

تأثیر شکل جان و نوع بال بر مقاومت خمشی تیرهای I شکل

مرتضی ناظریان^{۱*}، علیرضا رضائیان^۲ و محمد شمسیان^۳

*- نویسنده مسئول، دانشیار، گروه سامانه‌های زیستی، دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
پست الکترونیک: morteza17172000@yahoo.com

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

۳- دانشیار، گروه صنایع چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه زابل، ایران

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۸ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۸

چکیده

مقاومت خمشی تیر I شکل سبک‌سازی شده به دو روش زیگزاگی و لانه‌زنبوری با استفاده از گونه‌های صنوبر (Populus deltoides) و اکالیپتوس (Eucalyptus spp) بررسی شد. متغیرهای مورد بررسی شامل: الف) نوع بال، ب) شکل مغزی سبک‌سازی شده در جان و ج) تیمار لایه‌های سطحی جان. نوع بال در دو سطح: (۱) فرآورده لایه‌ای LVL حاصل از صنوبر و (۲) چوب ماسیو اکالیپتوس، شکل مغزی جان تیر نیز در دو سطح: (۱) شامل زیگزاگی و (۲) لانه‌زنبوری و لایه‌های سطحی جان نیز که از صنوبر ۳ میلی‌متر ساخته شدند در دو سطح: (۱) تیمار نشده و (۲) تیمار شده طی تأثیر توأم حرارت و فشار پرس انتخاب شدند. خواص مکانیکی تیر شامل مدول گسیختگی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) به‌عنوان متغیرهای وابسته مورد بررسی و آزمون قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده در قالب طرح فاکتوریل کامل مورد تحلیل آماری قرار گرفتند. پس از تعیین آزمون معنی‌داری نتایج، با استفاده از آزمون مقایسه چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) میانگین‌های نمونه‌ها گروه‌بندی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از LVL حاصل از صنوبر برخلاف دانسیته پایین آن در بال تیر در مقایسه با استفاده از چوب اکالیپتوس به‌عنوان بال به‌طور معنی‌داری MOR و MOE را افزایش داد. همچنین به‌منظور سبک‌سازی تیر، کاربرد شکل لانه‌زنبوری در مغزی جان تیر به‌طور معنی‌داری مقاومت بیشتری را در مقایسه با شکل زیگزاگی به تیر داده است. البته تیمار لایه رویه جان تأثیر معنی‌داری بر روی خواص خمشی نداشته است.

واژه‌های کلیدی: تیرهای I شکل، بال، جان، زیگزاگی، لانه‌زنبوری، تیمار حرارتی - فشرده‌سازی

مقدمه

تیرهای مهندسی‌شده I شکل از جمله فرآورده‌های مهندسی شده چوبی هستند، با یک جان در مرکز و دو بال در بالا و پایین که از ترکیب فرآورده‌هایی همانند فرآورده‌های لایه‌ای مانند تخته لایه، LVL و نیز تخته تراشه جهت‌دار گاهی در ترکیب با چوب ماسیو ساخته می‌شوند. از دو منظر مزیت تیرهای I شکل را می‌توان مورد لحاظ قرار داد. اول

بالا بودن مقاومت با توجه به سبکی وزن ساختمان و دوم سرعت در اجرا و ساخت ساختمان که منجر به کاهش هزینه و زمان می‌شود. جامعه مهندسی به علت وزن سبک و مقاومت بالا، این فرآورده را به‌عنوان یک سازه ساختمانی مهندسی شده و با اهمیت بالا به رسمیت شناخته است (Breyer et al., 2015).

به‌عنوان یک قاعده کلی، تیرهای I شکل از دو بال قوی

تنش در گوشه‌های خود دارای کمترین مقاومت بوده، درحالی‌که مجراهای دایره‌ای به دلیل یکنواختی در توزیع تنش می‌توانند تحمل بار بیشتری داشته باشند (Zhu et al., 2005). این در حالی است که تمامی این الگوهای سبک‌سازی از یکسو به دلیل آنکه در دو طرف مجزا می‌باشند و پیوسته نیستند و از سوی دیگر سطوح طرفین بیشترین میزان تنش را به‌ویژه در طی کمانش در آزمون خمش تحمل می‌کنند و می‌توانند دارای مقاومت پایین‌تری باشند. از این رو می‌توان از طرح‌هایی استفاده نمود که نه تنها سبکی تیر بلکه امکان بهره‌گیری از مجراها برای نصب تأسیسات و نیز مقاومت تیر به‌طور همزمان تأمین گردد. نمونه‌های دیگری از استقرار مجراها را نیز می‌توان در ساخت تیرهای I شکل بکار برد که در آنها مجراها نه در راستای عمود بر سطح بلکه در راستای موازی با سطح (زیگزاگی، لانه‌زنبوری و غیره) مستقر می‌شوند، به طوری که بدون آنکه لایه‌های سطحی که عامل اصلی استحکام بخشی به تیر به‌ویژه در طی خمش و کمانش هستند از بین رود یا برداشته شود، تیری را ساخت که اهداف اصلی را در ساخت تیرهای I شکل داشته باشد. در این شرایط، همزمان می‌توان از این نحوه استقرار مجراها در جان تیر در ترکیب با لایه‌های سطحی به‌منظور ساخت فرآوردهایی شبیه پانل ساندویچی بهره جست، بدون آنکه معایب احتمالی ناشی از مجاری استقرار یافته به‌طور عمود بر سطح جان در تیر وجود داشته باشد. در این حالت، رویه‌های این پانل‌ها می‌توانند از مواد مختلف از جمله روکش‌های چوبی باشند. روکش‌های با دانسیته کم همانند صنوبر را می‌توان طی اجرای فرایند توأم حرارت-فشار هم از لحاظ فیزیکی و هم مکانیکی اصلاح نمود. در جریان فشرده‌سازی چوب بخش اعظم فضاهای خالی یا حفره‌های هوا توسط خود ماده چوبی جایگزین می‌گردد. این عمل را باید در شرایطی انجام داد که به ساختار سلولی چوب صدمه مکانیکی وارد نشود. با اعمال شرایطی مثل حرارت توأم با بخار دادن و غیره چوب را

که یک هسته ضخیم (جان) را با کمک یک اتصال‌دهنده مانند رزین دربرگرفته‌اند، ساخته شده‌اند. البته هر چه ضخامت جان بیشتر شود، سفتی^۱ و مقاومت خمشی کل تیر افزایش می‌یابد. ولی این ازدیاد سفتی و مقاومت خمشی با افزایش وزن پانل قابل مقایسه نیست (Malekzadeh Fard et al., 2011).

