

ارزیابی عملکرد خمشی چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT) ساخته‌شده از صنوبر (*Populus alba*)

چکیده

یکی از مقاومت‌های مهم در کاربرد چندسازه چوبی با لایه‌های متقاطع (Cross Laminated Timber) در احداث کف و سقف سازه‌های چوبی چندطبقه، مقاومت خمشی آن است. از این رو این پژوهش با هدف ارزیابی مقاومت خمشی CLT‌های ساخته شده با صنوبر انجام شده است. از چسب پلی اورتان به مقدار ۳۰۰ گرم بر مترمربع در این پژوهش استفاده شده است. ضخامت لایه‌های مورد استفاده در این پژوهش ۱۶ میلی متر بود. نتایج نشان داده‌اند که با چیدمان ۴۵ درجه لایه‌ها نسبت به حالت ۹۰ درجه در CLT، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی CLT ساخته شده به ترتیب به میزان ۱۴ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داده‌اند که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT متأثر از پهنای لایه‌های آن است و مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی نمونه CLT ساخته شده از لایه‌های با پهنای ۴ سانتیمتر به ترتیب ۱۴ و ۵ درصد بیشتر از CLT‌های ساخته شده با لایه‌های با پهنای ۹ سانتی‌متر بودند. از این رو، با توجه به نتایج می‌توان گفت با چیدمان لایه‌ها به صورت ۴۵ درجه و لایه‌های با پهنای کمتر می‌توان از چوب تند رشدی مانند صنوبر، CLT با مقاومت‌های قابل قبول ساخت.

واژگان کلیدی: چندسازه CLT، MOR، MOE، چیدمان لایه‌ها، پهنای لایه‌ها.

اکبر رستم پور هفتخوانی^{۱*}
محمد لایقی^۲
قنبر ابراهیمی^۳
کامبیز پورطهماسی^۴

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

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

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

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

مسئول مکاتبات:

arostampour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳/۰۵/۱۳۹۵

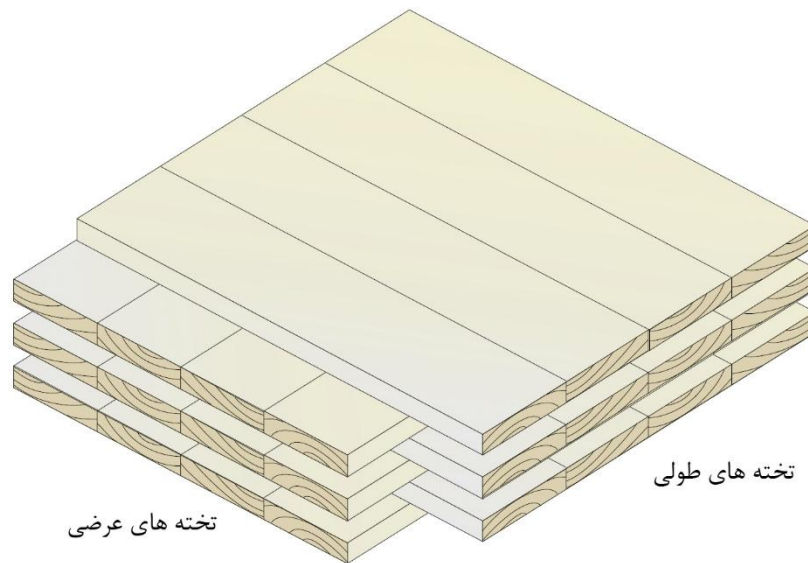
تاریخ پذیرش: ۲۳/۰۶/۱۳۹۵

مقدمه

چندسازه‌های چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT) دسته جدیدی از چندسازه‌های ساختمانی مهندسی شده چوب هستند که به صورت سه تا ۹ لایه با چیدمان متقاطع روی یکدیگر تولید می‌شوند. CLT به‌طور چشمگیری برای ساخت دیوار، سقف، کف به‌صورت پیش‌ساخته به کار می‌رود و در کف، سقف و بام جایگزین بهتری برای پانل‌های پوسته‌ای است [۱].

طی دو دهه گذشته، کاربرد این فرآورده به دلیل

قابلیت حمل‌ونقل آسان، قابلیت پیش‌ساخته شدن، سرعت ساخت‌وساز، عایق صدا، دوام خوب در برابر حریق و خواص حرارتی مناسب، خیلی زود در اروپا و آمریکای شمالی گسترش یافت [۲]. در چندسازه‌های با لایه‌های متقاطع (CLT) تولید صنعتی لایه‌ها دارای ضخامت بین ۱۶ تا ۵۱ میلی‌متر و پهنای ۶۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر هستند، ولی طول آن‌ها متغیر است. لایه‌ها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم قرار می‌گیرند و بین آن‌ها برای پیوستگی سطح چسب وجود دارد (شکل ۱).



