

ارزیابی فنی تیرهای گلولام خالص و ترکیبی مبتنی بر LSL ساخته شده از محور برگ نخل خرما متأثر از نوع چسب مصرفی

چکیده

امروزه به کار گرفتن بقایای لیگنوسلولزی در راستای تولید فرآورده‌های چوبی مهندسی شده، نویدبخش یک محصول پایدار است. هدف این تحقیق بررسی خواص گلولام تمام LSL (چوب تراشه لایه‌ای) از محور برگ نخل خرما و ترکیبی (ترکیب چوب سرو و LSL از محور برگ نخل خرما) با دو نوع چسب اپوکسی و پلی‌وینیل استات است. برای این منظور LSL مورد استفاده در ساخت گلولام با استفاده از محور برگ نخل خرما و رزین فنل فرمالدهید ساخته شده و مقاومت به ضربه آن اندازه‌گیری شد. سپس خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج، مقاومت به ضربه $6/9 LSL$ ژول بر سانتی‌متر به دست آمد. اختلاف معنی‌داری بین مقاومت خمشی و خواص فیزیکی تیرها، متأثر از نوع گلولام و چسب مصرفی 250 گرم بر مترمربع مشاهده شد. گلولام‌های ترکیبی با دانسیته کمتر، عملکرد مکانیکی بالاتری داشتند. گلولام‌های ساخته شده با چسب اپوکسی کمترین میزان رطوبت تعادل و بهترین عملکرد مکانیکی را نسبت به چسب پلی‌وینیل استات نشان دادند. بیش‌ترین میزان مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب با مقدار $3/3$ و 7856 مگاپاسگال مربوط به گلولام ترکیبی با چسب اپوکسی بود. بیشترین میزان مقاومت فشاری مربوط به گلولام ترکیبی ساخته شده با چسب پلی‌وینیل استات بود ($2/27$ مگاپاسگال)؛ با این حال تفاوت معنی‌داری بین مقاومت فشاری گلولام‌ها مشاهده نشد. به‌طور کلی، گلولام ترکیبی با منشأ بقایای درخت نخل و اتصال‌دهنده اپوکسی منجر به خواص فیزیکی و مکانیکی بهتر شد که این دستاورد می‌تواند در کاربردهای ساختمانی و شرایط سرویس مورد توجه قرار بگیرد.

واژگان کلیدی: گلولام، فنل فرمالدهید، بقایای نخل خرما، رزین اپوکسی، رزین پلی‌وینیل استات، خواص فیزیکی و مکانیکی.

نرگس سادات شریف موسوی^۱
مجید عزیزی^{۲*}
حمید زارع حسین‌آبادی^۳
مهدی جنوبی^۴

^۱ دانشجوی دکتری، فرآورده‌های چوب، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۲ استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۴ استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:

mazizi@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۸

درختان جنگلی، قابلیت استفاده از بقایای لیگنوسلولزی و نیاز به اعضای چوبی با ابعاد بزرگ‌تر به شکل سازه‌های مهندسی شده، باعث شد تا تیرهای لایه‌ای به‌جای چوب ماسیو مطرح شود [۱ و ۲]. هم‌چنین، با وجود مزیت‌های فراوان چوب، خواص کاربردی و زیباشناختی آن در

مقدمه

چوب به‌عنوان یک ماده طبیعی و مهندسی، از ایام گذشته تاکنون نقش مهمی در پیشرفت زندگی بشر ایفا کرده است. با این وجود، چندین عامل مهم و مؤثر از جمله کمبود منابع چوبی، ایجاد محدودیت‌های شدید در برداشت

است که از چسب زنی تراشه‌های لیگنوسولوزی جهت‌دار و اتصال آن‌ها به یکدیگر تحت حرارت و فشار پرس گرم ساخته می‌شود. این محصول نسبت به چوب ماسیو همان‌گونه، مقاومت‌های مکانیکی بالاتری را نشان داده و می‌تواند تا ۹۰ میلی‌متر ضخامت داشته باشد [۱۱، ۱۲]؛ بنابراین این محصول می‌تواند در ساخت گلولام یا به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده ترکیبی موردنظر باشد. الیاف شیشه، الیاف کربن، صفحات فولادی و کامپوزیت سنتری نیز از دیگر موادی هستند که به‌عنوان عامل تقویت در تیرهای لایه‌ای ترکیبی مطرح شده‌اند [۱۳، ۱۴]. به‌عنوان مثال برای طراحی سازه‌هایی که نیاز به سفتی و خواص مکانیکی بیشتری دارند از ترکیب چوب با الیاف کربن /وینیل استر و همچنین پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده می‌کنند که مقاومت خمشی را تقویت می‌کند [۱۴]. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات متعدد در ساخت گلولام مشخص شده است که عوامل متعددی می‌توانند در مقاومت و کارایی این تیرها ایفای نقش کنند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به نوع اتصال، گیرایی و نوع چسب، مقدار رطوبت و گونه چوبی اشاره کرد [۱۵، ۱۶]. اپوکسی، ایزوسیانات‌ها و مواد الاستومری از مهم‌ترین چسب‌ها در زمینه ساخت گلولام چوبی به شمار می‌آید [۷، ۱۷]. از طرفی رزین‌های ترموست مثل فنل فرمالدهید دارای مزیت‌های ویژه از قبیل مقاومت بالا به رطوبت و شرایط اقلیمی است، که برای ساخت فرآورده‌های چوبی تحت شرایط فشار و دما مناسب‌تر است [۱۸]. علی‌رغم گسترش مسائل زیست‌محیطی و افزایش تقاضا برای مصرف فرآورده‌های چوبی در ایران و جهان، کمبود چوب، بخصوص در ایران یکی از مشکلات در راستای صنعت چوب و کاغذ محسوب می‌شود. تنوع و حجم بالایی از انواع درختان نخل در دنیا وجود دارد که غالباً بلااستفاده و بدون کاربرد هستند [۱۹]. به‌طوری‌که کل سطح زیر کشت نخل نارگیل در دنیا نزدیک به ۱۲ میلیون هکتار است که بیش از ۹۰ درصد آن مربوط به آسیا است [۲۰]. یکی از مزایای استفاده از بقایای نخل به‌جای چوب در فرآورده‌های چوبی این است که بقایای نخل خرما به‌عنوان ماده‌ای تجدید پذیر ماده اولیه مناسبی در ساخت فرآورده‌های چوبی در ترکیب با چسب مصنوعی

مواجهه با شرایط محیطی پرمخاطره دچار نقصان شده و هزینه‌های بالای اقتصادی سرویس و نگهداری را متحمل می‌سازد [۳]. ساخت‌وساز گلولام در آغاز قرن ۱۹ آغاز شد، زمانی که اتو کارل فردریش هتزر (۱۹۱۱-۱۸۴۶) از وایمار، آلمان، اولین اختراع خود را برای این روش ساخت به دست آورد [۴]. استفاده از تیرهای لایه‌ای به‌واسطه استفاده از چسب و حذف برخی معایب و ناهم‌سو یکسانی چوب، می‌توانند در بسیاری از موارد از جمله ساختمان‌سازی، پل‌سازی و ابر سازه‌ها بسیار حائز اهمیت باشند [۵]. تیرهای چوبی نسبت به سایر مصالح دارای مزایایی نظیر دوام بالا، وزن کمتر، ساخت و نصب آسان‌تر و توجیه اقتصادی بیشتر هستند؛ همچنین دارای مقاومت بیشتری در برابر مواد شیمیایی بوده و در اکثر شرایط آب و هوایی قابل ساخت و نصب می‌باشند [۶]. به‌طوری‌که تا سال ۲۰۱۶ حدود ۶/۲٪ از کل پل‌های ساخته‌شده در ایالات‌متحده، متشکل از تیرهای چوبی بودند. بر اساس گزارشی که در سال ۲۰۱۳ توسط واکر و همکارانش منتشر شد، ۱۳۰ پل گلولام در سراسر ایالات‌متحده آمریکا (شامل ۱۷ پل تسمه‌ای گلولام) پس از گذشت ۵۰ سال هنوز در وضعیت بسیار خوبی قرار دارند [۷]. استفاده از تیرهای لایه‌ای مهندسی‌شده چوبی در سطح جهان، به‌ویژه اروپا و آمریکا رشد چشم‌گیری داشته است. آمارهای منتشرشده نشان می‌دهد که تولید گلولام در سال ۲۰۱۴ در اتریش حدود ۱/۵ میلیون مترمکعب [۸] و در سال ۲۰۱۶ در ایالات‌متحده و کانادا به ترتیب ۳۹۵۰۰۰ مترمکعب و ۳۵۰۰۰ مترمکعب بوده است [۸]. امروزه در بیشتر ساخت‌وسازهای مدرن چوبی از گلولام به‌عنوان عنصر و جزء اصلی فرآورده استفاده می‌شود و ایمنی و دوام سازه به‌طور مستقیم مرتبط با مقاومت کششی و فشاری گلولام و اجزای تشکیل‌دهنده آن تحت بارهای روزانه است [۹]. یکی از راهکارهای مناسب در ساخت گلولام جهت دستیابی به اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی و همچنین کیفیت‌های لازم در تولید محصول نهایی، استفاده از سیستم ترکیب مواد مختلف با چوب است [۱۰]. LSL یا چوب تراشه لایه‌ای نوعی کامپوزیت چوبی مهندسی‌شده

