Archive of SID

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

اکبر رستم پور هفتخوانی[1*]
محمد لایقی[2]
قنبر ابراهیمی[3]
کامبیز پورطهماسی[4]

[1] دانشجوی دکتری صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[2] استادیار گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[3] استاد گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

[4] استاد گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

مسئول مکاتبات:
arostampour@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۳

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. ازاین 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 مورداستفاده 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 ساخته‌شده 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 ساخته‌شده از لایه‌های با پهنای ۴ سانتیمتر به ترتیب ۱۴ و ۵ درصد بیشتر از CLTهای ساخته‌شده با لایه‌های با پهنای ۹ سانتی‌متر بودند. ازاین‌رو، با توجه به نتایج می‌توان گفت با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه و لایه‌های با پهنای کمتر می‌توان از چوب تند رشدی مانند صنوبر، CLT با مقاومت‌های قابل‌قبول ساخت.

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

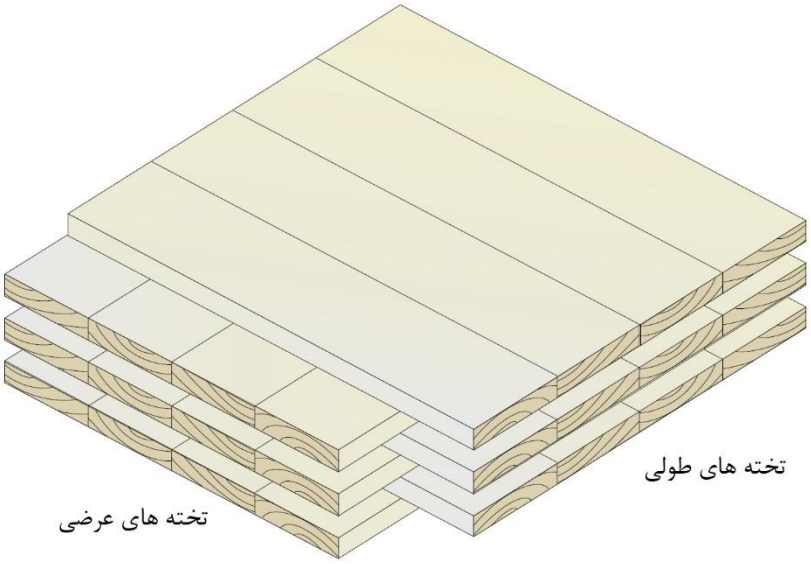
مقدمه

چندسازه‌های چوبی با لایه‌های متقاطع (CLT) دسته جدیدی از چندسازه‌های ساختمانی مهندسی‌شده چوب هستند که به‌صورت 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).

www.SID.ir

Archive of SID



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

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 قابل‌قبول برای ساخت ساختمان‌های چوبی در ایالات‌متحده شده و در سال ۲۰۱۵ شورای بین‌المللی کد (ICC[1]) محتوای استاندارد ANSI/APA PRG-320 را در مورد CLT پذیرفته است و این محصول سازه‌ای در کد IBC[2] (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 ساخت‌وساز 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 سه‌نقطه‌ای استاندارد ASTM D198 مورد مقایسه قرار 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 دوایر 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 موردمطالعه قرار دادند.

[1] International Code Council
[2] International Building Code

www.SID.ir

Archive of SID

نتایج آن‌ها نشان داده که مقاومت و مدول خمشی CLT ساخته‌شده ازاین‌گونه مقاومت‌های مجاز استاندارد ANSI/APA PRG 320 را دارد [۹].

