی‌اورتان (PU) بود. در مجموع، ۳۰ تیمار مطالعه شد و برای هر تیمار، ۳ تکرار در نظر گرفته شد. تجزیه و تحلیل داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۶ انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد.



شکل ۵. تصویر تست برش لغزشی

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

نتایج آنالیز واریانس تأثیر مستقل و متقابل متغیرهای مورد مطالعه مانند نوع چسب، جنس لایه میانی و همچنین جنس لایه‌های سطحی بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) پانل‌های CLT در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تأثیر مستقل و متقابل تمام متغیرها بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار است.

۳-۱. اثر مستقل متغیرهای مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های CLT

۳-۱-۱. اثر مستقل فشردگی لایه‌های بیرونی

اثر مستقل فشردگی لایه‌های بیرونی بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های CLT به ترتیب در شکل ۶-a و ۶-b نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول یک نیز مشاهده شد، اثر فشردگی لایه‌های بیرونی بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار است و مطابق آزمون مقایسه میانگین دانکن، هر یک از درصدهای فشردگی صفر، ۵ و ۱۰ درصد در سه گروه مختلف قرار گرفتند. کمترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های شاهد (صفر درصد)

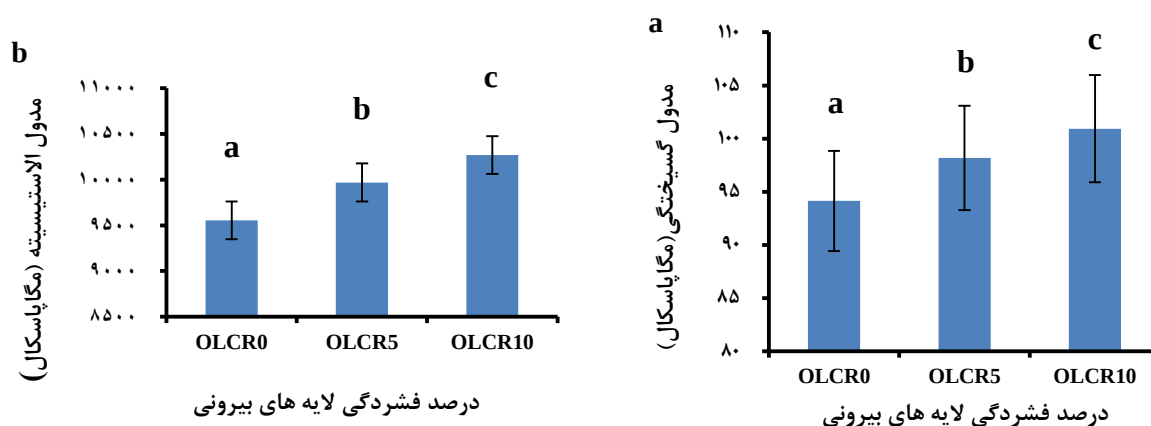
فشردگی) است و بیشترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با ۱۰ درصد فشردگی است. نتایج نشان داد میزان فشردگی لایه‌های بیرونی بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های CLT، تأثیر مثبت داشته و با افزایش میزان فشردگی از صفر به ۵ و سپس از ۵ به ۱۰ درصد، به ترتیب مقاومت خمشی ۱۴/۵ و ۱۳ درصد و مدول الاستیسیته ۱۳/۹ و ۱۵/۲ درصد افزایش یافته است. با متراکم شدن چوب از خلل و فرج آن کاسته شده و ضریب ظاهری و دانسیته بلوک‌های چوبی افزایش می‌یابد. این موضوع باعث بهبود مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته شده است [۲-۴]. همچنین در چندین مطالعه دیگر نیز نشان داده شده است که همواره رابطه مثبت و معنی‌داری بین فشرده‌سازی چوب و افزایش مقاومت مکانیکی آن وجود دارد و فشرده‌سازی به‌طور قابل توجهی سطح منافذ را بدون هیچ آسیبی به دیواره سلولی کاهش می‌دهد و می‌تواند مقادیر MOE و MOR نمونه‌های CLT را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۳].

جدول ۱. تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل عوامل متغیر بر بر مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) پانل‌های CLT

