

تقویت عملکرد خمشی چندسازه چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT) ساخته شده از صنوبر و پیچ با ورق آلومینیوم و الیاف شیشه

اکبر رستم‌پور هفتخوانی^{۱*}، علی شکیبا^۲

۱. استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل
۲. دانشجوی کارشناسی گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶

چکیده

در این پژوهش، تقویت عملکرد خمشی CLT سه‌لایه ساخته شده از صنوبر (*populous alba*)، چسب و پیچ پانلی برای اعمال فشار بررسی شد. متغیرهای بررسی شده شامل نوع تقویت کننده (ورق آلومینیوم و الیاف شیشه) و آرایش قرارگیری تقویت کننده (آرایش ۱ (در قسمت پایین (کششی))، آرایش ۲ (در قسمت پایین (کششی) و بالا (فشاری))، آرایش ۳ (در پایین، بالا و بین دو لایه پایین) و آرایش ۴ (در پایین، بالا و بین لایه‌ها) بودند. آزمون خمش براساس ASTM D4761 و دستگاه اینسترون انجام گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به جهت طولی پانل‌های CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳ و کمترین MOR و MOE مربوط به جهت عرضی پانل‌های CLT تقویت شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ بود. با تقویت CLT با ورق آلومینیوم، MOR و MOE در جهت عرضی CLT به ترتیب ۱۹۵/۱ و ۳۴۴/۶ درصد و در جهت طولی ۸۹/۳ و ۵۰/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. در پی تقویت CLT با الیاف شیشه، MOR و MOE در جهت عرضی پانل CLT به ترتیب ۴۲/۸ و ۲۱/۳ درصد و در جهت طولی ۴۶/۱ و ۱۲/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. MOR و MOE نمونه‌های تقویت شده با ورق آلومینیوم بیشتر از نمونه‌های تقویت شده با GFRP بود. تقویت CLT سبب تغییر مد شکست از ترد به شکست نرم شد و به تبع آن عملکرد خمشی آنها بهبود یافت. **واژه‌های کلیدی:** اتصال دهنده‌های مکانیکی، الیاف شیشه، تقویت عملکرد خمشی، چندسازه چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT)، صنوبر، ورق آلومینیوم.

مقدمه

جمله مقاومت کم جهت عمود بر الیاف نسبت به جهت موازی الیاف. برای حل مشکل مربوط به دهانه‌های به نسبت بلند و از بین بردن محدودیت‌های ابعاد و افزایش کیفیت، استفاده بهینه از چوب، حذف معایب موضعی و افزایش مقاومت چوب، به ساخت فرآورده‌های لایه‌ای توجه ویژه‌ای شده است. نسبت مدول الاستیسیته چوب در جهت طولی به عرضی ۳۰ به ۱ است که سبب ضعف چوب در جهت عرضی است.

چوب به دلیل مزایایی مانند منشأ طبیعی، تجدیدپذیری، انرژی کمتر برای استخراج، تولید و حمل و نقل آسان، قابلیت پیش ساخته کردن، آلودگی کمتر، مقاومت مناسب و ... از گذشته تا کنون، از بهترین گزینه‌ها برای ساختمان‌سازان بوده است. چوب ضعف‌هایی هم دارد، از

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۷۹۵۲۳۴

Email: arostampour@uma.ac.ir

بنابراین، برای یکنواختی مقاومت در جهات مختلف، فرآورده‌های لایه‌ای با چیدمان لایه‌ها به صورت طولی و عرضی به صورت یک در میان مانند تخته چندلایه^۱ و چندسازه چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT^۲) ساخته شدند. CLT در اواسط دهه ۱۹۹۰ در سوئیس و اتریش ایجاد شد. کاربرد این فرآورده به دلیل حمل و نقل آسان، قابلیت پیش‌ساخته شدن، سرعت زیاد ساخت و ساز، عایق صدا، پایداری خوب در برابر آتش و خواص حرارتی مناسب خیلی زود در اروپا و آمریکای شمالی گسترش یافت [۱]. برای اتصال لایه‌ها در ساخت CLT از چسب پلی‌اورتان، امولسیون ایزوسیانات و چسب‌های فنولیک استفاده می‌شود. این چسب‌ها در حالت سرد به بیش از دو ساعت پرس نیاز دارند. برای پرس کردن CLT با پرس هیدرولیک می‌توان فشاری معادل $1-10 \text{ N/mm}^2$ و حتی بیشتر اعمال کرد، اما با پرس خلأ این میزان فشار معادل $0.1-0.5 \text{ N/mm}^2$ است و با میخ و پیچ این مقدار فشار به $0.2-0.1 \text{ N/mm}^2$ می‌رسد. چسب پلی‌اورتان برای چسبندگی به فشار کمتری نیاز دارد و حداقل فشار لازم برای ایجاد چسبندگی معادل $1-0.1 \text{ N/mm}^2$ است [۲، ۱]. استاندارد ISO مدول الاستیسیته جهت طولی و عرضی پانل CLT و مدول گسیختگی در جهت طولی پانل را به ترتیب ۱۱۶۰۰، ۴۵۰ و 24 MPa برای CLT با دانسیته حداقل ۳۸۵ و دانسیته میانگین 420 Kg/m^3 گزارش کرده است [۳]. در این پژوهش از چوب صنوبر برای ساخت CLT استفاده شد. شمسیان و همکاران (۲۰۰۸) با اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی سپیدار (کیوده) نشان دادند که مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته آن با دانسیته 0.395 g/cm^3 به ترتیب ۶۵ و 8097 MPa بوده است [۴]. در طی دو دهه گذشته با پیشرفت فناوری، روش‌های جدیدی برای مقاوم‌سازی،

تقویت و افزایش اطمینان در ظرفیت تحمل بار محصولات لایه‌ای ساخته شده از چوب و کاهش تغییر شکل و شکست اعضای سازه‌ای چوبی ابداع شده است. از مهم‌ترین این روش‌ها استفاده از ورق و میلگردهای فلزی، ورق، میلگرد و الیاف پلیمری (FRP^۳) است. یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تعمیر و مقاوم‌سازی ساختمان‌های چوبی به خصوص در تیرهای چوبی استفاده از ورق‌های فلزی بوده است [۵]. در دهه ۱۹۶۰ مطالعات جامعی درباره تقویت محصولات لایه‌ای با ورق فولاد و آلومینیوم صورت گرفت. Hurst و Coleman (۱۹۷۴) نشان دادند که تیر لایه‌ای ساخته شده از کاج متصل شده با میخ به تنهایی یا میخ به همراه چسب وقتی با ورق فلزی تقویت شد، مقاومت خمشی آنها به ترتیب ۲۲-۸ درصد و ۳۷-۲۲ درصد افزایش یافت، اما میزان خیز آنها به ترتیب ۳۵-۳۰ درصد و ۴۰ درصد کاهش یافت [۶]. نتایج پژوهش Alam و Ansell (۲۰۱۲) نشان داد که در تیرهای تقویت شده هرچه تراکم میخ در سطح بیشتر شود، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد، اما مدول الاستیسیته افزایش پیدا می‌کند [۷]. Borri و همکاران (۲۰۰۵) و Nowak و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که افزایش مقاومت و سفتی در تیرهای لایه‌ای تقویت شده با ورق فولادی بیشتر از FRP است [۸، ۹]. در پژوهشی مشابه، Jankowski (۲۰۱۰) نشان داد که وقتی تیرهای لایه‌ای با ورق فولادی تقویت می‌شوند مدول الاستیسیته آن تا ۸۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۰]. Jasieńko (۲۰۰۱) نیز نشان داد که وقتی تیرهای لایه‌ای با FRP تقویت می‌شود مدول الاستیسیته آن تا ۲۰ درصد افزایش می‌یابد [۱۱]. پژوهش Nowak و همکاران (۲۰۱۶) نشان داد که علی‌رغم تقویت‌کنندگی بیشتر ورق فولادی، FRP وزن کمتر و مقاومت به خوردندگی بیشتری دارد که بر کیفیت

