

بررسی عملکرد خمشی و برشی چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع (CLT) ساخته‌شده از گونه راش و صنوبر با استفاده از روش تجربی و اجزای محدود

حجت همت‌آبادی^{۱*}، محراب مدهوشی^۲، ابوالقاسم خزائیان^۲ و قنبر ابراهیمی^۳

*۱- نویسنده مسئول، دانشجوی دکترا، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه گرگان، گرگان، ایران، پست الکترونیک: hhematabadi@gmail.com

۲- دانشیار، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

تاریخ دریافت: آذر ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: بهمن ۱۴۰۰

چکیده

در این پژوهش مقاومت به خمش و برشی چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع (CLT) سه‌لایه ساخته‌شده از ترکیب گونه یهن‌برگ صنوبر (*Populus deltoides*) و راش (*Fagus orientalis*) با استفاده از روش تجربی بررسی گردید. نمونه‌های آزمایشگاهی با نسبت‌های طول به ضخامت ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ و پهنای ۳۰ سانتیمتر و ضخامت ۶ سانتیمتر در هر دو جهت اصلی و فرعی پیل ساخته شدند و مقاومت آنها با استفاده از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D ۱۹۸ بررسی شد. همچنین با استفاده از روش اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس، نمونه‌های پیل CLT تحت بار خمشی مدل‌سازی شدند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت طول به ضخامت تیر از ۶ تا ۲۵، مقدار میانگین مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت خمشی (MOR) CLTها در هر دو جهت اصلی و فرعی افزایش یافت. بعکس میانگین مقاومت برشی (τ_{max}) نمونه‌ها در هر دو جهت اصلی و فرعی پیل کاهش یافت. نتایج توزیع تنش نمونه‌ها با روش اجزای محدود نشان داد که مکان و مقدار توزیع تنش‌های خمشی و برشی هر لایه از پیل در جهت اصلی و فرعی پیل با یکدیگر متفاوت است و در جهت اصلی پیل CLT لایه‌های سطحی سهم بیشتری در تحمل بار نهایی دارند، اما در جهت فرعی پیل لایه وسط مهمترین نقش را در تحمل بار نهایی ایفا می‌کند. در این پژوهش نتیجه‌گیری شد که می‌توان برای محاسبه مدول الاستیسیته و خمشی CLT از نمونه‌هایی با نسبت‌های طول به ضخامت بالاتر از ۱۵ بر اساس استاندارد ASTM D 198 استفاده کرد. به همین دلیل اختلاف کمتر از ۱۰ درصد بین نتایج مدول الاستیسیته حاصل از مدل‌سازی عددی و نتایج تجربی، مدول الاستیسیته CLT بر اساس روش اجزای محدود قابل پیش‌بینی بود.

واژه‌های کلیدی: چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع، CLT، راش، صنوبر، مقاومت به خمش و برش، اجزای محدود.

مقدمه

تا ۷ لایه و در موارد محدودی بیشتر است. ضخامت لایه‌های تخته مورد استفاده کمتر از ۵۱ میلی‌متر است و قبل از اتصال باید درجه‌بندی و در کوره خشک شوند. ابعاد نهایی فرآورده CLT با توجه به توان تکنولوژی، ظرفیت کارخانه تولیدکننده، آیین‌نامه‌های ساخت‌وساز و حمل‌ونقل در هر کشور متغیر

چندسازه ساختمانی با لایه‌های چوبی متقاطع (CLT) متشکل از تعدادی لایه چوب هستند که به‌صورت لایه‌های متقاطع ۹۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار گرفته‌اند و با چسب به یکدیگر متصل شده‌اند. معمولاً تعداد لایه‌های CLT بین ۳

گونه پهن‌برگ صنوبر و پالونیا در داخل کشور انجام شده است اما هیچ گزارشی راجع به خواص مکانیکی CLT ترکیبی صنوبر-راش و یا ترکیب گونه صنوبر با دیگر گونه‌ها انجام نشده است. Rostampour (۲۰۱۷) ساخت پنل CLT با استفاده گونه صنوبر (*Populus alba*) را با زاویه چیدمان ۹۰ و ۴۵ درجه مورد بررسی قرار داد و نتایج حاصل را با CLT ساخته شده از نئول مقایسه کرد. نتایج او نشان داد که مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی در جهت طولی پنل CLT ساخته شده با چیدمان لایه‌ها به صورت ۰-۴۵ درجه نسبت به ۰-۹۰ درجه افزایش می‌یابد، اما در جهت عرضی مقدار آن کاهش می‌یابد.

امروزه به دلیل رشد جمعیت، تقاضا و مصرف زیاد چوب، استفاده از گونه‌های تندرشد و پهن‌برگ به‌عنوان یک منبع بزرگ و قابل دسترسی در ساخت فرآورده‌های جدید ساختمانی مورد توجه قرار گرفته است. اما این گونه‌ها معمولاً بدلیل تندرشد بودن و همچنین دانسیته پایین مقاومت ذاتی کمتری نسبت به گونه‌های با دانسیته بالا دارند (He et al., 2018). بنابراین برای اینکه بتوان شناخت کافی از عملکرد سازه‌ای این نوع گونه‌ها در تولید محصولات سبز و دوستدار محیط‌زیست مانند CLT داشته باشیم، تولید فرآورده‌های جدید ساختمانی حاصل از ترکیب گونه‌های تندرشد و گونه‌های جنگلی داخل کشور برای تولید چندسازه ساختمانی مقاوم و بررسی ویژگی‌های فیزیکی-مکانیکی آنها برای ساختمان‌سازی بر اساس استانداردهای موجود امری ضروریست. در حال حاضر مقاومت‌های تجربی CLT طبق استاندارد PRG320 و با نسبت طول به دهانه ۳۰ و پهنای ۳۰ سانتیمتر مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که این خود شامل محدودیت‌هایی مانند استفاده از پرس بزرگ، استفاده از مواد اولیه بیشتر و ماشین‌آزمون بزرگ‌تر است. از این رو، در این پژوهش تأثیر نسبت‌های متفاوت طول به ضخامت تیر در ارزیابی مقاومت‌های خمشی CLT مورد بررسی قرار گرفت تا بررسی شود که آیا می‌توان استاندارد ASTM D ۱۹۸ را با نسبت‌های کمتر طول به ضخامت تیر برای ارزیابی مقاومت‌های خمشی CLT استفاده کرد. همچنین با توجه به