عمده‌ترین ماده اولیه چوبی مورداستفاده برای ساخت CLT در اروپا نوئل یا کاج با دانسیته اسمی بین ۴۲۰ تا ۵۰۰ 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 ۳۵۰ kg/m^3 را برای چوب‌های موردقبول برای ساخت CLT مجاز کرده است [۳]. یکی از پتانسیل‌های خوب برای تأمین مواد اولیه در ساخت CLT ازنظر فراوانی توده‌های دست کاشت و تند رشد می‌باشند. در راستای اهداف کاهش شدت بهره‌برداری از جنگل‌های طبیعی، ولی تأمین چوب موردنیاز، پرورش توده‌های زراعتی گونه‌های تند رشد در طیف توجه اندیشمندان قرار گرفته است و ملت‌هایی که عزم ملی خوبی در این زمینه به‌کاربرده‌اند به توفیق چشمگیری دست‌یافته‌اند. 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 به‌عنوان 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 ساخته‌شده مقاومت خمشی و برشی قابل‌قبولی دارد، اما سفتی (MOE) آن‌ها حدود مجاز ANSI/APA PRG-320 را ندارد [۱۰]. Dinwoodie (۲۰۰۰) نشان داده که مدول الاستیسیته و مدول برشی نوئل در جهت طولی ۲۵برابر بیشتر از جهت عرضی آن است. ازاین‌رو مقاومت خمشی در جهت طولی و عرضی پانل CLT ساخته‌شده متفاوت خواهد بود که در این مطالعه اختلاف آن بررسی خواهد شد [۱۱]. با توجه به مرور منابع انجام‌شده، در این مطالعه مقاومت خمشی چندسازه ساختمانی با لایه‌های متقاطع (CLT) ساخته‌شده از صنوبر با روش چیدمان ستاره‌ای و همچنین کاهش پهنای لایه‌ها به‌عنوان روشی برای مقاوم‌سازی آن در برابر بار خمشی موردبررسی 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، پهنا 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 پهنا 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 ارائه‌شده در جدول ۲) و چیدمان بر اساس توجیه راستای الیاف لایه‌های متقاطع و توجیه دوایر رویششان، CLT تولید شدند. دلیل استفاده از چسب پلی اورتان در این مطالعه، زمان مناسب گیرایی رزین، نداشتن انتشار گازهای سمی، ضد آب بودن بوده است.

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

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

www.SID.ir

Archive of SID

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

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

عوامل ثابت این مطالعه نوع چسب (چسب پلی اورتان)، گونه چوب مصرفی (چوب صنوبر)، ضخامت (۱۶mm) و تعداد لایه‌ها (سه‌لایه) بوده‌اند. عوامل متغیر در این مطالعه نوع چیدمان لایه‌ها، پهنای لایه‌ها بوده است. برای یکنواختی رطوبت آزمونه‌های بریده‌شده از CLT به مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۸ درصد و دمای ۲۱ درجه سلسیوس، مشروط سازی شده‌اند.

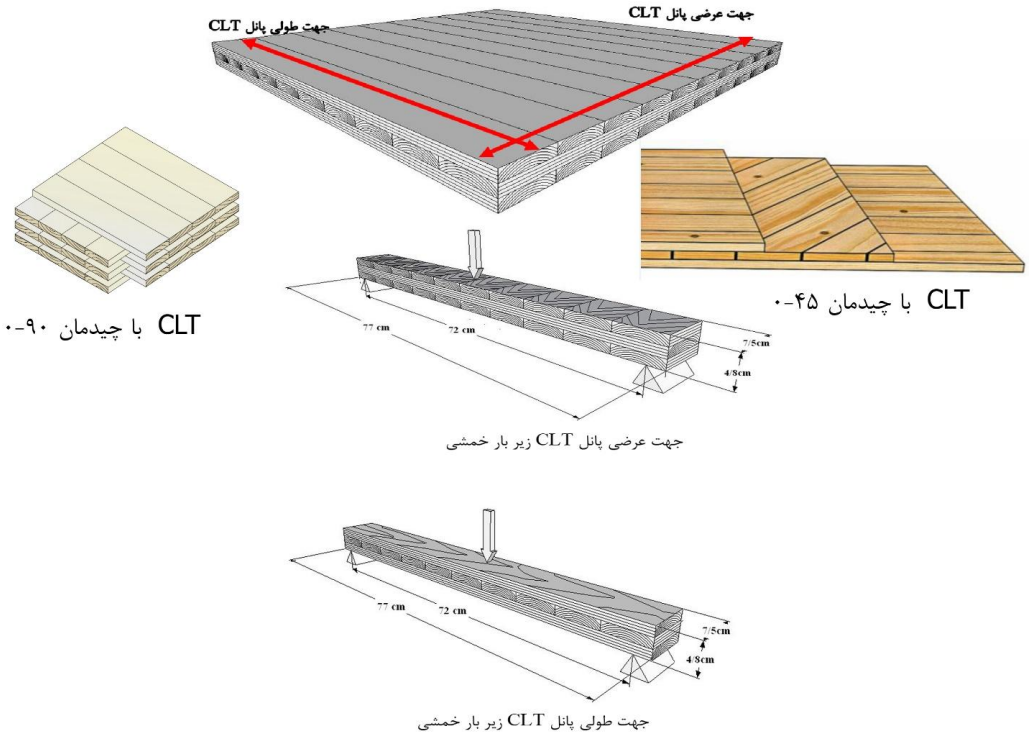
مقاومت و مدول خمشی CLT های ساخته‌شده با تبعیت از استاندارد ANSI/APA PRG 320 [۳] و توسط دستگاه Instron مدل ۴۴۸۶ اندازه‌گیری شده‌اند. شکل ۲ خشک‌کردن، برش، رنده و ساخت CLTهای آزمونی را نشان می‌دهد. نمایی شماتیک از جهات بارگذاری خمشی پانل CLT در شکل ۳ ارائه شده است.