1. Plywood
2. Cross Laminated Timber

3. Fiber-reinforced polymer (FRP)

D 143 اندازه‌گیری شد [۱۵]، به ترتیب 0.381 g/cm^3 ، 49 MPa و 6200 MPa بود. از تخته‌های حاصل نمونه‌های CLT سه‌لایه ساخته شدند. تخته‌ها به صورت مماسی بریده شدند و برای ساخت CLT لایه‌ها به صورت یک در میان در جهت طولی و عرضی روی هم قرار گرفتند. اعمال فشار برای چسباندن لایه‌ها در ساخت نمونه‌های CLT با چسب پلی‌اورتان، با پیچ پانلی رزوه درشت انجام شد، به طوری که ابتدا لایه‌ها چسب‌زنی شدند، سپس برای اعمال فشار به‌ازای سطح 12×8 سانتی‌متر مربع در لایه رویی دو عدد پیچ نصب شد. به دلیل دانسیته کم صنوبر و قطر کم اتصال‌دهنده‌ها، نصب پیچ بدون سوراخ پیش‌ساخته انجام گرفت. برای جلوگیری از ترکیدن چوب، پیچ‌ها طوری نصب شدند که در جهت طولی در یک راستا نباشند. شکل ۱ نحوه ساخت نمونه‌های CLT را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات فیزیکی پیچ در شکل ۱ نشان داده شده است. چسب پلی‌اورتان با کد M518 از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شد که به رنگ کرم، دارای دانسیته 1.3 g/cm^3 و درصد مواد جامد ۱۰۰ درصد بود (براساس کاتالوگ شرکت سازنده). مقدار چسب پلی‌اورتان مصرفی 300 g/m^2 در نظر گرفته شد. برای تقویت مقاومت خمشی CLT از ورق آلومینیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر، الیاف شیشه بافته شده و دو جهته به ضخامت 0.236 میلی‌متر استفاده شد. خواص تقویت‌کننده‌های استفاده شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. آرایش قرارگیری الیاف تقویت‌کننده در لایه‌های CLT در شکل ۲ آمده است.

چسبندگی مؤثرترند [۱۲]. Harte و Raftery (۲۰۱۱) نشان دادند که میزان تقویت‌کنندگی به آرایش تقویت‌کننده در بین لایه‌های چوب بستگی دارد. در این پژوهش آنها الیاف FRP را بین دو لایه آخری در قسمت کششی و همچنین در قسمت زیرین قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که وقتی FRP بین لایه‌ها قرار گرفت، مقاومت بهتری از خود نشان داد [۱۳]. Ahad و همکاران (۲۰۱۹) با تقویت CLT با FRP و ورق فولادی نشان دادند که برای تقویت CLT با وزن کمتر بهتر است از FRP استفاده شود و بیشترین افزایش MOR و MOE در تیرهای تقویت‌شده با FRP با ضخامت ۵ میلی‌متر دیده شد [۱۴]. با توجه به دانسیته کم صنوبر و در نتیجه مقاومت و مدول الاستیسیته کم CLT ساخته شده با آن، تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر ورق آلومینیوم و الیاف شیشه بر تقویت مقاومت خمشی پانل CLT ساخته شده از صنوبر با چسب و پیچ انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

برای این تحقیق ابتدا گرده‌بینه‌های چوب صنوبر (*Populus alba*) با ابعاد $200 \times 10 \times 2/5$ سانتی‌متر (به ترتیب طول، پهنا و ضخامت) تبدیل و سپس چوبدستک‌گذاری شده و در هوای آزاد به مدت ۲ ماه تا رطوبت ۱۵ درصد خشک شدند. پس از درجه‌بندی تخته‌ها به صورت نظری، تخته‌های درجه یک با دستگاه رنده و گندگی تا ضخامت ۲۰ و پهنای ۸۰ میلی‌متر از چهار طرف رنده شدند (S4S). دانسیته، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته چوب صنوبر که با استاندارد ASTM

جدول ۱. خواص مهندسی تقویت‌کننده‌های استفاده شده در این تحقیق

نوع تقویت‌کننده	ضخامت (mm)	وزن هر متر مربع (g/m^2)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
ورق آلومینیوم	۱	۲۷۱۰	۲۹۰	۷۰
الیاف شیشه	۰/۲۳۶	۶۰۰	۲۳۰۰	۹۰

نیرو و جابه‌جایی است. برای محاسبه توزیع تنش بین لایه‌های ابتدا مرکز سطح مقطع با فرمول زیر محاسبه شد.

$$\bar{y} = \sum \frac{A_i \bar{y}_i}{A_i} \quad (3)$$

$$I_x = I_{xi} + A_i d_i^2 = \frac{1}{12} b_i h_i^3 + A_i (\bar{y} - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

سپس برای توزیع تنش فشاری و کششی و همچنین تنش برشی از فرمول زیر استفاده شد.

$$\sigma = n \frac{My}{I_x} \quad (5)$$

که در آن \bar{y} مرکز سطح کل جسم (mm)، \bar{y}_i مرکز سطح هر جزء A_i (mm)، مساحت هر جزء I_{xi} (mm²)، ممان اینرسی کل مقطع I_{xi} (mm⁴)، ممان اینرسی هر جزء d_i (mm⁴)، فاصله مرکز سطح هر جزء از مرکز سطح کل مقطع σ (mm)، تنش کششی و فشاری (MPa)، نسبت مدولی، M لنگر خمشی (N.mm)، y فاصله تا مرکز سطح مقطع (mm) است. برای محاسبه نسبت مدولی، مدول الاستیسیته الیاف شیشه ۹۰، ورق آلومینیوم ۷۰، چوب در جهت موازی الیاف ۶/۲ MPa و نسبت جهت عمود بر الیاف به جهت موازی الیاف ۱ به ۳۰ در نظر گرفته شد.

متغیرهای بررسی شده در این تحقیق شامل نوع تقویت‌کننده (ورق آلومینیوم و الیاف شیشه)، جهت پانل (طولی و عرضی)، محل قرارگیری تقویت‌کننده در لایه‌های CLT (چهار آرایش) بودند که در شکل ۲ نمایش داده شده است. در مجموع شانزده تیمار و برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد. سپس مقاومت خمشی CLTهای تقویت‌شده با CLT ساخته شده بدون تقویت‌کننده مقایسه شد. داده‌های MOR و MOE اندازه‌گیری شده با نرم‌افزار SPSS 25 تجزیه و تحلیل آماری شدند. برای این کار از آزمون فاکتوریل استفاده شد و نمونه‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری تجزیه و تحلیل شدند. برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد.

برای یکنواختی رطوبت، نمونه‌های CLT به مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سلسیوس، مشروط‌سازی شدند.