منبع تغییرات	میانگین مربعات	F	درجه آزادی	معنی‌داری
درصد فشردگی لایه بیرونی	۳۴۴/۱۰۸	۳۴/۳۶	۲	۰/۰۰۱**
جنس و فشردگی لایه میانی	۱۱۳/۵۱۱	۸/۶۵	۴	۰/۰۰۱**
نوع چسب	۲۵۳/۶۱۳	۱۶/۹۷	۱	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * جنس و فشردگی لایه میانی	۹۵/۵۲۱	۲۵/۴۲۱	۱۴	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * نوع چسب	۱۹۰/۰۴۱	۲۵/۹۴	۵	۰/۰۰۱**
جنس و فشردگی لایه میانی * نوع چسب	۷۹/۳۱۴	۷/۴۲	۹	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * جنس و فشردگی لایه میانی * نوع چسب	۵۱/۹۲	۲۸/۶۹۱	۲۹	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی	۳۸۶۳۰۲۷/۳۷۸	۵۶	۲	۰/۰۰۱**
جنس و فشردگی لایه میانی	۸۸۱۲۴۴/۴	۷/۴	۴	۰/۰۰۱**
نوع چسب	۱۰۷۴۵۲۸/۴	۷/۵	۱	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * جنس و فشردگی لایه میانی	۸۷۵۴۸۳/۷۹	۴۷/۴۷	۱۴	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * نوع چسب	۱۷۱۰۱۹۱/۸۷	۳۰/۲۵	۵	۰/۰۰۱**
جنس و فشردگی لایه میانی * نوع چسب	۵۱۲۱۵۷/۹	۴/۵۱	۹	۰/۰۰۱**
درصد فشردگی لایه بیرونی * جنس و فشردگی لایه میانی * نوع چسب	۴۶۰۰۷۱/۸۳	۹۲/۴۱	۲۹	۰/۰۰۱**

مدول الاستیسیته

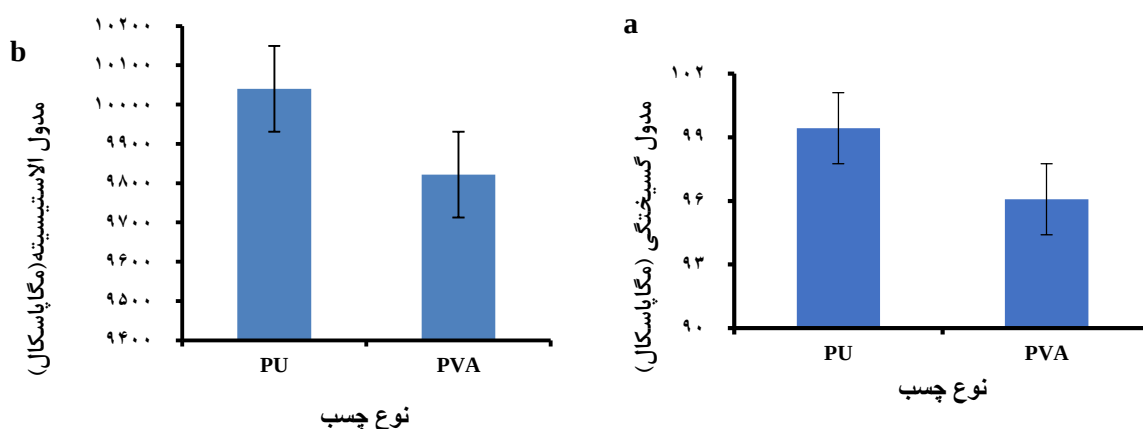
مدول الاستیسیته



شکل ۶. اثر مستقل درصد فشردگی لایه‌های بیرونی بر مقاومت خمشی (a) و مدول الاستیسیته (b)

۳-۱-۲. اثر مستقل نوع چسب

اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته CLT‌های ساخته شده در شکل ۷-a و ۷-b نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سطح اعتماد ۹۹ درصد، معنی‌دار است. مشاهده می‌شود که چسب پلی‌اورتان عملکرد بهتری بر عملکرد خمشی پانل‌های CLT دارد، به‌طوری‌که کمترین مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌وینیل استات و بیشترین مقدار، مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌اورتان است. با تغییر نوع چسب از چسب پلی‌وینیل استات به چسب پلی‌اورتان مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۲/۷ و ۱۶ درصد افزایش یافت. انتخاب نوع چسب، تأثیر به‌سزایی بر کیفیت اتصال دارد [۲۰]. البته باید این نکته را یادآور شد که شکست تقریباً در تمام نمونه‌های ساخته شده در چوب اتفاق افتاد و این نشان می‌دهد که هر دو نوع چسب عملکرد قابل قبولی تحت بار خمشی از خود نشان داده‌اند. در مورد تأثیر نوع چسب بر مقاومت‌های مکانیکی به‌ویژه مقاومت برشی چوب Pereira و همکاران (۲۰۱۶) و Derikvand و Pangh (۲۰۱۶) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند [۱۱، ۱۲].