شکل ۱- نمایی از نحوه چیدمان لایه‌ها در CLT [۲]

داده‌اند و اختلاف بین آن‌ها را به ترتیب ۲/۵ و ۱۷ درصد بیان کرده‌اند [۵]. Kim و همکاران (۲۰۱۳) عملکرد برشی CLT ساخته‌شده با کاج قرمز و چسب پلی اورتان را بررسی کرده‌اند و نشان داده‌اند که عملکرد این چسب عالی است، چون هیچ شکستی در خط چسب مشاهده نشده است و تمامی شکست‌ها در چوب اتفاق افتاده بود [۶]. Park و همکاران (۲۰۰۳) با بررسی عملکرد چندسازه‌های لایه‌ای ساخته‌شده به‌صورت موازی (گلولام) و متقاطع (CLT) نشان داده‌اند که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی با لایه‌ای کردن به‌صورت متقاطع افزایش می‌یابد. علاوه بر این، بیان کرده‌اند که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT به میزان تغییر مکان لایه‌رویی و مقاومت برشی لایه میانی بستگی دارد [۷]. Buck و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی تأثیر زاویه چیدمان لایه عرضی (۴۵ و ۹۰ درجه) در ساخت CLT نشان داده‌اند که دلیل شکست لایه عرضی CLT زیر بار خمشی به‌صورت برشی در امتداد دواپر سالیانه است (برش پیچشی)، یکی از راه‌های غلبه بر این مشکل، چیدمان لایه‌های عرضی به‌صورت ۴۵ درجه است و این روش مقاومت خمشی CLT را ۳۵ درصد افزایش می‌دهد [۸]. Mohamadzadeh و Hindman (۲۰۱۵) خواص مکانیکی CLT ساخته‌شده با چوب لاله را مورد مطالعه قرار دادند.

در سال ۲۰۱۱ استاندارد آمریکایی ANSI/APA PRG-320 [۳] برای ارزیابی عملکرد CLT منتشرشده و سپس در سال ۲۰۱۲ به‌روزرسانی شده است. این استاندارد شروعی برای پذیرش CLT به‌عنوان مصالحی قابل قبول برای ساخت ساختمان‌های چوبی در ایالات متحده شده و در سال ۲۰۱۵ شورای بین‌المللی کد (ICC^۱) محتوای استاندارد ANSI/APA PRG-320 را در مورد CLT پذیرفته است و این محصول سازه‌ای در کد IBC^۲ (کد بین‌المللی ساختمان) قرار گرفت.

نسبت مقاومت به وزن CLT در مقایسه با دیگر فراورده‌های چوبی سبب شده است تا این فراورده به‌عنوان جایگزین مناسبی برای فولاد و بتن به‌عنوان مصالح معمول برای ساختمان‌های چندطبقه باشد [۱]. سرعت ساخت بیشتر، منشأ پایدار چوب، ترسیب کربن، عملکرد بهتر در برابر زلزله، عایق بودن و انرژی تولید کمتر و همچنین انرژی کمتر برای ساخت و ساز از مزایای CLT نسبت به بتن است [۴]. Hindman و Harison (۲۰۰۷) مقدار مدول الاستیسیته و مدول برشی با روش بارگذاری خمشی چهار نقطه‌ای و پنج نقطه‌ای را با روش بارگذاری سه نقطه‌ای استاندارد ASTM D198 مورد مقایسه قرار

¹ International Code Council

² International Building Code

Dinwoodie [۱۰]. ANSI/APA PRG-320 را ندارد [۱۰]. Dinwoodie (۲۰۰۰) نشان داده که مدول الاستیسیته و مدول برشی نوئل در جهت طولی ۲۵ برابر بیشتر از جهت عرضی آن است. از این رو مقاومت خمشی در جهت طولی و عرضی پانل CLT ساخته شده متفاوت خواهد بود که در این مطالعه اختلاف آن بررسی خواهد شد [۱۱]. با توجه به مرور منابع انجام شده، در این مطالعه مقاومت خمشی چندسازه ساختمانی با لایه‌های متقاطع (CLT) ساخته شده از صنوبر با روش چیدمان ستاره‌ای و همچنین کاهش پهنای لایه‌ها به عنوان روشی برای مقاوم‌سازی آن در برابر بار خمشی مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

برای اجرای این تحقیق ابتدا گرده‌بینه‌ها از گونه صنوبر (*populous alba*) تهیه شده است. گرده‌بینه‌ها ابتدا به تخته‌هایی با ابعاد اسمی ۲/۵×۲۱×۲۰۰ سانتیمتر (به ترتیب ضخامت، پهنای و طول) تبدیل شدند و در فضای زیر سرپناه به مدت دو ماه تا رطوبت ۱۲ درصد خشک شدند. میانگین دانسیته، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته این کلن صنوبر با تبعیت از استاندارد ASTM D143 [۱۲] اندازه‌گیری شده‌اند و در جدول ۱ ارائه شده است. تخته‌های هواخشک آزمونی با برش طولی به قطعاتی با دو اندازه پهنای تبدیل و سپس تا ضخامت ۱۶ میلی‌متر و پهنای ۴۰ و ۹۰ میلی‌متر رنده شدند (4S4). با تخته‌های رنده شده و چسب پلی‌اورتان (با ویژگی‌های ارائه شده در جدول ۲) و چیدمان بر اساس توجیه راستای الیاف لایه‌های متقاطع و توجیه دوایر رویششان، CLT تولید شدند. دلیل استفاده از چسب پلی‌اورتان در این مطالعه، زمان مناسب گیرایی رزین، نداشتن انتشار گازهای سمی، ضد آب بودن بوده است.

نتایج آن‌ها نشان داده که مقاومت و مدول خمشی CLT ساخته شده از این گونه مقاومت‌های مجاز استاندارد ANSI/APA PRG 320 را دارد [۹].