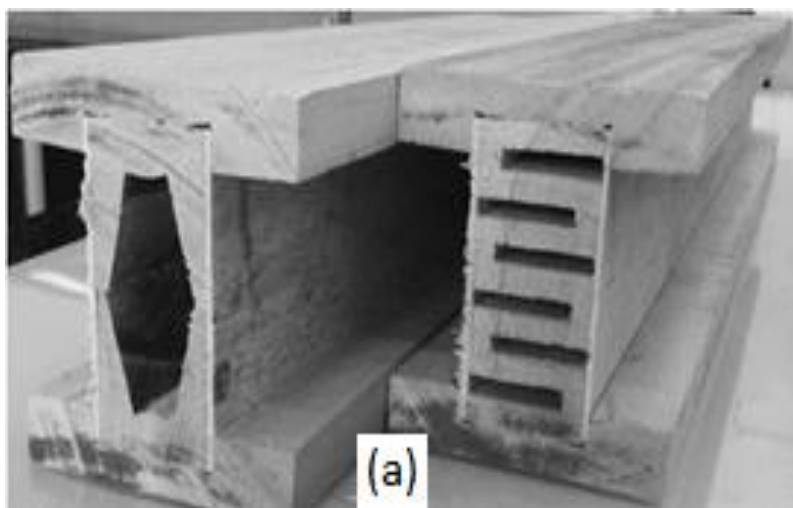
روش‌های متنوعی برای سبک‌سازی تیرهای I مورد استفاده قرار می‌گیرد که متناسب با حیطه کاربرد و نیازهای ساختمانی از تیرها می‌باشند، مانند چندوجهی (لانه‌زنبوری)، مشبک، دایره‌ای، بیضوی و غیره که عمدتاً با دو هدف مورد توجه قرار گرفته‌اند: ۱- سبک‌سازی و مزایای مربوط به آن و ۲- عبور عناصر تأسیساتی از آنها. در تمامی موارد استفاده شده نحوه استقرار مجاری ایجاد شده در تیر به‌صورت عمود بر سطح جان می‌باشد، به‌نحوی که عملاً هیچ بررسی بر روی امکان استقرار مجاری در جان تیر به‌صورت موازی با آن انجام نشده است. به‌طورکلی استقرار مجراها در جان عمدتاً باعث ایجاد تمرکز تنش شده و باعث می‌شود تا ظرفیت بارگذاری کاهش یابد. در این شرایط، احتمال شکست در نتیجه فزونی یافتن تنش در لبه مجاری از ظرفیت تحمل تنش حداکثر تیر تشدید خواهد شد (Morris et al., 1995). این دگرگونی و تغییر در میزان تحمل تنش می‌تواند در نتیجه اختلاف در خواص ایزوتروپیک ماده مورد استفاده در جان به‌دلیل وجود یا عدم وجود مجرا باشد، به‌نحوی که کاربرد مجرا سبب می‌شود تا جان تیر از حالت ایزوتروپیک خارج شده و به ماده‌ای ارتوتروپیک نزدیک گردد و سبب شود تا تغییر شکل زیادی در حیطه غیرخطی منحنی کرنش-تنش مسبب ایجاد تنش زیادتر در تیر و به‌تبع آن کاهش در مقاومت خمشی تیر در نتیجه ایجاد تنش برشی تشدید شده در تار خنثی تیر شود (Harte & Baylor, 2011). در این میان، شکل سبک‌سازی به‌دلیل ایجاد مجراها در جان نیز بر روی تنش خمشی و نیز تنش برشی ایجاد شده تأثیر متفاوت دارد، به این صورت که مجراهای چندوجهی به‌دلیل تمرکز

مواد و روش‌ها

از چوب اکالیپتوس *E. camaldulensis* (به صورت دارخشک) هم در جان و هم در بال و نیز از LVL حاصل از روکش صنوبر در بال استفاده شد. پس از قطع و انتقال، گرده‌بینه به الوارهایی بریده شده و پس از خشک شدن در هوای آزاد به مدت سه ماه، الوارهای خشک شده با توجه به متغیرها به تخته‌هایی با ابعاد $900 \times 70 \times 30$ mm بریده شدند. تهیه مغزی جان تیر به دو شکل انجام شد: لانه‌زنبوری و زیگزاگی (شکل ۱). سبک‌سازی به نحوی انجام شد که وزن جان تیر به حدود نصف وزن در حالت ماسیو کاهش یافت. پس از برش و تهیه مغزی‌های شش‌گوش و زیگزاگی، دو سطح آنها توسط روکش صنوبر (۳mm) به‌عنوان رویه‌ها و با رزین UF با میزان مصرف 100 g/m^2 (دلیل کاربرد رزین UF امکان استفاده از تیمار حرارت-فشار برای حصول شرایط یکسان ساخت بوده و از عوامل دیگر تأثیرگذار ناخواسته کاسته شد)، به مدت ۳min و فشار پرس kg/cm^2 ۱۰ چسبانده شدند. رویه‌ها به دو دسته تقسیم گردیدند: تیمار نشده و تیمار شده (تیمار حرارتی در حرارت 180°C تحت فشار kg/cm^2 ۱۰ به مدت ۶min).

می‌توان فشرده کرد. اثر کاربرد پانل‌های موج به‌عنوان جان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پانل‌های ساده باعث کم‌انرژی‌تر برشی در جان تیر می‌شود، درحالی‌که با کنگره‌دار کردن می‌توان پانل‌های مقاوم‌تر برای استفاده در تیر ساخت (McGraw et al., 2010).

تیرها می‌توانند در حال بارگذاری تحت تنش خمشی، برشی و یا مجموع این دو تنش قرار گیرند. برحسب اینکه میزان تنش اعمال شده در خمش یا برش بیشتر باشد، تیرها توسط یکی از این دو تنش گسیخته خواهند شد. در طی تنش خمشی عمده قسمت حمل تیر بال‌ها می‌باشند، درحالی‌که در طی تنش برشی عمده قسمت حمل تیر، جان می‌باشد. تدابیری باید اتخاذ گردد تا به‌وسیله آن بتوان همزمان مقاومت خمش خالص و مقاومت برشی تیر را افزود و اقدام به تولید تیرهایی نمود که دارای وزن پایین باشند. از این رو، در این تحقیق سعی گردید تا با کاربرد چوب‌آلات با کیفیت پایین و سنگین و کاهش وزن آن به‌عنوان جان به شیوه‌های خاص، اعمال تیمار حرارتی بر رویه‌های پانل ساندویچی مورد مصرف در جان و همزمان تعیین اثر کاربرد نوع ماده چوبی مورد مصرف به‌عنوان بال مقاومت‌های خمشی تیر I شکل را افزود.



شکل ۱- تیر سبک‌سازی شده I شکل به دو صورت لانه‌زنبوری و زیگزاگی

عرض برابر با ضخامت جان (۳۰ mm) و به عمق ۱۵ mm ایجاد شد. شیار بال‌ها پس از آغشته شدن با چسب اوره فرمالدئید (۱۰۰ گرم بر سانتی‌متر مربع) توسط قلم‌مو و مونتاز با جان، به صورت ایستاده با جان با کمک شابلون (به منظور کنترل میزان فشار اعمال شده) درون دستگاه پرس با فشار برابر 10 kg/cm^2 ، حرارت 160°C و به مدت ۱۰ min پرس شدند.