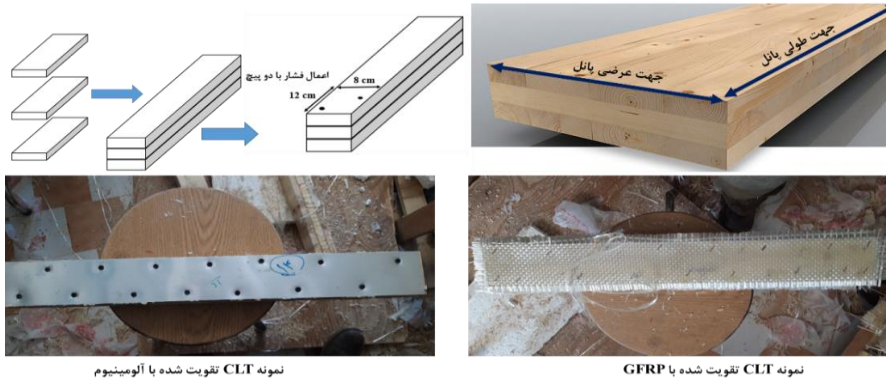
مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLTهای ساخته شده با تبعیت از استاندارد ASTM D4761 اندازه‌گیری شد [۱۶]. آزمون خمش به صورت سه نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه در جهت طولی و عرضی پانل CLT انجام گرفت. پهناي نمونه‌های آزمون خمش ۸۰ میلی‌متر و ضخامت آنها برحسب نوع لایه تقویت‌کننده متغیر بود. نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع برای نمونه‌های مورد پژوهش ۱۴ در نظر گرفته شد. شکل ۳ نحوه آزمون خمش CLT در جهت‌های طولی و عرضی پانل را نشان می‌دهد. مقادیر مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته خمشی (MOE) برای مقایسه میزان بار و جابه‌جایی نمونه‌های تحت بررسی با فرمول‌های زیر برای خمش سه نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه محاسبه و گزارش شدند.

$$MOR = 1.5 \frac{P_u L}{bh^2} \quad (1)$$

مدول الاستیسیته خمشی (MOE) از فرمول زیر و در قسمت خطی نمودار نیرو و جابه‌جایی (در محدوده الاستیک و در حد تناسب) محاسبه شد:

$$MOE = \frac{PL^3}{48\delta I} = \frac{L^3 \Delta P}{4 bh^3 \Delta x} \quad (2)$$

که در آن MOR بیانگر مدول گسیختگی یا مقاومت خمشی (MPa)، MOE مدول الاستیسیته خمشی (MPa)، M لنگر خمشی حداکثر (N.mm)، C ارتفاع مقطع (mm)، I ممان اینرسی مقطع (mm⁴)، P_u بار حداکثر (N)، P_{pl} بار در حد تناسب (N)، L طول دهانه (mm)، δ تغییر مکان یا خیز تیر حین خمش (mm)، b پهناي نمونه (mm) و h ارتفاع مقطع تیر (mm) است. ΔP (N) و Δx (mm) به ترتیب تغییرات نیرو و جابه‌جایی در ناحیه خطی نمودار



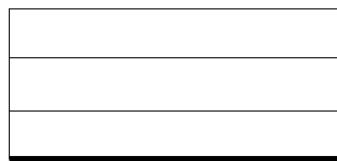
الف) نحوه ساخت نمونه CLT



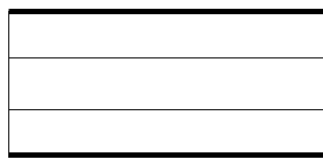
پیچ پانلی رزوه درشت

ب) پیچ استفاده شده در این تحقیق

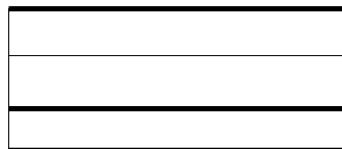
شکل ۱. نمونه‌های CLT ساخته شده، پیچ استفاده شده برای این تحقیق (D قطر بیرونی، Dr قطر ریشه و L طول پیچ است)



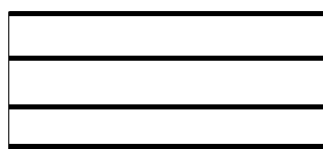
ب) آرایش ۲



الف) آرایش ۱



د) آرایش ۴



ج) آرایش ۳

شکل ۲. آرایش قرارگیری تقویت کننده در بین لایه‌های CLT (خطوط تیره تر محل قرارگیری تقویت کننده را نشان می‌دهد، آرایش ۱ در قسمت پایین (کششی))، آرایش ۲ در قسمت پایین (کششی) و بالا (فشاری))، آرایش ۳ در پایین، بالا و بین دو لایه پایین و آرایش ۴ در پایین، بالا و بین لایه‌ها))



ب) آزمون خمشی جهت عرضی پانل



الف) آزمون خمشی جهت طولی پانل

شکل ۳. آزمون خمشی عمود بر سطح CLT در جهت طولی و عرضی پانل

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس تأثیر مستقل و متقابل نوع تقویت کننده، جهت پانل CLT و محل قرارگیری لایه تقویت کننده در CLT بر MOR و MOE نمونه‌های بررسی شده در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده شد که تأثیر مستقل نوع تقویت کننده، جهت پانل CLT و محل قرارگیری لایه‌های تقویت کننده در CLT بر MOR آنها در

سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری معنی دار است، اما تأثیر متقابل آنها بر MOR معنی دار نیست. همچنین نتایج جدول ۲ نشان داد که تأثیر مستقل نوع تقویت کننده، جهت پانل CLT و محل قرارگیری لایه تقویت کننده و همچنین اثر متقابل نوع تقویت کننده × جهت پانل و نوع تقویت کننده × محل قرارگیری تقویت کننده بر MOE در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری معنی دار است.

جدول ۲. جدول تجزیه واریانس مربوط به تأثیر مستقل و متقابل نوع تقویت کننده، جهت پانل، محل قرارگیری تقویت کننده در لایه‌های CLT بر MOR و MOE نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش

MOE (MPa)				MOR (MPa)				منابع تغییرات
Sig.	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	Sig.	مقدار F	میانگین مربعات	درجه آزادی	
۰/۰۰۰*	۳۰۷/۹۴	۲۷۲۵۱۰۸۱/۰۲	۱	۰/۰۰۰*	۳۰/۴۴	۱۱۹۷/۷۰	۱	نوع تقویت کننده
۰/۰۰۰*	۸۳۲/۴۰	۷۳۶۶۳۵۰۷/۶۹	۱	۰/۰۰۰*	۳۰۷/۲۰	۱۲۰۸۶/۹۱	۱	جهت پانل
۰/۰۰۰*	۱۴/۰۶	۱۲۴۴۲۵۳/۴۱	۳	۰/۰۰۷*	۴/۸۹	۱۹۲/۵۱	۳	محل قرارگیری تقویت کننده
۰/۰۰۰*	۴۵/۷۰	۴۰۴۴۳۴۳/۵۲	۱	۰/۶۱۶ ^{ns}	۰/۲۶	۱۰/۰۷	۱	نوع تقویت کننده × جهت پانل
۰/۰۰۰*	۹/۷۴	۸۶۲۳۳۵/۶۹	۳	۰/۳۵۸ ^{ns}	۱/۱۱	۴۳/۷۷	۳	نوع تقویت کننده × محل قرارگیری تقویت کننده
۰/۱۶۰ ^{ns}	۱/۸۴	۱۶۲۸۴۲/۱۳	۳	۰/۵۸۲ ^{ns}	۰/۶۶	۲۶/۰۲	۳	جهت پانل × محل قرارگیری تقویت کننده
۰/۱۷۴ ^{ns}	۱/۷۶	۱۵۶۱۵۵/۶۳	۳	۰/۴۸۸ ^{ns}	۰/۸۳	۳۲/۶۱	۳	نوع تقویت کننده × جهت پانل × محل قرارگیری تقویت کننده

- ns عدم معنی داری - * معنی داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد

درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. نتایج نشان داد که وقتی CLT با الیاف شیشه تقویت می‌شود، MOR و MOE در جهت عرضی پانل CLT به ترتیب ۴۲/۸ و ۲۱/۳ درصد و در جهت طولی آن ۴۶/۱ و ۱۲/۷ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که میزان تقویت کنندگی ورق آلومینیوم برای افزایش MOR و MOE در جهت عرضی پانل‌های CLT مطالعه شده به ترتیب ۳۵۵/۸ درصد و تقریباً شانزده برابر و در جهت طولی CLT به ترتیب ۹۳/۷ درصد و چهار برابر الیاف شیشه بوده است. کمترین تأثیر تقویت کننده بر MOR و MOE در جهت عرضی پانل CLT تقویت شده با الیاف شیشه دیده شد، اما تقویت کنندگی ورق آلومینیوم برای افزایش عملکرد خمشی در جهت عرضی پانل بیشتر از جهت طولی آن بود.