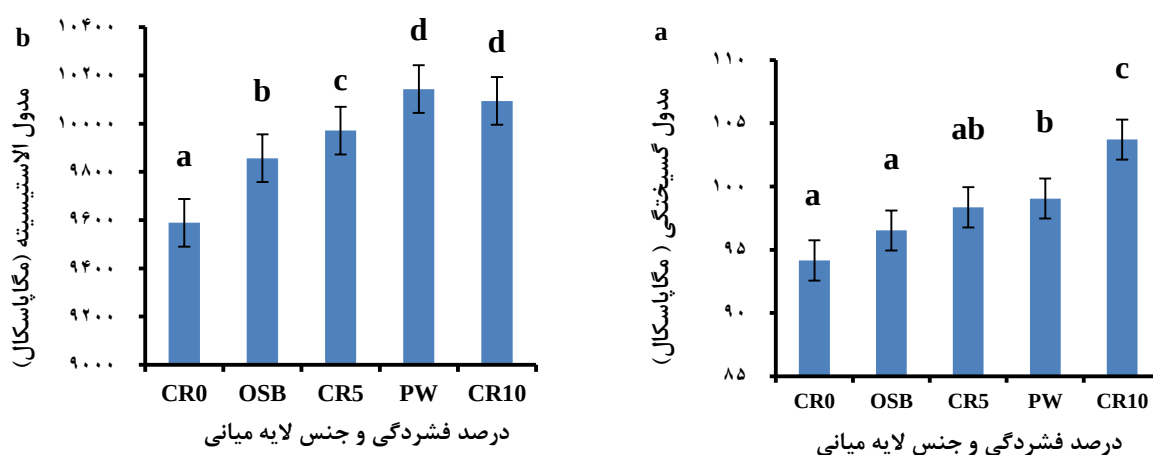


شکل ۷. اثر مستقل نوع چسب بر مقاومت خمشی (a) و مدول الاستیسیته (b)

۳-۱-۳. اثر مستقل درصد فشردگی و جنس لایه میانی

اثر مستقل درصد فشردگی و جنس لایه میانی بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته CLT‌های ساخته شده به‌ترتیب در شکل ۸-a و ۸-b نشان داده شده است. نتایج نشان داد که اثر مستقل درصد فشردگی و جنس لایه میانی بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار است. همچنین مشاهده شد که با افزایش میزان فشردگی بلوک‌های لایه میانی از صفر به ۵ و سپس ۱۰ درصد، مقاومت خمشی پانل‌های CLT به ترتیب ۱۲/۱۵ و ۱۶/۱۱ درصد افزایش یافت. با تغییر جنس لایه میانی از OSB به تخته لایه نیز مقاومت خمشی، ۱۱ درصد بهبود یافت. استفاده از پانل OSB در لایه میانی نسبت به بلوک‌های فشرده نشده، مقاومت بهتری نشان داد، اما نسبت به نمونه‌های ساخته شده با فشردگی ۵ و ۱۰ درصد، عملکرد خمشی آن کمتر بود. استفاده از تخته لایه، عملکرد خمشی پانل‌های CLT را در مقایسه با نمونه‌های شاهد و فشردگی ۵ درصد افزایش داد. نمونه‌های ساخته شده با فشردگی ۱۰ درصد، بیشترین مقدار مقاومت خمشی را از خود نشان دادند و همچنین اختلاف آنها از نظر آماری با سایر تیمارها معنی‌دار است. همان‌طور که در شکل ۷-b مشاهده می‌شود، با افزایش درصد فشردگی لایه مغزی پانل CLT، مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که با افزایش درصد فشردگی لایه مغزی از صفر به ۵ و سپس به ۱۰ درصد، به ترتیب مقدار مدول الاستیسیته ۱۳/۷ و ۱۵/۴ درصد افزایش یافت. این نشان می‌دهد که میزان فشردگی لایه مغزی بر مقدار مدول الاستیسیته تأثیر مثبت دارد و با افزایش درصد فشردگی مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد. همچنین با تغییر جنس لایه مغزی از چوب اکالیپتوس فشرده نشده به پانل OSB نیز مقدار مدول الاستیسیته، حدود ۱۰/۲ درصد افزایش یافت. در ادامه با تغییر لایه مغزی به چوب فشرده ۵ درصد، چوب فشرده شده ۱۰ درصد و تخته لایه، مقدار مدول الاستیسیته به ترتیب ۱۰/۸،