آزمون مقاومت خمشی

پس از ساخت تیر و انعقاد کامل رزین و رسیدن رطوبت نمونه به حد تعادل با محیط (حدود ۷٪)، تیرها در دستگاه آزمایش مکانیکی اونیورسال HONSFIELD 25k تحت آزمون خمش استاتیکی سه نقطه قرار گرفته و پس از ثبت نتایج، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته تیر از طریق محاسبه ممان اینرسی (I) و ممان خمشی حداکثر (M_{max}) (روابط ۱-۴) (Leckie & Dal Bello, 2009) محاسبه گردید.

از چوب اکالیپتوس و LVL ساخته شده از روکش صنوبر نیز به عنوان سطوح متغیر نوع بال استفاده شد. برای ساخت LVL، روکش‌های صنوبر پس از خشک شدن در اتوکلاو (رطوبت نهایی ۴٪ و به منظور جلوگیری از تأثیرات منفی تغییرات رطوبتی بر روی تغییرات ابعاد تیر ساخته شده نهایی و نیز جلوگیری از تورم LVL که به ویژه در پانل‌های ساخته از چوب‌های با دانسیته پایین به دلیل محبوس شدن کامل بخار رطوبت موجود در چوب و چسب در نتیجه ضریب بالای فشردگی پانل و فزونی یافتن این فشار بخار اشباع از مقاومت خط چسب بسیار مرسوم می‌باشد) و خنک‌سازی با رزین UF و به مقدار 100 g/m^2 آغشته شده و پس از مونتاز تحت فشار 30 kg/cm^2 ، به مدت ۱۵ min و حرارت 160°C پرس شدند. تعداد لایه‌ها برای رساندن ضخامت تخته به ۲۰ میلی‌متر و برابر با ضخامت چوب ماسیو اکالیپتوس ۸ عدد بود. پس از خروج از پرس، اندازه‌بری و خنک‌سازی در وسط LVL و تخته‌های ماسیو به موازات طول شیار به

$$M_{max} = \frac{PL}{4} \quad (2) \quad I = \frac{w(d-2f)^3}{12} + 2 \left(\frac{bf^3}{12} + bf \left(\frac{d}{2} - \frac{f}{2} \right)^2 \right) \quad (1)$$

از رابطه (۲) حداکثر ممان (لنگر) خمشی تیر در بارگذاری متمرکز سه نقطه تعیین شد. برای تیرهای I شکل، حداکثر تنش یا مقاومت تیر برابر است با:

I ممان اینرسی تیر، w ضخامت جان تیر، d ارتفاع تیر، f ضخامت بال تیر و b عرض بال تیر، P - نیروی بارگذاری متمرکز اعمال شده در وسط تیر و L - فاصله دو تکیه‌گاه از هم می‌باشد.

$$MOE = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad (4) \quad MOR = -\frac{M_{max} \cdot y_{max}}{I} = \frac{PL}{4I} \times \frac{d}{2} = \frac{PLD}{8I} \quad (3)$$

P بار اعمال شده بر روی تیر، L طول دهانه، δ خیز تیر و y_{max} فاصله بین سطح تیر تا وسط تیر (محور خنثی) و I نیز ممان اینرسی می باشد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

با توجه به متغیرهای مورد مطالعه در این تحقیق شامل نوع بال در دو سطح، شکل مغزی جان در دو سطح و تیمار رویه جان در دو سطح، نتایج به دست آمده از آزمون خمشی در قالب طرح فاکتوریل مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفتند تا تأثیر مستقیم و متقابل هر یک از عوامل مستقل بر مدول خمشی و مدول الاستیسیته در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. پس از ثبت معنی داری نتایج، با استفاده از آزمون مقایسه چند دامنه‌ای دانکن (DMRT) میانگین‌های نمونه‌ها گروه بندی شدند.

نتایج

میانگین مدول خمشی (MOR) و مدول الاستیسیته (MOE) و انحراف معیار نتایج به دست آمده از آزمون خمشی در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین مطابق با جدول ۲،

تجزیه واریانس نتایج به دست آمده از آزمون مقاومت خمشی نشان داد که اثر مستقل شکل مغزی، نوع بال بر مدول خمشی تیرهای ساخته شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد آماری معنی دار بوده است، اما اثر تیمار روکش در جان تیر بر روی مدول خمشی و مدول الاستیسیته از لحاظ آماری معنی دار نمی باشد. شکل مغزی بر مدول الاستیسیته از لحاظ آماری معنی دار اما نوع بال و تیمار روکش جان معنی دار نمی باشند. اثر متقابل شکل مغزی \times نوع بال، شکل مغزی \times نوع بال \times تیمار لایه‌های سطحی جان و نوع بال \times تیمار لایه سطحی بر روی مدول خمشی در سطح ۹۵ درصد اطمینان آماری معنی دار می باشد، در حالی که اثر متقابل شکل مغزی \times تیمار لایه سطحی جان بر روی مدول خمشی معنی دار نیست. اثر متقابل شکل مغزی \times نوع بال بر مدول الاستیسیته در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی دار می باشد. اثر متقابل نوع بال \times تیمار لایه سطحی جان معنی دار نمی باشد. اثر متقابل شکل مغزی \times تیمار لایه سطحی جان بر مدول الاستیسیته در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار می باشد. اثر متقابل شکل مغزی \times نوع بال \times تیمار لایه سطحی جان بر مدول الاستیسیته در سطح اطمینان ۹۵ درصد نیز معنی دار می باشد.

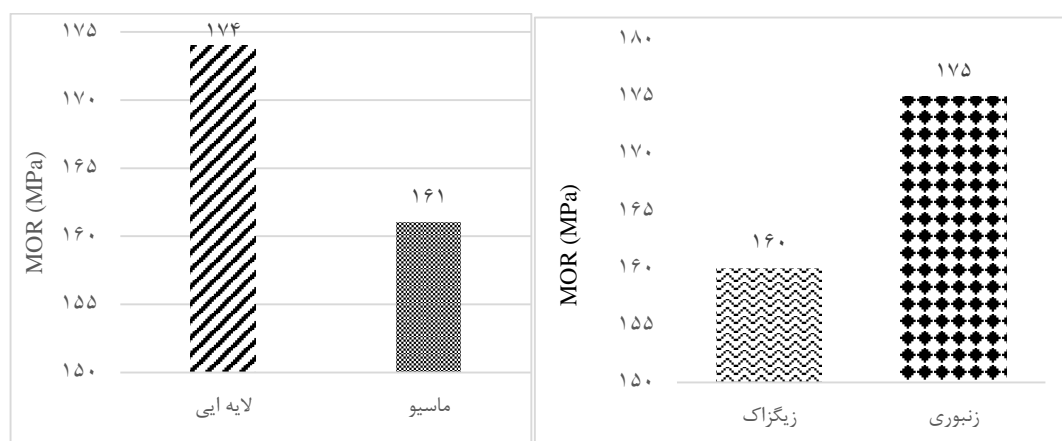
جدول ۱- میانگین و انحراف معیار مدول خمشی و مدول الاستیسیته