میانگین MOR و MOE مربوط به CLT‌های بررسی شده در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین میزان افزایش MOR و MOE مربوط به CLT‌های تقویت شده نیز در این جدول ارائه شده است. برای محاسبه میزان افزایش MOR و MOE، مقدار افزایش آنها نسبت به نمونه‌های شاهد در جهت عرضی و طولی پانل، جداگانه محاسبه و مقایسه شد. نتایج نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به جهت طولی پانل‌های CLT تقویت شده با آلومینیوم با آرایش ۳ بوده است. کمترین MOR و MOE در بین نمونه‌های CLT تقویت شده نیز در جهت عرضی پانل‌های تقویت شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ دیده شد. نتایج نشان داد که با تقویت CLT با ورق آلومینیوم، MOR و MOE نمونه‌های مطالعه شده در جهت عرضی به ترتیب ۱۹۵/۱ و ۳۴۴/۶ درصد و در جهت طولی ۸۹/۳ و ۵۰/۸

جدول ۳. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT ساخته شده برای این پژوهش

درصد افزایش MOE*	درصد افزایش MOR*	MOE (MPa)	MOR (MPa)	محل قرارگیری تقویت کننده	جهت پانل	نوع تقویت کننده
۱۴۱/۷	۶۵/۶	۱۸۸۹(۹۸/۶) ^b	۱۵/۲۸(۰/۴۳۸) ^{ab**}	۱		
۳۱۰/۴	۱۳۱/۰	۳۲۰۸/۳(۲۶۶/۷) ^c	۲۱/۴۶(۵/۲۵۲) ^{bc}	۲	عرضی	
۳۳۳/۸	۱۸۱/۱	۳۳۹۱(۱۷۸/۲) ^{cd}	۲۶/۱۱(۴/۰۱) ^{cd}	۳		
۳۴۴/۶	۱۹۵/۱	۳۴۷۵/۷(۱۱۵/۵) ^{cde}	۲۷/۴۱(۲/۲۳۳) ^{cd}	۴		ورق آلومینیوم
۲۰/۱	۴۰/۴	۴۳۴۵(۲۲۲/۶) ^{eh}	۴۶/۸۴(۹/۳۳۷) ^{fg}	۱		
۲۷/۹	۵۵/۷	۴۶۲۸(۳۵۳/۷) ^h	۵۱/۹۵(۱۶/۱۲۵) ^g	۲	طولی	
۵۰/۸	۸۹/۳	۵۴۵۴/۳(۳۳۷/۹) ⁱ	۶۳/۱۵(۵/۱۴۹) ^h	۳		
۴۱/۷	۵۵/۰	۵۱۲۵(۴۱۳/۶) ⁱ	۵۱/۷۲(۶/۶۴۱) ^g	۴		
۶/۹	۱۴/۵	۸۳۶(۸۹) ^a	۱۰/۶۳(۰/۶۰۲) ^{ab}	۱		
۱۴/۷	۱۹/۷	۸۹۷(۱۲۵/۶) ^a	۱۱/۱۲(۱/۶۹۷) ^{ab}	۲	عرضی	
۱۹/۴	۲۶/۳	۹۳۳(۸۰/۷) ^a	۱۱/۷۳(۰/۷۴۵) ^{ab}	۳		
۲۱/۳	۴۲/۸	۹۴۸(۵۴/۳) ^a	۱۳/۲۶(۰/۸۳) ^{ab}	۴		الیاف شیشه
۷/۶	۱۵/۷	۳۸۹۴/۷(۲۰۴/۲) ^{defg}	۳۸/۶(۷/۰۳۰) ^{ef}	۱		
۷/۸	۲۹/۸	۳۸۹۸/۷(۱۷۷/۲) ^{defg}	۴۳/۲۹(۶/۶۹۴) ^{efg}	۲	طولی	
۹/۹	۴۰/۱	۳۹۷۵(۲۱۷/۷) ^{efg}	۴۶/۷۳(۵/۹۸۵) ^{fg}	۳		
۱۲/۷	۴۶/۱	۴۰۷۸/۳(۴۵۱/۵) ^{fg}	۴۸/۷۳(۴/۹۶) ^{fg}	۴		
---	---	۷۸۱/۷(۲۸/۵) ^a	۹/۳۹(۰/۶۸۶) ^a	بدون تقویت کننده	عرضی	نمونه شاهد
---	---	۳۶۱۸(۶۰/۱) ^{cdef}	۳۳/۳۶(۱/۹۶۱) ^{de}	بدون تقویت کننده	طولی	

* برای محاسبه درصد افزایش، درصد تغییرات MOR و MOE نمونه‌های تحت مطالعه با مقدار آنها برای نمونه‌های شاهد ارزیابی شد.

** اعداد داخل پرانتز انحراف معیار و حروف بعد از پرانتز گروه‌بندی دانکن را نشان می‌دهند.

۳/۰۴ به ۱/۸۸ برابر برای MOR و از ۲/۳ به ۱/۴۷ برابر برای MOE)، اما وقتی از الیاف شیشه استفاده می‌کنیم، تفاوت MOR و MOE بین جهت طولی و عرضی پانل چندان تغییر نمی‌کند (از ۳/۶۳ به ۳/۶۷ برابر برای MOR و از ۴/۶۶ به ۴/۳ برابر برای MOE).

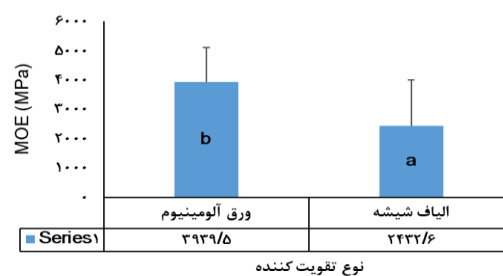
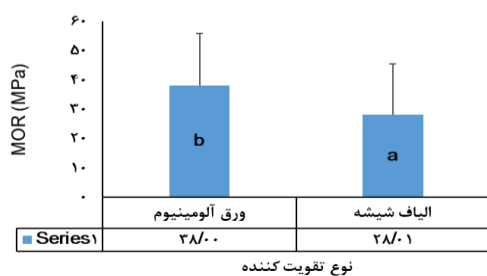
شکل ۴ ج تأثیر مستقل محل قرارگیری تقویت کننده در لایه‌های CLT بر MOR و MOE را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که MOR و MOE در CLT‌های ساخته شده با آرایش ۳ بیشتر از بقیه آرایش‌ها بود و کمترین آن مربوط به آرایش ۱ بود. MOR و MOE در CLT‌های با آرایش ۳ به ترتیب ۳۲/۵ و ۲۵/۴ درصد بیشتر از آرایش ۱ بود.

