

بررسی عملکرد خمشی چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع (CLT) ساخته شده از صنوبر و تقویت شده با پیچ و میخ

چکیده

این مطالعه باهدف بررسی عملکرد خمشی CLT ساخته شده از گونه صنوبر (*Populus alba*)، چسب پلی‌اورتان و اتصال دهنده‌های مکانیکی انجام شد. مقدار مصرف چسب ۳۰۰ گرم بر مترمربع بود. برای ساخت CLT، تخته‌های صنوبر در هوای آزاد خشک و سپس از چهار طرف رنده شدند. ضخامت و پهنای تخته‌ها به ترتیب ۱۹ و ۱۰۰ میلی‌متر بودند. ضخامت و پهنای نمونه CLT سه لایه برای آزمون خمش به ترتیب ۵۷ و ۸۰ میلی‌متر و نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع حدود ۱۲ بود. آزمون خمش با دستگاه اینسترون مدل ۴۴۸۶ انجام شد. متغیرهای موردبررسی شامل نوع اتصال دهنده (شامل میخ فولادی گالوانیزه، میخ شانه‌ای یا تیپو ST و پیچ پانلی رزوه درشت)، تعداد اتصال دهنده (۲ و ۴)، چسب (با و بدون چسب) و جهت پانل (جهت طولی و عرضی پانل) بودند. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) مربوط به جهت طولی CLT-های ساخته شده با ۴ عدد پیچ پانلی به همراه چسب و همچنین کمترین آن‌ها نیز مربوط به جهت عرضی CLT‌های ساخته شده با ۲ عدد میخ تیپو به همراه چسب بوده است. نتایج نشان داد که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر مستقل نوع اتصال دهنده، چسب (با و بدون چسب) و تعداد اتصال دهنده (۲ و ۴) به ترتیب ۷۱ و ۱۶، ۴۰۰ و ۱، ۱۰ درصد تغییر می‌کند. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT در جهت طولی به ترتیب حدود سه و چهار برابر بیشتر از نمونه‌های CLT در جهت عرضی است. نتایج نشان داد که مقاومت‌های خمشی CLT های ساخته شده با چسب به همراه میخ تیپو، میخ فولادی و پیچ در حد استاندارد ISO 16696-1 بود، اما مدول الاستیسیته خمشی آن‌ها به خصوص مدول در جهت طولی پانل در حد استاندارد نبود که لازم است مطالعات جامعی برای مقاوم سازی آن انجام شود.

واژگان کلیدی: عملکرد خمشی، چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع (CLT)، صنوبر، اتصال دهنده پیچ و میخ.

اکبر رستم پور هفتخوانی^{۱*}
فائزه مهماندوست^۲
معراج شرری^۱
محمد احمدی^۳
بیبا معزی پور^۱
علی شکرورد شکبیا^۴

^۱ استادیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، مشهد، ایران

^۳ دانشیار، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۴ دانشجوی کارشناسی، گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

مسئول مکاتبات:

arostampour@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

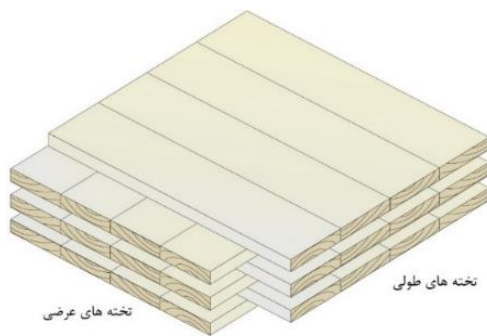
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۰۷

محیط زیستی آن برای ساخت‌وساز آگاه شده‌اند. بخش عمده تمرکز ساختمان سبز بر کاهش مصرف انرژی ساختمان و کاهش اثرات منفی بر سلامت انسان است.

مقدمه
طی دهه گذشته، مفهوم ساختمان سبز به‌طور چشمگیری موردتوجه قرار گرفته است و مردم از مزایای

نه‌چندان دور به‌سوی ساخت خانه‌های چوبی به‌صورت وسیع روی آورده شود.

یکی از جدیدترین مصالح ساختمانی، چندسازه‌های چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT) است که ابتدا در دهه ۱۹۹۰ در کشورهای اتریش و آلمان به‌صورت صنعتی در ساخت خانه‌های مسکونی و غیرمسکونی به کار رفتند. طی دو دهه گذشته، کاربرد این فراورده به دلیل قابلیت حمل‌ونقل آسان، قابلیت پیش‌ساخته شدن، سرعت ساخت‌وساز بالا، عایق صدا، مقاومت خوب در برابر آتش، خواص حرارتی مناسب خیلی زود در اروپا و آمریکای شمالی گسترش یافت [۱]. شکل ۱ نمایی از محصول CLT را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از نحوه چیدمان لایه‌های CLT و محصول واقعی و کاربرد آن در ساختمان

کوتاه‌مدت موردتوجه قرار گرفته است [۳]. Rostampour (۲۰۱۸) و Rostampour و همکاران (۲۰۱۷) با چوب صنوبر CLT با خواص مطلوب ساختند و نشان دادند که مقاومت‌های مکانیکی CLT ساخته‌شده با صنوبر با CLT ساخته‌شده با گونه نوئل به‌عنوان گونه‌ای رایج برای ساخت CLT قابل‌مقایسه است [۴، ۵]. چسب‌های مورد استفاده برای ساخت CLT شامل رزرسینول فرم آلدئید (PRF)، امولسیون پلیمر ایزوسیانات (EPI) و پلی‌اورتان تک جزئی (PUR) هستند. یکی از متداول‌ترین چسبی که برای ساخت CLT استفاده می‌شود، چسب پلی‌اورتان است. با نگاهی بر خواص آن مشاهده می‌شود که مدت مونتاژ برای آن ۴۵ دقیقه، مدت پرس ۱۲۰ دقیقه، فشار پرس 4 Kg/cm^2 - ۸/۱۴ است [۱]. Brandner (۲۰۱۳) و Kairi (۲۰۰۲) نشان دادند که پرس CLT با پرس‌های هیدرولیک یا پرس خلاء انجام می‌شود که فناوری

از این‌رو، موضوع اصلی و موردتوجه در ساختمان‌های سبز، انتخاب مصالح ساختمانی با ویژگی‌های محیط‌زیستی مثبت است. چوب و فراورده‌های آن به‌عنوان مصالحی سبز برای ساختمان‌سازی شناخته می‌شوند. ساختمان‌های چوبی به‌طور وسیعی در کشورهای امریکا، ژاپن، کانادا و اروپا گسترش یافته است. به‌طور کلی این سیستم به علت سبک بودن در مناطق زلزله‌خیز بهترین سیستم ساختمانی به‌حساب می‌آید و زمین‌لرزه‌های فراوانی که در گوشه و کنار جهان به وقوع پیوسته نشان داده‌اند که خانه‌های با اسکلت چوبی مقاومت بسیار زیادی در برابر زمین‌لرزه دارند. در کشور ما که جزء کشورهای زلزله‌خیز جهان به‌شمار می‌رود، دور از انتظار نیست که در آینده‌ای



CLT به‌عنوان یک محصول مهندسی‌شده است که به‌صورت صفحه‌ای تولید می‌شود و در ساخت ساختمان چوبی به‌عنوان دیوار، کف و طبقه (سقف) برای تحمل بار استفاده می‌شود. برای ساخت CLT از گونه‌های چوبی مختلفی می‌توان استفاده کرد. در ساخت این فراورده‌ها سبک بودن و درعین‌حال داشتن مقاومت استاندارد برای ساخت ساختمان چوبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به کمبود مواد اولیه چوبی و تقاضای روزافزون چوب، این صنعت با تنگنمایی روبه‌رو شده است و سبب گرایش این صنعت به استفاده از گونه‌های تند رشد مانند صنوبر شده است. امروزه با افزایش روزافزون جمعیت و سهم سرانه مصرف چوب و لزوم کاهش برداشت چوب از جنگل‌های طبیعی، نیاز به تأمین چوب از طریق استفاده از گونه‌های چوبی تند رشد امری اجتناب‌ناپذیر است [۲] و بر این اساس طرح‌های تولید انبوه چوب در دوره‌های زمانی