^۱ Laminated strand lumber

چوبی مهندسی شده بسیار باارزش است. هدف اولیه این تحقیق، ساخت و بررسی LSL با استفاده از بقایای درخت نخل (ساقه یا محور برگ) با چسب فنل فرمالدهید است. هدف اصلی این تحقیق، ساخت یک گلولام ترکیبی (هیبریدی) است که اجزای آن شامل LSL هایی باشند که از محور برگ نخل خرما ساخته شده‌اند. در نهایت، خواص مکانیکی و فیزیکی گلولام تمام LSL و گلولام ترکیبی تقویت شده با چوب سرو به وسیله دو نوع چسب، اپوکسی و پلی وینیل استات (PVA)، ارزیابی و مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

مواد

محور برگ نخل خرما (*Phoenix dactyliferous L.*) از نخلستان‌های رودان در استان هرمزگان و منوجان در جنوب کرمان تهیه شد. چسب فنل فرمالدهید (PF) از شرکت رزیتان تهیه شد. چسب دوجزئی اپوکسی ۳۰۱C و همچنین پلی وینیل استات از شرکت ماندگار بسپار فجر آسیا تهیه شد. در جدول ۱ مشخصات چسب‌های مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. الوارهای چوبی از قسمت برون چوب گونه سرو نقره‌ای یا آریزونا (*Cupressus arizonica*) موجود در جنگل سرو و سیمین دانشکده منابع طبیعی واقع در کرج استفاده شد. مواد تهیه شده برای ساخت کامپوزیت و تیرهای مهندسی به کارگاه فرآورده‌های چوبی و مبلان گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران منتقل شدند.

و طبیعی، پلیمر و مواد معدنی بوده و به تحقق اهداف زیست‌محیطی کشور در رسیدن به توسعه پایدار صنایع کامپوزیت‌های لیگنوسلولزی کمک می‌کند. همچنین، استفاده از بقایای نخل خرما به جای چوب در فرآورده‌های چوبی مانند تخته خرده چوب و MDF، می‌تواند به عنوان یک ماده اولیه مناسب و ارزان قیمت برای تولید این فرآورده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. ایران بعد از کشور مصر دومین کشور تولیدکننده خرماي جهان به شمار می‌آید که با قریب به ۲۲۰۰۰۰ هکتار نخلستان حدود ۱۷ درصد وسعت نخلستان‌های دنیا را در اختیار دارد. ولی با این وجود بقایای حاصل از نخل خرما (تنه، برگ‌ها و شاخه‌های حاصل از هرس) با وجود حجم غنی از سلولز، همی سلولز و لیگنین، همه‌ساله بدون استفاده سوزانده و رها می‌شوند [۲۱، ۲۲]. رطوبت تعادل بالا برای محتوای چوبی تنه نخل به دلیل نسبت بالای از سلول‌های پارانشیمی حاوی قندها و نشاسته، مقاومت‌های بیولوژیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲۳]. در مقابل، شاخه‌ها و محور برگ نخل منبع غنی از سلولز هستند که می‌توانند در صنایع سلولزی و همچنین کاربردهای با استحکام بالا مورد استفاده قرار گیرند [۲۴]. بنابراین به کار گرفتن چنین منبع لیگنوسلولزی برای استفاده در تولید سازه‌های چوبی بر پایه الوار تراشه لایه‌ای، علاوه بر جنبه زیست‌محیطی، می‌تواند معرف تولید یک سازه مهندسی پایدار و قابل ارزیابی باشد. مطالعات اندکی در زمینه ساخت فرآورده‌های چوبی از جمله تخته خرده و کامپوزیت چوب پلاستیک با استفاده از محور برگ نخل خرما انجام شده است [۲۱، ۲۲ و ۲۵]. ولی هنوز مطالعه در این زمینه ناقص و ناکافی است؛ بنابراین بهره‌گیری از این بقایا در ساخت فرآورده‌های

جدول ۱: مشخصات چسب‌های مورد استفاده

مدت زمان استفاده (min)	درصد ماده جامد	دانسیته g/cm ^۳	رنگ	نوع چسب
۱/۱۰ در ۱۶۰ °C	۳±۷۵	۱/۱۵	قهوه‌ای	فنل فرمالدهید
-	۶۵-۶۰	۱/۱۸	سفید شیری	پلی وینیل استات
۳۰-۴۰ در ۲۵ °C	-	۱/۶	خاکستری روشن خاکستری کم‌رنگ	اپوکسی - رزین اپوکسی - هاردنر

تهیه مواد

ارائه شده است و در ادامه نیز به صورت کلی نحوه آماده سازی مواد اولیه بیان شده است.

به ترتیب در اشکال شماره ۱ و ۲ طرح شما تیک آماده سازی و ساخت LSL از محور برگ نخل و گلولام



شکل ۱: طرح شما تیک از آماده سازی و ساخت LSL از محور برگ نخل

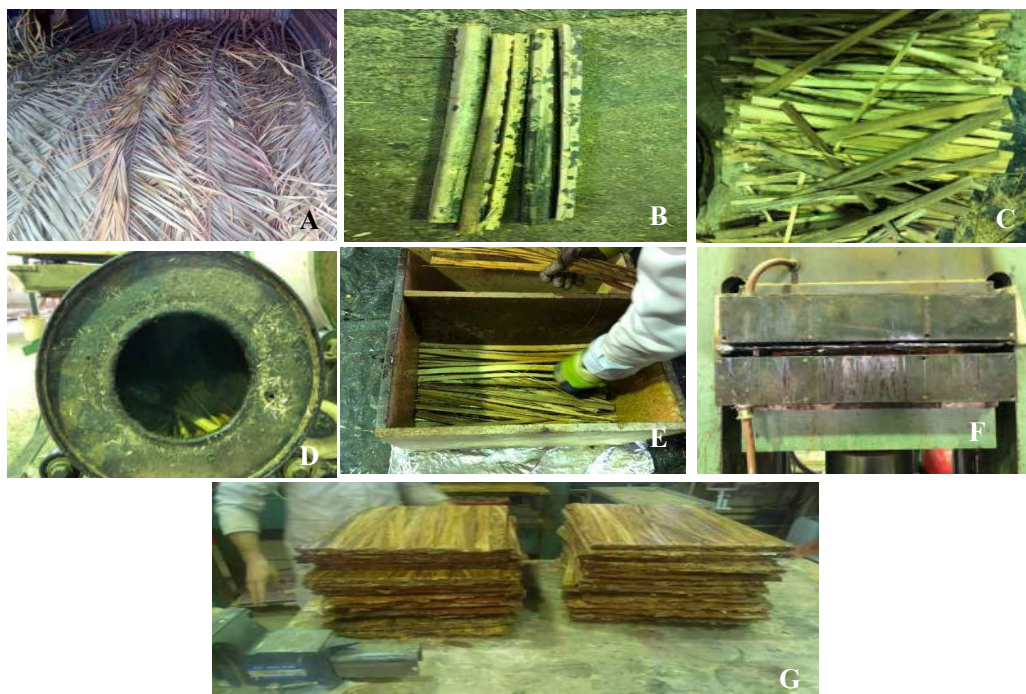


شکل ۲: طرح شما تیک از آماده سازی و ساخت گلولام

از خشک کن در کیسه های پلاستیکی ضخیم بسته بندی شدند تا تبادل رطوبتی نداشته باشند. برای ساخت LSL مورد استفاده برای ساخت گلولام، تراشه ها با چسب فنل فرمالدهید به وسیله دستگاه چسب زن استوانه ای دوار چسب زنی شدند. نهایتاً تراشه های چسب زنی شده با استفاده از یک قالب به صورت دستی چیدمان شده و کیک حاصله تحت فشار پرس گرم قرار گرفت تا پانل های LSL به دست آید. در شکل ۳ مراحل ساخت LSL به تصویر کشیده شده است.