تأثیر متقابل نوع تقویت کننده، جهت پانل و محل قرارگیری تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی شکل ۵ تأثیر متقابل نوع تقویت کننده، جهت پانل و محل قرارگیری تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT‌های تقویت شده را نشان می‌دهد.

تأثیر مستقل نوع تقویت کننده، جهت پانل و محل قرارگیری تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی

شکل ۴ تأثیر مستقل نوع تقویت کننده، جهت پانل و محل قرارگیری تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی را نشان می‌دهد. شکل ۴ الف بیانگر تأثیر مستقل نوع تقویت کننده بر MOR و MOE است. بیشترین MOR و MOE مربوط به CLT‌های تقویت شده با ورق آلومینیوم بود. MOR و MOE در جهت طولی و عرضی پانل CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم به ترتیب ۳۵/۷ و ۶۱/۹ درصد بیشتر از CLT تقویت شده با الیاف شیشه است.

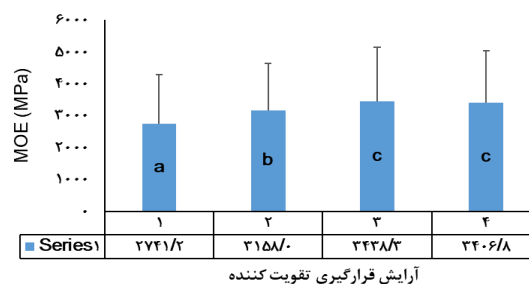
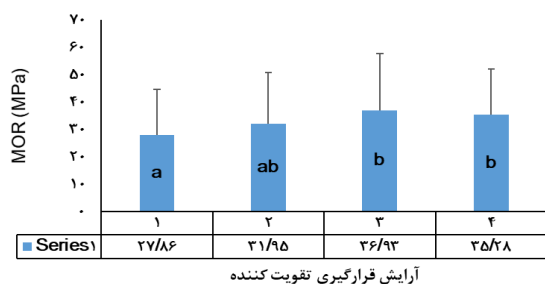
شکل ۴ ب تأثیر مستقل جهت پانل بر MOR و MOE را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که MOR و MOE پانل‌های CLT در جهت طولی به ترتیب ۱۸۵/۲ و ۱۲۷/۲ درصد بیشتر از جهت عرضی آن است. نتایج نشان داد که وقتی از ورق آلومینیوم برای تقویت CLT استفاده می‌کنیم، با افزایش تعداد لایه‌های تقویت کننده، تفاوت MOR و MOE بین جهت طولی و عرضی پانل کاهش می‌یابد (از



الف) نوع تقویت کننده



ب) جهت پانل



ج) محل فرارگیری تقویت کننده

شکل ۴. تأثیر مستقل نوع تقویت کننده، جهت پانل و محل فرارگیری تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT

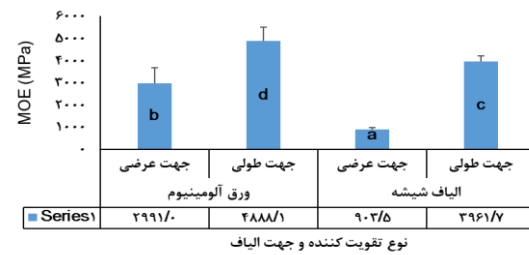
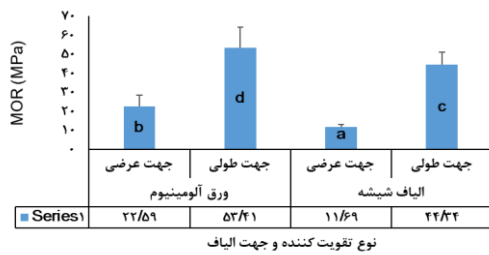
تقویت شده به ترتیب ۲۷۹/۴ و ۳۳۸/۵ بود. این تغییرات بین جهت طولی و عرضی CLT های تقویت شده با آلومینیوم به ترتیب ۱۳۶/۴ و ۶۳/۴ درصد بود. نتایج گروه بندی دانکن نشان داد که بین MOR و MOE جهت طولی و عرضی پانل CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم و الیاف شیشه اختلاف معنی داری وجود دارد.

تأثیر متقابل نوع تقویت کننده بر محل فرارگیری تقویت کننده در شکل ۵ ب نشان داده شده است. مشاهده شد که بیشترین MOR و MOE مربوط به CLT های تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳ و کمترین آنها نیز مربوط به CLT های تقویت شده با الیاف شیشه با آرایش ۱

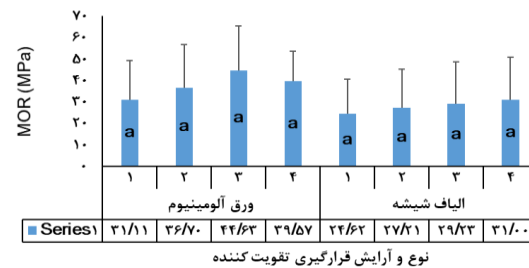
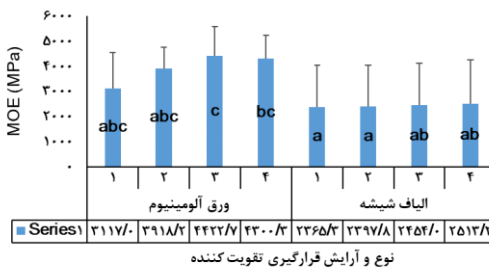
تأثیر متقابل نوع تقویت کننده بر جهت پانل در شکل ۵ الف نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین MOR و MOE در جهت طولی پانل CLT های تقویت شده با ورق آلومینیوم و کمترین آن مربوط به جهت عرضی CLT های تقویت شده با الیاف شیشه بود، به طوری که MOR و MOE در جهت طولی پانل CLT های تقویت شده با ورق آلومینیوم به ترتیب ۳۵۷/۱ و ۴۴۱ درصد بیشتر از مقدار آن در جهت عرضی CLT های تقویت شده با الیاف شیشه است. با توجه به نتایج مشاهده شد که وقتی CLT با الیاف شیشه تقویت می شود، اختلاف MOR و MOE بین جهت طولی و عرضی CLT های

قرارگیری تقویت کننده را نشان می‌دهد. بیشترین MOR و MOE در جهت طولی پانل CLT با تقویت کننده با آرایش ۳ و کمترین آنها در جهت عرضی CLT با تقویت کننده با آرایش ۱ مشاهده شد و اختلاف بین آنها برای MOR و MOE به ترتیب ۳۲۲/۳ و ۲۴۶ درصد بود. همان طور که مشاهده می‌شود MOR و MOE پانل‌های CLT با تغییر آرایش تقویت کننده در جهت طولی بین بهترین آرایش نسبت به ضعیف ترین آرایش به ترتیب ۲۸/۶ و ۱۴/۴ درصد و در جهت عرضی به ترتیب ۵۶/۳ و ۶۲/۳ درصد تغییر یافت. نتایج گروه بندی دانکن نشان داد که بیشترین اختلاف آماری معنی دار مربوط به MOR در جهت طولی پانل CLT با تغییر آرایش تقویت کننده بود و بین MOR و MOE جهت عرضی پانل CLT با آرایش های مختلف اختلاف معنی داری دیده نمی‌شود.