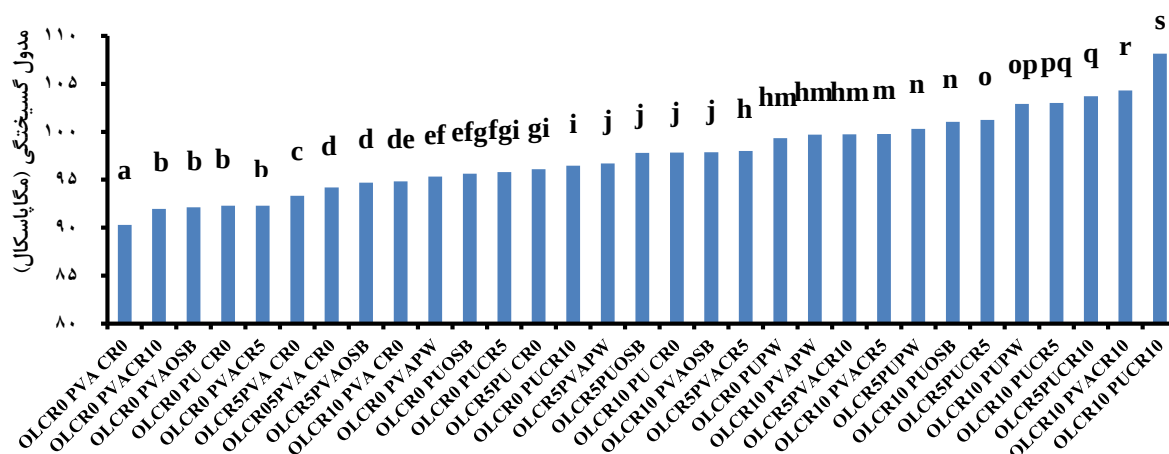
۱۴/۲ و ۶ در صد افزایش یافت. استفاده از تخته لایه در لایه مغزی، بهترین عملکرد را در بهبود مدول الاستیسیته در مقایسه با سایر تیمارها دارد هر چند که اختلاف آن نسبت به نمونه‌های ساخته شده با چوب فشرده، ۱۰ درصد (لایه مغزی) از لحاظ آماری معنی‌دار نیست. در رابطه با استفاده از اوراق فشرده چوبی برای بهبود مقاومت برشی لغزشی پانل‌های CLT دهانه کوتاه، مطالعات زیادی انجام شده است زیرا در این نوع پانل‌ها، با توجه خواص صفحه‌ای و ایزوتروپیک بودن، می‌توان تا حدود زیادی ضعف ناشی از جهت‌گیری عرضی بلوک‌های چوبی در لایه میانی را کاهش داد. Li و همکاران (۲۰۲۰) و Yang و همکاران (۲۰۲۱) از تخته لایه، تخته تراشه جهت‌دار و LVB برای ساخت پانل‌های HCLT استفاده کردند و توانستند عملکرد خمشی پانل‌ها را به مقدار قابل توجهی بهبود بخشند [۱۶، ۲۰].



شکل ۸. اثر مستقل درصد فشردگی و جنس لایه میانی بر مقاومت خمشی (a) و مدول الاستیسیته (b)

۳-۲. اثر متقابل متغیرهای مورد مطالعه بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های CLT

مطابق جدول یک، اثرات متقابل تعاملی دو گانه درصد فشردگی لایه بیرونی×جنس و فشردگی لایه میانی، درصد فشردگی لایه بیرونی×نوع چسب، جنس و فشردگی لایه میانی×نوع چسب و اثر متقابل تعاملی سه گانه درصد فشردگی لایه بیرونی×جنس و فشردگی لایه میانی×نوع چسب بر مقدار مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته پانل‌های CLT در سطح اعتماد ۹۹ درصد معنی‌دار شده است. اثر متقابل درصد فشردگی لایه‌های بیرونی×جنس و درصد فشردگی لایه مغزی×نوع چسب بر مقاومت خمشی در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل، کمترین مقدار مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌وینیل استات و بلوک‌های چوبی فشرده نشده (در هر سه لایه) است. با تغییر نوع چسب به پلی‌اورتان و سطح فشردگی لایه‌ها (هر سه لایه) به ۱۰ درصد، مقدار مقاومت خمشی، ۱۸/۷۱ درصد افزایش یافت. همچنین مشاهده شد که تأثیر فشردگی لایه‌های بیرونی بر مقاومت خمشی از سطح فشردگی و جنس لایه مغزی بیشتر است، به طوری که مقدار میانگین مقاومت خمشی نمونه‌هایی که لایه بیرونی آنها از چوب اکالیپتوس فشرده نشده ساخته شده است، با تغییر جنس لایه میانی از چوب اکالیپتوس فشرده نشده به OSB و همچنین افزایش سطح فشردگی لایه مغزی از ۵ به ۱۰ درصد، اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و همگی، به جز نمونه‌های ساخته شده با بلوک‌های فشرده نشده (در تمام لایه‌ها) در یک گروه قرار گرفته‌اند. همچنین در شرایط مشابه لایه‌های بیرونی و نوع چسب، استفاده از تخته لایه در لایه میانی مقاومت خمشی بهتری نسبت به سطح فشردگی صفر، ۵ در صد و OSB نشان داد. با توجه به نتایج این مطالعه، سطح فشردگی لایه بیرونی، جنس و سطح فشردگی لایه مغزی و نوع چسب به ترتیب بیشترین تأثیر بر مقاومت خمشی داشتند.