عمده‌ترین ماده اولیه چوبی مورد استفاده برای ساخت CLT در اروپا نوئل یا کاج با دانسیته اسمی بین ۴۲۰ تا 500 kg/m^3 و رطوبت ۱۲ درصد است. استاندارد ANSI/APA PRG-320 محدودیت دانسیته را برای کاربرد انواع چوب در ساخت CLT اعمال کرده است و دانسیته 350 kg/m^3 را برای چوب‌های مورد قبول برای ساخت CLT مجاز کرده است [۳]. یکی از پتانسیل‌های خوب برای تأمین مواد اولیه در ساخت CLT از نظر فراوانی توده‌های دست کاشت و تند رشد می‌باشند. در راستای اهداف کاهش شدت بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی، ولی تأمین چوب مورد نیاز، پرورش توده‌های زراعتی گونه‌های تند رشد در طیف توجه اندیشمندان قرار گرفته است و ملت‌هایی که عزم ملی خوبی در این زمینه به کار برده‌اند به توفیق چشمگیری دست یافته‌اند. بنابراین کاربرد سنجیده چوب استحصالی از توده‌های زراعتی گونه‌های تندرشد، راه‌حل مناسبی برای مسئله کمبود چوب است که در اکثر نقاط جهان در حال حاضر مطرح است. پژوهش‌های مختلفی درباره ساخت این فراورده با گونه‌های سوزنی‌برگ انجام شده است، ولی درباره استفاده از گونه تندرشدی مانند صنوبر در ساخت این فراورده تاکنون مطالعه جامعی صورت نگرفته است.

یکی از موارد خیلی بحرانی در کاربرد این فراورده به عنوان کف و سقف ساختمان‌های چندطبقه مقاومت خمشی آن است که عامل محدودکننده برای کاربرد آن با طول دهانه بلند است. Kramer و همکاران، (۲۰۱۳) با بررسی قابلیت ساخت CLT از صنوبر هیبرید نشان داده‌اند که CLT‌های ساخته شده مقاومت خمشی و برشی قابل قبولی دارد، اما سفتی (MOE) آن‌ها حدود مجاز

جدول ۱- خواص صنوبر مورد مطالعه اندازه‌گیری شده بر اساس استاندارد ASTM D143

گونه	دانسیته (g/cm^3)	MOR (MPa)	MOE (MPa)
<i>populous alba</i>	۰/۳۸۱	۵۹	۷۳۸۰

جدول ۲- مشخصات چسب پلی اورتان مورد استفاده در این پژوهش
(اندازه‌گیری شده توسط آزمایشگاه شرکت مواد شیمیایی مکرر، تهران)

درصد مواد جامد	مقاومت در برابر حرارت (در حالت گیرایی کامل)	سختی shore A	دانسیته (g/cm ³)	فرصت کاربری (دقیقه)	رنگ	نوع چسب
۱۰۰	۲۵۰ ساعت در ۷۰°C ۱۵۰ ساعت در ۱۰۰°C	۹۰-۹۵	۱/۳	۲۵	کرم	چسب پلی اورتان M518

دستگاه Instron مدل ۴۴۸۶ اندازه‌گیری شده‌اند. شکل ۲ خشک کردن، برش، رنده و ساخت CLT‌های آزمونی را نشان می‌دهد. نمایی شماتیک از جهات بارگذاری خمشی پانل CLT در شکل ۳ ارائه شده است. تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شده و برای هر آزمون ۴ تکرار در نظر گرفته شده است. بعد از بررسی توزیع نرمال مشاهدات، تأثیر هر یک از عوامل متغیر بر خواص اندازه‌گیری شده در سطح اعتماد ۹۵ درصد تجزیه و تحلیل شده‌اند.

عوامل ثابت این مطالعه نوع چسب (چسب پلی اورتان)، گونه چوب مصرفی (چوب صنوبر)، ضخامت (۱۶mm) و تعداد لایه‌ها (سه لایه) بوده‌اند. عوامل متغیر در این مطالعه نوع چیدمان لایه‌ها، پهنای لایه‌ها بوده است. برای یکنواختی رطوبت آزمونه‌های بریده شده از CLT به مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۸ درصد و دمای ۲۱ درجه سلسیوس، مشروط سازی شده‌اند. مقاومت و مدول خمشی CLT‌های ساخته شده با تبعیت از استاندارد ANSI/APA PRG 320 [۳] و توسط