تجزیه‌وتحلیل 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 تجزیه‌وتحلیل شده‌اند.

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

www.SID.ir

Archive of SID



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

نتایج و بحث

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

تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مقاومت خمشی در جهت طولی و عرضی

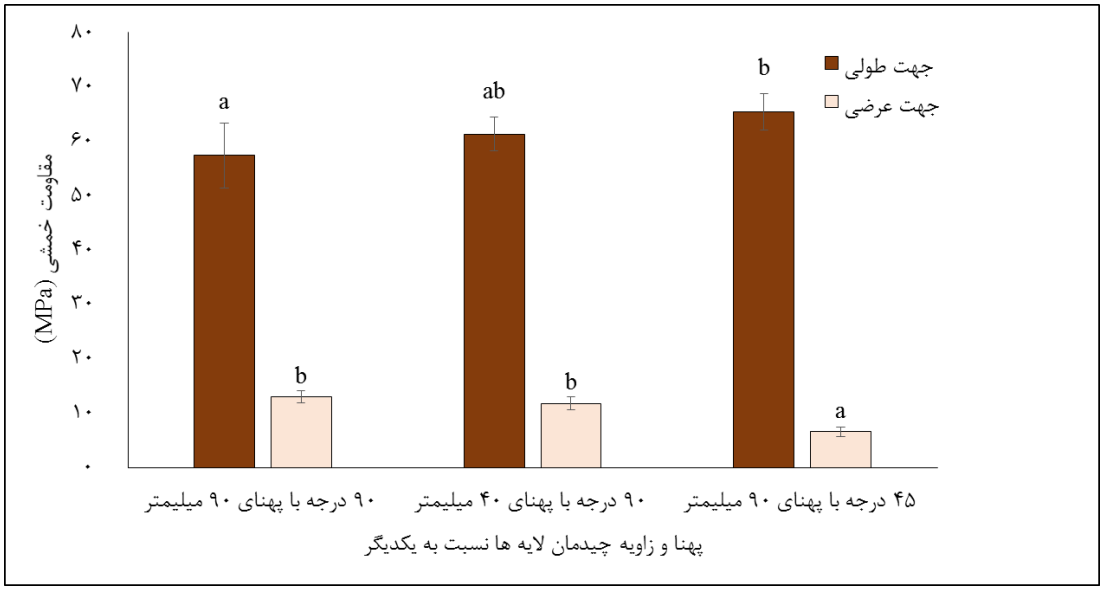
شکل ۴ تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها را بر مقاومت خمشی CLTهای ساخته‌شده در جهت طولی و عرضی نشان می‌دهد. نتایج نشان داده‌اند که با چیدمان لایه‌های با پهنای ۹۰ میلی‌متر به‌صورت ۴۵ درجه مقاومت خمشی در جهت طولی CLTهای ساخته‌شده ۱۴ درصد افزایش می‌یابد. با کم کردن پهنای لایه به ۴۰ میلی‌متر نیز مقاومت خمشی در جهت طولی CLTهای ساخته‌شده ۷ درصد افزایش می‌یابد. نتایج آماری نشان داده‌اند که این تغییرات به‌طورکلی ازنظر آماری معنی‌دار نیست (P=۰/۱۱۷)، اما اختلاف مقاومت خمشی CLTهای ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه با CLTهای ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت 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 CLT های با چیدمان ۹۰-۰ و ۴۵-۰ درجه مشاهده می‌شود که اختلاف آن‌ها فقط در زاویه چیدمان لایه‌ها در لایه وسطی است، ازاین‌رو وقتی زیر بار خمشی قرار می‌گیرند با مدهای گوناگونی می‌شکنند که به‌نوبه خود مقاومت‌های خمشی آن‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد. لایه میانی نمونه‌های طولی CLT بیشتر با مد شکست برشی در امتداد دوایر رویش شکستند و به دلیل اینکه طول خط شکست در نمونه‌های CLT با چیدمان ۴۵-۰ 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.