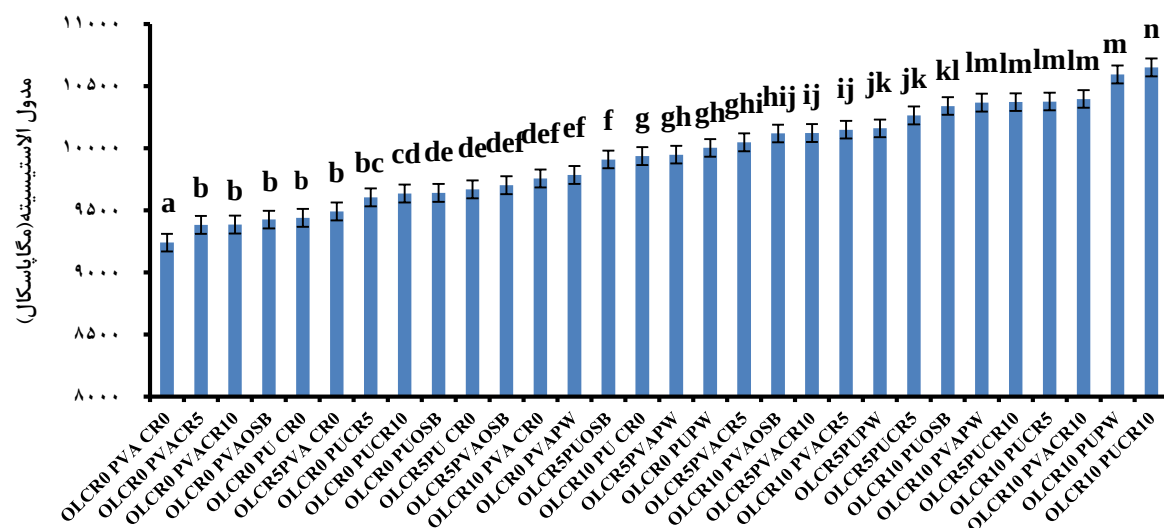


درصد فشردگی لایه‌های بیرونی، جنس و درصد فشردگی لایه مغزی و نوع چسب

شکل ۹. اثر متقابل درصد فشردگی لایه‌های بیرونی، جنس و درصد فشردگی لایه مغزی و نوع چسب بر مدول گسیختگی

(OLCR0: لایه خارجی با فشردگی صفر درصد، OLCR5: لایه خارجی با فشردگی ۵ درصد، OLCR10: لایه خارجی با فشردگی ۱۰ درصد، CR0: لایه داخلی با فشردگی صفر درصد، CR5: لایه داخلی با فشردگی ۵ درصد، CR10: لایه داخلی با فشردگی ۱۰ درصد، OSB: تخته تراشه جهت‌دار، PW: تخته لایه، PVA: چسب پلی وینیل استات، PU: چسب پلی یورتان).

در شکل ۱۰، اثر متقابل سه‌گانه متغیرها بر مدول الاستیسیته پانل‌های CLT نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌اورتان و بلوک‌های چوبی فشرده شده به میزان ۱۰ درصد و در هر سه لایه است. همچنین کمترین مقدار مدول الاستیسیته برای نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌وینیل استات و بلوک‌های چوبی فشرده نشده (در هر سه لایه) به دست آمد. یعنی با تغییر نوع چسب از پلی‌وینیل استات به پلی‌اورتان و سطح فشردگی لایه‌ها از صفر به ۱۰ درصد، مقدار مدول الاستیسیته ۲۱/۴۱ درصد افزایش یافت. مدول الاستیسیته نمونه‌های ساخته شده با چسب پلی‌اورتان و لایه میانی تخته لایه، در هر سه سطح فشردگی لایه بیرونی (صفر، ۵ و ۱۰ درصد) در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با هر دو نوع چسب پلی‌اورتان و پلی‌وینیل استات و لایه مغزی OSB، بلوک‌های فشرده نشده و فشردگی ۵ درصد بیشتر است.



درصد فشردگی لایه‌های بیرونی، جنس و درصد فشردگی لایه مغزی و نوع چسب

شکل ۱۰. اثر متقابل درصد فشردگی لایه‌های بیرونی، جنس و درصد فشردگی لایه مغزی و نوع چسب بر مدول الاستیسیته

(OLCR0: لایه خارجی با فشردگی صفر درصد، OLCR5: لایه خارجی با فشردگی ۵ درصد، OLCR10: لایه خارجی با فشردگی ۱۰ درصد، CR0: لایه داخلی با فشردگی صفر درصد، CR5: لایه داخلی با فشردگی ۵ درصد، CR10: لایه داخلی با فشردگی ۱۰ درصد، OSB: تخته تراشه جهت‌دار، PW: تخته لایه، PVA: چسب پلی وینیل استات، PU: چسب پلی یورتان).