است (Gagnon & Popovski, 2013; Madhoushi, 2017). همچنین Robertson (۲۰۱۱) سرعت ساخت بیشتر، منشأ پایدار چوب، ترسیب کربن، عملکرد بهتر در برابر زلزله، عایق بودن و انرژی تولید کمتر برای ساخت‌وساز را از مزایای CLT نسبت به بتن بیان کرد. تاکنون پژوهش‌های زیادی در سراسر جهان برای تولید فرآورده CLT از منابع تندرشد انجام شده است و همچنان نیز در حال گسترش است. Liao و همکاران (۲۰۱۷) امکان ساخت CLT از گونه‌های تندرشد و کم‌قطر اکالیپتوس را در شرایط متفاوت زمان پرس، مقدار رزین مصرفی و فشار مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که خواص خمشی حاصل از این فرایند با نمونه‌های دیگر موجود در بازار مطابقت دارد و مد شکست نمونه‌ها به‌طور خیلی زیادی به مقاومت برشی پیچشی وابسته است. آنان بیان کردند که این نوع CLT ساخته‌شده از گونه دانسیته پایین اکالیپتوس به‌طور موفقیت‌آمیزی می‌تواند در کاربردهای سازه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد. Wang و همکاران (۲۰۱۴) استفاده از گونه صنوبر (*Populus euramericana*) را در لایه مرکزی CLT ساخته‌شده از دوگلاس فر مورد آزمایش قرار دادند و گزارش کردند که مقاومت به خمش این فرآورده کمتر از CLT ساخته‌شده از دوگلاس خالص نیست. Kramer و همکاران (۲۰۱۳) با بررسی امکان ساخت CLT از صنوبر و چسب رزورسینول نشان دادند که CLT‌های ساخته‌شده مقاومت خمشی و برشی قابل قبولی دارند اما MOE آنها حدود مجاز استاندارد ANSI/APA PRG320 را ندارد. آنان همچنین مقدار MOR و MOE اندازه‌گیری شده از CLT ساخته‌شده از صنوبر را در نسبت طول به ضخامت ثابت تیر (۲۷:۱) به ترتیب ۷/۳ گیگا پاسکال و ۲۶ مگا پاسکال بیان کردند. Navaratnam و همکاران (۲۰۲۰) ویژگی خمشی و برشی CLT ساخته‌شده از کاج رادپاتا استرالیایی را مورد پژوهش قرار دادند. نتایج تجربی آنان نشان داد که با افزایش مقدار ضخامت تیر مقدار مقاومت برشی پنل‌ها کاهش یافت. همچنین نتایج تجربی سفتی خمش نمونه‌ها از نتایج حاصل از روش‌های تئوری بیشتر بود. تاکنون پژوهش‌هایی درباره ساخت و بررسی خواص مکانیکی پنل CLT ساخته‌شده از

اینکه چوب راش دارای دانسیته و مقاومت برش پیچشی بالاتری در امتداد دایره‌های رویش نسبت به گونه صنوبر است، در این پژوهش سعی بر آن است تا مقاومت به خمش و برش CLT ترکیبی ساخته شده از گونه تندرشد صنوبر و گونه جنگلی راش را در نسبت‌های متغیر طول به ضخامت تیر با روش تجربی و روش اجزای محدود با کمک نرم‌افزار آباکوس مورد پژوهش قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

برای انجام این پژوهش گرده‌بینه‌ها با طول تقریبی ۲ متر از گونه صنوبر (*Populus deltoides*) با قطر ۵۰-۳۰ سانتی متر و گونه راش (*Fagus orientalis*) با قطر ۷۰ تا ۸۰ سانتی متر از جنگل پژوهشی دکتر بهرام‌نیا دانشگاه گرگان تهیه شد. گرده‌بینه‌ها پس از چهار تراش شدن به تخته‌هایی با ابعاد اسمی

جدول ۱- خواص مکانیکی چوب مورد استفاده برای ساخت CLT

Table 1. Mechanical properties of wood used for manufacturing of CLT

مقاومت کششی عمود بر الیاف	مقاومت برشی موازی الیاف	مدول الاستیسیته	مقاومت خمشی	دانسیته	گونه
Tensile strength perpendicular to grain (MPa)	Shear strength parallel to grain (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Density (g/cm ³)	Species
1.96	4.96	8900	59	0.381	صنوبر Populus deltoide
7.3	14.4	12850	126.5	0.68	راش Fagus Orientalis

جدول ۲- مشخصات چسب پلی‌اورتان مورد استفاده در این پژوهش

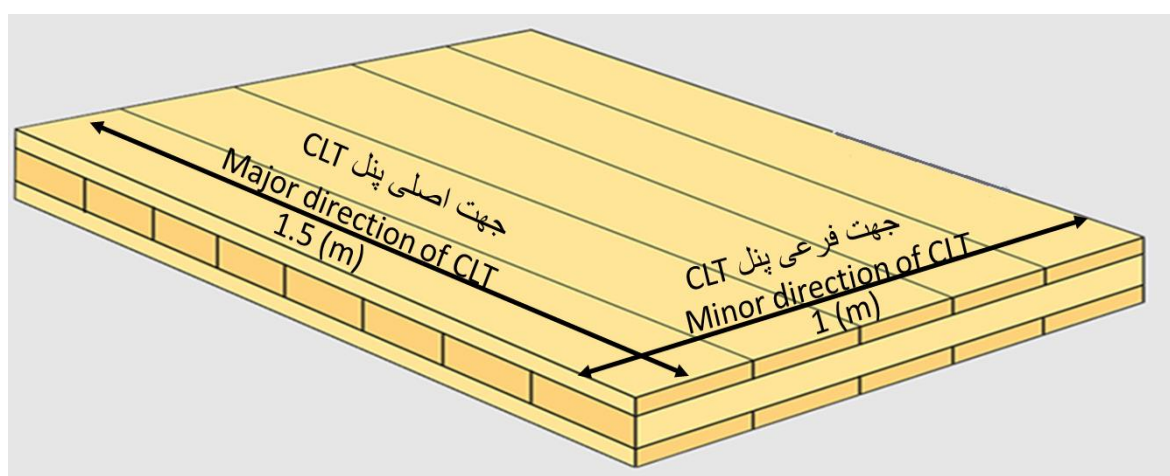
Table 2. Characteristics of Polyurethane adhesive used in this research

درصد مواد جامد	سختی	دانسیته	فرصت کاربری	رنگ	چسب
Solid materials (%)	Stiffness (%)	Density (g/cm ³)	Hardening time	Color	Adhesive
100	90-95	1.3	25	کرم Primrose yellow	پلی‌اورتان Polyurethane/ M518

ساخت نمونه‌های CLT

تخته‌های اندازه‌بری شده با استفاده از چسب پلی‌اورتان با نسبت 350 g/m^2 در لبه و سطح تخته چسب‌زنی شدند. برای سهولت کار، ابتدا تخته‌ها از یک گونه (صنوبر یا راش) از بغل به یکدیگر متصل شدند، سپس صفحه‌های ایجادشده با زاویه 90° درجه روی یکدیگر برای ساخت CLT استفاده شد. نحوه چیدمان صفحه‌های صنوبر و راش در پنل CLT طوری بود که در همه نمونه‌ها، صفحه راش در وسط و دو صفحه صنوبر در بالا و پایین پنل قرار داشتند. در نهایت

تخته‌ها با پرس هیدرولیک به مدت ۲ ساعت تحت فشار 0.75 مگاپاسکال به مدت ۳ ساعت پرس شدند. نمونه‌های آزمونی برای بررسی مقاومت خمش در پنج گروه با نسبت متغیر طول به ضخامت تیر (۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵) از این CLT‌ها بریده شدند و برای یکنواختی رطوبت، آزمونه‌های تهیه‌شده به مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای 21°C درجه سلسیوس، مشروط‌سازی گردیدند. شکل ۱ جهت برش اصلی و فرعی آزمونه‌های CLT را از پنل اصلی نشان می‌دهد.