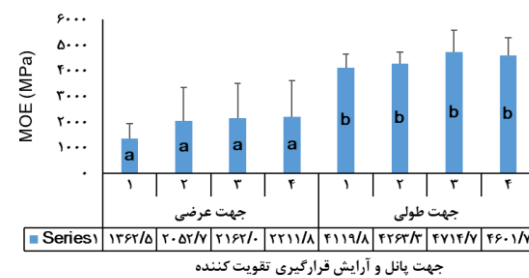
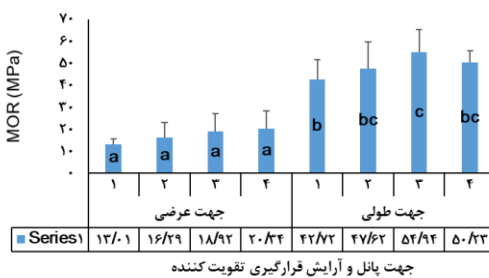
بود و اختلاف آنها برای MOR و MOE به ترتیب برابر با ۸۱/۳ و ۸۷ درصد بود. با تغییر آرایش تقویت کننده در CLT ساخته شده با الیاف شیشه و ورق آلومینیوم، MOR به ترتیب ۲۵/۹ و ۴۳/۵ درصد و MOE به ترتیب ۶/۳ و ۴۱/۹ درصد تغییر یافت. نتایج گروه بندی دانکن نشان داد که بین MOR پانل های CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم و الیاف شیشه با آرایش های مختلف تقویت کننده اختلاف معنی داری وجود ندارد، اما در MOE وضعیت متفاوتی دیده شد؛ به طوری که بین MOE پانل های CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش های مختلف اختلاف معنی داری وجود داشت، اما بین MOE پانل های تقویت شده با الیاف شیشه با آرایش های مختلف اختلاف معنی داری وجود نداشت. شکل ۵ قسمت ج) تأثیر متقابل جهت پانل بر محل



الف) نوع تقویت کننده * جهت پانل



ب) نوع تقویت کننده * محل قرارگیری تقویت کننده



ج) جهت پانل * محل قرارگیری تقویت کننده

شکل ۵. تأثیر متقابل عوامل متغیر تحت بررسی بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT

نتایج نشان داد که وقتی پانل CLT زیر بار خمشی در وسط دهانه قرار می‌گیرد، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها در جهت طولی پانل بیشتر از جهت عرضی آن است. چوب ماده‌ای ارتروویپیک است و نسبت مدول الاستیک بین جهت طولی و عرضی آن ۳۰ به ۱ است [۱]. وقتی پانل به صورت عرضی زیر بار قرار می‌گیرد، لایه‌های رویی آن به صورت عرضی قرار می‌گیرند، اما وقتی پانل به صورت طولی زیر بار خمشی قرار می‌گیرد، لایه‌های رویی به صورت طولی و لایه وسطی آن به صورت عرضی قرار می‌گیرند. در CLT لایه‌هایی که به صورت عرضی قرار گرفته‌اند و اغلب به صورت مماسی هستند، در صفحه شعاعی - مماسی (RT) که ضعیف‌ترین صفحه از نظر مقاومتی است، به صورت برشی در امتداد دوایر رویش سالیانه می‌شکنند. در این مد شکست، ترک‌ها ابتدا در ناحیه چوب بهاره بین دو دایره رویش شروع شده و سپس در امتداد دوایر رویش منتشر می‌شوند. مباحث مذکور نشان می‌دهد که دلیل کاهش مقاومت CLT در جهت طولی، ضعف مقاومت لایه‌های جهت عرضی و در نتیجه شکست لایه‌های عرضی آن در ناحیه ضعیف چوب بهاره است. نتایج مذکور با یافته‌های Rostampour و همکاران (۲۰۱۷) و Buck و همکاران (۲۰۱۶) همخوانی دارد [۱۷، ۱۸]. همچنین نتایج نشان داد که وقتی از ورق آلومینیوم برای تقویت CLT استفاده می‌شود، با افزایش تعداد لایه‌های تقویت‌کننده تفاوت MOR و MOE بین جهت طولی و عرضی پانل کاهش می‌یابد که به نوعی نقطه قوت تقویت CLT با آن است، اما وقتی از الیاف شیشه استفاده می‌کنیم، تغییر چندانی نمی‌کند.

نتایج نشان داد که MOR و MOE نمونه‌های CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم بیشتر از CLT تقویت شده با الیاف شیشه است. با مقایسه مدول الاستیسیته و مقاومت کششی الیاف شیشه و ورق آلومینیوم در می‌یابیم که مقدار آنها برای الیاف شیشه بیشتر است، اما ضخامت الیاف شیشه حدود پنج برابر کمتر است. بیشتر بودن MOR و

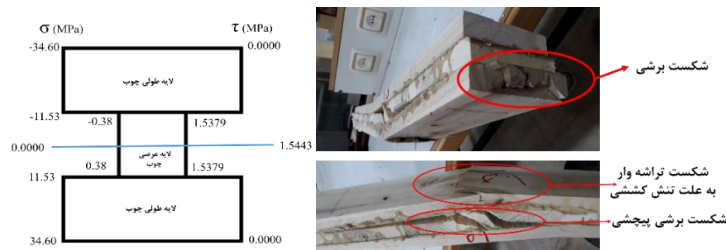
MOE پانل CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم را می‌توان به ضخامت زیاد آن نسبت به الیاف شیشه ربط داد. نتایج تحقیقات گذشته نشان داد که تقویت‌کنندگی ورق فلزی برای افزایش عملکرد خمشی در تیرهای لایه‌ای نسبت به FRP بیشتر است [۸، ۱۲]، اما وقتی که ضخامت FRP را بیشتر در نظر بگیریم می‌توان به مقاومت بیشتری نسبت به ورق فلزی دست یافت [۱۴].

نتایج مربوط به آرایش محل قرارگیری تقویت‌کننده در لایه‌های CLT نشان داد که بیشترین MOR و MOE در جهت طولی پانل تقویت شده با ورق آلومینیوم مربوط به آرایش ۳ بود که در آن یک لایه در سطح بالا در قسمت فشاری، یک لایه در سطح پایینی در قسمت کششی و یک لایه نیز بین لایه‌های چوب در قسمت کششی قرار گرفته بود. مشاهدات نشان داد که ورق‌ها در قسمت کششی تیر تأثیرگذاری بیشتری داشتند. به همین دلیل آرایش ۳ که دو لایه در قسمت کششی داشت، نسبت به آرایش‌های ۱ و ۲ مقاومت بیشتری از خود نشان داد. اما وقتی که در سطوح بالا و پایین و همچنین بین همه لایه‌های چوب، ورق آلومینیوم به عنوان تقویت‌کننده داشته باشیم، تنش کششی و فشاری در سطوح و تنش برشی در وسط مقطع نمونه و به خصوص در تکیه‌گاه‌ها افزایش می‌یابد، به طوری که وقتی CLT ساخته شده با پیچ زیر بار خمشی قرار می‌گیرد، به دلیل توزیع تنش برشی بین لایه‌ها و لغزش صفحات روی یکدیگر، به پیچ و چسب تنش برشی زیادی اعمال می‌شود. از طرفی با افزایش مقدار بار و جابه‌جایی بین لایه‌ها، پیچ بر اثر شکست برشی می‌شکند. از این رو، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی نمونه CLT ساخته شده با پیچ متأثر از مقاومت برشی و توان نگهداری پیچ در CLT خواهد بود، به طوری که هرچه مقاومت برشی پیچ و توان نگهداری آن بیشتر باشد، مقاومت آن بیشتر است. وقتی جهت طولی CLT با آرایش ۴ تقویت می‌شود، با افزایش لغزش بین لایه‌های چوب و ورق