درجه‌بندی شده و تخته‌های درجه یک جدا شدند. سپس تخته‌های درجه یک با دستگاه رنده و گندگی تا ضخامت ۱۹ و پهنا ۱۰۰ میلی‌متر از چهار طرف رنده شدند (S4S). از تخته‌های رنده شده نمونه‌های CLT سه لایه ساخته شدند. ضخامت، پهنا و طول پانل CLT به ترتیب ۵۷، ۸۰ و ۸۰۰ میلی‌متر بودند. دانسیته، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته چوب مورد استفاده که با استاندارد ASTM D 143 اندازه‌گیری شد به ترتیب 0.35 g/cm^3 ، ۴۹ MPa و ۶۲۰۰ MPa بود. رطوبت نمونه‌ها موقع ساخت نمونه‌ها حدود ۱۵ درصد بوده است. نمونه‌های CLT با اتصال دهنده‌های مکانیکی مانند پیچ پانلی، میخ فولادی و میخ شانه‌ای با استفاده از چسب پلی اورتان یا بدون چسب ساخته شدند. به دلیل دانسیته کم صنوبر و عدم ایجاد مشکل شکاف در نصب اتصال دهنده‌ها، اتصال دهنده‌های مکانیکی بدون سوراخ پیش‌ساخته نصب شدند. پیچ با دستگاه دریل شارژی نصب شد. برای نصب میخ شانه‌ای از دستگاه میخکوب بادی استفاده شد. نصب میخ فولادی نیز با چکش انجام شد. اتصال دهنده به صورت مستقیم و با زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح و در یک طرف پانل نصب شدند. چسب پلی اورتان از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شد. مقدار چسب پلی اورتان ۳۰۰ گرم بر مترمربع بود. مشخصات چسب مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

پیشرفته‌ای دارد و پرهزینه است. به وسیله پرس هیدرولیک می‌توان فشاری معادل $1-0.1 \text{ N/mm}^2$ و حتی بیشتر روی CLT اعمال کرد، اما با پرس خلاء این میزان فشار معادل $0.1-0.05 \text{ N/mm}^2$ است [۶، ۷]. مرحله پرس در فرایند ساخت CLT علاوه بر تکنولوژی پیشرفته بسیار پرهزینه است. از این رو لازم است با تمهیداتی هزینه ساخت این فراورده را کاهش داد. Kairi (۲۰۰۲)، نشان داد که با میخ و پیچ می‌توان فشاری به ترتیب 0.1 MPa - 0.05 MPa و $0.1-0.2$ [۷]. از این رو، در این مطالعه برای کاهش هزینه ساخت CLT، ساخت آن با گونه صنوبر به عنوان گونه‌ای تند رشد و ارزان و همچنین حذف پرس برای کاهش هزینه تولید بررسی شد.

مواد و روش‌ها

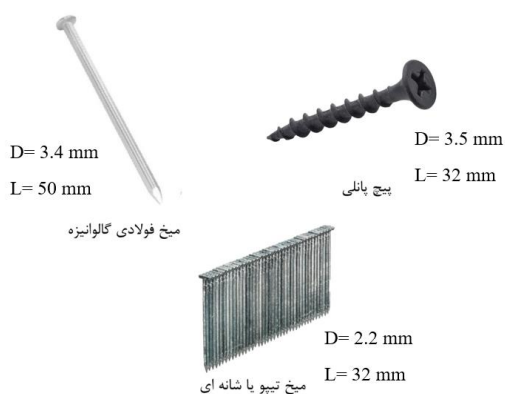
برای اجرای این تحقیق ابتدا گرده‌بینه‌های چوب صنوبر تهیه شدند. سپس گرده‌بینه‌ها به ابعاد مطلوب بریده شده و در چوب‌بری به تخته‌هایی با ابعاد $2/5 \times 1 \times 200$ سانتی‌متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت) تبدیل شدند. سپس تخته‌های تبدیل شده چوب دستک گذاری شده و در هوای آزاد به مدت ۲ ماه تا رطوبت ۱۵ درصد خشک شدند. بعد از خشک شدن لایه‌ها تا ۱۵ درصد رطوبت، تخته‌ها به صورت نظری

جدول ۱- مشخصات چسب پلی‌اورتان مورد استفاده در این پژوهش

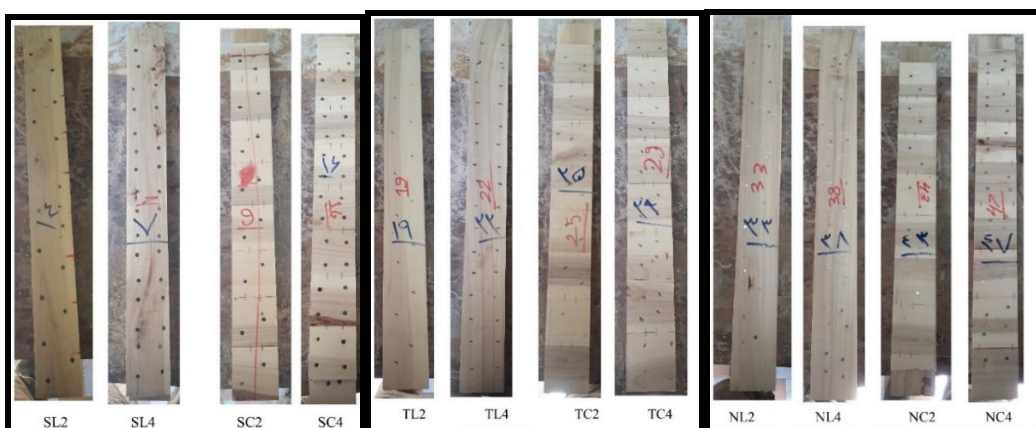
درصد مواد	مقاومت در برابر حرارت	shore	دانسیته	سختی	فرصت	رنگ
۱۰۰	۲۵۰ ساعت در $150, 70^\circ\text{C}$ در 100°C	-	۱/۳	۹۵-۹۰	۲۵	کرم

برای بررسی تأثیر نوع اتصال دهنده (میخ فولادی گالوانیزه، میخ شانه‌ای یا تیپو ST و یا پیچ پانلی)، تعداد اتصال دهنده (۲ یا ۴)، تأثیر چسب (با و بدون چسب) در جهت عرضی و طولی پانل CLT و با در نظر گرفتن ۴ تکرار برای هر تیمار در مجموع ۹۶ نمونه CLT ساخته شدند. وقتی دولایه از تخته با پهنا ۱۰۰ mm به صورت

متقاطع و با زاویه ۹۰ درجه روی هم قرار می‌گیرد، سطح ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر ایجاد می‌کند که برای اتصال آن‌ها تعداد ۲ یا ۴ اتصال دهنده در این سطح نصب شد. تصاویر و مشخصات اتصال دهنده‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه‌های ساخته شده برای این تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۲- اتصال دهنده‌های مورد استفاده برای ساخت CLT (D, قطر بیرونی و L طول اتصال دهنده است)



شکل ۳- نمونه‌های CLT ساخته شده با میخ فولادی (Nail=N)، میخ شانه‌ای یا تیپو (T) و پیچ پانلی (S) با تعداد ۲ یا ۴ اتصال دهنده در سطح ۱۰۰ در ۱۰۰ میلی‌متر مربع و در جهت طولی (L) و جهت عرضی (C) پانل (C) برای مثال NL2 یعنی جهت طولی نمونه‌های CLT ساخته شده با ۲ عدد میخ فولادی برای هر ردیف لایه)

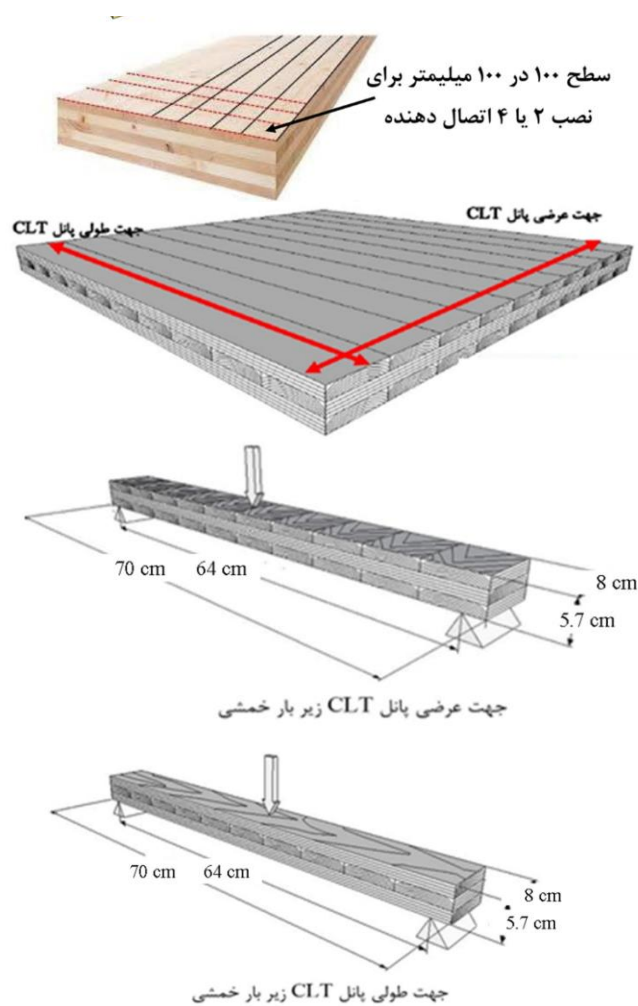
¹ Galvanized concrete steel nail

² Steel Strip Brad Nails (ST Nails)

³ Self-Tapping Drywall Screw

و ASTM D 143 اندازه‌گیری شد [۸، ۹]. آزمون خمشی به صورت سه نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه در جهت طولی و عرضی پانل CLT انجام شد. روش آزمون در شکل ۴ ارائه شده است. نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع برای نمونه‌های مورد مطالعه حدود ۱۲ در نظر گرفته شده است.