برش به ابعاد نهایی



رنده کردن چوب

دسته بندی چوب ها
برای خشک کردن در هوای آزاد

پرس CLT

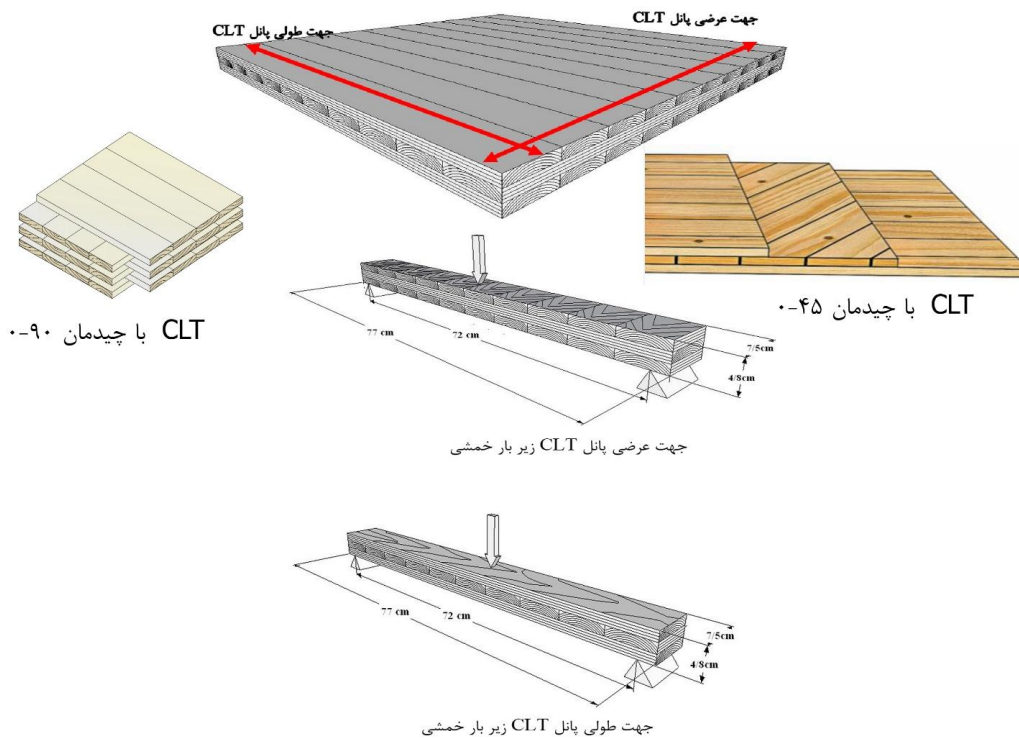


چسب زنی لایه ها



کناره بری و اندازه بری

شکل ۲- خشک کردن در هوای آزاد، برش، رنده و ساخت CLT‌های آزمونی



شکل ۳- نمایی شماتیک از جهات بارگذاری خمشی روی پانل CLT

نتایج و بحث

مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی آزمون‌ها در دو جهت طولی و عرضی پانل‌های CLT اندازه‌گیری شده‌اند.

تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مقاومت خمشی

در جهت طولی و عرضی

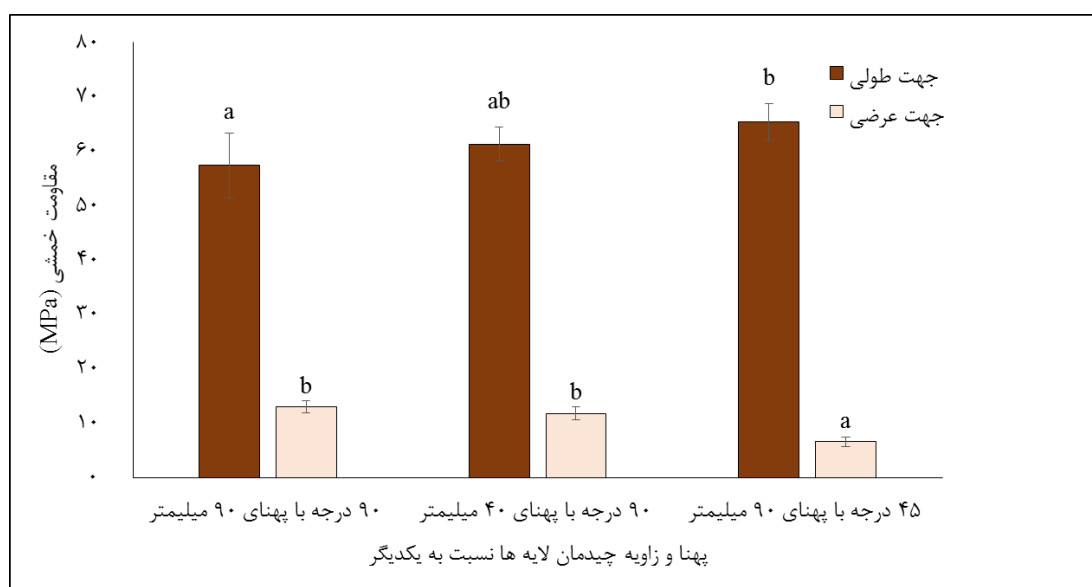
شکل ۴ تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها را بر مقاومت خمشی CLT‌های ساخته‌شده در جهت طولی و عرضی نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌اند که با چیدمان لایه‌های با پهنای ۹۰ میلی‌متر به صورت ۴۵ درجه مقاومت خمشی در جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. با کم کردن پهنای لایه به ۴۰ میلی‌متر نیز مقاومت خمشی در جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده ۷ درصد افزایش می‌یابد. نتایج آماری نشان داده‌اند که این تغییرات به‌طور کلی از نظر آماری معنی‌دار نیست ($P=0/117$)، اما اختلاف مقاومت خمشی CLT‌های ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به صورت ۴۵ درجه با CLT‌های ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به صورت ۹۰

درجه معنی‌دار است.

دلیل افزایش مقاومت خمشی با تغییر زاویه چیدمان از ۹۰ به ۴۵ درجه در جهت طولی پانل CLT را می‌توان به نوع شکست آن زیر بار نسبت داد. با نگاهی به ساختار لایه‌ها در نمونه‌های طولی CLT‌های با چیدمان ۰-۹۰ و ۰-۴۵ درجه مشاهده می‌شود که اختلاف آن‌ها فقط در زاویه چیدمان لایه‌ها در لایه وسطی است، از این رو وقتی زیر بار خمشی قرار می‌گیرند با مدهای گوناگونی می‌شکنند که به نوبه خود مقاومت‌های خمشی آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لایه میانی نمونه‌های طولی CLT بیشتر با مد شکست برشی در امتداد دایر رویش شکستند و به دلیل اینکه طول خط شکست در نمونه‌های CLT با چیدمان ۰-۴۵ درجه بزرگ‌تر بود، نمونه‌های مربوط به آن بار بیشتری را تحمل کردند [۱۳]. از طرفی با کم کردن پهنای لایه‌ها برای ساخت CLT به دلیل افزایش تعداد خط چسب و به دلیل مقاوم‌تر بودن چسب نسبت به چوب، در نمونه‌های CLT ساخته‌شده با لایه‌های با پهنای کمتر مقاومت خمشی افزایش یافته است.