تقویت شده با آرایش ۴ نسبت به ۳ کاهش می‌یابد. نتایج توزیع تنش نشان داد که وقتی یک لایه تقویت کننده بین لایه‌های چوب قرار می‌گیرد، خود با تحمل تنش سبب می‌شود تنش کمتری به چوب منتقل شود. وقتی تیر چوبی از بالا تحت بار خمشی قرار می‌گیرد، شکست در آنها به صورت کششی ترد در قسمت زیرین، فشاری نرم در قسمت بالایی و شکست برشی در وسط دیده می‌شود، به طوری که در لایه‌های عرضی CLT به صورت برش پیچشی در امتداد دوایر منتشر می‌شود. شکست نرم یا چکش خوار در اعضای سازه‌ای با تغییر شکل پلاستیک زیاد یا ویسکوالاستیک قبل از شکست سبب پراکندگی تنش، اتلاف انرژی ناشی از تنش، ضربه و نیروی زلزله می‌شود. شکست در آلومینیوم از نوع چکش خوار یا نرم^۱ و در چوب حالت بین نرم و ترد^۲ است. در قسمت کششی چوب، بیشتر شکست ترد دیده می‌شود، اما در قسمت فشاری شکست از نوع نرم است. تحقیقات نشان داده است که تقویت در قسمت کششی تأثیر بیشتری بر عملکرد خمشی دارد [۱۹]. شکست ترد کششی بیشتر در تیرهای تقویت نشده دیده می‌شود. شکست فشاری نرم زمانی دیده می‌شود که تیر در ناحیه کششی تقویت شود (آرایش ۱). شکست برشی بیشتر در تیرهای تقویت شده وقتی تیر چوبی در ناحیه فشاری و کششی تقویت می‌شود، سبب گسترش شکست برشی پیچشی در امتداد دوایر رویش می‌شود (به خصوص آرایش‌های ۲ و ۳).

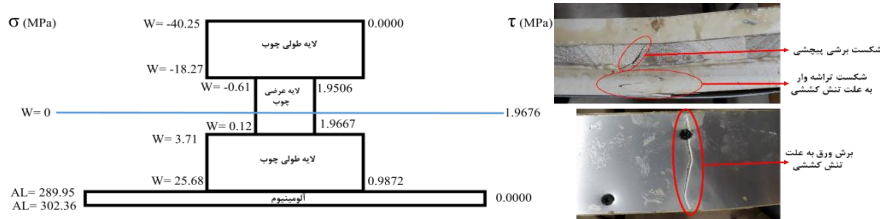
آلومینیوم، تنش برشی زیادی به پیچ‌ها منتقل می‌شود و به خصوص در تکیه‌گاه‌ها پیچ تحت تنش برشی می‌شکند که سبب کاهش مقاومت نسبت به آرایش ۳ خواهد شد. اما در جهت عرضی این روند با جهت طولی پانل فرق دارد. به دلیل مقادیر کمتر تنش در جهت عرضی، تنش برشی وارد شده به پیچ آن قدر زیاد نیست که بتواند پیچ را تحت تنش برشی شدید بشکند. به همین دلیل با افزایش تعداد لایه‌های آلومینیوم در جهت عرضی پانل CLT، MOR و MOE به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. وقتی که از الیاف شیشه برای تقویت استفاده می‌شود، قضیه کمی متفاوت است. نتایج مذکور با یافته‌های Ahad و همکاران (۲۰۱۹) همخوانی دارد [۱۴]. این پژوهشگران کیفیت چسبندگی الیاف شیشه با لایه‌های چوب را عامل اصلی افزایش MOR و MOE ذکر کرده‌اند. در نتیجه با افزایش تعداد لایه‌های آن MOR و MOE در هر دو جهت به طور پیوسته تقویت شده و افزایش یافته است.

برای نشان دادن توزیع تنش فشاری، کششی و برشی در سطوح بالا و پایین و بین لایه‌ها، تنش خمشی و برشی مقطع تبدیل شده نمونه‌های جهت طولی CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش‌های مختلف محاسبه و به همراه شکست‌های مشاهده شده در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج نشان داد که بیشترین تنش برشی در بین لایه‌ها در نمونه CLT با آرایش ۳ دیده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها و شکست برشی پیچ MOR و MOE نمونه‌های

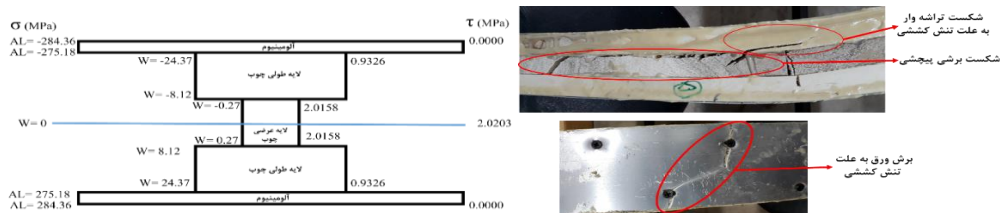


الف) نمونه طولی CLT بدون تقویت کننده

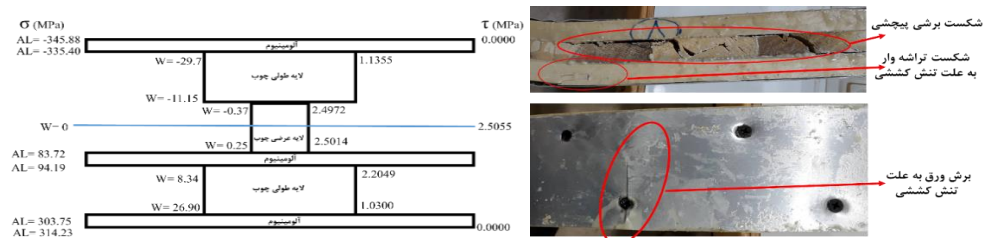
1. Ductile
2. Brittle



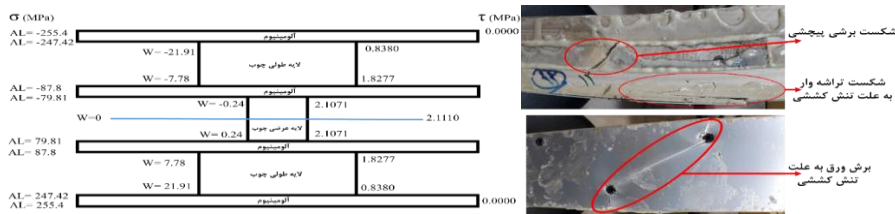
ب) نمونه طولی CLT تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۱



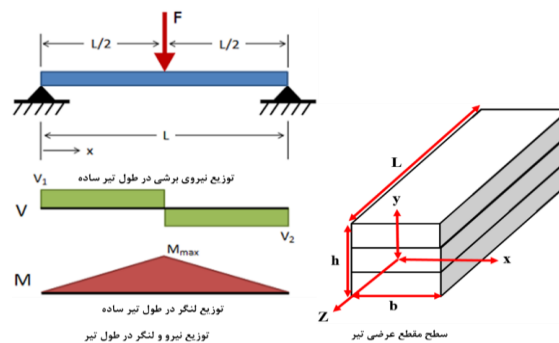
ج) نمونه طولی CLT تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۲