www.SID.ir

Archive of SID

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 به‌طورکلی ازنظر آماری معنی‌دار است (P=۰/۰۰۰۴). همچنین مشاهده شده که با تغییر زاویه چیدمان لایه‌ها به ۴۵ درجه، مقاومت 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 ازنظر آماری معنی‌دار نیست. دلیل این امر را نیز می‌توان با نگاهی با ساختار لایه‌ها یافت. در هر دو نوع چیدمان لایه‌های رویی به‌صورت عرضی قرارگرفته‌اند و مشابه‌اند، اما لایه وسطی آن‌ها در CLT ساخته‌شده با چیدمان ۰-۹۰ به‌صورت طولی و در CLT ساخته‌شده با چیدمان ۰-۴۵ 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 ۰-۹۰ درجه مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های CLT ساخته‌شده با چیدمان ۰-۴۵ درجه داشته‌اند.



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

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.

تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مدول الاستسیته خمشی در جهت طولی و عرضی

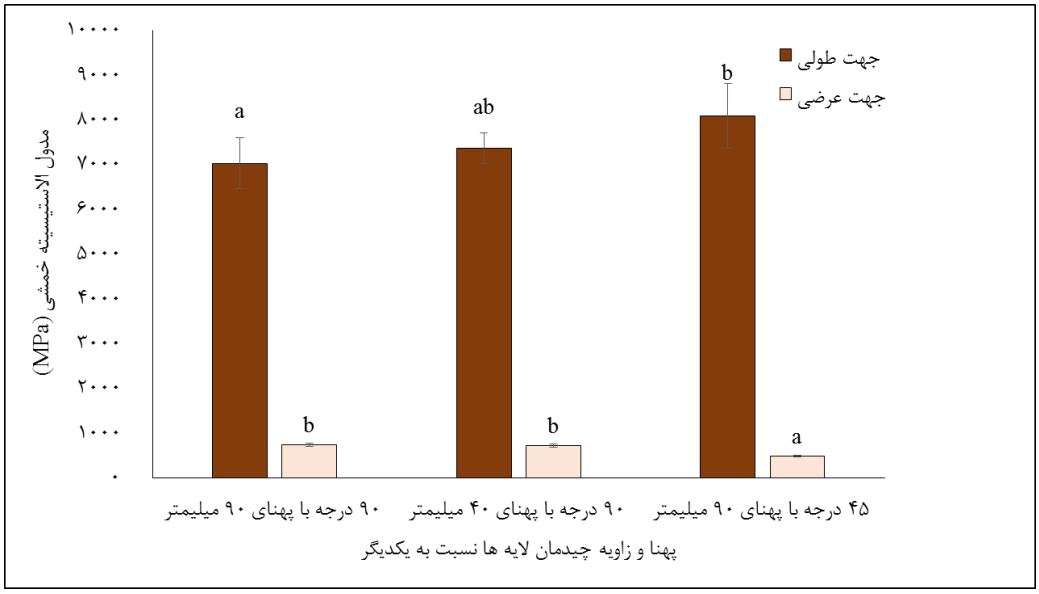
شکل ۵ تأثیر چیدمان و پهنای لایه‌ها بر مدول الاستسیته خمشی CLTهای ساخته‌شده را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با چیدمان‌ها به‌صورت ۴۵ درجه و همچنین کم کردن پهنای لایه‌ها مدول الاستسیته خمشی CLTهای ساخته‌شده در جهت طولی به ترتیب به میزان