به‌عنوان مثال نمونه‌های ساخته شده با سطح فشردگی صفر، لایه‌های بیرونی و لایه میانی OSB در مقایسه با نمونه‌های ساخته

شده با سطح فشردگی ۱۰ در صد، لایه‌های بیرونی و لایه میانی تخته لایه، حدود ۱۴/۶۰ در صد مدول الاستیسیته کمتری را نشان دادند. با توجه به نتایج این مطالعه، سطح فشردگی لایه بیرونی، جنس و سطح فشردگی لایه مغزی و نوع چسب به ترتیب، بیشترین تأثیر بر مدول الاستیسیته را داشتند. فشرده‌سازی به‌تنهایی فرآیندی است که خواص مکانیکی و فیزیکی چوب را بهبود می‌بخشد و آن را برای کاربردهای با کیفیت، مناسب می‌کند. انتخاب چسب به‌طور قابل توجهی بر اثر بخشی این فرآیند و استحکام حاصل از اتصالات چوب تأثیر می‌گذارد و منجر به بهبود عملکرد اتصالات چسب ساخته شده از چوب متراکم شده می‌شود. Jennings و همکاران (۲۰۰۵) نیز نشان دادند که چقرمگی شکست نمونه‌های چوبی فشرده شده و متصل شده با فیلم PF چسب پلیمری دی‌فنیل‌متان‌دی‌ایزوسیانات (PMDI) به‌طور قابل توجهی بیشتر از نمونه‌های شاهد (فشرده نشده) است [۱۰].

۳-۳. مد شکست

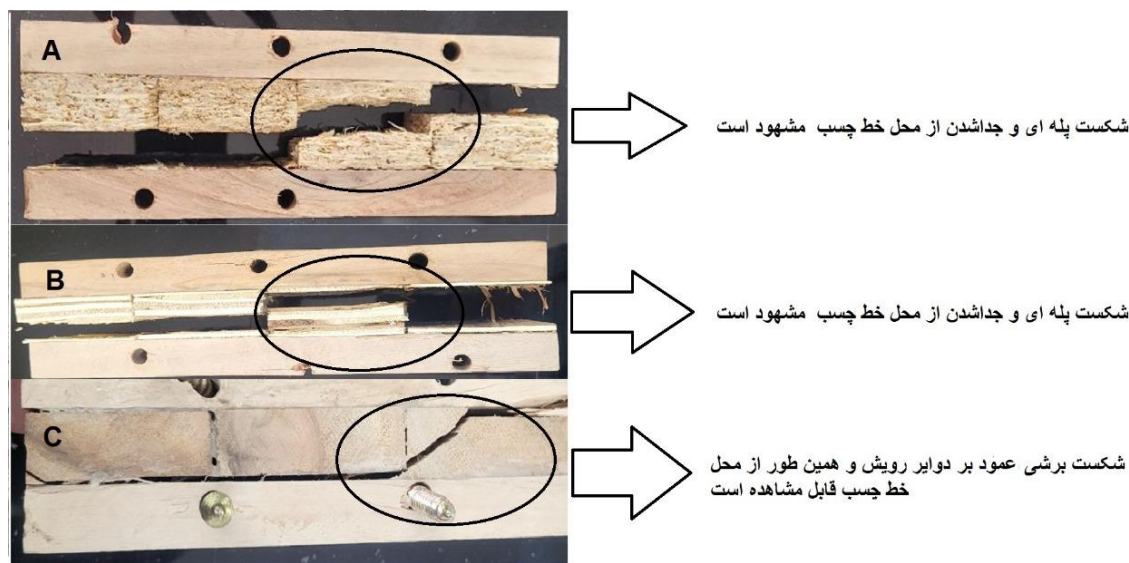
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با تغییر میزان فشردگی و جنس لایه میانی پانل‌های CLT، مد شکست نمونه‌ها تحت بار خمشی متفاوت است. شکل A-۱۱ پانل CLT ساخته شده با چوب اکالیپتوس فشرده نشده (شاهد) را نشان می‌دهد. در این نمونه، هر سه مد شکست برشی در لایه میانی و عمود بر دوایر رویش، شکست کششی در ناحیه تحتانی و در امتداد طول پانل و الیاف و شکست فشاری به‌صورت خرد شدن در لایه فوقانی مشاهده می‌شود. در پانل‌های CLT، به‌دلیل آرایش و چیدمان لایه‌ها، رفتار بسیار متفاوتی تحت بار خمشی استاتیک مشاهده می‌شود. دلیل این نوع پاسخ و رفتار متفاوت پانل‌های CLT تحت بار خمشی را می‌توان به ارتوتروپیک بودن چوب نسبت داد که خواص مکانیکی آن در سه جهت اصلی طولی، شعاعی و مماسی متفاوت است. هنگامی که بار خمشی اعمال می‌شود، توزیع نیروی برشی باعث می‌شود که لایه‌های چوب بر روی یکدیگر بلغزند و این باعث ایجاد تنش‌های برشی می‌شود، که می‌تواند از مقاومت برشی چسب یا الیاف چوب فراتر رود و منجر به شکست برشی شود. این حالت شکست، اغلب با ایجاد و رشد ترک‌ها در امتداد خط چسب و یا در یک زاویه نسبت به جهت الیاف چوب قابل مشاهده است. در پانل‌هایی با دهانه کوتاه (نمونه‌هایی که نسبت طول دهانه به ضخامت نمونه کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد) تحت بارهای متمرکز، مقاومت برشی نسبتاً کم لایه‌های عرضی، می‌تواند منجر به شکست برشی لغزشی شود. این پدیده را می‌توان به مدول و استحکام برشی کمتر در صفحه شعاعی-مماسی در بلوک‌های چوبی نسبت داد [۲۱].