برای یکنواختی رطوبت، نمونه‌های CLT به مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سلسیوس، مشروط سازی شده‌اند. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT های ساخته شده با تبعیت از استاندارد ANSI/APA PRG 320



نمونه جهت عرضی



نمونه جهت طولی

شکل ۴- نمایشی از جهات بارگذاری خمشی روی پانل CLT

جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده با ۴ و ۲ عدد پیچ پانلی به همراه چسب بوده است (۵۰/۶ MPa و ۳۹/۳۵) و همچنین کمترین مقاومت خمشی نیز به ترتیب مربوط به جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده با ۲ و ۴ عدد میخ تیپو به همراه چسب بوده است (۲/۱۱ MPa و ۳/۰۱). همچنین نتایج نشان داد که بیشترین مدول الاستیسیته خمشی مربوط به جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده با ۴ عدد میخ تیپو و پیچ پانلی به همراه چسب بوده است (به ترتیب ۵۴۰۵ و ۵۳۲۸ MPa) و همچنین کمترین مدول الاستیسیته خمشی نیز مربوط به جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده با ۲ عدد میخ تیپو بدون چسب و جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده با ۴ عدد میخ فولادی بدون چسب بوده است (۳۹۴/۶ MPa و ۴۰۱). جدول ۳ تجزیه واریانس نمونه‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد. مشاهده شد که تأثیر مستقل نوع اتصال‌دهنده، چسب و جهت پانل در سطح معنی‌داری ۵ درصد از نظر آماری بر مقاومت خمشی معنی‌دار است، اما تأثیر تعداد اتصال‌دهنده بر مقاومت خمشی معنی‌دار نیست. همچنین مشاهده شد که تأثیر متقابل نوع اتصال‌دهنده×چسب، نوع اتصال‌دهنده×جهت پانل، چسب×جهت پانل و همچنین نوع اتصال‌دهنده×چسب×جهت پانل بر مقاومت خمشی از نظر آماری معنی‌دار است. علاوه بر این، مشاهده شد که تأثیر مستقل کاربرد چسب و جهت پانل در سطح معنی‌داری ۵ درصد از نظر آماری بر مدول الاستیسیته خمشی معنی‌دار است، اما تأثیر مستقل نوع و تعداد اتصال‌دهنده بر مدول الاستیسیته خمشی معنی‌دار نیست. همچنین مشاهده شد که تأثیر متقابل کاربرد چسب×جهت پانل بر مدول الاستیسیته خمشی از نظر آماری معنی‌دار است.

سپس از داده‌های نیرو و جابجایی مقادیر مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) با فرمول‌های زیر برای خمش سه‌نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه محاسبه و گزارش شد.

$$MOR = \frac{MC}{I} \quad (1)$$

فرمول بالا برای مقطع مستطیل با پهنای b و ارتفاع مقطع h به صورت زیر ساده شد:

$$MOR = 1.5 \frac{P_u L}{bh^2} \quad (2)$$

مدول الاستیسیته خمشی (MOE) از فرمول زیر و در قسمت خطی نمودار نیرو جابجایی محاسبه می‌شود:

$$MOE = \frac{P_{pl} L^3}{48 \delta l} \quad (3)$$

که فرمول زیر نیز برای مقطع مستطیل به شکل زیر ساده می‌شود:

$$MOE = \frac{PL^3}{4 \delta bh^3} = \frac{\Delta PL^3}{4 \Delta x bh^3} \quad (4)$$

سپس داده‌های به دست آمده با نرم‌افزار SPSS 25 تجزیه و تحلیل آماری شدند. برای تحلیل آماری از آزمون فاکتوریل استفاده شد. طوری که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT با تعداد ۲ و یا ۴ عدد میخ فولادی، میخ تیپو یا شانه‌ای، پیچ با و بدون چسب در جهت طولی و عرضی پانل بررسی شدند. در مجموع ۲۴ تیمار بررسی شد و برای هر تیمار ۴ تکرار در نظر گرفته شد. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد.

نتایج و بحث

میانگین مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی برای نمونه‌های مطالعه شده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت خمشی به ترتیب مربوط به

جدول ۲- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی برای نمونه‌های ساخته شده برای این مطالعه

نوع اتصال دهنده	چسب	جهت CLT	تعداد اتصال دهنده	MOR (MPa)	MOE (MPa)
میخ فولادی	با چسب	عرضی	۲	۹/۶۵(۳/۹۳)	۸۰۰(۴۱)
		عرضی	۴	۳/۴(۰/۶۴)	۷۷۶(۵۰)
		طولی	۲	۲۴/۸(۷/۴۴)	۴۸۶۹(۵۳۵)
		طولی	۴	۲۴/۶(۶/۱۴)	۴۳۷۰(۷۷۰)
	بدون چسب	عرضی	۲	۸/۸۱(۰/۴۹)	۵۷۰(۴۲۴)
		عرضی	۴	۹/۴۴(۱/۲)	۴۰۱(۶۲)
		طولی	۲	۱۹/۷۱(۱/۱۴)	۱۲۸۰(۲۰۲)
		طولی	۴	۲۱/۴۲(۱/۹۱)	۱۵۱۶(۱۶۶)
بیچ پانلی	با چسب	عرضی	۲	۹/۴۵(۱/۶۷)	۸۰۲(۲۴)
		عرضی	۴	۹/۸(۰/۸۷)	۱۱۴۱(۴۷۶)
		طولی	۲	۳۹/۳۵(۱۹/۱۳)	۵۳۲۴(۸۰۹)
		طولی	۴	۵۰/۶۹(۶/۸۱)	۵۳۲۸(۱۳۲۹)
	بدون چسب	عرضی	۲	۱۰/۲۴(۰/۹۶)	۷۶۱(۵۶۵)
		عرضی	۴	۱۱/۳۵(۱/۰۸)	۴۸۶(۵۷)
		طولی	۲	۲۰/۴۷(۳/۶۲)	۱۳۰۸(۱۲۶)
		طولی	۴	۲۵/۴۵(۰/۹۵)	۱۷۵۴(۹۰)
میخ تیپو	با چسب	عرضی	۲	۲/۱۱(۰/۵۴)	۷۴۰(۸۴)
		عرضی	۴	۳/۰۱(۱/۵۸)	۱۵۱۱(۱۴۴۰)
		طولی	۲	۲۰/۴۶(۶/۰۱)	۴۴۳۴(۱۰۳۵)
		طولی	۴	۱۸/۷۷(۸/۰۸)	۵۴۰۵(۱۴۱۹)
	بدون چسب	عرضی	۲	۸/۳۱(۱/۵۵)	۳۹۵(۷۸)
		عرضی	۴	۱۰/۴۵(۰/۸۱)	۶۴۱(۳۵۰)
		طولی	۲	۱۹/۷۸(۰/۶۸)	۱۱۶۰(۱۵۵)
		طولی	۴	۲۰/۱۸(۲/۱۸)	۱۴۶۵(۵۳۲)

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس مربوط به نمونه‌های CLT ساخته شده برای این مطالعه

منابع تغییرات	MOR (MPa)		MOE (MPa)	
	مقدار F	سطح معنی داری	مقدار F	سطح معنی داری
نوع اتصال دهنده	۲۶/۹۵	۰/۰۰۰*	۰/۶۶۵	۰/۱۹۶ ^{ns}
چسب	۵/۶۸	۰/۰۲۰*	۲۳۲/۱۱۰	۰/۰۰۰*
جهت CLT (طولی و عرضی پانل)	۲۶۸/۹۴	۰/۰۰۰*	۳۵۰/۱۷۵	۰/۰۰۰*
تعداد اتصال دهنده	۱/۴۶	۰/۲۳۱ ^{ns}	۲/۲۷۳	۰/۱۳۶ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × چسب	۱۵/۱۶	۰/۰۰۰*	۰/۷۱۱	۰/۴۹۵ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × جهت پانل	۸/۸۴	۰/۰۰۰*	۰/۶۱۴	۰/۵۴۴ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × تعداد اتصال دهنده	۲/۳۶	۰/۱۰۲ ^{ns}	۲/۳۹۶	۰/۰۹۸ ^{ns}
چسب × جهت پانل	۳۲/۴۶	۰/۰۰۰*	۱۴۴/۱۹۶	۰/۰۰۰*
چسب × تعداد اتصال دهنده	۰/۲۶	۰/۶۱۲ ^{ns}	۰/۲۴۵	۰/۶۲۲ ^{ns}
جهت پانل × تعداد اتصال دهنده	۱/۹۱	۰/۱۷۱ ^{ns}	۰/۱۳۷	۰/۷۱۲ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × چسب × جهت پانل	۶/۷۸	۰/۰۰۲*	۰/۴۰۰	۰/۶۷۲ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × چسب × تعداد اتصال دهنده	۰/۹۶	۰/۳۸۶ ^{ns}	۰/۹۸۴	۰/۳۷۹ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × جهت پانل × تعداد اتصال دهنده	۱/۷۱	۰/۱۸۷ ^{ns}	۰/۰۶۹	۰/۹۳۴ ^{ns}
چسب × جهت پانل × تعداد اتصال دهنده	۰/۷۸	۰/۳۸۱ ^{ns}	۱/۳۲۴	۰/۲۵۴ ^{ns}
نوع اتصال دهنده × چسب × جهت پانل × تعداد اتصال دهنده	۰/۳۱	۰/۷۳۳ ^{ns}	۰/۵۱۶	۰/۵۹۹ ^{ns}