مغزی	فرآورده	لایی	میانگین MOR (MPa)	انحراف معیار	میانگین MOE (MPa)	انحراف معیار
زیگزاگی	لایه‌ای	با تیمار	۱۷۳/۳	۵/۷	۱۴۰۰۰	۱۶/۶۴
	لایه‌ای	بدون تیمار	۱۷۰	۱۰	۱۲۹۳۳	۳۵/۲۳
	ماسیو	با تیمار	۱۴۳/۳	۱۱/۵	۱۱۹۳۳	۱۸
زنبوری	لایه‌ای	با تیمار	۱۶۶/۷	۵/۷	۲۱۴۰۰	۲۹/۸۱
	لایه‌ای	بدون تیمار	۱۸۶/۷	۷/۵	۵۰۷۰۰	۲۷۶
	ماسیو	با تیمار	۱۷۵/۵	۶/۵	۱۹۵۳۳	۵۰/۶۳
	ماسیو	بدون تیمار	۱۶۰	۱۰	۲۲۶۶۷	۷۶/۱۷

جدول ۲- تجزیه واریانس مدول گسیختگی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی داری
شکل مغزی (MOR)	۱۲/۰۴۲	۱	۱۲/۰۴۲	۱۶/۰۵۶	۰/۰۰۱
(MOE)	۱۴۱۹۸۸/۱۶۷	۱	۱۴۱۹۸۸/۱۶۷	۱۲/۹۳۴	۰/۰۰۲
نوع بال (MOR)	۹/۳۷۵	۱	۹/۳۷۵	۱۲/۵۰۰	۰/۰۰۳
(MOE)	۳۶۰۳۷/۵۰۰	۱	۳۶۰۳۷/۵۰۰	۳/۸۲۳	۰/۰۸۹
تیمار لایه (MOR)	۰/۰۴۲	۱	۰/۰۴۲	۰/۰۵۶	۰/۸۱۷
(MOE)	۴۱۶۶۶/۶۶۷	۱	۴۱۶۶۶/۶۶۷	۳/۷۹۶	۰/۰۶۹
(MOR) (A)×(B)	۵/۰۴۲	۱	۵/۰۴۲	۶/۷۲۲	۰/۰۴۳
(MOE)	۳۱۱۰۴/۰۰۰	۱	۳۱۱۰۴/۰۰۰	۲/۸۳۳	۰/۰۱۴
(MOR) (A)×(C)	۱/۰۴۲	۱	۱/۰۴۲	۱/۳۸۹	۰/۲۵۶
(MOE)	۳۷۲۸۸/۱۶۷	۱	۳۷۲۸۸/۱۶۷	۳/۳۹۷	۰/۰۱۰
(MOR) (B)×(C)	۳/۳۷۵	۱	۳/۳۷۵	۴/۵۰۰	۰/۰۴۰
(MOE)	۲۰۰۶۸/۱۶۷	۱	۲۰۰۶۸/۱۶۷	۱/۸۲۸	۰/۲۳۰
(MOR) (A)×(B)×(C)	۱۵/۰۴۲	۱	۱۵/۰۴۲	۲۰/۰۵۶	۰/۰۰۰
(MOE)	۳۱۹۷۴/۰۰۰	۱	۳۱۹۷۴/۰۰۰	۲/۹۱۳	۰/۰۰۷
خطا (MOR)	۱۲/۰۰۰	۱۶	۰/۰۷۵		
(MOE)	۱۷۵۶۴۲/۶۶۷	۱۶	۱۰۹۷۷/۶۶۷		
کل (MOR)	۶۴۱۷/۰۰۰	۲۴			
(MOE)	۱۵۶۲۴۴۲/۰۰۰	۲۴			

(MOR): ضریب همبستگی: ۰/۷۴ ضریب اصلاحی: ۰/۶۳ (MOE): ضریب همبستگی: ۰/۶۵۹ ضریب اصلاحی: ۰/۵۱۰

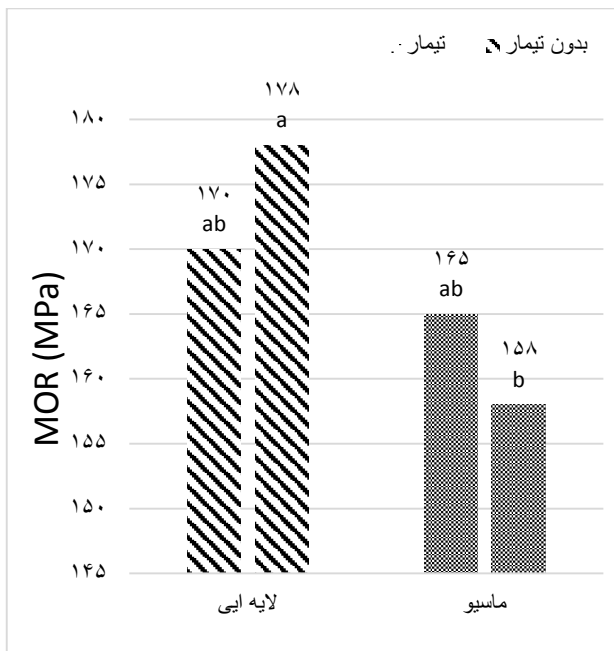


شکل ۲- تأثیر مستقل نوع مغزی بر MOR

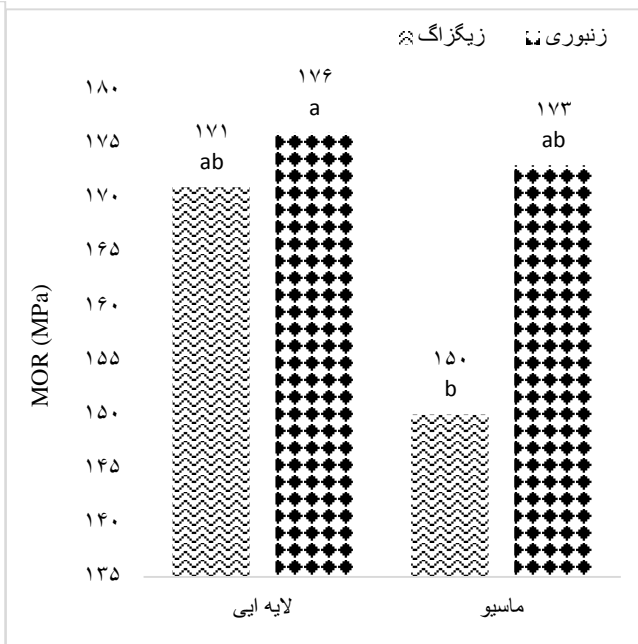
شکل ۳- تأثیر مستقل نوع بال بر MOR

لایه‌ای و در درجه بعد به مغزی لانه‌زنبوری و بال لایه‌ای متعلق بوده و کمترین میزان آن مربوط به مغزی زیگزاگی و چوب ماسیو می‌باشد. گروه‌بندی دانکن نیز سطوح مختلف مقادیر میانگین‌ها را در ۲ گروه قرار داده است (شکل ۴).