ساخت LSL

ابتدا شاخه و برگ های تهیه شده به مدت ۱ ماه در هوای آزاد خشک شدند. سپس برگچه ها به روش دستی از محور جدا شدند. بعد از اندازه بری ساقه های برگ به طول ۴۵ سانتی متر، ضخامت ساقه ها برش داده شد تا تراشه های نهایی با ضخامت ۱ میلی متر حاصل شود. تراشه ها ابتدا در هوای آزاد خشک شده و سپس برای رسیدن به رطوبت مناسب (۸- ۶ درصد) با استفاده از آون صفحه ای نیمه صنعتی در دمای 103 ± 2 خشک شدند. تراشه ها بعد



شکل ۳: مراحل ساخت LSL از محور برگ نخل خرما (A): محور برگ نخل (B): محور ساقه و اندازه بری (C): تراشه‌ها (D): چسب زنی (E): چیدمان تراشه‌ها و قالب‌ریزی کیک (F): پرس (G): پانل‌های LSL

نمونه‌های LSL ساخته‌شده پیش از ساخت گلولام و آزمون‌های موردبررسی، ۲۱ روز در شرایط کلیماتیزه نگهداری شد.

اطلاعات مربوط به فرآیند ساخت LSL در جدول ۲ ارائه شده است. کامپوزیت‌های ساخته‌شده بعد از خروج از پرس، به مدت ۲۴ ساعت در محیط کارگاه خنک شده و عملیات اندازه بری و پرداخت‌کاری سطح انجام شد.

جدول ۲: مشخصات مربوط به فرآیند ساخت LSL

پارامتر	رطوبت کیک (%)	درصد چسب (%)	فشار پرس (bar)	دمای پرس (°c)	زمان پرس (min)
مقدار	۱۲	۱۴	۵۰	۱۷۰	۲۰

ازای هر مترمربع بررسی شد؛ تا مقدار بهینه چسب در ساخت گلولام‌ها با آزمون مقاومت برشی مشخص شود. طی ساخت تیر لایه‌ای ترکیبی از دولایه میانی LSL و سه لایه (رویی‌ها و مغز) چوب سرو استفاده شد. تیر لایه‌ای تمام LSL نیز با ۵ لایه LSL ساخته شد (شکل ۸ و ۱۰). برای افزایش طول گلولام از اتصال کام و زبانه و چیدمان آجری (شکل ۱۰A, B) به‌منظور عدم تطبیق محل اتصالات در لایه‌ها بر روی هم استفاده شد. از الوارهای چوب سرو خشک‌شده در هوای آزاد به مدت ۶ ماه برای

ساخت گلولام تماماً LSL و گلولام ترکیبی (چوب

ماسیو، LSL)

بعد از ساخت و ارزیابی اولیه LSL ساخته‌شده از بقایای نخل خرما، ساخت گلولام خالص و ترکیبی در ۵ لایه به ابعاد نهایی ۱۲۰ (طول) × ۵ (عرض) × ۸ (ضخامت) سانتی‌متر و با استفاده از دو نوع چسب اپوکسی و پلی وینیل استات به‌طور مقایسه‌ای انجام گرفت. در این تحقیق برای به دست آوردن میزان بهینه چسب مصرفی برای ساخت گلولام‌ها، مقادیر چسب ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ گرم به

کدگذاری مربوط به اطلاعات گلولامها در جدول ۳ ارائه شده است.

تهیه نمونه‌های آزمونی و انجام آزمون‌های

مکانیکی

جدول شماره ۴، نوع و استاندارد آزمون‌ها و ابعاد نمونه‌های مورد آزمون را نشان می‌دهد.

خواص فیزیکی

دانسیتته و رطوبت تعادل جهت ارزیابی خواص فیزیکی گلولام‌های ساخته شده و عملکرد آن در شرایط سرویس بررسی شد. برای این منظور از نمونه‌های به ابعاد $8 \times 5 \times 5$ (ضخامت \times عرض \times طول سانتی‌متر) مطابق استاندارد ISO8375 [۲۶] استفاده شد.

ساخت گلولام ترکیبی استفاده شد. برای این منظور، الوارهای نیمه‌خشک سرو به مدت ۲۱ روز در شرایط دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد برای رسیدن به رطوبت تعادل ۱۲ درصد نگهداری شدند. سپس نمونه با استفاده از سمباده (درجه ۱۵۰) پرداخت و عملیات برش‌کاری و اندازه بری انجام شد. ضخامت و عرض همه اجزای سازنده به ترتیب ۱۶ و ۵۰ میلی‌متر ثابت بود. برای ساخت نهایی تیرهای گلولام، اجزای آماده شده از چوب و LSL با استفاده از دو نوع چسب ذکر شده و به کمک گیره‌های دستی به هم متصل و مونتاژ شدند. نهایتاً بعد از ۴۸ ساعت گیره‌ها باز شده و بعد از مشروط سازی در اتاق کلیما، آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی آن‌ها انجام شد. طرح آزمایش‌ها و

جدول ۳: کدگذاری و طرح آزمایش‌ها مربوط به انواع گلولام‌ها

شماره	نوع اتصال‌دهنده	نوع و اجزای گلولام	کد تیمار
۱		کامل LSL	A ₁ B ₁
۲		(B ₁)	A ₁ B ₁
۳	پلی وینیل استات		A ₁ B ₁
۴	(A ₁)		A ₁ B ₂
۵	چوب ماسیو+LSL		A ₁ B ₂
۶		(B ₂)	A ₁ B ₂
۷		کامل LSL	A ₂ B ₁
۸		(B ₁)	A ₂ B ₁
۹	اپوکسی		A ₂ B ₁
۱۰	(A ₂)		A ₂ B ₂
۱۱	چوب ماسیو+LSL		A ₂ B ₂
۱۲		(B ₂)	A ₂ B ₂

جدول ۴: نوع آزمون، استاندارد آزمون‌ها و ابعاد نمونه‌های آزمونی

نوع آزمون	استاندارد آزمون	ابعاد نمونه‌های مورد آزمون (cm)
بررسی دانسیته گلولام	ISO8375	۵×۵×۸
بررسی رطوبت تعادل گلولام	ISO8375	۵×۵×۸

۳۰×۵×۸	ISO8375	مقاومت فشاری در جهت موازی الیاف گلولام
۱۲۰×۵×۸	ISO8375	بررسی خواص خمشی گلولام (مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته)
۳۲×۵×۱/۶	ASTM D-198	مقاومت به ضربه LSL
۵×۵×۳/۲	ASTM D-198	مقاومت خط برش چسب بین لایه‌ها LSL
۵×۵×۱/۶	ASTM D-198	مقاومت برشی نمونه‌ها LSL

خواص مکانیکی

مقاومت به ضربه و ارزیابی مقاومت برش خط چسب بر روی نمونه LSL قبل از ساخت گلولام انجام شد. تا علاوه بر ارزیابی اجزای مورد استفاده در گلولام، مقاومت مکانیکی LSL ساخته شده از نخل خرما، جداگانه مورد ارزیابی قرار گیرد. آزمون مقاومت به ضربه نمونه‌ها به وسیله دستگاه Amsler Sharpie ساخت کشور سوئیس مطابق استاندارد ASTM D-198 [۲۷] و با تقسیم نیرو بر مساحت سطح نمونه بر حسب ژول بر سانتی‌متر انجام شد. برای این منظور، مقاومت به ضربه با ۱۰ تکرار انجام شد. آزمون مقاومت برشی خط چسب به وسیله دستگاه Wolpert ساخت کشور آلمان برای بررسی کیفیت اتصال با استاندارد ASTM D-98906 [۲۸] و سرعت بارگذاری ۲ mm/min و روی نمونه انجام شد. آزمون فشاری موازی الیاف به وسیله دستگاه Losenhausenwerk ساخت کشور آلمان روی نمونه گلولام‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ISO8375 [۲۶] و سرعت بارگذاری ۳ mm/min انجام شد. آزمون خمش روی نمونه گلولام‌های ساخته شده مطابق با استاندارد ISO8375 انجام شد [۲۶]. نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع برای نمونه‌های بررسی شده ۱۳ در نظر گرفته شد. نرخ بارگذاری ۱۰ میلی‌متر در دقیقه تنظیم شد و تا زمان شکست نمونه ثابت ماند.

آنالیز آماری

در این تحقیق، با توجه به متغیرها (نوع گلولام و نوع چسب مصرفی) از آزمون تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) به کمک نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۵ برای تحلیل نتایج انجام شد. برای بررسی معنی‌داری، گروه‌بندی دانکن آدر سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده شد. همچنین

برای افزایش اعتمادپذیری و کاهش خطاهای احتمالی، از میانگین نتایج با انحراف معیار مشخص در این تحقیق استفاده شد.