شکل ۱- جهت برش اصلی و فرعی پنل CLT

Figure 1. Schematic of CLT in the major and minor cutting directions

و جهت برش پنل (جهت اصلی و فرعی) بودند.

آزمون خمش CLT

مقاومت و مدول خمشی تجربی CLT بر اساس استاندارد ASTM D198 و با نسبت‌های مختلف طول به ضخامت تیر با دستگاه Instron مدل ۴۴۸۶ اندازه‌گیری شد. جدول ۳ مشخصات CLT مورد استفاده (طول دهانه تیر، نسبت طول به ضخامت تیر و پهنای تیر) را تحت بار خمشی تجربی نشان می‌دهد.

عوامل ثابت فرایند ساخت در این پژوهش نوع گونه (راش به‌عنوان لایه مغزی پنل و صنوبر به‌عنوان لایه بالا و پایین)، ضخامت کل چندسازه CLT (۶۰ میلی‌متر)، تعداد لایه‌ها (سه لایه)، ضخامت هر لایه (۲۰ میلی‌متر)، نوع چسب (چسب پلی‌اورتان)، مقدار چسب (350 g/m^2 بر مترمربع)، نسبت هاردنر به چسب (۳۰ به ۱۰۰)، زمان پرس (۲ ساعت)، فشار پرس (0.75 مگاپاسکال) و سرعت بارگذاری (۵ میلی‌متر بر دقیقه) بودند. عوامل متغیر برای بررسی مقاومت خمشی، نسبت طول به ضخامت تیر (۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵)

جدول ۳- مشخصات CLT مورد استفاده در دو جهت اصلی و فرعی تحت بار خمشی

Table 3. Characteristics of CLT in both major and minor directions under bending loading

گروه Group	نسبت طول به ضخامت تیر Length to thickness ratio	پهنای تیر (میلی متر) Width of beam (mm)	طول دهانه تیر (متر) Span of beam (m)	تکرار Repetition
1	6	150	0.36	3
2	10	300	0.6	3
3	15	300	0.9	3
4	20	300	1.2	3
5	25	300	1.5	3

مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت خمشی (MOR) CLT (mm⁴)، B پهنای مقطع تیر (mm) و h ارتفاع مقطع تیر (mm) است.

مدل سازی نمونه های CLT با روش اجزای محدود در نرم-افزار ABAQUS

آنالیز اجزای محدود نمونه های CLT در هر دو جهت اصلی و فرعی با استفاده از نرم افزار آباکوس ورژن ۶/۱۴ انجام شد. طول، عرض، ارتفاع و ضخامت CLT ها دقیقاً طبق ابعاد گروه های بیان شده در جدول ۳ مدل شدند. همچنین ضرایب الاستیک و پوآسون گونه صنوبر و راش مورد استفاده در مدل اجزای محدود در این پژوهش براساس پژوهش های قبلی انجام شده توسط Zahedi و همکاران (۲۰۲۱) در جدول ۴ بیان شدند. همچنین در این پژوهش مبنای مدول های برشی چوب راش مورد استفاده در مدل اجزای محدود بر اساس روابط کلی بیان شده بین پارامترهای مهندسی چوب محاسبه شد. همه مدل های CLT همانند نمونه های تجربی از سه لایه (لایه راش در وسط و لایه صنوبر در بالا و پایین پنل CLT) که به حالت متقاطع نسبت به یکدیگر قرار داشتند مدل شدند. شکل ۲ لایه های چوب و تعریف زاویه بین لایه ها را بر اساس محور مختصات تعریف شده در نمونه های خمشی در آباکوس نشان می دهد.

مدول الاستیسیته (MOE) و مقاومت خمشی (MOR) CLT (MOR) مدول الاستیسیته (MOE) و بیشینه مقاومت خمشی (MOR) نمونه های CLT بر اساس استاندارد ASTM D198 و با استفاده از رابطه های شماره (۱) و (۲) محاسبه شدند.

$$MOE_{app} = \frac{PL^3}{48I\Delta} \quad (۱)$$

P/Δ نسبت بار به جابجایی خمشی تیر (kN/mm) در ناحیه الاستیک تیر و L طول تیر (mm) است.

$$\sigma = \frac{M_{max}}{S} \quad (۲)$$

که در آن M بیشینه لنگر خمشی و S مدول مقطع تیر است.

مقاومت برشی (τ_{max}) پنل CLT

مقاومت برشی (τ_{max}) تجربی نمونه های CLT بر اساس استاندارد AS D198 با استفاده از رابطه شماره ۳ محاسبه شد.

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{IB} \quad (۳)$$

$$Q = \left(\frac{bh}{2}\right) \left(\frac{h}{4}\right)$$

که در آن Q لنگر اول سطح برای مقطع مستطیلی تیر V بیشینه نیروی برشی تیر (N)، I ممان اینرسی تیر (mm³)

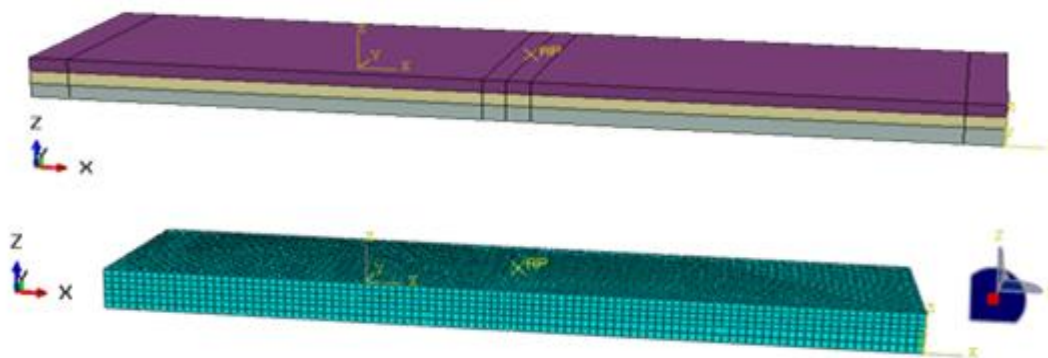
جدول ۴- ویژگی‌های الاستیک چوب صنوبر و راش در ۱۲٪ رطوبت مورد استفاده در مدل اجزای محدود