خمشی در جهت عرضی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، اما کم کردن پهنای لایه‌ها تأثیر اندکی بر مقاومت خمشی لایه‌ها در جهت عرضی دارد و کاهش مقاومت آن از نظر آماری معنی‌دار نیست. دلیل این امر را نیز می‌توان با نگاهی با ساختار لایه‌ها یافت. در هر دو نوع چیدمان لایه‌های رویی به‌صورت عرضی قرار گرفته‌اند و مشابه‌اند، اما لایه وسطی آن‌ها در CLT ساخته‌شده با چیدمان ۹۰-۰ به‌صورت طولی و در CLT ساخته‌شده با چیدمان ۴۵-۰ درجه با زاویه ۴۵ درجه بوده است، به دلیل مقاوم‌تر بودن چوب در جهت طولی نسبت به چوب با زاویه ۴۵ درجه، نمونه‌های CLT ساخته‌شده با چیدمان ۹۰-۰ درجه مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های CLT ساخته‌شده با چیدمان ۴۵-۰ درجه داشته‌اند.

مقاومت خمشی در جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده وضعیت متفاوت داشته‌اند. با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه و کم کردن پهنای لایه‌ها در جهت طولی مقاومت خمشی افزایش می‌یابد، اما در جهت عرضی مقاومت خمشی کم می‌شود. مقاومت خمشی در جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه ۵۰ درصد کمتر می‌شود و به نصف می‌رسد. با کم کردن پهنای لایه‌ها، مقاومت خمشی در جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده ۹ درصد کاهش می‌یابد که چشمگیر نیست. نتایج آماری نشان داد که تغییرات مقاومت خمشی در جهت عرضی به‌طور کلی از نظر آماری معنی‌دار است ($P=0/00004$). همچنین مشاهده شده که با تغییر زاویه چیدمان لایه‌ها به ۴۵ درجه، مقاومت



شکل ۴- مقاومت خمشی CLT‌های ساخته‌شده با صنوبر در راستای طولی و عرضی

تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مدول

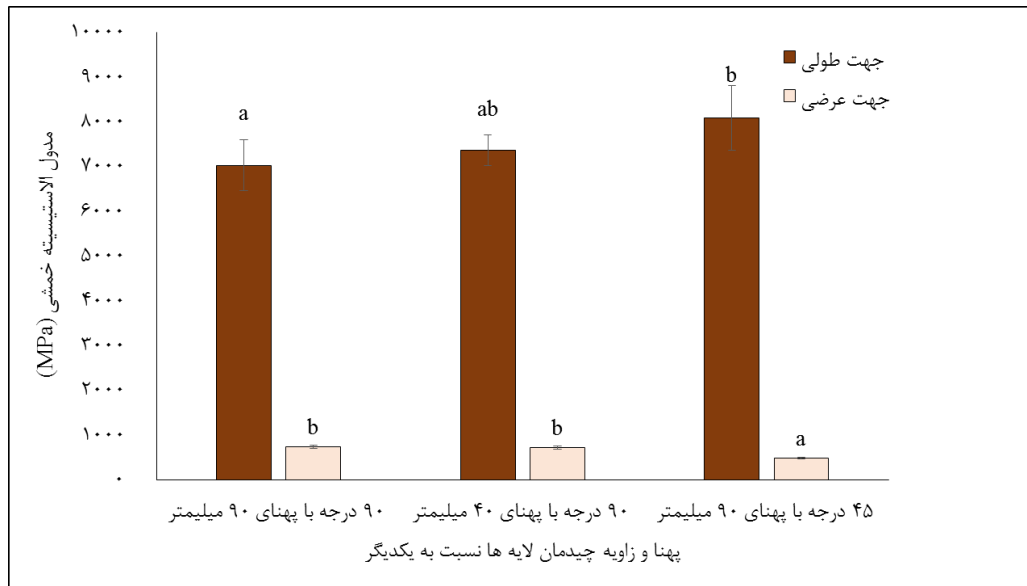
الاستیسیته خمشی در جهت طولی و عرضی

شکل ۵ تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مدول الاستیسیته خمشی CLT‌های ساخته‌شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با چیدمان‌ها به‌صورت ۴۵ درجه و همچنین کم کردن پهنای لایه‌ها مدول الاستیسیته خمشی CLT‌های ساخته‌شده در جهت طولی به ترتیب به میزان

نتایج نشان داده‌اند که اختلاف مقاومت خمشی در جهت طولی به عرضی در CLT‌های ساخته‌شده با لایه‌های با پهنای ۹۰ میلی‌متر و چیدمان ۹۰ درجه، لایه‌های با پهنای ۹۰ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه و همچنین لایه‌های با پهنای ۴۰ میلی‌متر و زاویه ۹۰ درجه به ترتیب ۴/۵، ۹ و ۴ برابر بوده است. دلایل این امر به نوع چیدمان لایه‌ها نسبت داده می‌شود که در قبل توضیح داده شد.