نتایج

خواص مکانیکی مربوط به ساخت LSL

مقاومت به ضربه

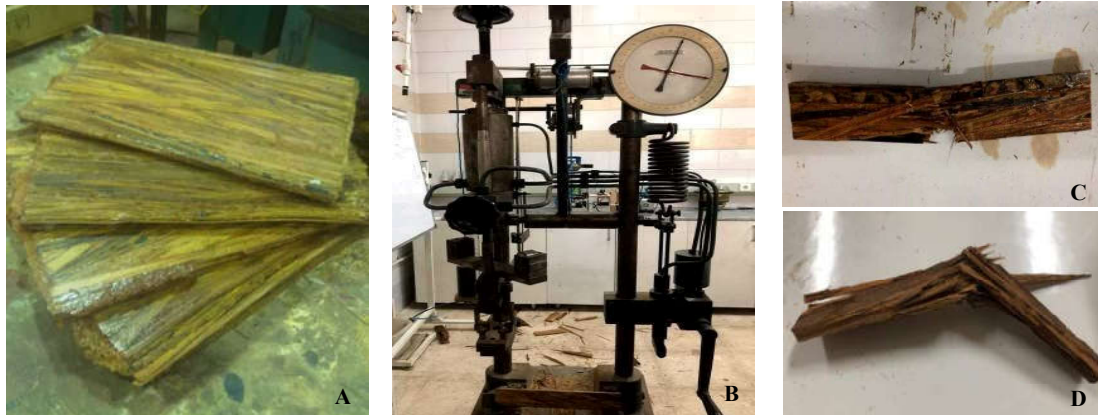
آزمون مقاومت به ضربه برای ارزیابی عملکرد مکانیکی LSL ساخته شده از محور برگ درخت نخل به منظور ساخت گلولام، انجام شد. نتایج نشان داد که مقاومت به ضربه LSL حاصله، برابر با $(\pm 1/5)$ ۶/۹ ژول بر سانتی‌متر بود. تصاویر مربوط به LSL در شرایط آزمون مقاومت به ضربه در شکل ۲ ارائه شده است. یک تحقیق نشان داد که تخته فیبر ساخته شده از نخل، مقاومت مکانیکی بالاتری نسبت به الیاف کتان، باگاس و بامبو دارد [۲۹]. محتوای سلولز و همی سلولز، نوع مواد یا گونه چوبی و دانسیته مصرفی از مهم‌ترین مواردی است که می‌تواند میزان استحکام مکانیکی و بخصوص مقاومت به ضربه سازه کامپوزیتی چوبی را تعیین کند [۲۳، ۳۰-۳۲]. طی پژوهش Jahromi و همکاران (۲۰۰۸) بر روی مقاومت‌های مکانیکی تنه نخل خرما، میزان مقاومت به ضربه ۱/۶ ژول بر سانتی‌متر به دست آمد که در مقایسه با LSL در تحقیق حاضر مقادیر پایین را گزارش می‌دهد [۳۳]. همچنین گزارش شده است که چسب فنل فرمالدهید مقاومت مکانیکی بالاتری نسبت به چسب ملامین فرمالدهید (MUF) در ساخت تخته خرده چوب از ضایعات نخل خرما نشان می‌دهد [۳۴]؛ بنابراین ساخت LSL با ضایعات نخل و رزین فنل فرمالدهید، می‌تواند نویدبخش تولید یک فراورده چوبی مهندسی شده و باکیفیت باشد.

^۲ گروه بندی دانکن با حروف الفبای انگلیسی (حروف a یا A نمایانگر بهترین عملکرد) روی نمودارها نشان داده شد.

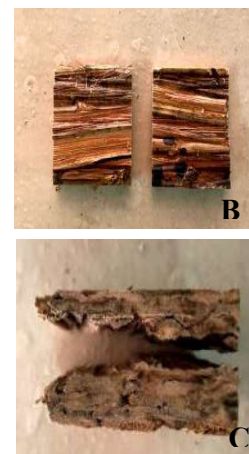
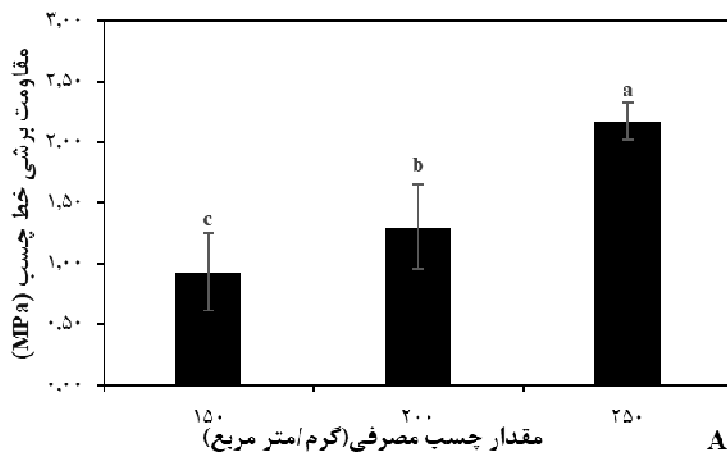
مقاومت برشی خط چسب

تعیین مقدار و توزیع چسب از عوامل مهمی است که می‌تواند کیفیت چسبندگی در تیرهای لایه‌ای را مشخص کند. از این رو نتایج آزمون مقاومت برشی خط چسب جهت تعیین کیفیت چسبندگی با مقادیر متفاوتی از چسب پلی وینیل استات بر حسب گرم بر مترمربع به همراه تصاویر نحوه شکست نمونه‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. مشخص شد که با افزایش مقدار چسب مصرفی، مقاومت برشی خط چسب به طور معنی‌داری افزایش یافته است ($p \leq 0/05$) مقاومت برشی لایه‌های LSL در محدوده ۰/۹۳ تا ۲/۱۷ مگا پاسکال به دست آمد که بالاترین مقاومت برشی مربوط به مقدار چسب ۲۵۰ گرم بود. تحقیقات پژوهشگران بر روی پانل‌های چوبی ساخته شده با ضایعات

نخل مشخص کرد که استفاده بهینه از مقدار چسب باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی می‌شود [۳۲ و ۳۵]. در واقع استفاده مناسب از مقدار بهینه چسب با پیوندپذیری بین دو سطح، خواص مکانیکی را بهبود داده و به تبع آن بانفوذ بیشتر به منافذ سطحی، خواص فیزیکی را نیز بهبود می‌دهد. همچنین بیان شده است که دو عامل خصوصیت چسب (ویسکوزیته، ماهیت شیمیایی و...) و کیفیت سطح (شدت نم‌پذیری و زبری) از مهم‌ترین عواملی است که منجر به اتصال‌پذیری بیشتر و افزایش مقاومت برشی چندسازه‌های چوبی می‌شود [۳۶ و ۳۷]؛ بنابراین در این تحقیق مقدار چسب ۲۵۰ گرم بر مترمربع به عنوان مقدار بهینه برای ساخت همه گلولام‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۴: پانل LSL و آزمون ضربه: (A) LSL، (B) دستگاه آزمون ضربه (B)، نمونه‌های LSL از نمای بالا (B) و پهنا (C) بعد از آزمون ضربه

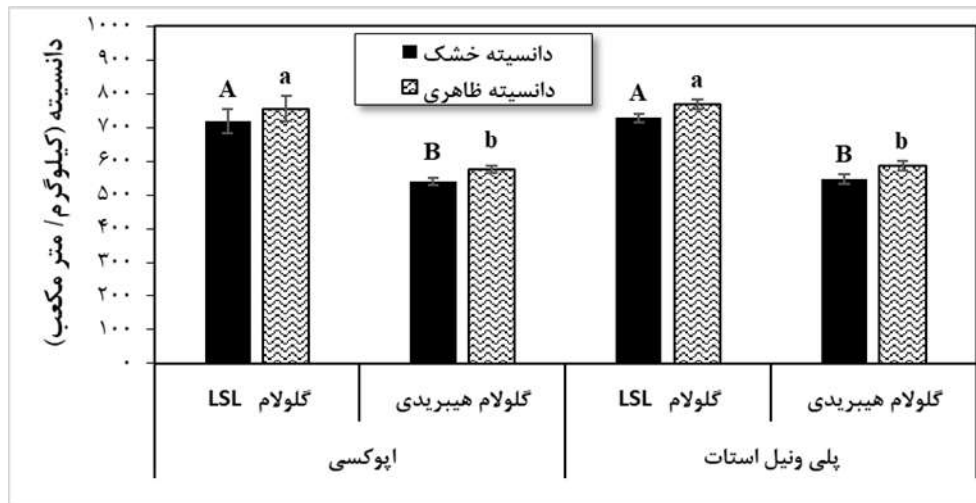


شکل ۵- آزمون مقاومت برشی خط چسب بین لایه‌های LSL (A) با مقادیر متفاوتی از چسب پلی وینیل استات و تصاویر مربوط به شکست نمونه‌های آزمونی (B,C)

دانسیته کاهش پیدا کرد. در واقع LSL به‌عنوان یک کامپوزیت مهندسی‌شده فشرده (دانسیته ۷۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب) به دلیل فرآیند پرس در حضور رزین فنل فرمالدهید، دانسیته بالایی را ارائه داده است؛ حال آنکه چوب سرو (با دانسیته ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب) به‌عنوان یک ماده طبیعی نیمه سبک، در لایه میانی منجر به کاهش دانسیته شد. از لحاظ آماری و گروه‌بندی دانکن اختلاف معنی‌داری بین دانسیته‌ها متأثر از نوع چسب مصرفی نبود. میزان دانسیته ظاهری نمونه‌ها، مقداری بالاتر از دانسیته خشک به دست آمد که به دلیل رطوبت جذب‌شده خارج از انتظار نبود.