Table 4. Elastic properties of used poplar and beech species for modeling of finite element in moisture content of 12%

گونه Species	دانسیتیه Density (g/cm ³)	مدول الاستیسیته ۱ Modulus of elasticity 3 E ₁ (GPa)	مدول الاستیسیته ۲ Modulus of elasticity 3 E ₂ (GPa)	مدول الاستیسیته ۳ Modulus of elasticity 3 E ₃ (GPa)	مدول برشی ۱۲ Shear modulus G12 (GPa)	مدول برشی ۱۳ Shear modulus G13 (GPa)	مدول برشی ۲۳ Shear modulus G23 (GPa)	ضریب پواسون ۱۲ Poisson's ratio ν_{12}	ضریب پواسون ۱۳ Poisson's ratio ν_{13}	ضریب پواسون ۲۳ Poisson's ratio ν_{23}
صنوبر Populus deltoides	0.38	4.17	0.9	0.48	0.7	0.62	0.17	0.13	0.7	0.75
راش Fagus Orientalis	0.68	13.3	1.68	0.82	1.33	1.14	0.13	0.107	0.056	0.63

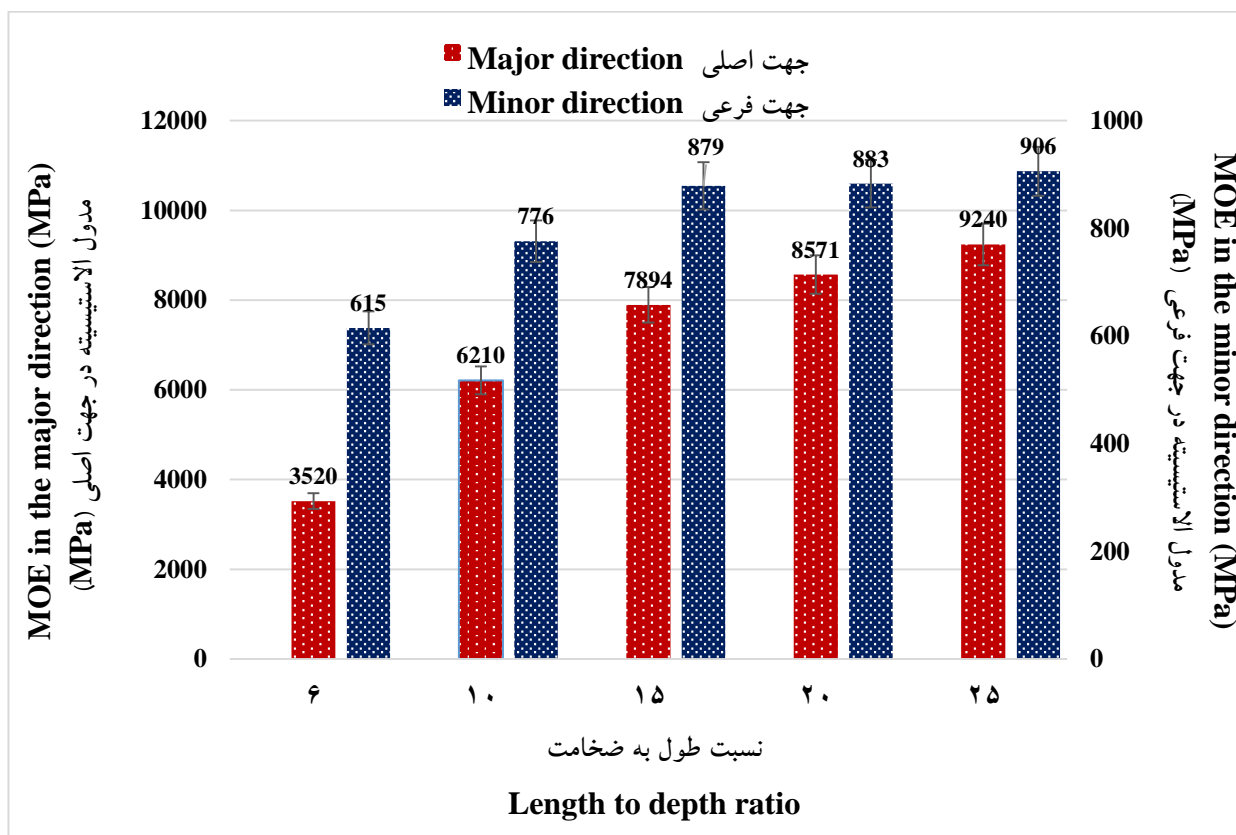
مش‌بندی و آنالیز حساسیت مش نمونه‌های مدل شده CLT در مش‌بندی مدل برای لایه‌های چوب از یک نوع مش ثابت مکعبی با ۲۰ گره به‌صورت انتگرال کاهش‌یافته (C3D20R) استفاده شد. در این پژوهش برای افزایش سرعت فرایند مدل نوع مش‌بندی، از انتگرال کاهش‌یافته استفاده شد. شکل ۳ نحوه مش‌بندی نمونه‌های مدل شده خمشی CLT را در محیط آباکوس نشان می‌دهد.

مش‌بندی و آنالیز حساسیت مش نمونه‌های مدل شده CLT در مش‌بندی مدل برای لایه‌های چوب از یک نوع مش ثابت مکعبی با ۲۰ گره به‌صورت انتگرال کاهش‌یافته (C3D20R) استفاده شد. در این پژوهش برای افزایش سرعت



شکل ۲- تعریف لایه‌ها و مش‌بندی نمونه‌ها بر اساس محور مختصات در نرم‌افزار آباکوس

Figure 2. Definition of layers and meshing of samples of CLT based on coordinate axes in Abaqus



شکل ۳- مدول الاستیسیته (MOE) پنل ترکیبی صنوبر-راش در دو جهت اصلی و فرعی

Figure 3. Modulus of elasticity (MOE) of hybrid poplar-beech CLT in both major and minor directions