خمشی CLT های ساخته شده به ترتیب به مقدار ۳۵ و ۲ درصد کاهش می یابد. نتایج آماری نشان دادند که این تغییرات از نظر آماری معنی دار است.

۱۵ و ۵ درصد افزایش می یابد. نتایج آماری نشان داد که این تغییرات از نظر آماری معنی دار است. در جهت عرضی با چیدمان لایه ها به صورت ۴۵ درجه و همچنین کم کردن پهنا لایه ها، مدول الاستیسیته



شکل ۵- مدول الاستیسیته خمشی CLT های ساخته شده با صنوبر در راستای طولی و عرضی

شکست با شکست های ناشی از تنش برشی پیچشی (Rolling Shear) بود که در امتداد دایر رویش دیده شد (R)، سپس ترکها در نواحی بین لایه ها گسترش یافت و به صورت کنگره ای بود (T2) که دلیل آن تجمع تأثیر تنش برشی پیچشی و تنش خمشی عمود بر الیاف است. سپس شکست به لایه های بیرونی منتشر می شود و در لایه پایینی زیر بار به دلیل ضعف مقاومت چوب در نواحی دارای معایب رشد مشاهده می شود. سپس شکست به لایه های بیرونی منتشر می شود. شکست ابتدا در لایه بالایی شروع شد که تحت تنش فشاری قرار داشت. با ادامه بارگذاری شکست در لایه های بیرونی به خصوص لایه پایینی زیر بار دیده شد که به دلیل تنش کششی ایجاد شده بود و سپس شکست به سطح مشترک بین لایه ها منتشر شده و لایه ها از هم جدا شد. به طور کلی، شکست در CLT با مد R و T1 به صورت موضعی شروع شده و با شکست های با مد L1 و T2 پایان می یابد؛ اما وقتی که جهت طولی پنل CLT با چیدمان ۰-۴۵ درجه

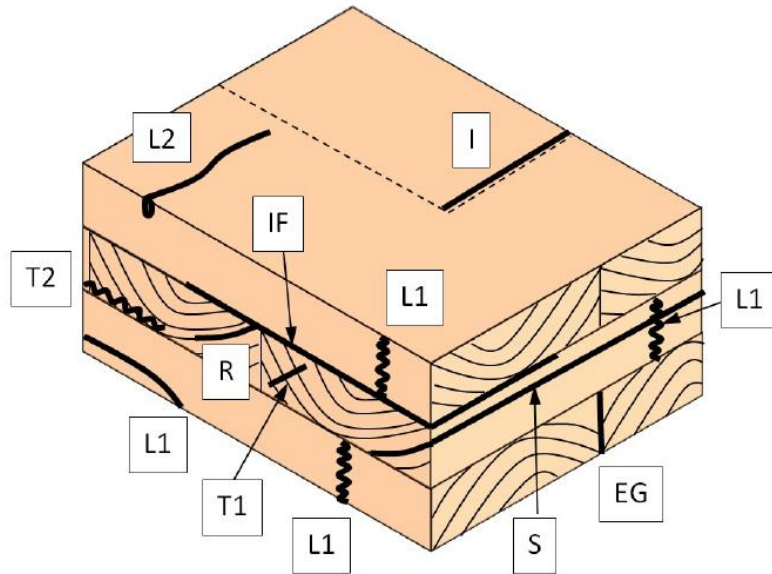
نتایج نشان داده اند که اختلاف مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی به عرضی در CLT های ساخته شده با لایه های با پهنا ۹۰ میلی متر و چیدمان ۹۰ درجه، لایه های با پهنا ۹۰ میلی متر و زاویه ۴۵ درجه و همچنین لایه های با پهنا ۴۰ میلی متر و زاویه ۹۰ درجه به ترتیب ۸/۵، ۱۶ و ۹ برابر بوده است.

دلیل افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT در جهت طولی با تغییر نوع چیدمان از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه را می توان به تغییر نوع مد شکست نسبت داد. ۶ ارائه شده است. شکل ۷ شکست های مشاهده شده در CLT مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. ترتیب اتفاق این مدهای شکست در پژوهش Hochreiner و همکاران، ۲۰۱۴ به صورت R، T1، EG، T2، I، L1، IF بیان شده است [۱۳].

وقتی که CLT با لایه های با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم در جهت طولی زیر بار خمشی قرار گرفت، شروع

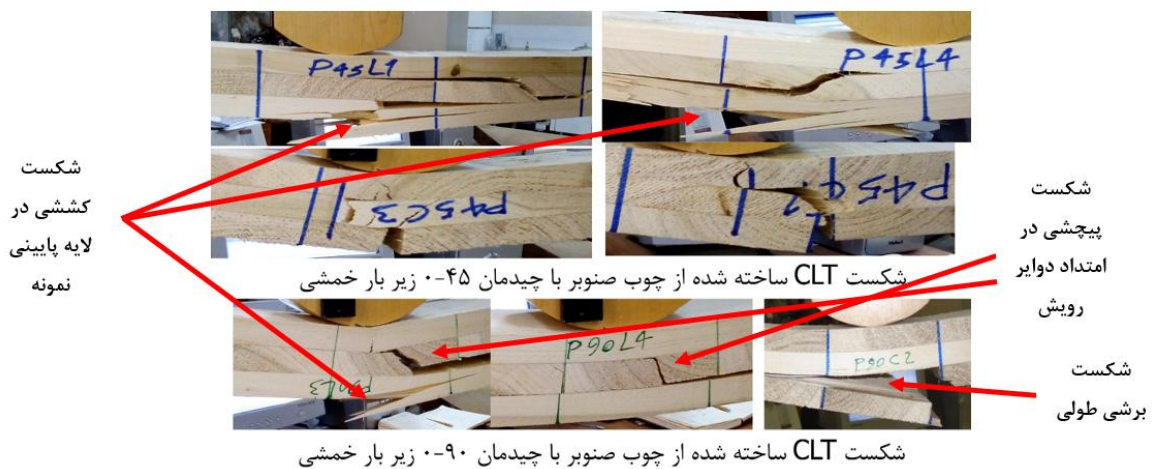
تنش را به لایه‌های بیرونی منتقل می‌کند که سبب شکست در لایه‌های بیرونی می‌شود.