د) نمونه طولی CLT تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳



ه) نمونه طولی CLT تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۴



و) توزیع نیروی برشی و لنگر خمشی در طول تیر

شکل ۶. مقادیر توزیع تنش فشاری (با علامت منفی، -σ)، کششی (با علامت مثبت، +σ)، مقادیر توزیع تنش برشی (τ) در نمونه‌های جهت طولی پانل CLT بدون تقویت‌کننده (الف) و تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش‌های مختلف (ب تا ه) به همراه مدهای شکست CLT و توزیع نیروی برشی و لنگر خمشی در طول تیر (و) (b) پهناي تیر، h ارتفاع مقطع و L طول تیر

نتیجه گیری

MOR و MOE را نسبت به نمونه CLT تقویت نشده در جهت طولی به ترتیب ۸۹/۳ و ۵۰/۸ درصد و همچنین در جهت عرضی به ترتیب ۱۹۵/۱ و ۳۴۴/۶ درصد افزایش داد که بهترین تیمار از بین نمونه‌های بررسی شده است. تقویت CLT با ورق فلزی یا GFRP سبب بهبود مقاومت و کاهش تردشکنی آن شد. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که از ورق آلومینیوم به‌عنوان ورق فلزی ضدزنگ می‌توان برای تقویت خمشی CLT ساخته شده از صنوبر استفاده کرد، به‌طوری که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی آن را تا حد چشمگیری افزایش دهد. با توجه به نتایج، تقویت CLT با GFRP موفقیت‌آمیز نبود که دلیل آن کاربرد فقط یک لایه از آن برای تقویت بود، به‌طوری که اگر هزینه محدودکننده نباشد، به‌دلیل سبکی، سازگاری بهتر آن با چوب و همچنین مقاومت بیشتر آن نسبت به آلومینیوم می‌توان از آن به‌عنوان گزینه مطلوب‌تری نسبت به ورق آلومینیوم به‌عنوان تقویت‌کننده در CLT استفاده کرد.

این تحقیق با هدف بررسی تأثیر جهت پانل، نوع و آرایش محل قرارگیری تقویت‌کننده بر MOR و MOE پانل CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم و الیاف شیشه انجام گرفت. نتایج نشان دادند که بیشترین MOR و MOE مربوط به جهت طولی پانل‌های CLT تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳ بود. کمترین MOR و MOE مربوط به جهت عرضی پانل‌های CLT تقویت شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ بود. با تقویت CLT با ورق آلومینیوم، MOR و MOE در دو جهت طولی و عرضی پانل به هم نزدیک شده و مقاومت و مدول خمشی در جهات مختلف پانل یکنواخت‌تر می‌شود. بررسی تأثیر مستقل نوع تقویت‌کننده و آرایش محل قرارگیری آنها بر MOR و MOE نشان داد که نوع تقویت‌کننده تأثیر بیشتری نسبت به محل قرارگیری آن بر MOR و MOE داشت. تأثیر نوع تقویت‌کننده بر MOR بیشتر از تأثیر آن بر MOR بود. از بین نمونه‌های ساخته شده، تقویت CLT با ورق آلومینیوم و با آرایش ۳،

References

- [1]. Gagnon, S., and Pirvu, C. (2011). *CLT Handbook: Cross-Laminated Timber*. FPInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Québec.
- [2]. Brandner, R. (2013). Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report, In: Proceedings of European Conference on Cross Laminated Timber (CLT). May. 21-22 Graz, Austria, pp. 3-36.
- [3]. ISO 16696-1 (2019). Timber structures - Cross Laminated Timber -Part 1: Component Performance, Production Requirements and Certification Scheme.
- [4]. Shamsian, M., Ebrahimi, Gh., Tajvidi, M., and Ghalandar Zadeh, A. (2009). Measurement of mechanical and physical properties of Aspen (*Populus alba*) for establishing its allowable design values. *Iranian Journal of Natural Resources*, 61(4): 953-961.
- [5]. Hoath, J. (2006). *Repairing Historic Roof Timbers*. *Historic churches*, 13: 25-27.
- [6]. Coleman, G., and Hurst, H. (1974). Timber structures reinforced with light gage steel. *Forest Products Journal*, 24(7): 45-53.
- [7]. Alam, P., and Ansell, M. (2012). The effects of varying nailing density upon the flexural properties of fitch beams. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1): 7-13.
- [8]. Borri, A., Corradi, M., and Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Composites Part B: Engineering*, 36(2): 143-153.
- [9]. Nowak, T.P., Jasieńko, J., and Czepizak, D. (2013). Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 40: 197-206.

- [10]. Jankowski, L.J., Jasiński, J., and Nowak, T.P. (2010). Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. *Materials and Structures*, 43(1-2): 141.
- [11]. Jasiński, J. (2001). Glue joints used for reinforcing the damaged ends of wooden beams. *Structural Engineering International*, 11(4): 246-250.
- [12]. Nowak, T., Jasiński, J., Kotwica, E., and Krzosek, S. (2016). Strength enhancement of timber beams using steel plates—review and experimental tests. *Drewno: Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty*, 59(196): 75-80.
- [13]. Raftery, G.M., and Harte, A.M. (2011). Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites Part B: Engineering*, 42(4): 724-735.
- [14]. Ahad, S., Singh, M.J., Bhat, J.A., and Sethi, M.A. (2019). An experimental study of CLT beams reinforced with steel bars, cold formed steel plate and FRP, *International Journal for Technological Research In Engineering*, 6(11): 5790- 5799.
- [15]. Standard method of testing small clear specimens of timber. *Annual Book of ASTM Standard*, D 143. 2018.
- [16]. Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Based Structural Materials. *Annual Book of ASTM Standard*, D4761, 2018.
- [17]. 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):68-78.
- [18]. 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.
- [19]. Franke, S., Franke, B., and Harte, A.M. (2015). Failure modes and reinforcement techniques for timber beams—State of the art. *Construction and Building Materials*, 97: 2-13.

Reinforcement of flexural performance of screwed cross laminated timber (CLT) panels constructed of poplar by aluminum sheet and glass fiber reinforced polymer wrap

A. Rostampour Haftkhani*; Assist., Prof., Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. Iran

A. Shokrvand Shakiba; B.Sc., Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. Iran

(Received: 12 January 2020, Accepted: 14 April 2020)

ABSTRACT

In this study, flexural reinforcement of 3-layer screwed CLT made of poplar (*Populus alba*) and polyurethane glue was investigated. Static bending test was performed by Instron according to ASTM D4761. The variables of this study were types of reinforcing (aluminum sheet and glass fiber reinforced polymer (GFRP) wrap) and arrangements of reinforcers (no.1: bonded on the bottom (tension) side; no.2: bonded on the bottom and top (tension and compression side); no.3: bonded on the bottom, top and between two bottom layers; no.4: bonded on the bottom, top and among layers). The results showed that the higher MOR and MOE were related to major direction of CLT reinforced with aluminum with configuration of no.1. The lower MOR and MOE were observed in minor direction of CLT reinforced with GFRP with configuration of no.1. The increasing percentage of the MOR and MOE in minor direction of CLT reinforced with aluminum were 195.1 and 344.6% and in major direction of them were 89.3 and 50.8%, respectively in comparison with control specimens. When CLT panel were reinforced with GFRP, the increasing percentage of MOR and MOE in the minor direction of CLT were 42.8 and 21.3% and in major direction of CLT were, respectively 46.1 and 12.7% in comparison with control specimens. The results showed that MOR and MOE of CLT reinforced with aluminum sheet were higher than those reinforced with GFRP wraps. Failure modes of CLT were changed by reinforcing from brittle to ductile and consequently increased their flexural strength.

Keywords: Mechanical fastener, GFRP wrap, flexural performance reinforcement, cross-laminated timber (CLT), poplar, aluminum sheet.

* Correspond author: Email: arostampour@uma.ac.ir, Tell: +989124795234