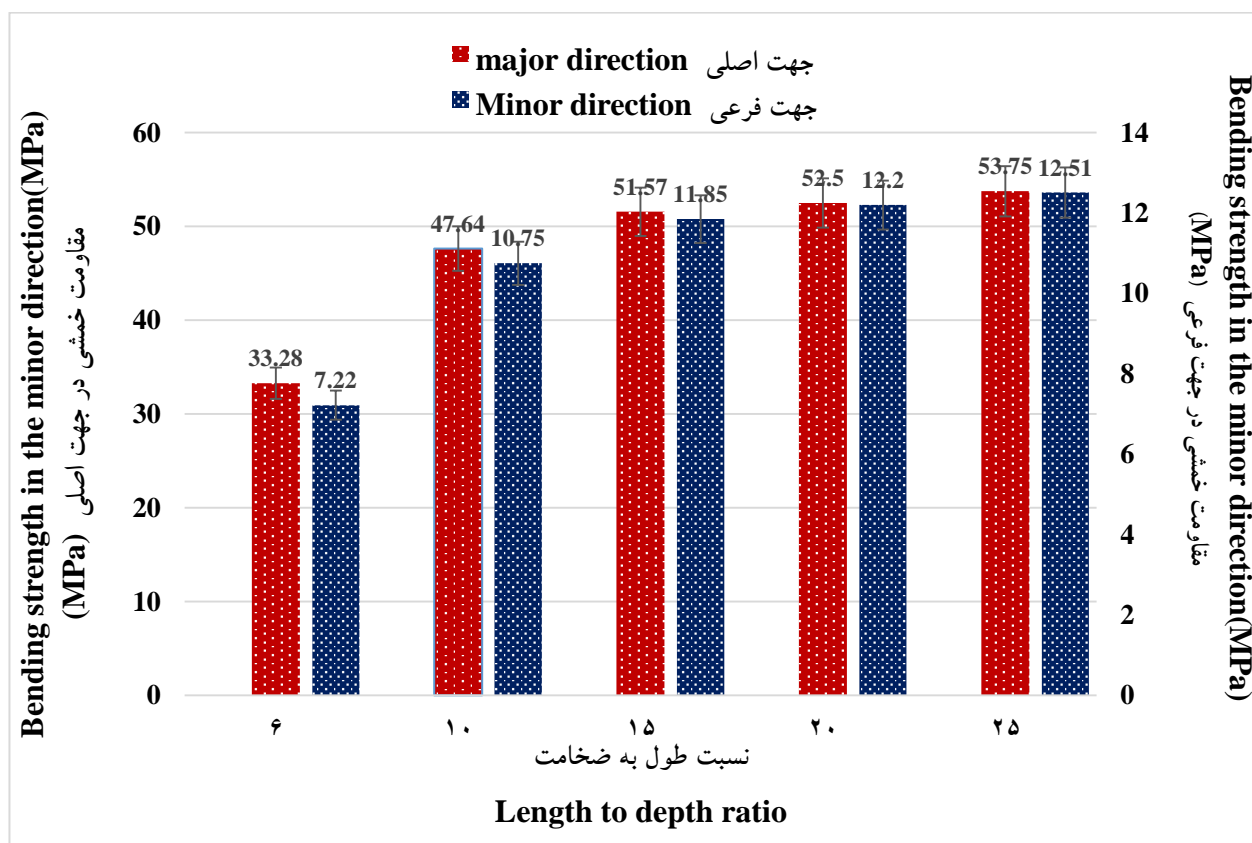
افزایش CLT MOE، از میزان طول به ضخامت ۶ تا ۲۰ بیشتر از میزان ۲۰ تا ۲۵ بود. همچنین با افزایش نسبت طول به ضخامت در هر دو جهت اصلی و فرعی، مقدار میانگین MOE نمونه‌های CLT افزایش یافت.

مقاومت به خمش (MOR) در جهت طولی و عرضی پنل CLT نتایج مقاومت خمشی (MOR) پنل CLT ساخته شده از چوب صنوبر و راش در دو جهت اصلی و فرعی پنل و در نسبت‌های مختلف طول به ضخامت تیر نشان داد که در نسبت‌های طول به ضخامت ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ مقدار MOR پنل صنوبر در جهت اصلی به ترتیب ۳۳۴٪، ۳۳۱٪، ۳۲۲٪، ۳۲۴٪ و ۳۲۲٪ درصد بیشتر از مقدار MOR پنل در جهت فرعی بود (شکل ۴).

شرایط مرزی و بارگذاری در مدل نمونه‌های CLT همه نمونه‌های CLT همانند نمونه‌های تجربی تحت بارگذاری سه نقطه‌ای در وسط تیر و دو تکیه‌گاه ثابت و غلتکی که در دو طرف تیر قرار داشتند مدل شدند. سطح بارگذاری مدل در وسط تیر CLT همانند نمونه‌های تجربی $10 \times 30 \text{ cm}^2$ بود. بارگذاری به صورت متمرکز در وسط سطح به یک نقطه کوپل و به طرف پایین وارد شد.

نتایج

مدول الاستیسیته (MOE) در جهت طولی و عرضی پنل CLT میانگین مدول الاستیسیته (MOE) پنل CLT ترکیبی ساخته شده از صنوبر-راش در نسبت‌های مختلف طول به ضخامت تیر در دو جهت اصلی و فرعی پنل در شکل ۳ مشاهده می‌شوند. در هر دو جهت اصلی و فرعی مقدار درصد



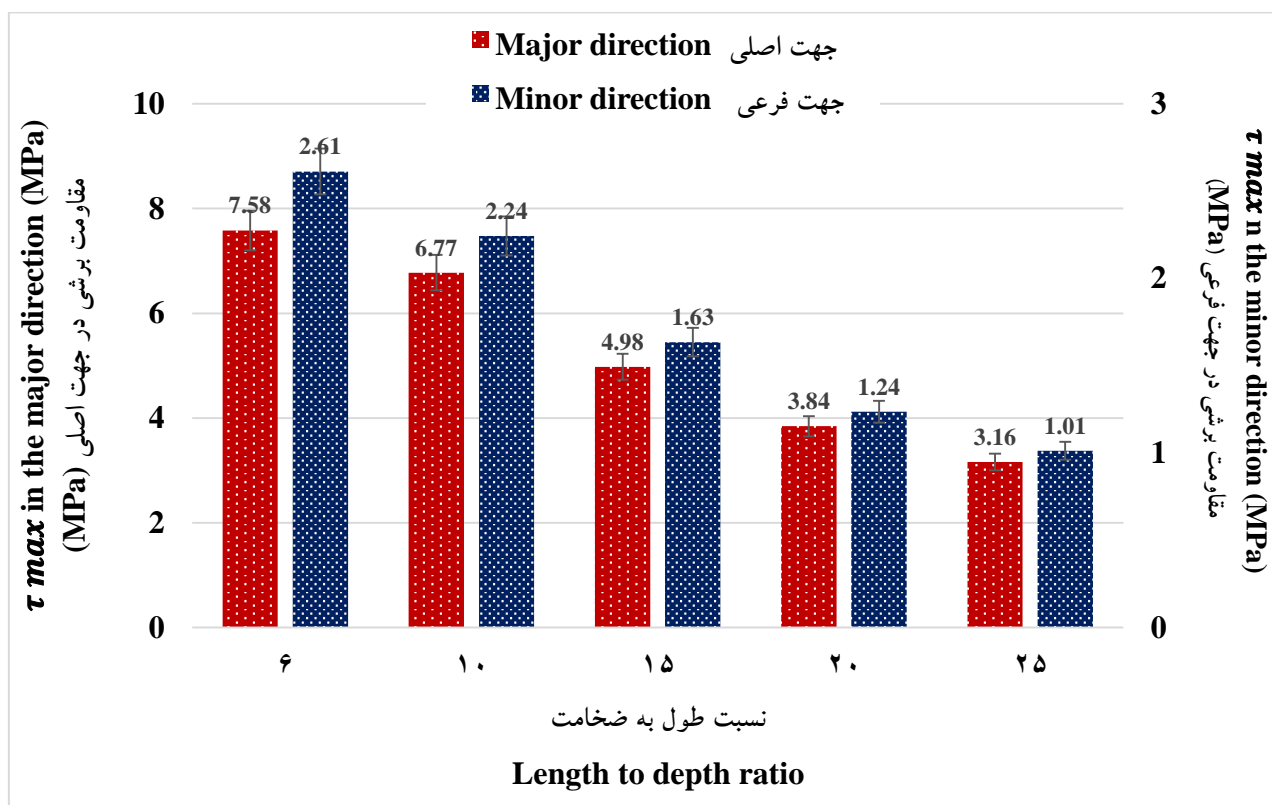
شکل ۴- مقاومت خمشی (MOR) ترکیبی صنوبر-راش در دو جهت اصلی و فرعی پنل