مطابق شکل (۲) مدول‌گسیختگی تیرهای ساخته شده با مغزی مقطع لانه‌زنبوری بیشتر از مغزی زیگزاگی است. همچنین تیرهایی که بال آنها از LVL هستند دارای MOR بیشتری از تیرهای با بال چوب ماسیو هستند. بیشترین میزان MOR مربوط به مغزی زیگزاگی و بال



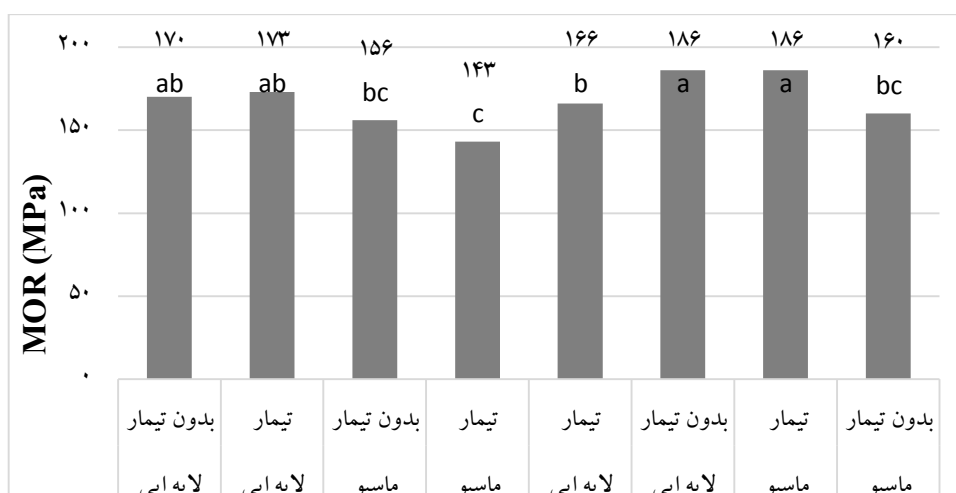
شکل ۵- تأثیر متقابل نوع مغزی و بال بر MOR



شکل ۴- تأثیر متقابل نوع مغزی و بال بر MOR

روکش شده با لایه تیمار نشده با بال لایه‌ای است و در یک گروه (a) با تیر با جان لانه‌زنبوری و روکش شده با لایه تیمار شده و با بال ماسیو قرار گرفته‌اند و کمترین میزان آن مربوط به تیر حاصل از بال ماسیو، جان زیگزاگی روکش شده بالایی تیمار شده می‌باشد که در یک گروه (c) با تیر ساخته شده از بال ماسیو و جان زیگزاگی روکش شده با لایه تیمار نشده قرار گرفته‌اند.

بیشترین میزان مدول‌گسیختگی مربوط به بال لایه‌ای و جان روکش شده بالایی تیمار نشده و کمترین میزان آن مربوط به تیر با بال چوب ماسیو و جان پوشیده شده بالایی تیمار نشده می‌باشد (شکل ۵). تأثیر متقابل سه‌گانه نوع بال، شکل مغزی جان و تیمار لایه سطحی جان در شکل ۶ ارائه شده است. به‌طورکلی، بیشترین مدول‌گسیختگی مربوط به تیر با جان لانه‌زنبوری

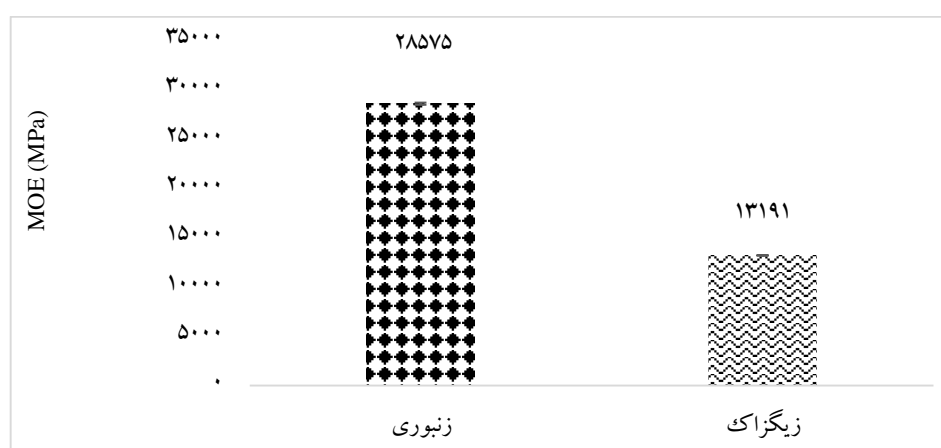


شکل ۶- تأثیر متقابل نوع مغزی، نوع بال و تیمار لایه‌های سطحی جان بر MOR

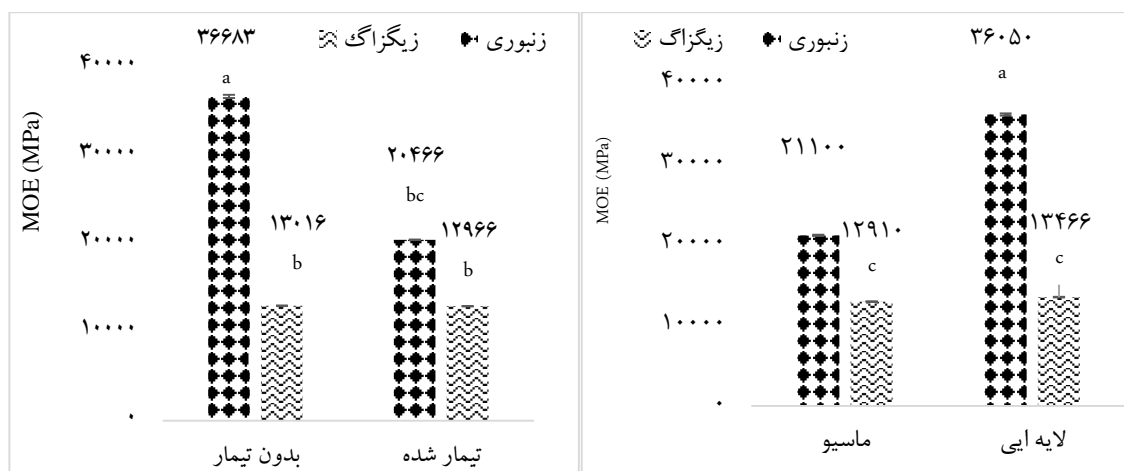
بررسی اثر متقابل شکل مغزی و تیمار رویه جان نشان داد که میانگین مدول الاستیسیته تیرها در سه گروه قرار داشته و بیشترین میزان مدول الاستیسیته مربوط به مغزی زنبوری و لایه بدون تیمار بوده است (شکل ۹). در طی تأثیر متقابل شکل مغزی، نوع بال و تیمار رویه جان، بیشترین مدول الاستیسیته مربوط به مغزی لانه‌زنبوری، بال LVL و لایه بدون تیمار جان بوده و مقادیر میانگین‌ها در ۲ گروه قرار دارد (شکل ۱۰).