www.SID.ir

Archive of SID

۱۵ و ۵ درصد افزایش می‌یابد. نتایج آماری نشان داد که این تغییرات ازنظر آماری معنی‌دار است.

در جهت عرضی با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه و همچنین کم کردن پهنای لایه‌ها، مدول الاستیسیته خمشی CLTهای ساخته‌شده به ترتیب به مقدار ۳۵ و ۲ درصد کاهش می‌یابد. نتایج آماری نشان دادند که این تغییرات ازنظر آماری معنی‌دار است.



شکل ۵- مدول الاستیسیته خمشی CLTهای ساخته‌شده با صنوبر در راستای طولی و عرضی

نتایج نشان داده‌اند که اختلاف مدول الاستیسیته 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 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 می‌توان به تغییر نوع مد شکست نسبت داد. مدهای شکست معمول در CLT زیر بار خمشی در شکل ۶ ارائه شده است. شکل ۷ شکست‌های مشاهده‌شده در CLT مورداستفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

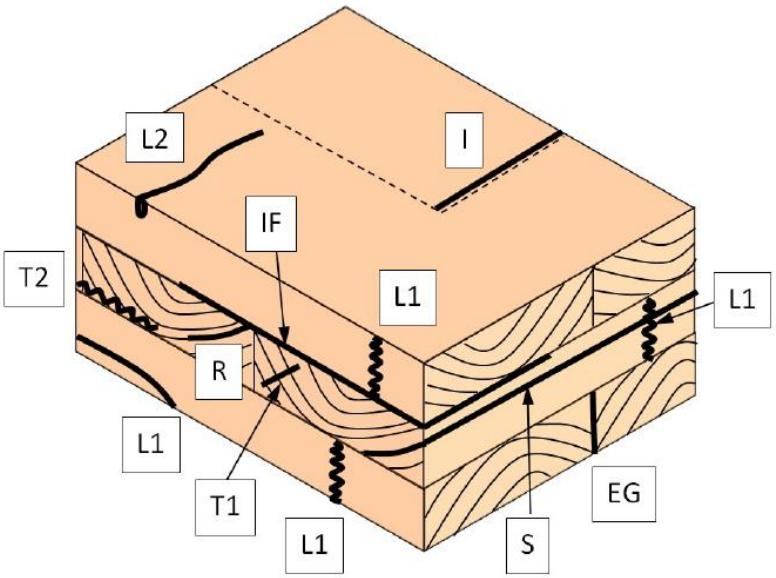
ترتیب اتفاق این مدهای شکست در پژوهش Hochreiner و همکاران، ۲۰۱۴ به‌صورت R، T1، EG، T2، I، L1، IF بیان‌شده است [۱۳].

وقتی‌که CLT با لایه‌های با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم در جهت طولی زیر بار خمشی قرار گرفت، شروع شکست با شکست‌های ناشی از تنش برشی پیچشی (Rolling Shear) بود که در امتداد دوایر رویش دیده شد (R)، سپس ترک‌ها در نواحی بین لایه‌ها گسترش یافت و به‌صورت کنگره‌ای بود (T2) که دلیل آن تجمیع تأثیر تنش برشی پیچشی و تنش خمشی عمود بر الیاف است. سپس شکست به لایه‌های بیرونی منتشر می‌شود و در لایه پایینی زیر بار به دلیل ضعف مقاومت چوب در نواحی دارای معایب رشد مشاهده می‌شود. سپس شکست به لایه‌های بیرونی منتشر می‌شود. شکست ابتدا در لایه بالایی شروع شد که تحت تنش فشاری قرار داشت. با ادامه بارگذاری شکست در لایه‌های بیرونی به‌خصوص لایه پایینی زیر بار دیده شد که به دلیل تنش کششی ایجادشده بود و سپس شکست به سطح مشترک بین لایه‌ها منتشر شده و لایه‌ها از هم جدا شد. به‌طورکلی، شکست در CLT با مد R و T1 به‌صورت موضعی شروع شده و با شکست‌های با مد L1 و T2 پایان می‌یابد؛ اما وقتی‌که جهت طولی پنل CLT با چیدمان ۰-۴۵ درجه

