جنگل و فرآورده‌های چوب، مجلهٔ منابع طبیعی ایران
دورهٔ ۷۲، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۸
ص ۲۶۳-۲۷۳

دانشکده منابع طبیعی
دانشگاه تهران

DOI: 10.22059/jfwp.2019.291193.1022

بررسی خواص مکانیکی تیرهای گلولام ساخته‌شده با آرایش متفاوت لایه‌ها و مسلح‌شده با میلگردهای فولادی

پرویز علی‌خوجه[۱]، محمودرضا حسینی طباطبایی[۲*]، حسینعلی رهدار[۲]، علی بیات کشکولی[۳]

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکدهٔ فنی مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی عمران دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۳. استاد گروه صنایع چوب و کاغذ دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه زابل، زابل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۳۰ ، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹

چکیده

یکی از محصولات چوبی مهندسی پرکاربرد در ساخت‌وسازها، تیرهای چوبی چندلایهٔ چسب‌شده (گلولام) است. گلولام از اتصال قطعه‌های لایه‌ای چوبی با طول و آرایش متفاوت ساخته می‌شود و امکان طراحی سازه‌های مرکب با ابعاد بزرگ را فراهم می‌کند. نگرانی اصلی در استفاده از تیرهای گلولام، دربارهٔ مقاومت، سختی و تغییر مکان آنهاست. در این مقاله به بررسی آزمایشگاهی نمونه‌های تیر زیر خمش چهارنقطه‌ای برای تعیین خواص مکانیکی آنها پرداخته شده است. تیرهای گلولام با طرح‌های متفاوت و به‌کمک میلگردهایی از زیر، بالا یا هر دو تقویت شد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که تقویت، نیروی نهایی را در تیرهای گلولام با لایه‌های یکسره ۲۲ تا ۴۹ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، در پی تقویت در نمونه‌های شاهد این‌گونه تیرها در مقایسه با تیرهای تقویت‌نشده، نیروی نهایی به ۱۱ تا ۸۵ درصد افزایش یافت. جذب انرژی در نمونه‌های تقویت‌شده در کشش و فشار نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده تنها در کشش و نمونهٔ شاهد بیشتر بود. ضریب گسیختگی تیرهای تقویت‌شده ارتباط مستقیمی با نوع تقویت دارد. تیرهای تقویت‌شدهٔ شاهد نسبت به تیرهای تقویت‌شده با لایهٔ یکسره، دارای درصد افت کمتر ضریب کشسانی بودند. همچنین با تقویت ناحیهٔ کشش و فشار شکست ترد کاهش چشمگیری یافت که در طراحی سازه‌های مقاوم به زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: آرایش متفاوت، تیرهای چوبی، رفتار خمشی، گلولام تقویت‌شده.

مقدمه

چوب و فرآورده‌های مهندسی‌شدهٔ آن نقش توسعه‌ای و اقتصادی مهمی در کشورهای توسعه‌یافته و نیز در حال توسعه داشته است. چوب به‌عنوان نوعی مادهٔ خام طبیعی، تجدیدشونده و دارای خصوصیات منحصربه‌فرد، مهم‌ترین مادهٔ ساختمانی در مصارف متعدد از جمله منازل مسکونی، ساختمان‌های اداری و صنعتی کوچک، سازه‌های آبی، برج‌های خنک‌کننده، تیرها و پل‌های راه و ترابری است [۱]. در طی دو دههٔ گذشته روش‌های جدید تقویت و افزایش اطمینان در ظرفیت تحمل بار، میزان مقاومت و تغییر شکل‌های شکست در اعضای سازه‌ای چوبی ابداع شده است که در حال توسعه‌اند. مهم‌ترین این روش‌ها استفاده از صفحات فلزی، صفحات پلیمری تقویت‌شده با الیاف، میلگردهای فلزی و میلگردهای پلیمری تقویت‌شده با

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۵۴-۳۱۲۳۲۰۲۰
Email: mr.htabatabaei@uoz.ac.ir