خواص فیزیکی و مکانیکی گلولام دانسیته

دانسیته از عوامل مؤثر در تعیین عملکرد یک فرآورده چوبی محسوب می‌شود. طبق نتایج تجزیه واریانس آماری، اختلاف معنی‌داری بین دانسیته ظاهری (گروه‌بندی دانکن با حروف کوچک) و خشک (گروه‌بندی دانکن با حروف بزرگ) نمونه‌ها، متأثر از نوع گلولام وجود داشت (۰/۰۵ $P \leq$). مطابق شکل ۴، گلولام‌های تمام LSL نسبت به گلولام‌های ترکیبی با هر دو نوع چسب مصرفی، دانسیته بالاتری ارائه دادند. این در حالی است که با استفاده کردن از چوب سرو در لایه میانی گلولام در تیرهای ترکیبی،

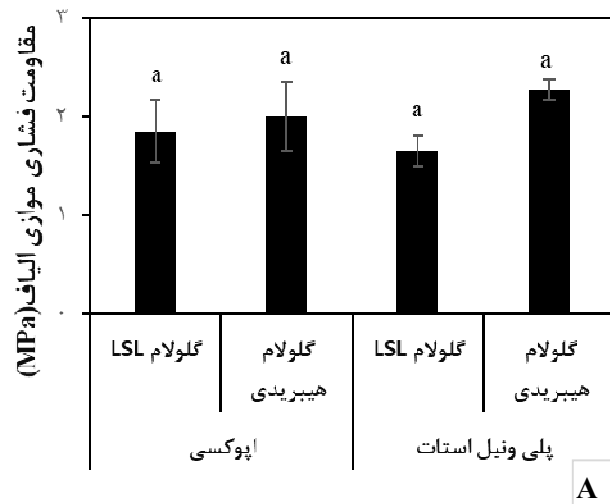


شکل ۶- دانسیته خشک و ظاهری تیرهای لایه‌ای ساخته‌شده با LSL: تأثیر نوع گلولام و چسب مصرفی

عملکرد تیرهای لایه‌ای را بهبود ببخشد. این موضوع می‌تواند به ماهیت متفاوت چوب و LSL و اتصال‌پذیری بین آن‌ها مربوط باشد. در واقع استفاده از مواد مختلف مثل چوب ماسیو و کامپوزیت مهندسی‌شده LSL در کنار هم به دلیل طبیعت مواد و الگوی قرارگیری ساختار آن تا حدودی امکان تحمل فشار را فراهم می‌نماید.

مقاومت به فشار موازی الیاف

شمایی از آزمون مقاومت فشاری و نتایج مقاومت به فشار موازی الیاف در تیرهای لایه‌ای، متأثر از نوع گلولام و چسب مصرفی در شکل ۷ ارائه‌شده است. مطابق نتایج تجزیه واریانس، اختلاف آماری معنی‌داری بین مقاومت فشاری گلولام‌ها مشاهده نشد ($P \geq 0.05$). با این حال به نظر می‌رسد گلولام‌های ترکیبی تا حدودی توانسته



شکل ۷- مقاومت فشاری موازی الیاف (A) در تیرهای لایه‌ی ساخته‌شده با LSL، متأثر از نوع گلولام و چسب مصرفی، تصویری از آزمون فشار موازی الیاف (B)

تنش‌های مختلف عمودی و خمشی و حتی درجه‌بندی مواد مانند چوب استفاده می‌شود [۳۸ و ۳۹]. تصاویری از دو نوع گلولام ساخته‌شده، تمام LSL و ترکیبی با دو نوع رزین اپوکسی و پلی وینیل استات به‌عنوان تیرهای لایه‌ی هدف، جهت انجام آزمون خمشی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

عملکرد خمشی

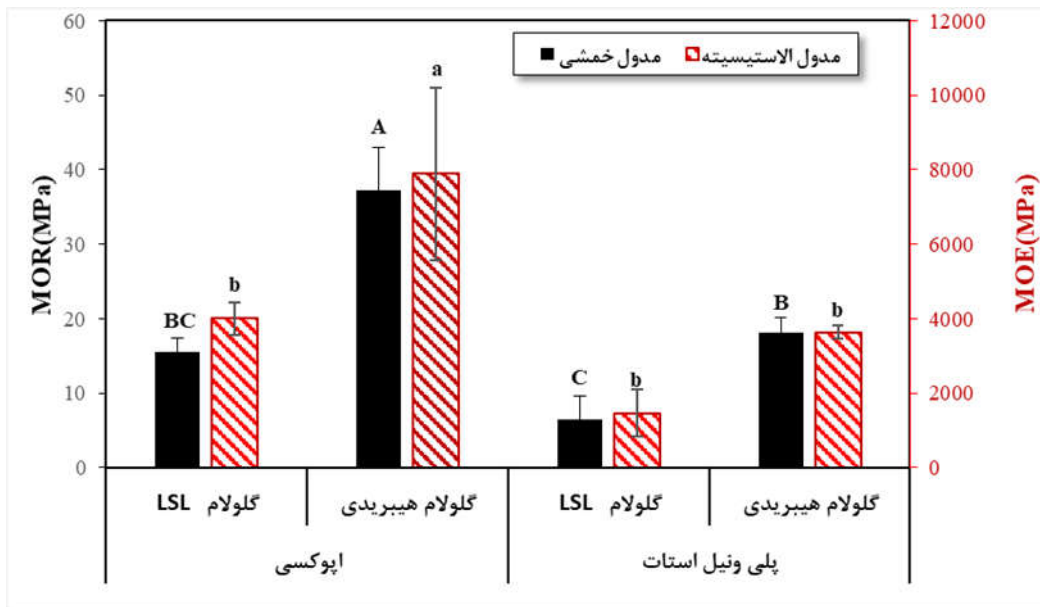
مدول الاستیسیته یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین خواص مکانیکی مواد است که در برآورد بسیاری از خواص، مقاومت‌ها، پیش‌بینی تغییر شکل‌های ناشی از



شکل ۸- گلولام‌های تمام LSL (A) و ترکیبی (B) شمایی از آزمون خمشی (C) شکست‌ها (D, E)

حضور چسب اپوکسی عملکرد بهتری داشتند [۴۰]. در پژوهشی دیگر، مقاومت مکانیکی و فیزیکی تخته لایه تقویت‌شده با الیاف شیشه و الیاف کتان، در حضور انواع ماتریس‌های پلیمری (اپوکسی، اوره فرمالدهید، ملامین اوره فرمالدهید و پلی اورتان) به‌عنوان چسب موردبررسی قرار گرفت. مشخص شد که بالاترین میزان مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی مربوط به تخته لایه تقویت‌شده با الیاف کتان در حضور چسب اپوکسی بود [۴۱]. در واقع به‌کارگیری نقاط قوت مواد در قالب یک فرآورده کامپوزیتی کنار هم تحمل‌پذیری سازه در مقابل خمش را افزایش دهد. همچنین، به نظر می‌رسد اپوکسی توانسته برتری خود را در مقایسه با سایر چسب‌ها اثبات کند. چسب‌های اپوکسی دارای مزایایی مانند عدم نیاز به عمل‌آوری با فشار بالا، خشک‌شوندگی سریع، چسبندگی عالی به انواع بسترها، سفتی بیشتر و مقاومت بالا به تغییرات رطوبتی هستند [۴۲ و ۴۳]. از این رو چسب اپوکسی به‌عنوان یک پلیمر ترموست، در مقایسه با پلی وینیل استات، منجر به تولید محصول با مقاومت بیشتر در این تحقیق شده است. مسئله جالب‌تر، مربوط به ماهیت شیمیایی دوقطبی و پیوندپذیری عالی اتصال‌دهنده‌های اپوکسی به انواع سطوح قطبی (چوب و...) و غیر قطبی است [۴۲ و ۴۴]. بنابراین یک پیوند شیمیایی قوی بین انواع ماده زمینه به همراه اتصال مکانیکی بهینه، برتری این نوع چسب را تأیید می‌کند.