زیر بار خمشی قرار گرفت، قطعات لایه میانی به دلیل بیشتر شدن خط شکست در امتداد دواپر رویش مقاوم‌تر شده و نسبت به شکست برشی پیچشی مقاومت می‌کنند و



شکل ۶- مدهای شکست رایج در CLT زیر بار خمشی [۱۳]

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، شکست کناره‌ای عمود بر الیاف، R: شکست کششی در جهت شعاعی که در چوب بهاره اتفاق می‌افتد و دلیل آن تنش برشی موازی الیاف است و به اصطلاح شکست برشی پیچشی نامیده می‌شود و در امتداد دواپر رویش گسترش می‌یابد، T1: شکست کششی در جهت مماسی، این نوع شکست در چوب بهاره و تابستانه هر دو اتفاق می‌افتد و دلیل آن شکست برشی یا هم کشیدگی است، T2: شکست مضر کششی در صفحه در جهت مماسی که دلیل اصلی آن تجمع تنش برشی پیچشی و تنش خمشی عمود بر الیاف است، EG: شکست در اتصال عرضی، IF: شکست سطح مشترک بین لایه‌ها.



شکل ۷- مدهای شکست در نمونه‌های CLT با زاویه چیدمان ۹۰ و ۴۵ درجه نسبت به همدیگر

(شکست برشی پیچشی در امتداد دواپر رویش در CLT با زاویه چیدمان ۹۰ درجه و شکست کششی در لایه بیرونی CLT با زاویه چیدمان ۴۵ درجه)

فشاری تیر تنش زودتر به مقدار حداکثر خود می‌رسد، در نتیجه آثار شکست نخست در قسمت فشاری تیر به وجود می‌آید و سپس آثار شکست در قسمت کششی ظاهر می‌شود [۱۷].

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بهبود مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT‌های ساخته‌شده از صنوبر از تغییر زاویه چیدمان لایه‌ها از ۹۰ درجه به ۴۵ درجه و کم کردن پهنا لایه‌ها استفاده شد.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به صورت ۴۵ درجه به ترتیب ۱۴ و ۱۵ درصد از مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT با چیدمان لایه‌ها به صورت ۹۰ درجه بیشتر است.
- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده با لایه‌های با پهنا ۴۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۴ و ۵ درصد از مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT با لایه‌های با پهنا ۹۰ میلی‌متر بیشتر است.
- با چیدمان لایه‌ها به صورت ۴۵ درجه، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت عرضی CLT‌های ساخته به ترتیب ۵۰ و ۳۵ درصد کمتر می‌شود.
- با کمتر شدن پهنا لایه‌ها از ۹۰ به ۴۰ میلی‌متر، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت عرضی CLT‌های ساخته‌شده به ترتیب ۹ و ۲ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌شود که با روش‌های مطالعه شده در این پژوهش می‌توان مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی جهت طولی CLT‌های ساخته‌شده با صنوبر را تا ۱۵ درصد تقویت کرد. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی عرضی CLT ساخته‌شده با کم کردن پهنا تخته تغییر چندانی نخواهد کرد، ولی مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT‌های ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به صورت زاویه ۴۵ درجه به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج و مرور منابع انجام شده پیشنهاد می‌شود با چیدمان لایه‌ها به صورت ۴۵ درجه

چیدمان قطعات لایه میانی به صورت ۴۵ درجه طول خط شکست برشی پیچشی را ۴۱ درصد افزایش می‌دهد. طوری که وقتی چیدمان قطعات لایه میانی با زاویه ۹۰ درجه باشد، طول خط شکست در لایه وسطی به اندازه پهنا لایه نمونه است (۷۵ میلی‌متر)، اما وقتی چیدمان قطعات لایه‌ها در لایه میانی با زاویه ۴۵ درجه باشد، طول خط شکست لایه وسطی که به صورت مورب است $10/6$ میلی‌متر خواهد بود ($10/6 = 7/5 \times 1/4$). افزایش طول خط شکست برشی سبب می‌شود نمونه در برابر شکست برشی پیچشی مقاوم‌تر شود.

مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT متأثر از پهنا لایه‌های آن است. علت این موضوع به تعداد خطوط درز شده در نمونه‌های با لایه‌های باریک‌تر مربوط می‌شود و این نتیجه با توجه به کیفیت چسب مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها که خیلی مقاوم‌تر از چوب زراعت شده صنوبر است (این برتری در شکست نمونه‌ها زیر بار برشی دیده شد، طوری که بیشتر شکست‌ها در چوب بود نه خط چسب)، دور از انتظار نبود.