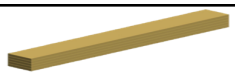
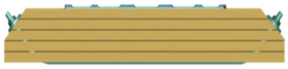
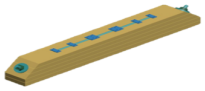
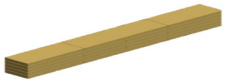
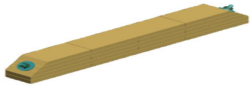
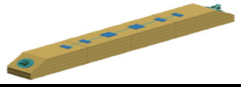
الیاف و الیاف مقاوم طبیعی و سنتزی است که به‌عنوان تقویت‌کننده در سطوح بیرونی یا لایه‌های داخلی اعضای چوبی استفاده می‌شوند [۲، ۳]. تحقیقات نشان داده است که گاهی استفاده از مواد مرکب می‌تواند از نظر ساختاری مناسب باشد و اجزای چوبی، مقاومت و انعطاف‌پذیری بیشتری را نسبت به عملکرد ذاتی چوب ارائه کنند [۴]. گلولام تقویت‌شده با میله‌های فولادی نوعی سیستم چندکاره را به وجود می‌آورد که همزمان خصوصیات گلولام مانند سختی و ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد. این یافته را می‌توان به افزایش اینرسی در مقطع مرکب نسبت داد. اثر میله‌ها در ناحیهٔ کششی برای جلوگیری از پارگی شکننده و در ناحیهٔ فشاری برای جلوگیری از خرد شدن تیر است. شواهد تجربی نشان می‌دهد که تقویت تیرهای چوبی با آرماتورهای فولادی می‌تواند تا حد زیادی مقاومت، سختی و ظرفیت حمل بار تیرها را افزایش و تغییر شکل را کاهش دهد [۵]. متفاوت با آنچه در تیرهای بتنی اتفاق می‌افتد، اثر تقویت تیرهای چوبی کاملاً متعادل است، زیرا تیرهای چوبی می‌توانند تنش‌های فشاری و کششی را تحمل کنند. بنابراین با پیش‌تنیده کردن می‌توان به مقاومت زیادی دست یافت که هزینهٔ کمی نیز دارد و میلگردهای فولادی پیش‌تنیدهٔ داخلی سبب بهبود سختی تیر گلولام و همچنین افزایش ظرفیت باربری آن می‌شود. نتایج عالی مربوط به خیز تیرها، به توزیع نیروهای داخلی و لنگرهای بین چوب و فولاد نسبت داده می‌شود [۶]. یک روش برای بهبود خواص مکانیکی تیرهای چوبی گلولام، وارد کردن میله‌های فولادی و اعمال یک سطح پیش‌تنیدگی متوسط در آرماتور است. این راهبرد می‌تواند به مقدار کافی شکل‌پذیری ایجاد کند [۷]. تیرهای تقویت‌شده در ناحیهٔ کششی و نیز در ناحیهٔ فشاری، سختی خمشی بیشتری نسبت به حالت بدون تقویت نشان می‌دهند که علت آن جلوگیری از کمانش ناگهانی یا تورق ناحیهٔ فشاری در اثر تقویت است [۸]. آرایش لایه‌ها تأثیر مهمی در خصوصیات خمشی محصولات چوبی لایه‌ای دارد و نمونه‌های با لایه‌های ضخیم و کوتاه کمترین مدول گسیختگی و همچنین کمترین ضریب کشسانی را خواهند داشت. در نتیجه برای بهبود خواص خمشی تیرهای لایه‌ای باید از لایه‌های بلندتر و نازک‌تر استفاده کرد [۹]. یکی از محدودیت‌های شناخته‌شده در استفاده از تیرهای گلولام، محدودیت جابه‌جایی عمودی اعمال‌شده توسط استانداردهاست. برای غلبه بر این ضعف مکانیکی مربوط به خواص چوب، استفاده از تیرهایی با مقطع قوی‌تر و در نتیجه سختی بیشتر، جایگزین خوبی است. از سویی این شیوه گاه از نظر معیار طرح معماری با توجه به کاهش فضای داخلی ساخت‌وساز امکان‌پذیر نیست، زیرا سبب از دست دادن جذابیت کاربردی ساختمان می‌شود. تحقیق دربارهٔ روش تقویت گلولام با تمرکز بر حالت حدی سرویس انجام گرفته و با قرار دادن ۲ و ۴ درصد فولاد در مقطع تیر چوبی، دیده شد که جابه‌جایی عمودی کاهش پیدا کرد و ظرفیت بار سرویس سازه افزایش یافت [۱۰]. در این پژوهش برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی تیرهای گلولام تقویت‌شده از نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. آرایش لایه‌ها و موقعیت قرارگیری تقویت از متغیرهای مورد نظر بوده است. در واقع این مقاله به بررسی بهبود خصوصیات مکانیکی، مانند سختی و ظرفیت باربری تیرهای گلولام می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

برای دستیابی به اهداف این پژوهش در مجموع دو گروه تیر گلولام شاهد و با لایه‌های یکسره ساخته شد که به روش‌های کاملاً یکسان تقویت شدند. در هر گروه ۹ تیر با سطح مقطع‌های ۱۲۵×۸۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در گروه تیرهای گلولام با لایه‌های یکسره هر تیر از پنج لایهٔ یکنواخت به ضخامت ۲۵ میلی‌متر ساخته شد. گروه دیگر، تیرهای گلولام شاهد بودند. هر تیر شامل پنج لایهٔ