*: معنی داری در سطح ۵ درصد، ns: عدم معنی داری

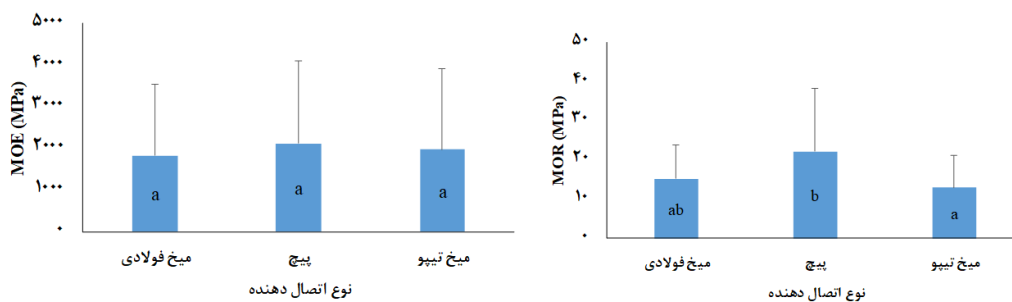
درصد و سه برابر بیشتر نمونه‌های ساخته‌شده بدون چسب است که از نظر آماری معنی‌دار است. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT در جهت طولی به ترتیب حدود سه و چهار برابر بیشتر از نمونه‌های CLT در جهت عرضی است که از نظر آماری معنی‌دار است. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT با چهار عدد اتصال‌دهنده به ترتیب حدود ۱ و ۱۰ درصد بیشتر از نمونه‌های CLT ساخته‌شده با دو عدد اتصال‌دهنده است که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

تأثیر متقابل نوع و تعداد اتصال‌دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی

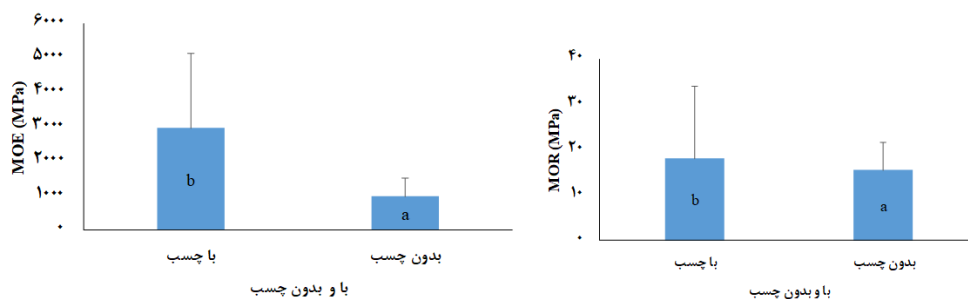
شکل ۶ تأثیر متقابل نوع اتصال‌دهنده، تعداد اتصال‌دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و چسب حدود ۱۴۶ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است، اما مدول الاستیسیته خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و چسب حدود ۲۴۴ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست. مقاومت خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و جهت پانل حدود پنج و نیم برابر تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است، اما مدول الاستیسیته خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و جهت پانل حدود پنج برابر تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر نوع و تعداد اتصال‌دهنده به ترتیب ۹۲ و ۳۴ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر چسب و جهت پانل ۳۷۷ درصد و ۹ برابر تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر چسب و تعداد اتصال‌دهنده به ترتیب ۲۶ و ۲۳۹ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست. همچنین مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر جهت CLT و تعداد اتصال‌دهنده به ترتیب ۲۴۰ و ۳۸۸ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

تأثیر مستقل نوع و تعداد اتصال‌دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی

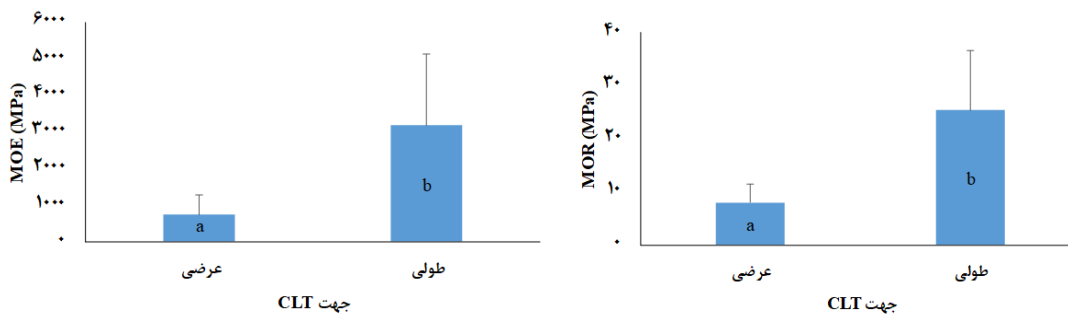
شکل ۵ تأثیر مستقل نوع اتصال‌دهنده، تعداد اتصال‌دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی را نشان می‌دهد. مشاهده شد که بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده با پیچ پانلی است. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته با میخ فولادی از نمونه‌های ساخته با میخ تیپو بیشتر است. نتایج نشان داد که مقاومت خمشی نمونه‌های CLT ساخته با پیچ پانلی به ترتیب ۴۵ و ۷۱ درصد از نمونه‌ای CLT ساخته با میخ فولادی و میخ تیپو بیشتر است. همچنین مقاومت خمشی CLT ساخته با میخ تیپو بیشتر است. نتایج جدول تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر مستقل نوع اتصال‌دهنده بر مقاومت خمشی در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار است. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون توکی استفاده شد. نتایج آزمون توکی نشان داد که اختلاف مقاومت خمشی نمونه‌های CLT ساخته‌شده با پیچ پانلی با مقاومت خمشی CLT‌های ساخته با میخ تیپو معنی‌دار است، اما با مقاومت خمشی نمونه‌های CLT ساخته‌شده با میخ فولادی معنی‌دار نیست. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده با پیچ پانلی است. همچنین مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته با میخ فولادی از نمونه‌های ساخته با میخ تیپو بیشتر است. مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT ساخته با پیچ پانلی به ترتیب ۱۶ و ۷ درصد از نمونه‌ای CLT ساخته با میخ تیپو و میخ فولادی بیشتر است. همچنین مدول الاستیسیته خمشی CLT ساخته با میخ تیپو ۸ درصد از نمونه‌های CLT ساخته با میخ فولادی بیشتر است. با تغییر نوع اتصال‌دهنده مقاومت خمشی ۷۱ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است؛ اما با تغییر نوع اتصال‌دهنده مدول الاستیسیته خمشی ۱۶ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های ساخته‌شده با چسب به ترتیب ۱۶