در شکل ۷ اثر مستقیم نوع مغزی جان بر مدول الاستیسیته نشان داده شده است. مدول الاستیسیته تیرهای ساخته شده با مغزی لانه‌زنبوری ۵۳/۸۳ درصد بیشتر از مغزی زیگزاکی است.

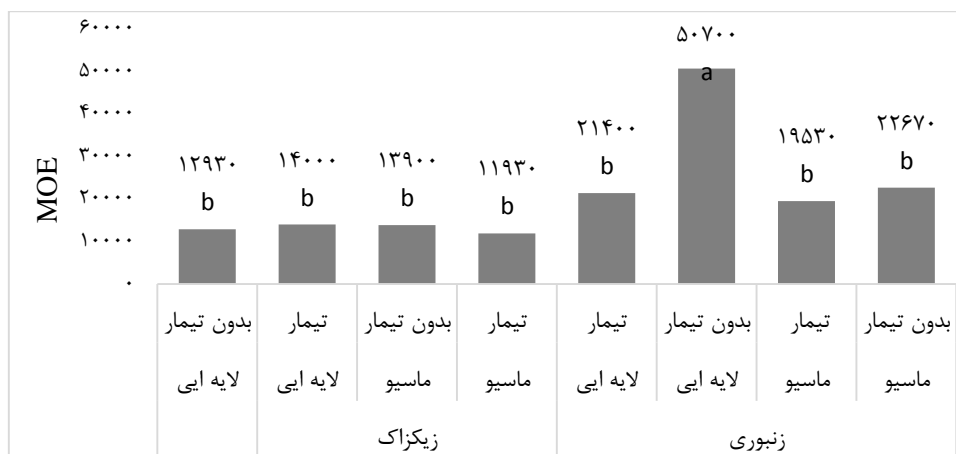
تیرهای با بال لایه‌ای و جان لانه‌زنبوری دارای مدول الاستیسیته بیشتری از تیرهای ساخته شده با چوب ماسیو و با جان زیگزاکی هستند و در سه گروه قرار می‌گیرند (شکل ۸).



شکل ۷- تأثیر مستقل نوع مغزی بر MOE



شکل ۸- تأثیر شکل مغزی × نوع بال بر MOE شکل ۹- تأثیر شکل مغزی × نوع تیمار لایه ای بر MOE





شکل ۱۰- تأثیر شکل مغزی × نوع بال × تیمار لایه جان بر MOE

بحث

علاوه بر آن، به دلیل تراکم زیاد، تخلخل سطحی لایه کاهش می‌یابد و امکان نفوذ مناسب رزین به داخل بافت چوب و لایه حاصل نشده (Nazerian, 2013) و باعث می‌شود تا اتصال مکانیکی در نتیجه عدم نفوذ مناسب و انبوه‌شدگی رزین در بافت متخلخل چوب به حداقل برسد. همزمان در طی پرس کردن لایه‌ها به مغزی حاصل از گونه سنگین اکالیپتوس رزین به اطراف تراوش کرده و عملاً به اندازه کافی در خط رزینی قرار نمی‌گیرد (Sivonen *et al.*, 2002). همچنین اعمال تیمار حرارت - فشار ساختار سلولی لایه را درهم خواهد شکست (Boonstra & Boke, 2006). از این رو، اگرچه نتایج نشان داده است که تیمار باعث کاهش مقاومت‌های مورد بررسی شده است، اما این کاهش از لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. در

در نتیجه اعمال تیمار حرارتی - فشار دانسیته لایه افزایش پیدا می‌کند؛ اما در نتیجه پیرولیز و شکست پلیمرهای ساختاری چوب (Nazerian *et al.*, 2016) لایه خاصیت ترد داشته و شکننده می‌شود (Winandy & Lebow, 2001). همزمان از فعالیت سطوح لایه کاسته شده، در نتیجه تشکیل ترکیبات حاصل از هیدرولیز پلی‌ساکاریدها و تشکیل گروه‌های آبگریز و انتقال آنها به سطح لایه خاصیت ترشوندگی سطح کاهش می‌یابد (Candan *et al.*, 2014) و امکان اتصال مناسب بین مغزی و لایه‌ها در جان مهیا نمی‌گردد. همزمان pH سطح لایه نیز بیش از حد کاهش یافته و پیش از موعد رزین استقرار یافته بین لایه و مغزی در جان منعقد می‌شود (Wang *et al.*, 2003).

سطحی (در اینجا بال) تحمل می‌گردد. افزایش دانسیته سبب شده است تا مقاومت خمشی افزایش یابد. با توجه به پدیده چسبندگی ۱ و پیوستگی ۲، کاربرد رزین همراه با نفوذ آن به داخل لایه‌ها و حفره‌ها و توسعه درهم روی مکانیکی ۳ باعث می‌شود تا احتمال گسیختگی در LVL در مقایسه با چوب ماسیو کاهش یابد. علاوه بر آن، توزیع عیوب در سراسر یک فراورده لایه‌ای، امکان تمرکز تنش در مقایسه با چوب ماسیو تا حد زیادی کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل وجود چوب واکنشی فراوان و وجود پرزهای زیاد غوطه‌ور در مایع رزینی امکان انتقال تنش از لایه‌ای به لایه دیگر فراهم شده و تردی خط چسب کاهش می‌یابد. از این رو کاربرد LVL در بال تیر از لحاظ مقاومتی مناسب‌تر می‌باشد و توصیه می‌گردد.

با فرض اینکه شکل زیگزاگی مغزی جان دارای شکلی ناودانی  و شکل لانه‌زنبوری مغزی جان دارای شکل  مستطیلی راست گوش است.