شکل ۱۱. مد شکست نمونه‌های CLT تحت بار خمشی استاتیک

شکل B-۱۱ نمونه ساخته شده با ۱۰ درصد فشردگی (بلوک‌های لایه میانی) را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، در این نوع پانل، دو مد شکست کششی در لایه زیرین و در امتداد طول پانل و مد شکست برشی در لایه میانی و تقریباً عمود بر طول پانل (عمود بر جهت الیاف چوب) مشاهده می‌شود. با فشردگی بلوک‌های لایه میانی علاوه بر افزایش

عملکرد خمشی، طول ترک برشی کاهش یافت. نمونه‌های ساخته شده با لایه عرضی تخته تراشه و تخته لایه به ترتیب در شکل‌های ۱۱-C و ۱۱-D ارائه شده است. در این دو شکل به وضوح مشخص است که با جای‌گذاری تخته تراشه و تخته لایه در لایه میانی پانل CLT، مد شکست نمونه از شکست برشی به شکست کششی لایه زیرین تغییر پیدا می‌کند. برای بهبود مقاومت برشی لغزشی در پانل‌های CLT با دهانه کوتاه مطالعات زیادی انجام شده است. در تمامی این مطالعات، تمرکز بر استفاده از ترکیب گونه با دانسیته‌های متفاوت (CLT هیبرید)، فشرده‌سازی چوب (به منظور افزایش دانسیته و افزایش ضریب ظاهری بلوک‌های چوبی) و یا استفاده از محصولات چوبی مهندسی شده مانند LVL، OSB، Ply wood، LSL و... در لایه میانی و یا عرضی پانل‌های CLT بوده است.



شکل ۱۲. مد شکست نمونه‌های CLT تحت بار برش لغزشی

شکل ۱۲ مد شکست نمونه‌های CLT را تحت آزمون برش لغزشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، نمونه‌هایی که در لایه میانی آنها از تخته تراشه جهت‌دار (A-۱۲) استفاده شده است، شکست در امتداد طول خط چسب و تخته تراشه است. اما وقتی در لایه میانی از تخته لایه (B-۱۲) استفاده شده است، شکست فقط در امتداد خط چسب مشاهده می‌شود. مد شکست پانل‌های CLT ساخته شده از چوب اکالیپتوس (C-۱۲) شامل مد شکست برشی تقریباً عمود بر دایر رویش و جدایی لایه در امتداد خط چسب است.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در پانل‌های CLT با دهانه‌های کوتاه (نمونه‌هایی که نسبت طول دهانه به ضخامت نمونه کمتر از ۳۰ سانتی‌متر باشد) و یا تحت بارهای متمرکز، مقاومت برشی نسبتاً کم لایه‌های عرضی می‌تواند منجر به شکست برشی لغزشی و به نوبه آن کاهش مقاومت‌های پانل CLT می‌شود. از این‌رو، در این مطالعه، از روش فشرده‌سازی و همچنین استفاده از صفحه‌های چوبی تخته تراشه جهت‌دار و تخته چندلا در لایه میانی (عرضی) پانل‌های CLT برای بهبود عملکرد خمشی و مقاومت برشی لغزشی آنها انجام شد. نتایج نشان داد که صرفاً و فقط با افزایش میزان فشرده‌گی لایه‌های بیرونی پانل‌های CLT، امکان افزایش مقادیر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش ضریب فشرده‌گی از صفر به ۵ و سپس از ۵ به ۱۰ درصد به ترتیب مقاومت خمشی $16/2$ و $14/8$ درصد و مدول الاستیسیته $13/7$ و 14 درصد افزایش یافتند. همچنین با تغییر لایه مغزی پانل CLT به بلوک‌های فشرده شده، ۵ و ۱۰ درصد نیز مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته افزایش نشان دادند. با تغییر جنس لایه میانی از بلوک‌های چوبی فشرده نشده به پانل OSB و سپس تخته لایه نیز علاوه بر افزایش مقادیر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته، مقاومت برشی نمونه‌ها در لایه میانی نیز تقویت شد و مد شکست از شکست برشی در لایه میانی به شکست کششی در لایه زیرین تغییر پیدا کرد.