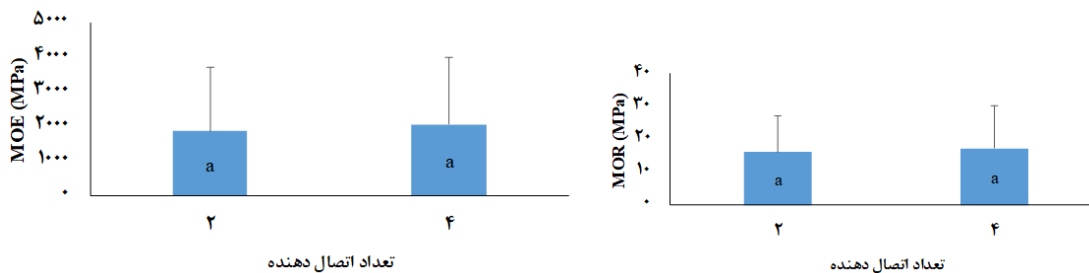
الف: نوع اتصال دهنده



ب: کاربرد چسب

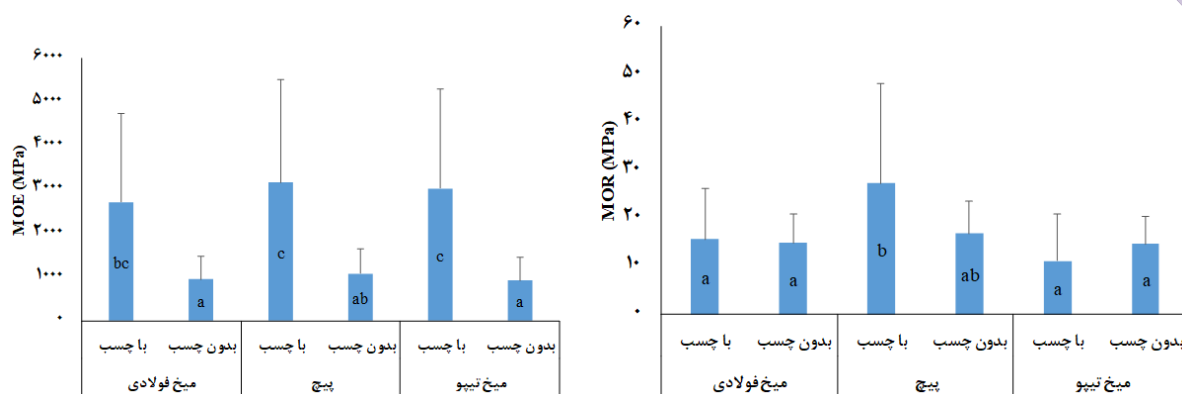


ج: جهت پانل CLT

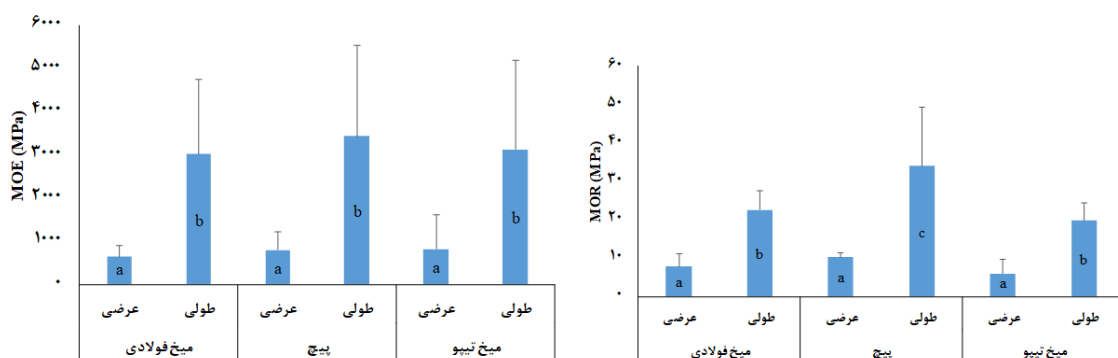


د: تعداد اتصال دهنده

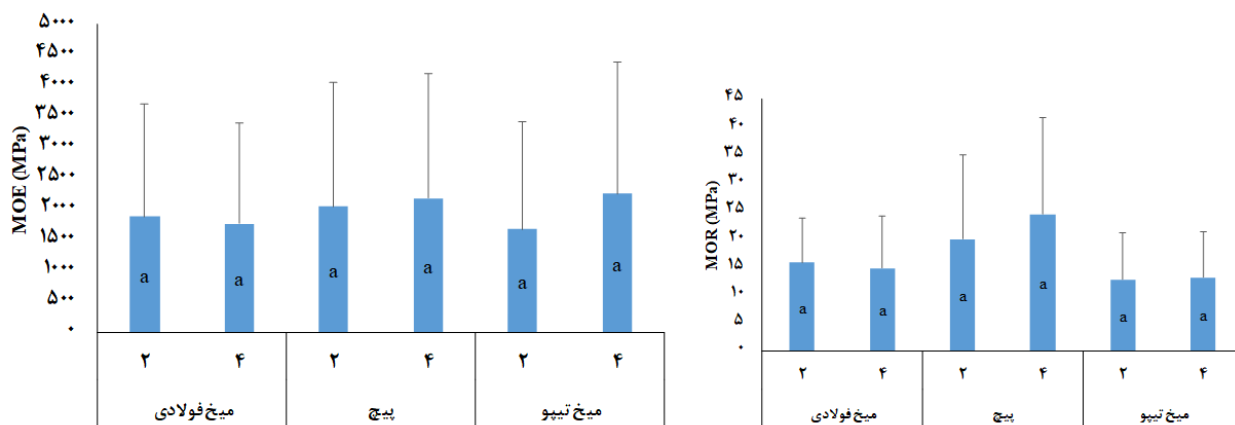
شکل ۵- تأثیر مستقل نوع اتصال دهنده، تعداد اتصال دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی



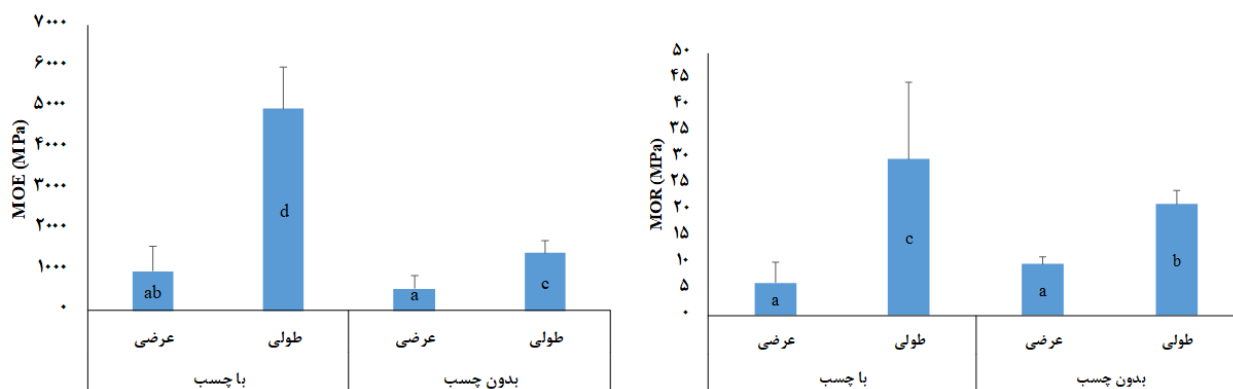
الف: نوع اتصال دهنده × چسب



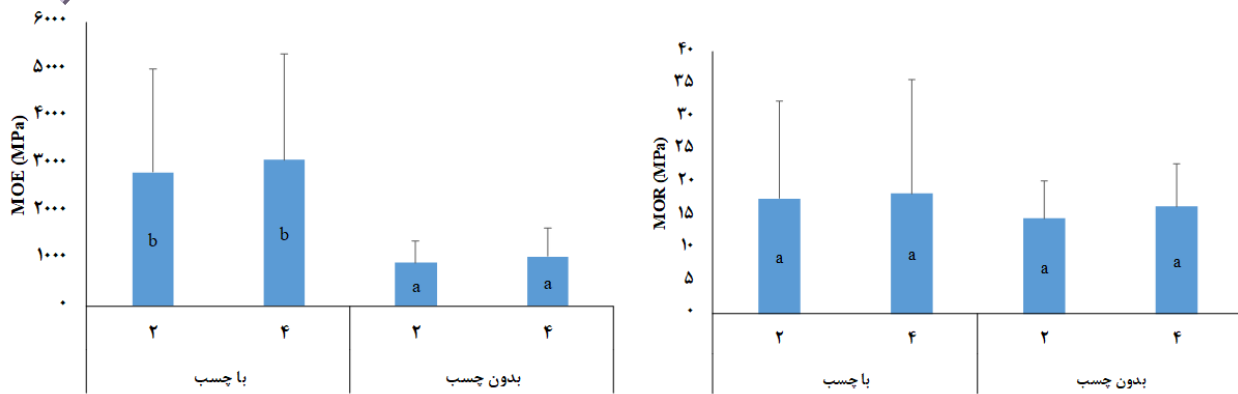
ب: نوع اتصال دهنده × جهت پانل



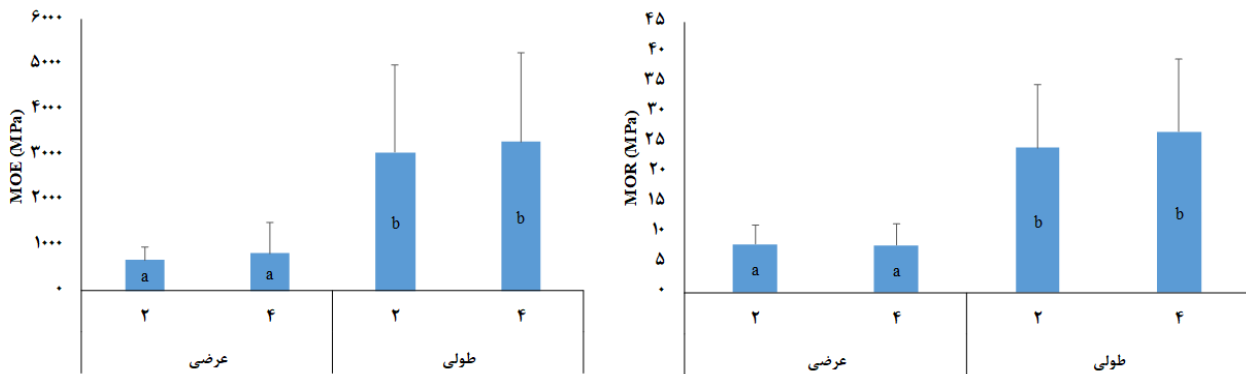
ج: نوع اتصال دهنده × تعداد اتصال دهنده



د: چسب × جهت پانل



ه: چسب × تعداد اتصال دهنده

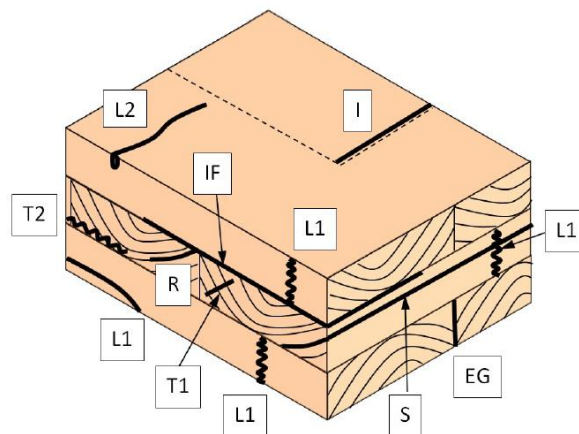


و: جهت پانل × تعداد اتصال دهنده

شکل ۶- تأثیر متقابل نوع اتصال دهنده، تعداد اتصال دهنده، چسب و جهت پانل CLT بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی

شروع می‌شود؛ اما وقتی جهت عرضی پانل CLT زیر بار خمشی قرار می‌گیرد، لایه‌های رویی آن به‌صورت عرضی هستند و شکست برشی در امتداد دوایر رویش در دولایه بالا و زیرین اتفاق می‌افتد. به همین دلیل مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT که به‌صورت طولی هستند بسیار بیشتر از جهت طولی پانل است. Rostampour و همکاران (۲۰۱۸)، Buck و همکاران (۲۰۱۱)، Li و همکاران (۲۰۱۴)، Chen و Lam (۲۰۱۱)، Dinwoodie (۲۰۰۰) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند [۴، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳]. برای توجیه بهتر نتایج مشاهده‌شده در این پژوهش مروری بر شکست چوب در اینجا ارائه می‌شود. مدهای شکست معمول در CLT زیر بار خمشی در شکل ۷ ارائه شده است.

نتایج نشان داد که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی پانل CLT بیشتر از جهت عرضی آن است. وقتی CLT زیر بار خمشی قرار می‌گیرد با مدهای گوناگونی می‌شکنند که به‌نوبه خود مقاومت‌های خمشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. وقتی نمونه‌ای زیر بار قرار می‌گیرد، ابتدا شکست در نقاط ضعیف آن شروع می‌شود. نقاط ضعیف در نمونه CLT که زیر بار خمشی قرار می‌گیرد لایه‌هایی هستند که به‌صورت عرضی قرار می‌گیرند که اغلب به‌صورت مماسی هستند و در صفحه شعاعی-مماسی (RT) می‌شکنند. از این‌رو وقتی نمونه‌های جهت طولی پانل CLT زیر بار خمشی وسط دهانه قرار می‌گیرد، شکست ابتدا در قطعات لایه میانی که به‌صورت عرضی قرار گرفته‌اند به‌صورت برشی در امتداد دوایر رویش



شکل ۷ مدهای شکست رایج در CLT زیر بار خمشی [۱۴].

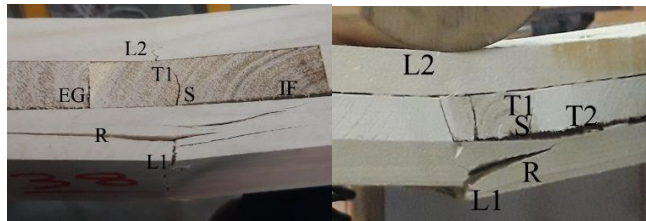
به صورت برش رولی^۱ در قطعات لایه میانی که به صورت تخته مماسی بودند (S) و یا در جهت عمود بر دواير رویش در تخته‌های شعاعی دیده شد، سپس شکست در محل درز لایه‌ها دیده شد و سرانجام به لایه‌های بیرونی منتشر شد. شکست ابتدا در لایه بالایی شروع شد که تحت تنش فشاری قرار داشت. با ادامه بارگذاری شکست در لایه‌های بیرونی به خصوص لایه رویی زیر بار دیده شد که به دلیل تنش کششی ایجاد شده بود و سپس شکست به سطح مشترک بین لایه‌ها منتشر شده و لایه‌ها از هم جدا شد. شکل ۸ مدهای شکست نمونه‌های CLT را در جهت عرضی و طولی پانل نشان می‌دهد. تنش نهایی چوب سالم در کشش بیشتر از فشار است. نسبت بین تنش کششی و فشاری در جهت موازی و عمود بر الیاف چوب به ترتیب ۲۰ به ۱ و ۱۰ به ۱ است. از طرفی نسبت بین تنش کششی و فشاری در چوب ۲ به ۱ است. به همین دلیل در قسمت فشاری تیر تنش زودتر به مقدار حداکثر خود می‌رسد. در نتیجه آثار شکست نخست در قسمت فشاری تیر به وجود می‌آید و بعد آثار شکست در قسمت کششی تیر ظاهر می‌شود [۱۶]. Buck و همکاران، (۲۰۱۶) نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند [۱۰]. Zhou (۲۰۱۳) و Zhou و همکاران (۲۰۱۴) بیان کردند که به دلیل ضعف استحکام صفحه شعاعی-مماسی (RT) در مقایسه با صفحه طولی-شعاعی (LR) و طولی-مماسی (LT) که در آن مدول برش رولی کم است، شکست CLT از نوع شکست برشی در امتداد دواير رویش است [۱۷، ۱۸].

L1: شکست کششی در جهت طولی CLT، بیشتر به دلیل نامنظمی الیاف مانند گره و دیگر معایب رشد اتفاق می‌افتد، L2: شکست فشاری در جهت طولی CLT، I: شکست کنگره‌ای عمود بر الیاف، R: شکست کششی در جهت شعاعی که در چوب بهاره اتفاق می‌افتد و دلیل آن تنش برشی موازی الیاف است و در امتداد دواير رویش گسترش می‌یابد، T1: شکست کششی در جهت مماسی، این نوع شکست در چوب بهاره و تابستانه هردو اتفاق می‌افتد و دلیل آن شکست برشی یا هم کشیدگی است، T2: شکست مضرس کششی در صفحه در جهت مماسی که دلیل اصلی آن تجمع تنش برشی رولی و تنش خمشی عمود بر الیاف است، EG: شکست در اتصال عرضی، IF: شکست سطح مشترک بین لایه‌ها، S: شکست برشی موازی الیاف که به شکست برشی رولی معروف است. ترتیب اتفاق این مدهای شکست در پژوهش Hochreiner و همکاران (۲۰۱۴) به صورت EG، T1، R، T2، I، L1، IF بیان شده است. آن‌ها نشان دادند که شکست در CLT با مد R و T1 به صورت موضعی شروع شده و با شکست‌های با مد L1 و T2 پایان می‌یابد. Franzoni و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که شکست در CLT با مدهای S و EG شروع شده و با L1 و I خاتمه می‌یابد [۱۵]. همچنین نشان دادند که L1 و T2 با همدیگر سبب شکست نهایی سازه می‌شود و R و T1 موضعی بوده و تأثیر کمی بر سفتی لایه‌های CLT دارد. وقتی که جهت طولی پانل CLT زیر بار خمشی قرار گرفت، شروع شکست ناشی از تنش برشی بود که در امتداد دواير رویش

1 - Rolling Shear

دوایر رویش با آزمون برش رولی نشان دادند که به دلیل استفاده از لایه‌های باکیفیت کمتر در لایه‌های عرضی اتفاق شکست برشی در امتداد دوایر رویش بیشتر است [۱۱]. همچنین نشان دادند که با استفاده از لایه‌های با ضخامت کمتر می‌توان بر این مشکل غلبه کرد.