بر اساس (Leckie & Dal Bello, 2009) ممان اینرسی را می‌توان برای هر دو تیر به‌طور مجزا با روابط به ترتیب (۵) و (۶) محاسبه نمود.

$$I = \frac{bd_2^3 - (b - 2w)(d_2 - 2f)^3}{12} \quad (6)$$

نیروی حداکثر چنانچه مغزی جان تیر به شکل لانه‌زنبوری انتخاب گردد خیلی بیشتر از زیگزاگی می‌باشد. به دلیل سطح تحت بارگذاری بیشتر و دیواره‌های ضخیم‌تر در سطحی‌ترین لایه‌های تحت فشار بالایی و تحت کشش پایینی در شکل لانه‌زنبوری، نیروی لازم برای گسیختن تیر افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل اینکه عملاً در شکل راست گوش دو دیواره جانبی عمودی به‌طور پیوسته با دیواره‌های جانبی بالا و پایین (افقی) در ارتباط می‌باشند (برخلاف نوع زیگزاگی) و مانند دو ستون عمل می‌کنند، امکان انتقال تنش

طی خمش، عمده تنش خمشی در سطحی‌ترین لایه‌های تیرها اعمال شده و به تدریج در طی گذر از لایه‌های سطحی به سمت لایه‌های میانی مقدار تنش ایجاد شده در محور خشی به صفر تنزل می‌یابد. این کاهش تنش نشان‌دهنده آن است که عملاً کاربرد حتی مواد دارای مقاومت پایین نیز می‌تواند در لایه مغزی (در اینجا جان تیر) مورد استفاده قرار گیرد، بدون آنکه تأثیر معنی‌داری بر روی افت مقاومت‌های خمشی داشته باشد. به عبارت دیگر، می‌توان با توجه به هدف کاربرد مانند امکان سرباز که دچار تغییرات شدید رطوبتی می‌شوند، از مواد یا تیمارهایی استفاده نمود که تنش ناشی از تغییرات رطوبتی در نتیجه کاهش خواص جذب آب و رطوبت کاست، بدون آنکه از خواص مقاومت خمشی ماده مانند تیر متأثر گردند؛ بنابراین اصل معنی‌دار نبودن تأثیر تیمار حرارتی بر روی خواص خمشی تیر بسیار ایده‌آل می‌باشد.

در نتیجه کاربرد توأم فشار و حرارت در ساخت LVL و همزمان کاربرد رزین، دانسیته آن و در نتیجه ضریب فشردگی آن افزایش می‌یابد (Vick, 1999). در نتیجه مقاومت بال افزایش می‌یابد. تیر I شکل به‌عنوان یک سیستم یک تکه و صلب، به دلیل اینکه عمده بار تحت خمش توسط لایه‌های

$$I = \frac{wd_1^3}{12} + 2\left[\frac{bf^3}{12} + bf\left(\frac{d_1}{2}\right)^2\right] \quad (5)$$

I

ممان اینرسی، w ضخامت دیواره عمودی، f ضخامت دیواره افقی، b ضخامت کل مغزی جان، d1 فاصله بین مراکز دو دیواره افقی از هم در شکل ناودانی جان و d2 ارتفاع جان در شکل راست گوش می‌باشد. با جاگذاری ممان‌های اینرسی در فرمول کلی محاسبه تنش تیرها (معادله ۳) می‌توان از طریق محاسبه ممان خمشی (معادله ۲) که منحصرأ مربوط به تیرهای در معرض بار متمرکز سه نقطه می‌باشد، میزان نیروی حداکثر که می‌تواند هر یک از دو شکل جان تحمل نماید را محاسبه نمود. در این صورت،

حذف عیوب، اعمال تیمارهای مختلف و غیره در این چوب‌آلات می‌توان فراورده‌های مهندسی شده‌ای مانند تیرهای I شکلی را تولید نمود که نه تنها بتوان از چوب‌آلات کم کیفیت استفاده نمود و از آنها در تولید مصنوعات با ارزش افزوده بالاتر سود جست، بلکه همزمان باعث کاهش وزن آنها و در نتیجه کاهش هزینه‌های کارگری در حمل‌ونقل و نصب و غیره شد. ضمن آنکه با اعمال تغییرات فیزیکی یا شیمیایی و تیمارهای خاص بر روی ماده اولیه چوبی به اهداف خاص برای بهبود این فراورده‌ها دست یافت. در این بررسی سعی گردید تا امکان کاربرد چوب‌آلات دارخشک اکالیپتوس برای تولید تیرهای I شکل مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، اثر سبک‌سازی جان تیر از طریق تغییر در شکل جان، تیمار لایه سطحی جان تیر و کاربرد LVL در بال تیر بر روی مقاومت خمشی شامل MOR و MOE مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تیمار توأم حرارت‌دهی - فشرده‌سازی رویه‌های جان در تیر I شکل تأثیر معنی‌داری بر روی مقاومت خمشی نداشته است. در حالی که معمولاً تیمار حرارتی باعث کاهش خواص مکانیکی می‌گردد، اما خواص فیزیکی مانند جذب آب و رطوبت بهبود می‌یابد. با توجه به حیطة کاربرد تیرها در مکان‌های مختلف خارجی و داخلی، تیرها می‌توانند بدون آنکه دچار افت مقاومتی در نتیجه اعمال تیمار حرارتی شوند، کمتر تحت تأثیر تغییرات رطوبتی قرار گیرند. تأثیر نوع بال بر روی خواص مقاومت خمشی شامل MOR و MOE در سطح اعتماد آماری ۹۹ درصد اختلاف معنی‌داری داشته است، به طوری که بیشترین مقاومت خمشی را تیرهایی داشته‌اند که بال آنها از LVL ساخته شده بود. علاوه بر آن شکل مغزی جان تیر نیز بر روی MOR و MOE تأثیر معنی‌دار داشته است، به طوری که بیشترین مقاومت‌ها را تیرهایی داشته‌اند که در مغزی جان از لانه‌زنبوری که به منظور سبک‌سازی بکار رفته است، استفاده شده است.

در سطح کل داخلی لانه‌زنبوری می‌تواند به طور یکنواخت توزیع گردد (شکل ۱) (Baylor & Harte, 2013).
روش‌های مختلفی را می‌توان برای ساخت جان تیر و سبک‌سازی آنها طراحی و اعمال نمود (Lagaros *et al.*, 2008). در تمامی این طراحی‌ها مجراها (عوامل سبک‌سازی تیر) می‌توانند به طور عمود یا هم‌راستا با سطح جان استقرار یابند. در بررسی‌های انجام‌شده معلوم شده است با استقرار لانه‌زنبوری به صورت عمود بر سطح جان عملاً نقاط اتصال بین نیمه تحت فشار (نیمه بالایی تار خنثی) و نیمه تحت کشش (نیمه پایینی تار خنثی) با وجود افزایش ارتفاع تیر کاهش می‌یابد (Morrissey *et al.*, 2009). اگرچه، به طور کلی افزایش ارتفاع تیر باعث افزایش مقاومت خمشی می‌گردد، اما این افزایش منوط به تحمل نیروی برشی حداقلی تیر منتج شده از خمش می‌باشد (Cheng & Wang, 1995). به نحوی که اگر سطح اتصال به اندازه کافی نباشد، افزایش بارگذاری در نتیجه عدم انتقال تنش فشاری به سطح تحت تنش کششی منجر به شکست برشی در تار خنثی می‌گردد (Harte & Baylor, 2011). علاوه بر آن، در تمامی روش‌های استقرار مجاری داخل جان به دلیل نزدیکی زیاد لبه‌های بالایی و پایینی مجاری به سطحی‌ترین لایه‌های تحت تنش فشاری و کششی امکان فزونی یافتن سریع‌تر تمرکز تنش در آنها محتمل‌تر بوده و تیر تحمل بارگذاری کمتری را از خود نشان می‌دهد (Ardalany *et al.*, 2013). این در حالی است که با استقرار مجاری سبک‌سازی در راستا و هم‌جهت با لایه‌های سطحی جان، تمامی موارد مرتبط با افزایش تمرکز تنش در لایه‌های نزدیک به سطح تحت تنش فشاری و کششی تیر، تمرکز تنش ایجادشده در لبه‌های مجاری سبک‌سازی، عدم انتقال تنش فشاری به سطح تحت تنش کششی در خمش و غیره تقلیل یافته یا از بین می‌رود.