Figure 4. Modulus of rupture (MOR) of hybrid poplar-beech CLT in the both major and minor directions

پنل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت برشی اندازه‌گیری شده نمونه‌های CLT با افزایش مقدار L/d تیر در هر دو جهت اصلی و فرعی کاهش می‌یابد. در هر دو جهت پنل، شدت کاهش مقدار مقاومت به برش نمونه‌ها در نسبت‌های L/d ۶ تا ۲۰ بیشتر از نسبت‌های L/d ۲۰ تا ۲۵ بود.

مقاومت به برش (τ_{max}) در جهت طولی و عرضی پنل CLT ترکیبی ساخته‌شده از صنوبر و راش

شکل ۵ مقدار مقاومت به برش (τ_{max}) نمونه‌های CLT ساخته‌شده از ترکیب صنوبر و راش را بر اساس نتایج تجربی با نسبت‌های مختلف L/d به ترتیب در دو جهت اصلی و فرعی



شکل ۵- مقاومت برشی (τ_{max}) پنل CLT ترکیبی صنوبر-راش در دو جهت اصلی و فرعی پنل

Figure 5. Shear strength (τ_{max}) of hybrid poplar-beech CLT in both major and minor directions

نیوتن به همه نمونه مدل وارد شد و بعد به وسیله بیشترین جابجایی محاسبه‌شده در زیر نقطه بارگذاری با نرم‌افزار ABAQUS، مقدار MOE نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج این اعتبارسنجی در جدول ۵ ارائه شده است. به طوری که روش اجزای محدود MOE نمونه‌های آزمونی را با خطای کمتر از ۱۰ درصد پیش‌بینی کرده است.

مدل‌سازی و اعتبارسنجی مدل CLT ترکیبی صنوبر-راش در خمش با روش اجزای محدود

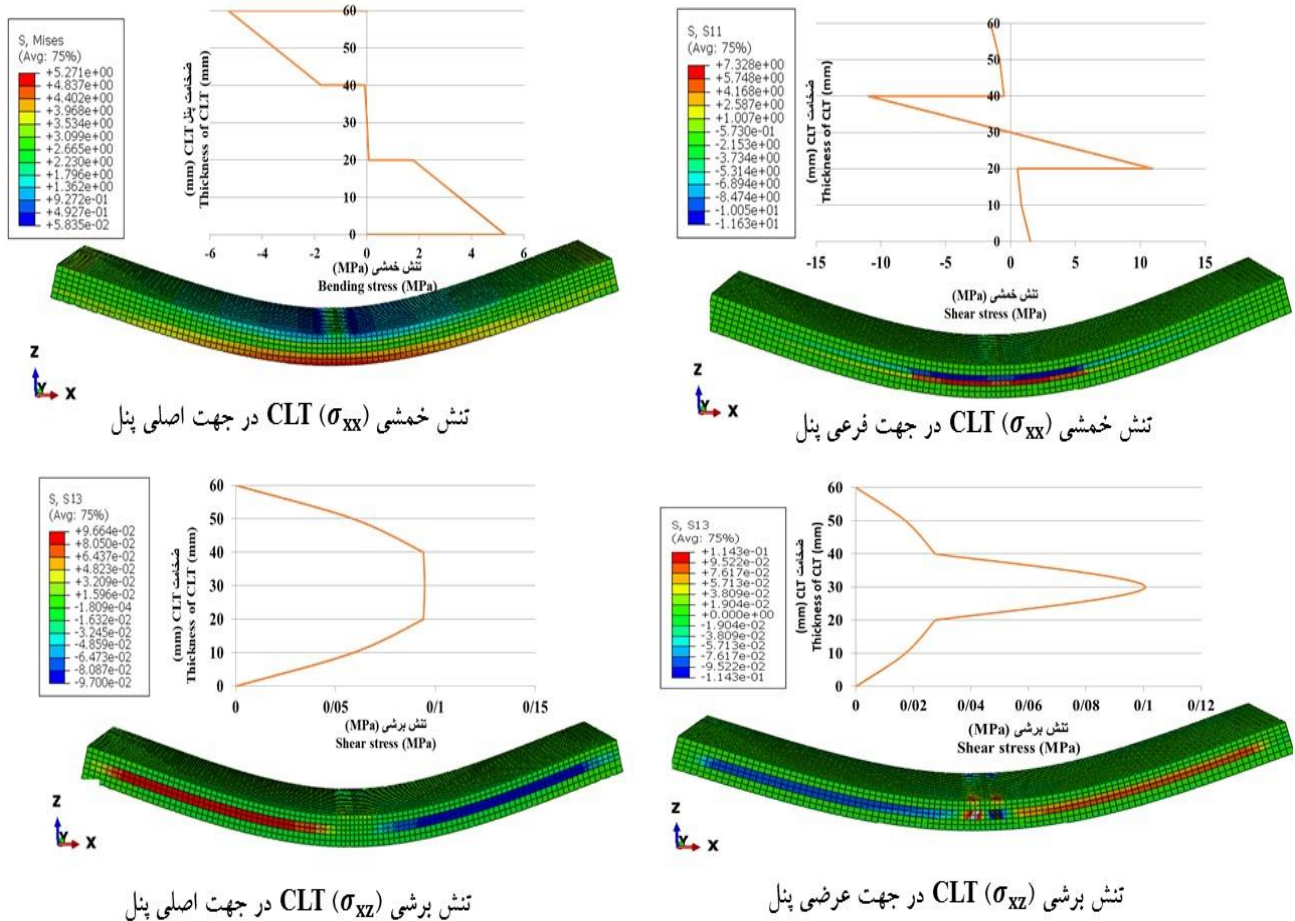
برای بررسی اعتبار مدل‌های اجزای محدود، دقت مدل‌های خمشی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خمشی با نتایج آزمونه‌های خمشی در آزمایشگاه مقایسه شدند. برای اعتبارسنجی مدل خمشی اجزای محدود، نیرویی برابر ۱۰۰۰