این مد شکست، ترک‌ها ابتدا در ناحیه چوب بهاره بین دو دایره رویش شروع می‌شود، سپس در امتداد دوایر رویش و یا اشعه چوبی منتشر می‌شود و سرانجام نمونه در خط چسب یا به دلیل جدا شدن برشی لایه‌ها می‌شکند. Li و همکاران (۲۰۱۴) با بررسی مقاومت برشی CLT در امتداد



الف: مدهای شکست در جهت طولی CLT

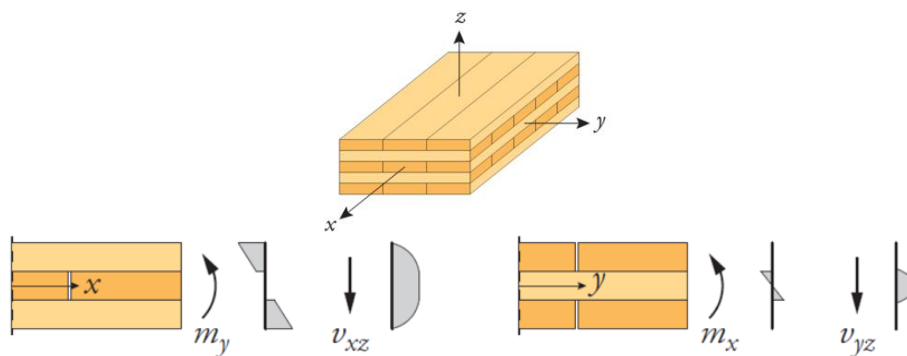


ب: مدهای شکست در جهت عرضی پانل CLT

شکل ۸- شکست‌های مشاهده شده در نمونه CLT مورد مطالعه در این تحقیق

توان نگهداری اتصال‌دهنده‌ای بیشتر باشد مقاومت آن بیشتر است. هر چه قطر اتصال‌دهنده بیشتر باشد، مقاومت برشی بیشتری دارد. از طرفی توان نگهداری نیز متأثر از قطر اتصال‌دهنده است و هر چه قطر بیشتر باشد اتصال‌دهنده توان نگهداری بیشتری خواهد داشت. بررسی‌ها نشان داده‌اند که با افزایش قطر، طول نفوذ، سرعت بارگذاری توان نگهداری پیچ افزایش می‌یابد [۲۰-۲۳]. قطر میخ فولادی از پیچ پانلی و میخ تیپو بیشتر است و تنش برشی بیشتری را تحمل می‌کند، اما پیچ به علت دارا بودن رزوه توان نگهداری بیشتری نسبت به انواع میخ دارد [۲۴]. از این رو می‌توان گفت که تنش خمشی CLT ساخته شده با انواع اتصال‌دهنده بیشتر متأثر از توان نگهداری آن است و دلیل بیشتر بودن مقاومت خمشی CLT ساخته شده با پیچ پانلی را می‌توان به توان نگهداری بیشتر آن نسبت به میخ نسبت داد.

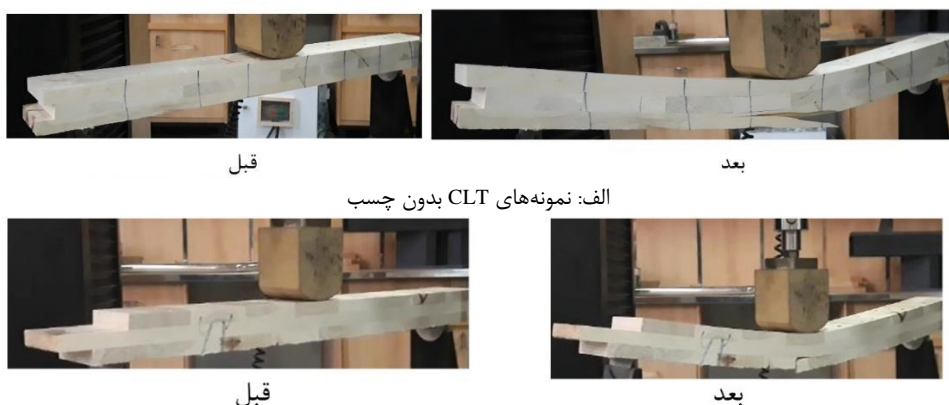
نتایج نشان داد که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT ساخته شده با پیچ بیشتر از CLT ساخته شده با میخ فولادی و میخ تیپو است. وقتی نمونه CLT زیر بار خمشی قرار می‌گیرد در سطح بالایی بیشترین تنش فشاری، در سطح زیرین بیشترین تنش کششی و در خط خنثی بیشترین تنش برشی دیده می‌شود. شکل ۹ توزیع تنش را در نمونه CLT زیر بار خمشی نشان می‌دهد. وقتی CLT ساخته شده با پیچ و میخ زیر بار خمشی قرار می‌گیرد به دلیل توزیع تنش برشی بین لایه‌ها و لغزش صفحات روی یکدیگر، به اتصال‌دهنده‌ها تنش برشی اعمال می‌شود. از طرفی با افزایش مقدار بار و جابجایی بین صفحات پیچ و میخ از جای خود بیرون آمده و به آن‌ها بار کششی وارد می‌شود. از این رو، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه CLT ساخته شده با اتصال‌دهنده‌ها متأثر از مقاومت برشی پیچ و توان نگهداری پیچ در CLT خواهد بود. هر چه مقدار مقاومت برشی پیچ و



الف: توزیع نیروی برشی (v) و لنگر (m) در جهت عرضی CLT ب: توزیع نیروی برشی (v) و لنگر (m) در جهت طولی CLT
 شکل ۹- توزیع تنش در نمونه CLT چندلایه زیر بار خمشی (توزیع لنگر (m) و نیروی برشی (v) در جهت طولی و عرضی پانل)

بدون چسب هستند، اما نمونه آخری با چسب به همراه اتصال‌دهنده ساخته شده است. مشاهده می‌شود که وقتی نمونه‌های CLT بدون چسب ساخته می‌شوند، تمام مقاومت CLT به نوع اتصال‌دهنده‌ای که برای اتصال لایه‌ها به هم استفاده می‌شود بستگی خواهد داشت. با اعمال بار برشی و کششی به پیچ در نمونه CLT زیر بار خمشی لایه‌ها به راحتی روی هم می‌لغزند (نمونه الف در شکل ۱۰) و مقاومت کاهش می‌یابد، اما وقتی لایه‌ها با چسب به هم چسبانده می‌شوند و از اتصال‌دهنده برای تأمین فشار استفاده می‌شود قضایه متفاوت است. در این حالت لغزش صفحات روی هم محدود شده و CLT مقاومت بیشتری را از خود نشان می‌دهد (نمونه ب در شکل ۱۰).

پانل CLT با چسب مقاوم به آب ساخته می‌شود و لایه‌ها بعد از چسب‌زنی با پرس به هم چسبانده می‌شوند. هدف از این تحقیق حذف مرحله پرس بود. از این رو پانل CLT با اتصال‌دهنده و چسب ساخته شد تا اعمال فشار با اتصال‌دهنده تأمین شود. نتایج نشان داد که پیچ عملکرد بهتری برای اعمال فشار برای چسباندن چسب از خود نشان داد. دلیل آن به توان نگهداری بیشتر پیچ برمی‌گردد که فشار بیشتری به لایه‌ها اعمال می‌کند و سطح چسبندگی بهتری ایجاد می‌کند. نتایج نشان داد که نمونه‌های CLT با چسب مدول و مقاومت خمشی بیشتری داشتند. شکل ۱۰ شکست پانل CLT را زیر بار خمشی قبل و بعد از شکست نشان می‌دهد. نمونه اول نمونه CLT



الف: نمونه‌های CLT بدون چسب ب: نمونه CLT به همراه چسب و اتصال‌دهنده
 شکل ۱۰- شکست پانل قبل و بعد از شکست طی اعمال بار خمشی به نمونه CLT

افزایش مقدار آن معنی‌دار نیست. با افزایش تعداد اتصال‌دهنده انتظار می‌رود توان نگهداری و مقاومت برشی پیچ در نمونه افزایش یابد، اما هرچه تعداد اتصال‌دهنده

با افزایش تعداد اتصال‌دهنده از ۲ به چهار به ازای هر لایه (مساحت ۱۰ در ۱۰ سانتیمتر) مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی افزایش می‌یابد، اما از نظر آماری

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT با چهار عدد اتصال‌دهنده به ترتیب حدود ۱ و ۱۰ درصد بیشتر از نمونه‌های CLT ساخته‌شده با دو عدد اتصال‌دهنده است که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

- بررسی تأثیر متقابل عوامل مورد مطالعه بر مقاومت خمشی نشان داد:

- مقاومت خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و چسب حدود ۱۴۶ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است، اما مدول الاستیسیته خمشی با تغییر نوع اتصال‌دهنده و چسب حدود ۲۴۴ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر نوع و تعداد اتصال‌دهنده به ترتیب ۹۲ و ۳۴ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با تغییر چسب و تعداد اتصال‌دهنده به ترتیب ۲۶ و ۲۳۹ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

نتایج نشان داد که مقاومت‌های خمشی CLT های ساخته‌شده با چسب به همراه میخ تیپو، میخ فولادی و پیچ در حد استاندارد ISO 16696 بوده است و با چوب صنوبر می‌توان CLT با مقاومت خمشی مطلوب ساخت؛ اما نتایج مربوط به مدول الاستیسیته خمشی نشان داد که مقادیر مدول الاستیسیته به‌خصوص مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی پانل در حد استاندارد نیست که لازم است مطالعات جامعی برای مقاوم‌سازی CLT ساخته‌شده با صنوبر برای افزایش مدول الاستیسیته خمشی آن انجام شود. شایان‌ذکر است که مدول الاستیسیته خمشی CLT به مقدار چشمگیری به دانسیته و رطوبت لایه‌ها بستگی دارد. دانسیته صنوبر کم است ($0/35 \text{ kg/cm}^3$)، از این‌رو مدول الاستیسیته خمشی کمی دارد. از سوی دیگر رطوبت لایه‌ها به دلیل خشک شدن در هوای آزاد زیاد است که تأثیر بسیار زیادی بر مدول الاستیسیته آن می‌گذارد.