نتیجه‌گیری

کاربرد چوب‌آلات کم کیفیت به عنوان تیر در سازه‌های مختلف ساختمانی عملاً امکان‌پذیر نیست. با تغییر ابعاد،

منابع مورد استفاده

- 452-462.
- Morris, V., Gustafsson, P.J. and Serrano, E., 1995. The shear strength of light-weight beams with and without a hole - a preliminary study. COST 508 -Wood Mechanics Proc. of the 1995 Wood Mechanics Workshop on Mechanical Properties of Panel Products. Watford, UK.
- Nazerian, M., 2013. The lamination influence on properties of agro-based particleboard. *Wood Material Science and Engineering*, 8(2): 129-138.
- Nazerian, M., Moazami, V., Mohebbi Gargari, R., 2016. The effect of core layer treatment and almond shell powder content in the glue line on the pull off adhesion of sandwich panel. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 31(1): 141-153.
- Sivonen, H., Maunu, S., Sundholm, F., Jamsa, S., and Viitaniemi, P., 2002. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung*, 56:648-54.
- Vick, C.B., 1999. Chapter 9: Adhesive Bonding of Wood Materials. Forest Products Laboratory. 1999. Wood handbook—Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 p.
- Wang, X., Ross, R.J., Brashaw, B.K., Verhey, S.A., Forman, J.W., and Ericson, J.R., 2003. Flexural properties of laminated veneer lumber manufactured from ultrasonically rated red maple veneer. Forest Product Laboratory, FPL-RN-0288.
- Wang, S., and Cheng, J.J.R., 1995. Shear behaviour of OSB wood composite I-beams with web openings. Rep. submitted to Canadian Forest Service, Dept. of Civil Eng, Univ. of Alberta, Edmonton, Ala, Canada, 1995.
- Winandy, J.E., and Lebow P.K., 2001. Modeling strength loss in wood by chemical composition. Part i. an individual component model for southern pine. *Wood and Fiber Science*, 33:239-54.
- Boonstra, M. J., and Boke, T., 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh- und Werkst*, 64:204-11.
- Zhu, E.C., Guan, Z.w., Rodd, P.D., and Pope, D.J., 2005. Finite element modelling of OSB webbed timber I-beams with interactions between openings. *Advances in Engineering Software*, 36: 797-805.
- Ardalany, M., Fragiaco, M., Carradine, D., and Mos, P., 2013. Experimental behavior of Laminated Veneer Lumber (LVL) joists with holes and different methods of reinforcement. *Engineering Structures*, 56: 2154-2164.
- Baylor, G., and Harte, A.M., 2013. Finite element modelling of castellated timber I-joists. *Construction and Building Materials*, 47: 680-688.
- Breyer, D., Cobeen, k., Fridley, K., and Pollock, D., 2015. Design of wood structures—ASD/LRFD. New York: McGraw-Hill Education.
- Candan, Z., Buyuksari, U., Korkut, S., Unsal, O., and Cakicier, N., 2014. Surface Characteristics of Thermally Modified Plywood Panels. Proceedings of the 57th International Convention of Society of Wood Science and Technology June 23-27, 2014 - Zvolen, SLOVAKIA.
- Harte, A.M. and Baylor, G., 2011. Structural evaluation of castellated timber I-joists, *Engineering Structures*, 33: 3748-3754.
- Lagaros, N.D., Psarras, L.D., Papadrakakis, M., and Panagiotou, G., 2008. Optimum design of steel structures with web openings. *Engineering Structure*, 30: 2528-37.
- Leckie, F.A., and Dal Bello, D.J., 2009. Strength and Stiffness of Engineering Systems, Mechanical Engineering Series, 696 p.
- Malekzadeh Fard, K., Ebrahimi, M., Nazari, A., and Irani S., 2011. Buckling Analysis of composite sandwich panel with symmetric FGM core, using improved high-order theory. *Aerospace Mechanics Journal*, 8(1): 55-70.
- Morrissey, G.C., Dinehart, D.W., and Dunn, W.G., 2009. Wood I-joists with excessive web openings: an experimental and analytical investigation. *ASCE Journal of Structure and Engineering*, 135(6):655-65.
- McGraw, B., Denes, L., Lang, E.M., Davalos, J.F., Chen, A., Song, G., and Malla, R.B., 2010. Development of a Corrugated Wood Composite Web Panel for I-Joist from Discarded Veneer-Mill Residues. In Proceedings of the 12th ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Construction and Operations in Challenging Environments, Honolulu, Hawaii pp.

Effect of web configuration and flange type on bending strength of I-joist beams

M. Nazerian^{1*}, A. Rezaian² and M. Shamsian³

1*- Corresponding author, Associate professor, Department of Bio-systems, Faculty of New technologies Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran; morteza17172000@yahoo.com

2-MSc. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

3-Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Zabol, Zabol, Iran

Received: April, 2019

Accepted: Aug., 2019

Abstract

Bending strength of poplar species (*Populus deltoids*) and eucalyptus (*Eucalyptus spp*) I-joist with reduced weight using two methods of crinkling and honeycombing was studied. Investigated variables was including: a) type of flange, b) configuration of lightened core layer in web and c) thermal-pressure treatment surface layers of web. Flange type at two levels: 1) LVL from poplar wood and 2) eucalyptus wood, configuration of web core layer at two level: 1) crinkle and 2) honeycomb and type of treatment applied on surface layers of web which were prepared from poplar layers with 3 mm thick at two levels: 1) thermo-compressed treated and 2) untreated veneers. Mechanical properties of beam including modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) were selected and tested as dependent variables. Results were statistically analyzed in full factorial plot. After determination of results significance results, means of values were classified by Duncan Multiple Range Test (DMRT). Results showed that using LVL from poplar unlike its low density had higher MOR and MOE values compared with eucalyptus wood. In addition, in order to reduce the weight of the beam, using honeycomb configuration in web core layer generated higher strength in comparison with crinkle configuration. Treatment of surface layers of web had no effect on bending strength, statistically.

Keyword: I-joist beam, flange, web, crinkle, honeycomb, thermal-compress treatment.