نتایج آزمون خمشی در قالب مدول الاستیسیته (MOE) و خمشی (MOR) در شکل ۹ ارائه شده است. برای نمایش معنی‌داری سطوح در پارامتر MOR از حروف انگلیسی بزرگ و MOE از حروف کوچک استفاده شده است. گروه‌بندی دانکن، اختلاف معنی‌داری را بین مقاومت خمشی نمونه‌ها متأثر از نوع گلولام و نوع چسب مصرفی ارائه داد ($P \leq 0.05$). به طوری که بیش‌ترین میزان مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی به ترتیب با مقدار ۷۸۸۵ و ۳۷ مگا پاسکال مربوط به نمونه گلولام ترکیبی، ساخته‌شده با چسب اپوکسی بود (گروه‌بندی A و a). در واقع، استفاده از فرم ترکیبی نتایج بهتری از مقاومت خمشی را برای تیر لایه‌ای نشان داد. همچنین با مقایسه نوع رزین، مشخص شد که اپوکسی عملکرد بهتر و مقاومت خمشی بالاتری نسبت به چسب پلی وینیل استات فراهم می‌کند. نتایج رضایت‌بخش برای خواص مکانیکی را می‌توان با چسبندگی خوب بین چسب و چوب توضیح داد. گزارش‌ها نشان داده است که نوع چسب مصرفی، تأثیر زیادی بر عملکرد مکانیکی فرآورده چوبی دارد [۳۴ و ۳۵]. همچنین، ساخت تیرهای لایه‌ای ترکیبی با استفاده از یک عامل تقویت‌کننده، یکی از روش‌های کارآمدی است که اخیر در ساخت سازه‌های چوبی مورد توجه پژوهشگران بوده است. در تحقیقی بر روی گلولام، تأثیر استفاده از تقویت‌کننده GFRP در حضور دو نوع چسب اپوکسی و پلی وینیل استات بر مقاومت خمشی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که نمونه‌های تقویت‌شده در



شکل ۹- مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت خمشی (MOR) تیرهای لایه‌های متأثر از نوع گلولام و نوع چسب مصرفی

قابل قبولی ارائه کرده‌اند و در برخی موارد نتایج به‌دست‌آمده حتی از برخی تحقیقات دیگر برتری داشته است. این نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌ها و مواد مناسب، بقایای نخل پتانسیل ارزشمندی دارند و با تحقیقات بیشتر می‌توانند به‌عنوان یک محصول جایگزین و پایدار در بازار عرضه شوند.

طبق نتایج مقاومت خمشی در این تحقیق مشخص شد که گلولام ترکیبی در حضور چسب اپوکسی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. از این‌رو نتایج مربوط به تیمار بهینه در این پژوهش بر اساس خواص خمشی در مقایسه با سایر پژوهش‌های مشابه در جدول ۴ ارائه شده است به نظر می‌رسد که گلولام‌های ساخته‌شده از بقایای نخل نتایج

جدول ۴- مقایسه خواص مکانیکی تیر لایه‌های بهینه در این تحقیق (گلولام ترکیبی با چسب اپوکسی) با مطالعات پیشین

منبع	نوع چسب	دانسیتته (Kg/cm^3)	مقاومت خمشی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت برشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)
گلولام ترکیبی (چوب سرو- LSL (نخل)	اپوکسی	۵۴۰	۳۷/۳	۷۸۵۶	۱/۳	۲
تخته لایه ترکیبی با شاخ و برگ نخل	UF	۶۳۰	۲۵	۲۱۹۰	۱/۲۴ *	- [۳۳]
تخته لایه ترکیبی با شاخ و برگ نخل	PF	۶۸۰	۲۹/۷	۲۳۶۸	۱/۴ *	- [۳۳]
تخته خرده چوب با شاخ و برگ نخل	PF	۷۰۰	۱۴	۲۷۸۰	-	- [۳۱]
تخته خرده چوب با شاخ و برگ نخل	MUF	۷۰۰	۱۰,۶	۱۸۸۰	-	- [۳۱]

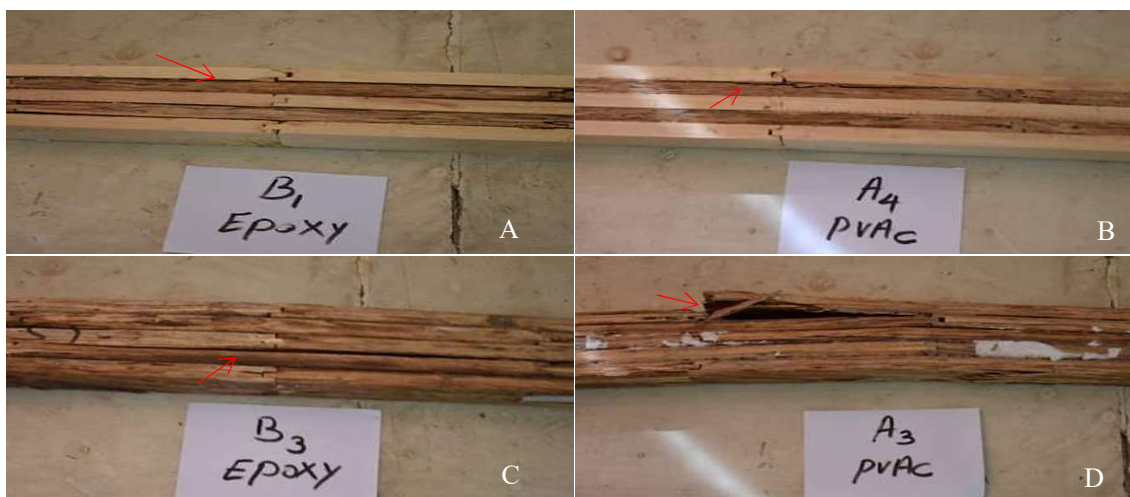
[۳۷]	-	-	۳۰۰۰	۲۹	-	اپوکسی	گلولام صنوبر
[۳۷]	-	-	۳۶۰۰	۴۵	-	اپوکسی	گلولام ترکیبی صنوبر با GFRP

* با مقدار چسب مصرفی ۳۰۰ گرم

اپوکسی بود (D). با مقایسه نوع گلولام، نیز مشخص شد که میزان شکست‌ها در گلولام ترکیبی به مراتب کمتر است. به طوری که نمونه گلولام ترکیبی ساخته شده با چسب اپوکسی بهترین عملکرد را ارائه داد (A). در واقع اتصال‌پذیری بهتر چسب اپوکسی و عملکرد بهتر گلولام ترکیبی از خروجی‌های این تحقیق است که در مدهای شکست هم قابل درک بود.

بررسی مد شکست نمونه‌ها

در این مطالعه با توجه به مشاهدات آزمون خمشی استاتیک، مد شکست نمونه‌های آزمونی در شکل ۱۰ ارائه شده است. در شکست فشاری و خمشی برای گلولام‌های ترکیبی (LSL + چوب ماسیو)، میزان شکست برای اتصال‌دهنده پلی وینیل استات بیشتر بود (A و B). برای گلولام نای تمام LSL نیز شکست بالای گلولام با اتصال‌دهنده پلی وینیل استانی، گویای برتری چسب



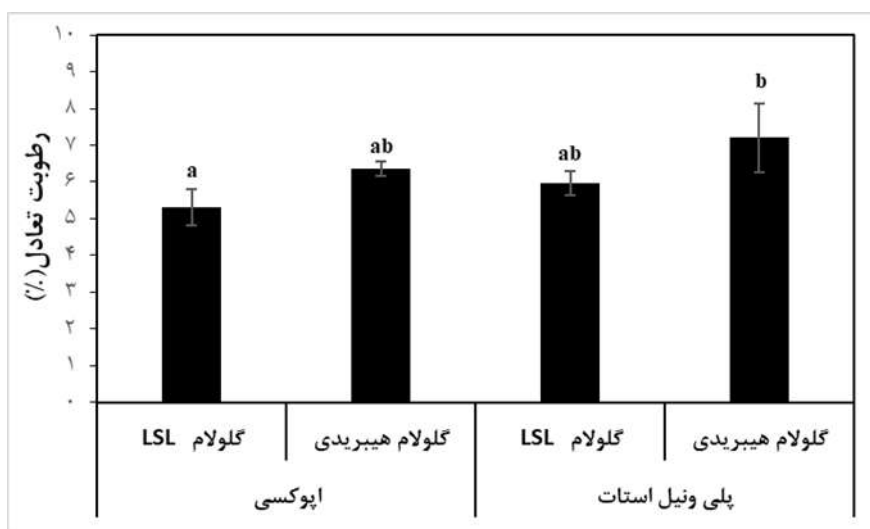
شکل ۱۰- تصاویر مد شکست گلولام‌ها در آزمون خمشی: ترکیبی با چسب اپوکسی (A)، ترکیبی با چسب پلی وینیل استات (B)، تماماً LSL با اپوکسی (C) و تماماً LSL با پلی وینیل استات (D).