www.SID.ir

Archive of SID

زیر بار خمشی قرار گرفت، قطعات لایه میانی به دلیل بیشتر شدن خط شکست در امتداد دوایر رویش مقاوم‌تر شده و نسبت به شکست برشی پیچشی مقاومت می‌کنند و تنش را به لایه‌های بیرونی منتقل می‌کند که سبب شکست در لایه‌های بیرونی می‌شود.



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، 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 به‌اصطلاح شکست برشی پیچشی نامیده می‌شود و در امتداد دوایر 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 تجمیع 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 دوایر رویش در CLT با زاویه چیدمان ۹۰ درجه و شکست کششی در لایه بیرونی CLT با زاویه چیدمان ۴۵ درجه)

www.SID.ir

Archive of SID

چیدمان قطعات لایه میانی به‌صورت 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 پهنای نمونه است (۷۵ میلی‌متر)، اما وقتی چیدمان قطعات لایه‌ها در لایه میانی با زاویه ۴۵ درجه باشد، طول خط شکست لایه وسطی که به‌صورت مورب است ۱۰/۶ میلی‌متر خواهد بود (۱۰/۶=۱/۴۱×۷/۵). افزایش طول خط شکست برشی سبب می‌شود نمونه در برابر شکست برشی پیچشی مقاوم‌تر شود.

مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT متأثر از پهنای 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 مورداستفاده 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 فشاری تیر تنش زودتر به مقدار حداکثر خود می‌رسد، درنتیجه 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 پهنای لایه‌ها استفاده شد.

- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی CLTهای ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه به ترتیب ۱۴ و ۱۵ درصد از مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۹۰ درجه بیشتر است.
- مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی CLTهای ساخته‌شده با لایه‌های با پهنای ۴۰ میلی‌متر به ترتیب ۱۴ و ۵ درصد از مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی CLT با لایه‌های با پهنای ۹۰ میلی‌متر بیشتر است.
- با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه، مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت عرضی CLTهای ساخته به ترتیب ۵۰ و ۳۵ درصد کمتر می‌شود.
- با کمتر شدن پهنای 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 به‌دست‌آمده پیشنهاد می‌شود که با روش‌های مطالعه شده در این پژوهش می‌توان مقاومت و مدول الاسیتسیته خمشی جهت طولی CLTهای ساخته‌شده با صنوبر را تا ۱۵ درصد تقویت کرد. مقاومت و مدول الاسیتسیته خمشی عرضی CLT ساخته‌شده با کم کردن پهنای تخته تغییر چندانی نخواهد کرد، ولی مقاومت و مدول الاسیتسیته خمشی CLTهای ساخته‌شده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت زاویه ۴۵ درجه به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج و مرور منابع انجام‌شده پیشنهاد می‌شود با چیدمان لایه‌ها به‌صورت ۴۵ درجه

www.SID.ir

Archive of SID

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

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از قطب مدیریت کاربردی 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.

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. FPInnovations 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.

www.SID.ir

Archive of SID

[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).

www.SID.ir

Archive of SID

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

A.Rostampour Haftkhani[1*]
M. Layeghi[2]
Gh. Ebrahimi[3]
K. Pourtahmasi[4]

[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

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/m^2). The thickness of used planks was 16 mm. The results indicated that modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) of CLT with 45o alternating transverse layer were increased 14 and 15%, respectively in comparison with 90^o 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^o 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.

www.SID.ir