۵. منابع

- [1] Fellmoser, P., & Blaß, H. J. (2004). Influence of rolling shear modulus on strength and stiffness of structural bonded timber elements. In *CIB-W18 meeting* Vol. 37.
- [2] Feng, T.Y. & Chiang, L.K. (2020). Effects of densification on low-density plantation species for cross-laminated timber. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2284, No. 1). AIP Publishing.
- [3] Liew, K.C., Tan, Y.F., Albert, C.M. & Raman, V. (2022). Cross-laminated timber and glulam from low-density *Paraserianthes falcataria*: A look into densification and shear strength. *Forests*, 13(10), 1540.
- [4] Gui, T., Cai, S., Wang, Z. & Zhou, J. (2020). Influence of aspect ratio on rolling shear properties of fast-grown small diameter eucalyptus lumber. *Journal of Renewable Materials*, 8(9), 1053-1066.
- [5] Pradhan, S., Entsminger, E.D., Mohammadabadi, M., Ragon, K. & Nkeuwa, W.N. (2023). The effects of densification on rolling shear performance of southern yellow pine cross-laminated timber. *Construction and Building Materials*, 392(3), 132024.
- [6] Pradhan, S., Mohammadabadi, M., Seale, R.D., Thati, M., Entsminger, E.D. & Nkeuwa, W.N. (2024). Optimizing lumber densification for mitigating rolling shear failure in cross-laminated timber (CLT). *Construction Materials*, 4(2), 342-352.
- [7] Li, M., Dong, W. & Lim, H. (2019). Influence of lamination aspect ratios and test methods on rolling shear strength evaluation of cross-laminated timber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(12), 04019310.
- [8] Nero, R., Christopher, P. & Ngo, T. (2022). Investigation of rolling shear properties of cross-laminated timber (CLT) and comparison of experimental approaches. *Construction and Building Materials*, 316(1), 125897.
- [9] Bianche, J.J., Carneiro, A.D.C.O., Vital, B.R., de Andrade, B.G., Gomes, R.M., de Oliveira Araújo, S. & de Souza, E. C. (2022). Improving the understanding of wood bonding: behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 112(1), 102987.
- [10] Jennings, J.D., Zink-Sharp, A., Kamke, F.A. & Frazier, C.E. (2005). Properties of compression densified wood. Part I: bond performance. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 19(13-14), 1249-1261.
- [11] Pereira, C.R., Mölleken, R.E., de Souza, F.H., Capellari, G.S., Neto, S.C. & Azevedo, E.C. (2016). Evaluation of MDF bonding with polyurethane of castor oil. *Applied Adhesion Science*, 4(13), 1-7.
- [12] Derikvand, M. & Pangh, H. (2016). A modified method for shear strength measurement of adhesive bonds in solid wood. *BioResources*, 11(1).
- [13] Afshari, Z., & Malek, S. (2022). Moisture transport in laminated wood and bamboo composites bonded with thin adhesive layers—A numerical study. *Construction and Building Materials*, 340, 127597.
- [14] Aicher, S., Hirsch, M. & Christian, Z. (2016). Hybrid cross-laminated timber plates with beech wood cross-layers. *Construction and Building Materials*, 124(4), 1007-1018.
- [15] Ehrhart, T. & Brandner, R. (2018). Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species. *Engineering Structures*, 172(4), 554-572.
- [16] Li, Q., Wang, Z., Liang, Z., Li, L., Gong, M. & Zhou, J. (2020). Shear properties of hybrid CLT fabricated with lumber and OSB. *Construction and Building Materials*, 261(4), 120504.
- [17] Wang, Z., Gong, M. & Chui, Y.H. (2015). Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber. *Construction and Building Materials*, 101(1), 622-627.
- [18] Wang, Z., Fu, H., Gong, M., Luo, J., Dong, W., Wang, T. & Chui, Y. H. (2017). Planar shear and bending properties of hybrid CLT fabricated with lumber and LVL. *Construction and Building Materials*, 151(4), 172-177.
- [19] Davids, W.G., Willey, N., Lopez-Anido, R., Shaler, S., Gardner, D., Edgar, R. & Tajvidi, M. (2017). Structural performance of hybrid SPFs-LSL cross-laminated timber panels. *Construction and Building Materials*, 149(3), 156-163.
- [20] Yang, S.M., Lee, H.H. & Kang, S.G. (2021). Research trends in hybrid cross-laminated timber (CLT) to enhance the rolling shear strength of CLT. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 49(4), 336-359.
- [21] Saleh Shushtari, M.H., Behnamfar, K. & Ghadiripour, P. (2010). Effects of cutting methods on growth and yield of *Eucalyptus camaldulensis* 9616 sprouts in Khouzestan province. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 18(3), 484-469. (In Persian)
- [22] Dehmardeh, G. M. (2012). Investigation on physical, mechanical, chemical and biometrical properties of *E. camaldulensis* wood from Sistan Region. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 18(3), 157-170. (In Persian)
- [23] Seng Hua, L., Wei Chen, L., Antov, P., Kristak, L. & Md Tahir, P. (2022). Engineering wood products from *Eucalyptus* spp. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022(1), 1-14.
- [24] Dong, W., Wang, Z., Chen, G., Wang, Y., Huang, Q. & Gong, M. (2023). Bonding performance of cross-laminated timber-bamboo composites. *Journal of Building Engineering*, 63(1), 105526.