رطوبت تعادل

رطوبت تعادل فرآورده چوبی یکی از مهم‌ترین عواملی است که دوام سازه چوبی را در شرایط سرویس تعیین می‌کند [۴۵ و ۴۶]. بر اساس نتایج آنالیز واریانس، اختلاف معنی‌داری بین رطوبت تعادل انواع گلولام‌های ساخته‌شده وجود داشت ($P \leq 0.05$). نتایج دانکن مبنی بر وضعیت معنی‌داری سطوح با حرف الفبای انگلیسی و بهترین عملکرد با حرف a بر روی نمودار ارائه‌شده است. مطابق شکل ۱۱، گلولام تمام LSL ساخته‌شده با چسب اپوکسی کمترین میزان رطوبت تعادل (۵/۳ درصد) و گلولام ترکیبی با چسب پلی وینیل استات، بالاترین میزان رطوبت تعادل (۷/۲ درصد) را نشان داد. استفاده از چسب اپوکسی در ساخت گلولام‌ها نسبت به پلی وینیل استات، رطوبت

تعادل کمتری را ارائه می‌دهد. همچنین گلولام‌های تمام LSL رطوبت تعادل کمتری نسبت به گلولام ترکیبی داشتند. چسب‌هایی مثل اوره فرمالدهید با وجود مزیت‌های فراوان از جمله قیمت مناسب و چسب پلی وینیل استات به دلیل پیوند منعطف‌تر، قیمت مناسب و ایمنی بالا، برای مصارف داخل ساختمان مناسب هستند [۴۷]. با این حال رزین فنل فرمالدهید به دلیل مقاومت مناسب به شرایط رطوبتی، در کاربردهای خارج ساختمان عملکرد بهتری را ارائه می‌دهند.

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که گلولام نای ترکیبی ساخته‌شده با اجزای LSL و چسب اپوکسی برای شرایط سرویس مناسب‌ترند.



شکل ۱۱- میزان رطوبت تعادل نمونه‌های تیر لایه‌ای، متأثر از نوع گلولام و چسب مصرفی

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد گلولام نای تقویت‌شده با LSL ساخته‌شده از بقایای محور برگ نخل خرما مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخص شد که LSL ساخته‌شده با رزین فنل فرمالدهید مقاومت به ضربه رضایت بخشی ارائه می‌دهد. با بررسی مقدار بهینه چسب، بالاترین میزان مقاومت برشی خط چسب با تیر لایه‌ای ساخته‌شده با ۲۵۰ گرم بر متر-مربع چسب حاصل شد. با مقایسه عملکرد تیرهای لایه‌ای معلوم شد که گلولام‌های ترکیبی با وجود دانسیته پایین‌تر،

مدول الاستیسیته و مقاومت خمشی بالاتری نسبت به گلولام تمام LSL ارائه می‌دهند. تأثیر اتصال‌دهنده در کیفیت گلولام، مشخص کرد که تیرهای لایه‌ای ساخته‌شده با رزین اپوکسی رطوبت تعادل پایین‌تر و خواص مکانیکی بهتری از پلی وینیل استات نشان دادند. اختلاف معنی‌داری بین مقاومت فشاری نمونه‌های تیر لایه‌ای مشاهده نشد. به‌طور کلی، گلولام ترکیبی با منشأ بقایای درخت نخل و اتصال‌دهنده اپوکسی منجر به خواص فیزیکی و مکانیکی بهتر شد که این دستاورد می‌تواند در

ساختمان و همچنین سازه‌های باتحمل بار بیشتر توصیه می‌شود. درحالی‌که چسب پلی وینیل استات برای محیط‌های داخل ساختمان و زمانی که مسئله اقتصادی مطرح است می‌تواند در نظر گرفته شود. ✓
 گلولام ترکیبی حاصل از ضایعات نخل خرما و چوب سرو باوجود دانسیته پایین و برای کاربردهایی که نیاز به استحکام بالا دارند توصیه می‌شود.

کاربردهای ساختمانی موردتوجه قرار بگیرد. موارد زیر برای تحقیقاتی پیشنهاد می‌گردند:
 ✓ یکی از مزیت‌های اصلی گلولام‌های ترکیبی زیست پایدار بر پایه LSL، رطوبت تعادل پایین این فرآورده بود که کاربرد آن در شرایط شرجی یا آب‌وهوای مرطوب می‌تواند مدنظر قرار گیرد.
 ✓ با توجه به تأثیر نوع چسب مصرفی در ساخت تیرهای لایه‌ای، چسب اپوکسی برای محیط‌های بیرون

منابع

- [1] Ebrahimi, G., 2009. Design of Wood Structures, First Edit. Tehran University Publications. [Online]. Available: PP. 595-601
- [2] Jonoobi, M., Shafie, M., Shirmohammadli, Y., Ashori, A., Hosseinabadi, H. Z., & Mekonnen, T., 2019. A review on date palm tree: Properties, characterization and its potential applications. Journal of Renewable Materials, 7(11), 1055-1075.
- [3] Mastouri, A., Efhamisidi, D., Shirmohammadli, Y., & Oladi, R., 2021. Physicochemical properties of thermally treated poplar wood in silicone and rapeseed oils: A comparative study. Journal of Building Engineering, 43, 102511.
- [4] B. Karacabeyli, E. and Douglas, Cross-Laminated Timber Handbook. Quebec, Canada. 2013.
- [5] Ebadi, M. M., Doudak, G., & Smith, I., 2019. Evaluation of floor vibration caused by human walking in a large glulam beam and deck floor. Engineering Structures, 196, 109349.
- [6] F. L. Ou and C. Weller, "AN OVERVIEW OF TIMBER BRIDGES, Transp. Res. Rec. 1986.
- [7] D. K. F. and R. B. G. "Highway Bridge Type and Performance Patterns, J. Perform. Constr. Facil. vol. 4, no. 3, pp. 161–173, Aug. 1990, doi: 10.1061/(ASCE)0887-3828(1990)4:3(161).
- [8] I. El-Houjeiry et al. "Experimental investigations on adhesive free laminated oak timber beams and timber-to-timber joints assembled using thermo-mechanically compressed wood dowels, Constr. Build. Mater. vol. 222, pp. 288–299, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.05.163.
- [9] Y. F. Li, M. J. Tsai, T. F. Wei, and W. C. Wang, "A study on wood beams strengthened by FRP composite materials, Constr. Build. Mater. vol. 62, pp. 118–125, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.03.036.
- [10] S. Alshurafa, H. Alhayek, and F. Taheri, "An investigation into the response of GFRP-reinforced glue-laminated tudor arches, Adv. Civ. Eng. vol. 2012, 2012.
- [11] Z. Wang, M. Gong, and Y.H. Chui, "Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber, Constr. Build. Mater. vol. 101, pp. 622–627, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.035.
- [12] D. M. Moses, H. G. L. Prion, H. Li, and W. Boehner, "Composite behavior of laminated strand lumber, Wood Sci. Technol. vol. 37, no. 1, pp. 59–77, 2003, doi: 10.1007/s00226-003-0169-5.
- [13] M. Tazarv, Z. Carnahan, and N. Wehbe, "Glulam timber bridges for local roads, Eng. Struct. vol. 188, pp. 11–23, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.03.012.
- [14] E. Ferrier, P. Labossière, and K. W. Neale, "Modelling the bending behaviour of a new hybrid glulam beam reinforced with FRP and ultra-high-performance concrete, Appl. Math. Model. vol. 36, no. 8, pp. 3883–3902, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.APM.2011.11.062.