Buck و همکاران، (۲۰۱۶) نیز به نتایج مشابهی دست‌یافته‌اند [۸]. Zhou (۲۰۱۳) [۱۴] و Zhou و همکاران (۲۰۱۴) [۱۵] 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 پیچشی (Rolling Shear) کم است، شکست CLT با لایه‌های ۹۰ درجه نسبت به همدیگر از نوع شکست برشی در امتداد دوایر رویش است. در 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 دوایر رویش با آزمون برش پیچشی نشان دادند که به دلیل استفاده از لایه‌های با کیفیت کمتر در لایه‌های عرضی اتفاق شکست برشی در امتداد دوایر رویش بیشتر است. همچنین نشان دادند که با استفاده از لایه‌های با ضخامت کمتر می‌توان بر این مشکل غلبه کرد [۱۶]. Ebrahimi (۲۰۱۱) بیان کرده است که تنش نهایی چوب سالم در کشش بیشتر از فشار است. به همین علت در قسمت

گونه‌های چوبی تند رشد به خاطر حمایت‌های مالی در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند. همچنین نویسندگان از مدیریت و پرسنل شرکت آموت ویلا به خاطر در اختیار قرار دادن دستگاه‌های پرس و کمک‌های بی‌دریغشان برای ساخت CLT تشکر می‌کنند.

نسبت به یکدیگر، لایه‌های با پهنا و ضخامت کمتر می‌توان CLT با مقاومت‌های قابل قبول ساخت.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از قطب مدیریت کاربردی

منابع

- [1] Mohammad, M., Gagnon, S., Douglas, B. and Podesto, L., 2012. Introduction to cross laminated timber. *Wood Design Focus*, 22(2): 3-12.
- [2] Gagnon, S., Pirvu, C., 2011. CLT handbook: cross-laminated timber. FPIInnovations Québec.
- [3] Association, A.T.E.W., 2012. Standard for performance-rated cross laminated timber. ANSI/APA PRG, 320.
- [4] Robertson, A.B., 2011. A comparative life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete, MSc thesis, University of British Columbia.
- [5] Harrison, S.K. and Hindman, D.P., 2007. Test method comparison of shear modulus evaluation of MSR and SCL products. *Forest products journal*, 57(7/8): 32-38.
- [6] Kim, H. K., Oh, J. K., Jeong, G. Y., Yeo, H. M. and Lee, J. J., 2013. Shear performance of PUR adhesive in cross laminating of red pine. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 41(2): 158-163.
- [7] Park, H. M., Fushitani, M., Sato, K., Kubo, T. and Byeon, H. S., 2003. Static bending strength performances of cross-laminated woods made with five species. *Journal of wood science*, 49(5): 411-417.
- [8] 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.
- [9] Mohamadzadeh, M. and Hindman, D., 2015. Mechanical Performance of Yellow-Poplar Cross Laminated Timber, Virginia Polytechnic Institute And State University, Department of Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, Report No. CE/VPI-ST-15-13.
- [10] Kramer, A., Barbosa, A.R., Sinha, A., 2013. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross-laminated timber applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(7): 1-5.
- [11] Dinwoodie, J. M., 2002. Timber: its nature and behaviour. CRC Press.
- [12] American Society for Testing and Materials., 1999a. "D 143-94: Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber," in 1999 Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol. 04.10: Wood.
- [13] Hochreiner, G., Füssl, J., Eberhardsteiner, J. and Aicher, S., 2014. CLT plates under concentrated loading—Experimental identification of crack modes and corresponding failure mechanisms, *Materials and Joints in Timber Structures*. Springer, RILEM Bookseries 9: 703-712.
- [14] Zhou, Q., 2013. Development of evaluation methodology for rolling shear properties in Cross Laminated Timber (CLT), MSc thesis. University of New Brunswick, Fredericton, NB.
- [15] Zhou, Q., Gong, M., Chui, Y.H. and Mohammad, M., 2014. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross-laminated timber fabricated with black spruce. *Construction and Building Materials*, 64: 379-386.

- [16] 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*, 10(18.5): 280.
- [17] Ebrahimi, Gh., 2013. *Mechanics of wood and wood composites*, 4th Ed., University of Tehran, 657 p. (In Persian).

Evaluation of bending performance of cross laminated timber (CLT) made out of poplar (*Populus alba*)

Abstract

Bending strength is a critical property of cross laminated timber (CLT) in structural applications, especially in floor of multi-story buildings. Therefore, this study was targeted to evaluate the bending strength of CLT made out of poplar (*populous alba*). Polyurethane adhesive was used to construct CLT (300 g/m²). The thickness of used planks was 16 mm. The results indicated that modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of CLT with 45° alternating transverse layer were increased 14 and 15%, respectively in comparison with 90° layers. Also, modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of CLT consist of layers with 4cm in width were increased 14 and 5%, respectively in comparison with layers 9cm in width. It was concluded that by using thinner layers, and 45° alternating layer configuration, it is possible to construct CLT with an acceptable bending strength from fast growing trees such as poplar.

Key words: cross laminated timber, MOR, MOE, layer configuration, layer width.

A.Rostampour Haftkhani^{1*}
M. Layeghi²
Gh. Ebrahimi³
K. Pourtahmasi⁴

¹ PhD student, Department of wood and paper science and technology, College of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

² Assistant Prof., Department of wood and paper science and technology, College of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³ Professor, Department of wood and paper science and technology, College of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

⁴ Professor, Department of wood and paper science and technology, College of natural resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Corresponding author:
arostampour@ut.ac.ir

Received: 2016/08/03
Accepted: 2016/09/13