جدول ۵- اعتبارسنجی روش اجزای محدود برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته CLT های ترکیبی صنوبر-راش
Table 5. Validation of the finite element method (FEM) for predicting the MOE values of hybrid poplar-beech CLTs

جهت پنل Panel direction	نسبت طول به ضخامت Span to depth ratio	مدول الاستیسیته تجربی Experimental MOE (MPa)	خیز تجربی Experimental replacement	مدول الاستیسیته عددی Numerical MOE (MPa)	خیز عددی Numerical replacement	درصد خطا Error (%)
	6	3520	3.4	3734	3.2	5.8
جهت اصلی Major direction	10	6210	7.6	6518	7.3	4.7
	15	7894	14.8	8521	13.7	7.3
	20	8571	24.5	9075	23	5.5
	25	9240	36.3	9703	34.6	4.7
جهت فرعی Minor direction	6	615	4.2	679	3.8	9.4
	10	776	13.8	859	12.5	9.6
	15	879	30.3	952	28	7.7
	20	883	55	944	51.6	6.4
	25	906	88.5	962	81.5	5.8

نتایج اجزای محدود، بیشترین مقادیر تنش خمشی در هر دو جهت اصلی و فرعی در وسط دهانه اتفاق افتاد. بیشترین مقدار تنش برشی تیر تحت خمش در هر دو جهت اصلی و فرعی پنل نزدیک به تکیه‌گاه‌ها رخ داد، درحالی‌که بیشترین جابجایی در همه مدل‌های CLT ترکیبی صنوبر-راش در وسط طول دهانه تیر مشاهده شد.

توزیع تنش خمشی و برشی در جهت طولی و عرضی پنل CLT با روش اجزای محدود توزیع تنش خمشی و برشی نمونه‌های CLT تحت آزمون خمش در محیط ABAQUS در جهت اصلی و فرعی پنل در شکل ۶ مشاهده می‌شوند. به‌نحوی‌که مکان و مقدار توزیع تنش‌های خمشی و برشی در جهت اصلی و فرعی هر لایه از پنل با یکدیگر متفاوت است. بر اساس



شکل ۶- تنش خمشی (σ_{xx}) و برشی (σ_{xz}) CLT ترکیبی صنوبر-راش در دو جهت اصلی و فرعی پنل
Figure 6. Bending (σ_{xx}) and shear stress (σ_{xz}) of hybrid poplar-beech CLT in both major and minor directions

چوب در جهت موازی الیاف مدول الاستیسیته خمشی بالایی دارد، بنابراین در چیدمان ۳ لایه CLT حضور ۲ لایه چوب موازی با الیاف سبب افزایش کلی مدول الاستیسیته پنل CLT در جهت اصلی نسبت به جهت فرعی است. ولی چیدمان CLT در جهت فرعی پنل CLT به گونه‌ای است که تنها لایه وسط موازی با جهت الیاف و محور اصلی تیر قرار می‌گیرد، در حالی که دو لایه سطحی بالا و پایین با زاویه ۹۰ درجه از محور اصلی تیر قرار دارند. با توجه به اینکه چوب در جهت عمود بر الیاف مدول الاستیسیته ضعیفی دارد، بنابراین وجود دو لایه چوب در ساختار CLT با زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور اصلی سبب کاهش مقدار MOE کلی پنل می‌شود. همچنین با افزایش نسبت طول به ضخامت تیر در هر دو

بحث

نتایج حاصل از تمامی نمونه‌های آزمونی ساخته شده نشان داد که در همه نسبت‌های متفاوت طول به ضخامت، مقدار MOE پنل CLT در جهت اصلی بیشتر از مقدار MOE پنل در جهت فرعی بود، به طوری که مقادیر MOE جهت اصلی به فرعی در نسبت‌های طول به ضخامت ۶، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ به ترتیب ۴۹۲٪، ۷۲۰٪، ۹۰۷٪، ۸۴۱٪ و ۸۷۶٪ بیشتر بودند. البته اختلاف زیاد بین نتایج حاصل از مقدار MOE را می‌توان به نحوه چیدمان لایه‌های چوب در دو جهت اصلی و فرعی نسبت داد. در جهت اصلی پنل ترکیبی ۳ لایه صنوبر-راش، تنها لایه وسط به صورت ۹۰ درجه است، در حالی که دو لایه رویی و زیری موازی با جهت الیاف هستند. با توجه به اینکه

و در لایه وسط CLT اتفاق افتاد. تحلیل نتایج اجرای- محدود نشان داد که در جهت اصلی پنل هر ۳ لایه در تحمل بار خمشی پنل شرکت می‌کنند، گرچه مقدار تحمل تنش توسط لایه‌های بالا و پایین نسبت به لایه وسط بیشتر بود. اما در جهت فرعی پنل مقدار تنش خمشی ($11/6 \text{ MPa}$) و برشی ($0/1 \text{ MPa}$) در لایه وسط نزدیک به نقاط بارگذاری پیش‌بینی شد. همچنین در جهت فرعی پنل تنها لایه وسط نقش اصلی را در مقدار مقاومت تیر داشت و تنش‌های خمشی و برشی به‌طور همزمان در لایه وسط CLT رخ دادند اما لایه‌های بالا و پایین کمتر در مقدار مقاومت خمشی شرکت کردند. این موضوع می‌تواند دلیل مقاومت به خمش بیشتر پنل‌های CLT ترکیبی صنوبر- راش را در جهت اصلی پنل نسبت به جهت فرعی پنل توجیه کند و این نتایج با نتایج پژوهش He و همکاران (۲۰۱۸) همسوست.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مسئولان محترم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان که امکانات لازم را برای انجام این پژوهش تأمین نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع مورد استفاده