بیشتر شود مقطع خالص تحمل بار در نمونه کاهش یافته و سبب کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی می‌شود. استاندارد ISO مدول الاستیسیته جهت طولی و عرضی پانل CLT و مدول گسیختگی در جهت طولی پانل را به ترتیب 11600 ، 450 و 24 MPa برای CLT با دانسیته حداقل 385 و دانسیته میانگین 420 Kg/m^3 گزارش کرده است [۲۵]. نتایج نشان داد که مقاومت‌های خمشی CLT های ساخته‌شده با چسب به همراه میخ تیپو، میخ فولادی و پیچ در حد استاندارد بوده است، اما مدول الاستیسیته خمشی آن‌ها به‌خصوص در جهت طولی پانل ساخته‌شده در حد استاندارد نیست.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر مستقل عوامل مورد مطالعه بر مقاومت خمشی نشان داد:

- بیشترین مقاومت خمشی مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده با پیچ پانلی است.

- مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته‌شده با میخ فولادی از نمونه‌های ساخته‌شده با میخ تیپو بیشتر است؛ و با تغییر نوع اتصال‌دهنده مقاومت خمشی ۷۱ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار است؛ اما با تغییر نوع اتصال‌دهنده مدول الاستیسیته خمشی ۱۶ درصد تغییر می‌کند که از نظر آماری معنی‌دار نیست.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های ساخته‌شده با چسب به ترتیب ۱۶ درصد و سه برابر بیشتر نمونه‌های ساخته‌شده بدون چسب است که از نظر آماری معنی‌دار است.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌های CLT در جهت طولی به ترتیب حدود سه و چهار برابر بیشتر از نمونه‌های CLT در جهت عرضی است که از نظر آماری معنی‌دار است.

- [1] Gagnon, S. and Pirvu, C. 2011. CLT handbook: cross-laminated timber. 1st ed., Pointe-Claire, Quebec: FPInnovations. 572 p.
- [2] Khazaeian, A., Yaghmaei, F. and Tabarsa, T., 2009. Investigation on Bending and Compression Strength of Paulownia fortunei Wood Grown in Gorgan Region, Journal of Wood & Forest Science and Technology, 16(3):1-22.
- [3] Merrikh, F., Araghi, M.K. and Bagheri, R., 2007. Designing and manufacturing of a poplar harvester for short rotation system, Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 16(3): 367-354.
- [4] Rostampour Haftkhani, A., 2018. Structural performance of cross-laminated timber (CLT) made out of poplar and preparing model for its mechanical behavior by finite element method, PhD thesis, University of Tehran.
- [5] Rostampour Haftkhani, A., Layeghi, M., Ebrahimi, GH. and Pourtahmasi, K., 2017. Evaluation of bending performance for cross laminated timber (CLT) made out of poplar (Populus alba), Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 8(1): 67-78.
- [6] Brandner, R. 2013. Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report. Focus Solid Timber Solution-European Conference on Cross-Laminated Timber (CLT), 21: 3-36.
- [7] Kairi, M., 2002. Glued / Screwed Joints / Screw Glued Wooden Structures, Chapter 4.4, In: Johansson C. J., Pizzi T. and Leemput M. V. eds., COST Action E13, Wood Adhesion and Glued Products, Working Group 2: Glued Wood Products: State of the Art Report, 2nd Ed, 205p.
- [8] Standards for performance-rated cross-laminated timber, ANSI/APA PRG 320, 2012.
- [9] Standard method of testing small clear specimens of timber. Annual Book of ASTM Standard, D143, 2015.
- [10] Buck, D., Wang, X.A., Hagman, O. and Gustafsson, A. 2016. Bending properties of cross laminated timber (CLT) with a 45 alternating layer configuration. BioResources, 11(2): 4633-4644.
- [11] Li, M., Lam, F. and Li, Y. 2014. Evaluating rolling shear strength properties of cross-laminated timber by torsional shear tests and bending tests, World Conference in Timber Engineering. p. 280.
- [12] Chen, Y. and Lam, F., 2013. Bending performance of box-based cross-laminated timber systems. Journal of structural engineering, 139(12):1-12.
- [13] Dinwoodie, J., 2000. Timber: Its Nature and Behavior. CRC Press, 272 p.
- [14] Hochreiner, G., Füssl, J., Eberhardsteiner, J. and Aicher, S. 2014. CLT plates under concentrated loading—Experimental identification of crack modes and corresponding failure mechanisms. In: Materials and Joints in Timber Structures, Springer, 9:703-712.
- [15] Franzoni, L., Lebée, A., Lyon, F. and Forêt, G., 2015. Advanced modelling of Cross Laminated Timber (CLT) panels in bending, European Conference on Theoretical, Numerical and Experimental Analyses in Wood Mechanics, 1-20.
- [16] Ebrahimi, Gh., 2013. Mechanics of wood and wood composites, 4th Ed., University of Tehran press, 657 p. (In Persian).
- [17] Zhou, Q. 2013. Development of evaluation methodology for rolling shear properties in Cross Laminated Timber (CLT), MSc thesis. University of New Brunswick, Fredericton, NB.

- [18] Zhou, Q., Gong, M., Chui, Y. and Mohammad, M. 2014. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber using bending and two-plate shear tests. *Wood and fiber science*, 46(2), 259-269.
- [19] Rostampour Haftkhani, A., 2010. Investigation on withdrawal and lateral strength of various screws used in furniture industry in commercial wood plastic composites, MSc thesis, University of Tehran
- [20] Rostampour Haftkhani, A., Ebrahimi, GH., M. Tajvidi, and M. Layeghi, 2011. Investigation on withdrawal strength of various screws used in furniture industry in commercial wood plastic composites (WPC) and comparison with those in commercial medium density fiberboard (MDF) and particleboard. *Iranian Journal of Natural Resources*, 64(4):369-382.
- [21] Rostampour Haftkhani, A., Ebrahimi, GH., M. Arabi, M. Tajvidi and M. Layeghi, 2012. Investigation on lateral load of joints made with various screws on commercial wood-plastic composite. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 27(1): 100-113.
- [22] Haftkhani, A.R., Ebrahimi, G., Tajvidi, M. and Layeghi, M. 2011. Investigation on withdrawal resistance of various screws in face and edge of wood-plastic composite panel. *Materials & Design*, 32(7), 4100-4106.
- [23] Haftkhani, A.R., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., Layeghi, M. and Arabi, M. 2011. Lateral resistance of joints made with various screws in commercial wood plastic composites. *Materials & Design*, 32(7), 4062-4068.
- [24] Eckelman, C.A. 2003. *Textbook of product engineering and strength design of furniture*, West Lafayette, Indiana, 99 p.
- [25] Timber structures, Cross-laminated timber, Part 1: Component performance, production requirements and certification scheme, ISO 16696-1:2019.

Flexural performance of cross-laminated timber made out of poplar reinforced with nail and screw

Abstract

In this study, flexural performance of cross-laminated timber (CLT) made out of poplar wood (*Populus alba*), Polyurethane adhesive and different mechanical connectors were investigated. Amount of adhesive was 300 g/m². For manufacturing CLT panels, wood planks were air-dried, then four face-bonding surfaces of planks were planed (S4S). Thickness and width of planks were 19 and 100 mm, respectively. The thickness, width and span to depth ratio of Three-layered CLT specimens for bending test were 57, 80 mm and 12, respectively. Bending test was conducted by Instron 4486. The variables of this study were including different connectors (galvanized steel nail, strip brad nails (ST Nails) and coarse thread drywall screw), connector number (2 and 4), adhesive (with and without adhesive) and panel direction (major and minor direction). The results showed that the higher modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) were related to major direction of CLT panels connected by 4 screws and adhesive as well the lower of them were related to minor direction of CLT panels connected by 2 ST nails and adhesive. The results also showed that MOR and MOE of CLT panels were changed about 71 and 16, 16 and 400, 1 and 10%, respectively with the change of shear connector, adhesive and number of connector. MOR and MOE in major direction of CLT panels were about 3 and 4 times higher than those in minor direction. The results revealed that MOR of CLT panels meet the specified requirements of ISO 16696-1 standard, however, MOE of them were not comparable with standard value. Hence, it was recommended to perform some comprehensive studies for reinforcing CLT panels made of poplar for increasing their MOE.

Keywords: Flexural performance, Cross laminated timber, Poplar, Nail and screw connections.

A. Rostampour Haftkhani^{1*}

F. Mehmandoust²

M. Sharari¹

M. Ahmadi³

B. Moezipour¹

A. Shokrvand Shakiba⁴

¹ Assistant prof., Wood Science and Technology, Department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

² MSc student, Civil engineering, Department of civil, Eqbal Lahoori Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

³ Associate prof., Wood Science and Technology, Department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

⁴ BSc student of Wood Science and Technology, department of natural resources, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding author:

arostampour@uma.ac.ir

Received: 2019/02/04

Accepted: 2019/04/27