- [15] D. Bourreau, Y. Aimene, J. Beauchêne, and B. Thibaut, "Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods, *Eur. J. Wood Wood Prod.* vol. 71, no. 5, pp. 653–662, 2013, doi: 10.1007/s00107-013-0721-4.
- [16] B. M. Collett, "A review of surface and interfacial adhesion in wood science and related fields, *Wood Sci. Technol.* vol. 6, no. 1, pp. 1–42, Mar. 1972, doi: 10.1007/BF00351806/METRICS.
- [17] P. Jelušič and S. Kravanja, "Flexural analysis of laminated solid wood beams with different shear connections, *Constr. Build. Mater.* vol. 174, pp. 456–465, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.102.
- [18] A. Pizzi and C. C. Ibeh, "Chapter 2 - Phenol-formaldehyde resins, in *Handbook of Thermoset Plastics (Fourth Edition)*, Fourth Edition. H. Dodiuk, Ed. Boston: William Andrew Publishing, 2022, pp. 13–40. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821632-3.00013-0>.
- [19] "Fathi L (2014) Ph.D. thesis, University of Hamburg, Germany, p 248.
- [20] L. Fathi and A. Frühwald, "The role of vascular bundles on the mechanical properties of coconut palm wood, *Wood Mater. Sci. & Eng.* vol. 9, no. 4, pp. 214–223, 2014, doi: 10.1080/17480272.2014.887774.
- [21] A. Sadeghefard, A. Mastouri, M. M. Faezipour, M. Azizi, and H. Zarehossien Abadi, "Influence of alkaline and boiling water pretreatment on the structural and surface wettability of biocomposite fabricated of pretreated palm fiber-thermoplastic starch, *For. Wood Prod.* vol. 73, no. 4, pp. 479–490, 2021.
- [22] F. A. Al-Sulaiman, "Mechanical properties of date palm fiber reinforced composites, *Appl. Compos. Mater.* vol. 9, no. 6, p. 369, 2002.
- [23] O. Schmidt, M. Bahmani, G. Koch, T. Potsch, and K. Brandt, "Study of the fungal decay of oil palm wood using TEM and UV techniques, *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 111, pp. 37–44, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.014>.
- [24] R. Khiari, M. F. Mhenni, M. N. Belgacem, and E. Mauret, "Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica* – A comparison with other wood and non-wood fibre sources, *Bioresour. Technol.* vol. 101, no. 2, pp. 775–780, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.079>.
- [25] M. Jonoobi et al. "A Review on Date Palm Tree: Properties, Characterization and Its Potential Applications", doi: 10.32604/jrm.2019.08188.
- [26] J. F. Correal, J. S. Echeverry, F. Ramírez, and L. E. Yamín, "Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated *Guadua angustifolia* Kunth, *Constr. Build. Mater.* vol. 73, pp. 105–112, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.056>.
- [27] Z. Wang, M. Gong, and Y.H. Chui, "Mechanical properties of laminated strand lumber and hybrid cross-laminated timber, *Constr. Build. Mater.* vol. 101, pp. 622–627, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.035.
- [28] ASTM, "Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading (ASTM D 906-98), 2017.
- [29] H. Hosseinkhani, M. Euring, and A. Kharazipour, "Utilization of Date palm (*Phoenix dactylifera* L.) Pruning Residues as Raw Material for MDF Manufacturing, *J. Mater. Sci. Res.* 2014, doi: 10.5539/jmsr.v4n1p46.
- [30] P. Moradpour, H. Pirayesh, M. Gerami, and I. Rashidi Jouybari, "Laminated strand lumber (LSL) reinforced by GFRP; mechanical and physical properties, *Constr. Build. Mater.* vol. 158, pp. 236–242, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.09.172.
- [31] I. Aydin, "Effects of some manufacturing conditions on wettability and bonding of veneers obtained from various wood species, Trabzon, Turkey Karadeniz Tech. Univ. Fac. For. Nat. Appl. Sci. Inst. 2004.

- [32] I. Khalid, O. Sulaiman, R. Hashim, W. Razak, N. Jumhuri, and M. S. M. Rasat, "Evaluation on layering effects and adhesive rates of laminated compressed composite panels made from oil palm (*Elaeis guineensis*) fronds, *Mater. Des.* vol. 68, pp. 24–28, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.12.007>.
- [33] M. K. Jahromi, A. Jafari, S. S. Mohtasebi, and S. Rafiee, "Engineering Properties of Date Palm Trunk Applicable in Designing a Climber Machine, *Agric. Eng. Int. CIGR J.* 2008, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:138104702>
- [34] X. Z. Siham Amirou, Abdelatif Zerizer, Antonio Pizzi, Imane Haddadou, "Particleboards production from date palm biomass, *Eur. J. Wood Wood Prod.*
- [35] R. Hartono, A. H. Iswanto, T. Sucipto, T. D. Cahyono, W. Dwianto, and T. Darmawan, "The effect of glue spreads and adhesive type on quality of laminated board from oil palm trunk, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* vol. 260, no. 1, p. 12079, 2019, doi: [10.1088/1755-1315/260/1/012079](https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012079).
- [36] H. P. S. Abdul Khalil, M. R. Nurul Fazita, A. H. Bhat, M. Jawaid, and N. A. Nik Fuad, "Development and material properties of new hybrid plywood from oil palm biomass, *Mater. Des.* vol. 31, no. 1, pp. 417–424, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.040>.
- [37] Y. Zheng, Z. Jiang, Z. Sun, and H. Ren, "Effect of microwave-assisted curing on bamboo glue strength: Bonded by thermosetting phenolic resin, *Constr. Build. Mater.* vol. 68, pp. 320–325, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.014>.
- [38] J. Bodig and B. A. Jayne, "Mechanics of Wood and Wood Composites, 1982. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:137359655>
- [39] X. Sun, M. He, and Z. Li, "Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation, *Constr. Build. Mater.* vol. 249, p. 118751, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118751>.
- [40] S. Osmannezhad, M. Faezipour, and G. Ebrahimi, "Effects of GFRP on bending strength of glulam made of poplar (*Populus deltoids*) and beech (*Fagus orientalis*), *Constr. Build. Mater.* vol. 51, pp. 34–39, Jan. 2014, doi: [10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.10.035](https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.10.035).
- [41] J. Jorda, G. Kain, M.C. Barbu, A. Petutschnigg, and P. Král, "Influence of adhesive systems on the mechanical and physical properties of flax fiber reinforced beech plywood, *Polymers (Basel)*. vol. 13, no. 18, p. 3086, 2021.
- [42] A. Pizzi and K. L. Mittal, *Handbook of adhesive technology*. CRC press, 2017.
- [43] J. Custódio, J. Broughton, and H. Cruz, "A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints, *Int. J. Adhes. Adhes.* vol. 29, no. 2, pp. 173–185, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.03.002>.
- [44] M. Fernández-Álvarez, F. Velasco, and A. Bautista, "Performance of ultraviolet exposed epoxy powder coatings functionalized with silica by hot mixing, *J. Mater. Res. Technol.* vol. 10, pp. 1042–1057, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.094>.
- [45] A. Tarmian and A. Mastouri, "Changes in moisture exclusion efficiency and crystallinity of thermally modified wood with aging, *iForest-Biogeosciences For.* vol. 12, no. 1, p. 92, 2019.
- [46] A. Mastouri, D. Efhamisisi, Y. Shirmohammadli, and R. Oladi, "Physicochemical properties of thermally treated poplar wood in silicone and rapeseed oils: A comparative study, *J. Build. Eng.* vol. 43, p. 102511, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102511>.
- [47] Sutrisno, E. M. Alamsyah, G. Gumilar, T. Tanaka, and M. Yamada, "Improved strength properties of LVL glued using PVAc adhesives with physical treatment-based Rubberwood (*Hevea brasiliensis*), *Open Agric.* vol. 5, no. 1, pp. 711–725, 2020.

Technical evaluation of pure and combined glulam beams based on LSL made from date palm rachies influenced by the type of adhesive used

Abstract

Nowadays, the utilization of lignocellulosic residues in the production of engineered wood products is promising for sustainable development. The purpose of this research is to investigate the properties of LSL (Laminated strand lumber) and hybrid-based glulam using date biomass in the presence of two types of adhesives, i.e. epoxy and polyvinyl acetate. For this purpose, Laminated Strand Lumber (LSL) was used in the construction of glulam beams, employing the date palm rachis and phenol-formaldehyde resin. The impact resistance of these beams was subsequently measured. Then, the physical and mechanical properties of the glulam beams were evaluated. According to the results, the impact resistance of Laminated Strand Lumber (LSL) was measured at 9.6 joules per square centimeter. Significant differences were observed between the flexural strength and the physical properties of the beams, which were influenced by the type of glulam and adhesive used at a density of 250 grams per square meter. Composite glulam beams with lower density exhibited superior mechanical performance. Glulam beams constructed with epoxy adhesive showed the lowest equilibrium moisture content and the best mechanical performance compared to poly-vinyl acetate adhesive. The highest flexural strength and modulus of elasticity, respectively, were 3.37 MPa and 7856 megapascals, which were associated with composite glulam beams bonded with epoxy adhesive. The highest compressive strength was associated with composite glulam beams bonded with poly-vinyl acetate adhesive (27.2 megapascals); however, no significant difference in compressive strength among the glulam beams was observed. In general, composite glulam beams originating from date palm tree residues and bonded with epoxy adhesive exhibited improved physical and mechanical properties. This achievement can be of significant interest in construction applications and service conditions.

Keywords: Glulam, Phenol-formaldehyde, Date wastes, Epoxy, Polyvinyl acetate, Physical and Mechanical properties.

N. Sharif-Mosavi¹
M. Azizi^{2*}
H. Zarea Hosseinabadi³
M. Jonoobi⁴

¹ PhD student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

² Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

⁴ Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

Corresponding author:
mazizi@ut.ac.ir

Received: 2022/07/31
Accepted: 2023/09/30