- Bodig, J. and Jayne, B.A., 1993. Mechanics of wood and wood composites, Malabar, Krieger Publishing Company, 736 p.
- Gagnon, S. and Popovski, M., 2013. Structural design of cross-laminated timber elements. CLT Handbook (FP Innovations), 1st Ed., Pointe-Claire, Quebec, 812 p.
- He, M., Sun, X. and Li, Z., 2018. Bending and compressive properties of cross-laminated timber (CLT) panels made from Canadian hemlock, Construction and Building Materials 185:175-183.
- Kramer, A., Barbosa, A.R. and Sinha, A., 2013. Viability of hybrid poplar in ANSI approved cross laminated timber applications. Journal of Materials in Civil Engineering, 26: 7. 1-5.
- Liao, Y., Tu, D., Zhou, J., Zhou, H., Yun, H., Gu, J. and Hu, Ch., 2017. Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter

جهت، مقدار MOR پنل افزایش یافت. گرچه درصد تغییرات افزایش MOR، در هر دو جهت اصلی و فرعی تیر از نسبت طول به ضخامت ۶ تا ۲۰ بیشتر از درصد تغییرات آن از ۲۰ تا ۲۵ بود. اختلاف زیاد بین نتایج حاصل از مقدار MOR پنل در دو جهت را نیز می‌توان به میزان مقاومت لایه‌های چوب در زوایای ۰ درجه و ۹۰ درجه در میزان تحمل بار نهایی خمش پنل مربوط دانست. همانطور که بیان شد در جهت اصلی پنل تنها لایه وسط به‌صورت ۹۰ درجه است ولی در جهت فرعی ۲ لایه سطحی رویی و زیری با زاویه ۹۰ درجه از محور اصلی قرار دارند و مقدار MOR پنل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مطابق نتایج تحقیق Kramer و همکاران (۲۰۱۳)، درصد افزایش MOR پنل CLT تحت خمش در جهت اصلی نسبت به جهت فرعی را می‌توان به اختلاف مقاومت نهایی لایه‌های چوب در زاویه‌های متفاوت چیدمان در آزمون خمش توجیه کرد. همچنین مقدار مقاومت به برش نمونه‌ها در جهت اصلی پنل CLT در همه نسبت‌های L/d پنل بیشتر از مقدار آن در جهت فرعی بود. این رفتار کاهش می‌تواند به دلیل ارتباط مستقیم مقاومت برشی کلی پنل CLT با نیروی برش (V_{max}) تیر تحت خمش باشد که با افزایش نسبت L/d نیروی برشی نمونه‌های CLT در هر دو جهت کاهش می‌یابد. معمولاً در تیرهای تحت خمش با افزایش نسبت L/d مقدار خمش خالص تیر به دلیل کاهش مقدار مقاومت برشی تیر افزایش می‌یابد (Bodig & Jayne, 1993). به‌طورکلی مجموع سهم مقاومت به برش ۳ لایه چوب در چیدمان‌های متفاوت بر مقدار مقاومت به برش کل پنل تأثیر دارد.

در بررسی مدل اجزای محدود نمونه‌های آزمونی، تنش‌های فشاری در لایه بالایی و تنش‌های کششی در لایه پایین تیر مشاهده شدند، به‌طوری‌که مقدار تنش خمشی (σ_{xx}) توسط مدل اجزای محدود در جهت اصلی پنل ($5/2 \text{ MPa}$) پیش‌بینی شد که در وسط طول دهانه و در لایه پایین و بالایی اتفاق افتاد، درحالی‌که مقدار تنش برشی (σ_{xz}) ($0/08 \text{ MPa}$) پیش‌بینی شد که در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها

- PRG 320, 29p, 2019.
- Standard test methods of static testing of lumber in structural sizes. ASTM International West Conshohocken, Pennsylvania. 27p, ASTM D198, 2014.
- Wang, Z., Fu, H., Chui, Y.H. and Gong, M., 2014. Feasibility of using poplar as cross layer to fabricate cross-laminated timber. World Conference on Timber Engineering, Shear Test, American Institute of Timber Construction. Standard AITC test T107. 10-14.
http://schr.ws/hosted_files/wcte2014/cb/ABS520_Gong_web.pdf.
- Zahedi, M., Kazemi Najafi, S., Füssl, J. and Elyasi, M., 2021. Determining elastic constants of poplar wood (*Populus deltoides*) by ultrasonic waves and its application in the finite element analysis. *Wood Material Science and Engineering*, 1925-1962.
- eucalyptus lumbers. *Construction and Building Materials*, 132: 1. 508–515.
- Madhoushi, M., 2017. *Green building biomaterials*, 1st Ed., Jahad Daneshgahi Press, 218 p. (In Persian).
- Navaratnam, S., Christopher, P., Ngo, T. and Le, T., 2020. Bending and shear performance of Australian Radiata pine cross-laminated timber. *Construction and Building Materials*, 232: 117215.
- Robertson, A.B., 2011. A comparative life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete. *Buildings*, 2: 245-270.
- Rostampour Haftkhani, A., layeghi, M., Ebrahimi, G. and Pourtahmasbi, 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.
- Standards for performance-rated cross-laminated timber. American National Standard. ANSI/APA

Performance assessment of bending and shear stiffness of hybrid Beech-Poplar cross-laminated timber (CLT) using experimental and finite element methods

H. Hematabadi^{1*}, M. Madhoushi², A. Khazaeian² and G. Ebrahimi³

1*-Corresponding Author, PhD Student, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, Email: hematabadi@gmail.com

2-Associate Professor, Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3-Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: Dec., 2021

Accepted: Feb., 2022

Abstract

This study investigated the bending and shear strength of hybrid cross-laminated timber (CLT) manufactured from beech (*Fagus orientalis*) and poplar (*Populus deltoides*) wood using experimental and finite element methods. The CLT panels were manufactured at various span to depth ratios 6, 10, 15, 20 and 25 with width of 30 cm and thickness of 2 cm in both major and minor directions. Then, the bending and shear strength of CLTs were measured using three-point bending test according to ASTM test methods. The results indicated that with the increase of span to depth ratio of the beam from 6 to 25, the averages modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR) values were increased in both major and minor directions. On the contrary, the averages shear modulus (τ_{max}) values of specimens in both directions were decreased. Moreover, the results of finite elements showed that the amounts of stress distributions and their locations were different in major and minor directions of the beam. In the major direction, the surface layers were primarily contributed load-carrying capacity of CLT panels, while in the minor direction the middle layer played the most significant role for load-carrying capacity. In this research, it was resulted that specimens with span to depth ratio greater than 15 based on ASTM D198 can be used for calculating MOE and MOR of CLT panels. Furthermore, due to existence of lower difference than 10% between experimental and numerical results, modulus of elasticity of CLTs were predictable according to finite element method.

Keywords: Cross laminated timber, Beech, Poplar, bending and shear strength, finite element method.