یکنواخت به ضخامت ۲۵ میلی‌متر بود که هر لایه از کنار هم قرار گرفتن دو یا سه قطعهٔ مجزا با اتصال سربه‌سر به‌صورت آجری ساخته شد. در جدول ۱ نامگذاری و شماتیک روش‌های تقویت نمونه‌های با لایه‌های یکسره و روش‌های تقویت نمونه‌های شاهد نشان داده شده است. در هر گروه سه نمونه از تیرها از نوع گلولام بدون آرماتور (نمونهٔ شاهد) هستند. برای تیرهای مسلح، دو روش تقویت به‌کار گرفته شد. در روش اول یک میلگرد در ناحیهٔ کششی تیر در درون شیاری قرار گرفت و با عبور دو انتهای میلگرد از وسط مقطع، در دو سر تیر به‌وسیلهٔ واشر و مهره مهار شد. در روش دوم به‌منظور جلوگیری از لهیدگی تیر در ناحیهٔ فشاری از میلگرد فشاری استفاده شد. برای اتصال میلگرد ناحیهٔ فشاری بست‌هایی به آن جوش داده شد و برای جلوگیری از کمانش جانبی میلگرد، شیاری در بالای تیر ایجاد شد. سپس میلگرد توسط پیچ‌هایی در محل خود قرار گرفت. ازآنجا که در کارهای سازه‌ای، کاهش هزینه‌ها و اقتصادی کردن طرح‌ها همیشه اهمیت دارد، به‌منظور کاهش مصالح مصرفی و در نتیجه اقتصادی کردن طرح‌های تقویت، میلگرد فشاری فقط در ناحیهٔ تنش بحرانی تیر قرار داده شد. ناحیهٔ تنش بحرانی تیر، ناحیهٔ خمش خالص است که ۶۰۰ میلی‌متر به‌دست آمد و برای اطمینان طول میلگرد فشاری ۱۰۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد.

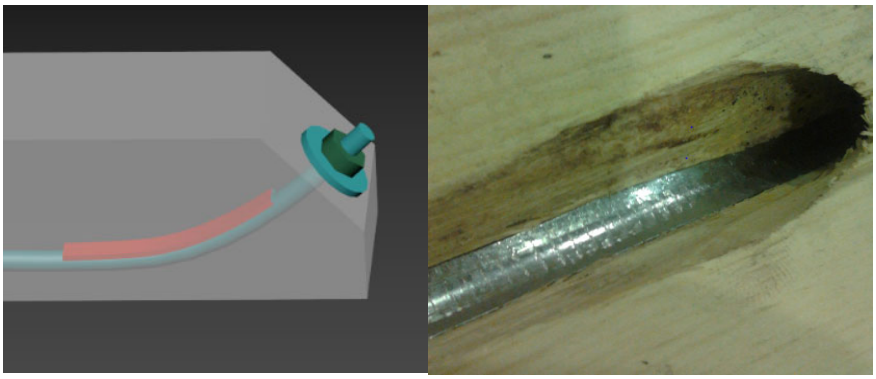
جدول ۱. نام‌گذاری نمونه‌ها براساس چیدمان لایه و تقویت

مشخصات تیر آزمایش‌شده	نام مختصر	شماتیک شکل تیر	
		نمای جلو	نمای سه‌بعدی
گلولام با لایه‌های یکسره	G		
گلولام تقویت‌شده در ناحیهٔ کششی	BRG		
گلولام تقویت‌شده در ناحیهٔ کششی و فشاری	BTRG		
تیر گلولام شاهد	GA		
گلولام شاهد تقویت‌شده در ناحیهٔ کششی	BRGA		
گلولام شاهد تقویت‌شده در ناحیهٔ کششی و فشاری	BTRGA		

به‌منظور جلوگیری از تمرکز تنش در محل قوس میلگرد کششی، یک قطعه فلزی به ابعاد ۱۵۰×۱۰×۲ میلی‌متر تعبیه شد تا از لهیدگی چوب در این محل جلوگیری کند (شکل ۱). ازآنجا که در ساخت سازه‌های چوبی توجه به زیبایی و حفظ ظاهر طبیعی چوب ضروری است، در ناحیهٔ کششی تیر شیاری ایجاد شد تا میلگرد ناحیهٔ کششی درون آن قرار گیرد و زیبایی طبیعی چوب از بین نرود.

مشخصات مصالح برای تولید تیر

مشخصات قطعه‌های چوبی، چسب و آرماتورهای استفاده‌شده در این تحقیق به‌شرح زیر است.



شکل ۱. محل قرارگیری قطعهٔ فلزی برای جلوگیری از تمرکز تنش

چسب

چسب به‌کاررفته برای اتصال لایه‌ها، نوعی پلیمر سنتزی لاستیکی است. این ماده در دستهٔ پلی‌وینیل استرها با فرمول عمومی 2RCOOCHCH قرار می‌گیرد. تنش برشی این چسب ۵/۸۲۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع است. قبل از چسباندن لایه‌ها به هم هر گونه گردوغبار از سطح لایه‌ها پاک شد تا اتصال لایه‌ها به‌خوبی انجام پذیرد. خصوصیات این چسب مطابق کاتولوگ کارخانه نشان داده شده است (جدول ۲).

لایه‌های چوبی

لایه‌های چوبی به‌کاررفته برای ساخت تیر از گونهٔ چوبی نراد با نام تجاری Abies است که به مقاطعی با ابعاد ۲۵×۸۰ میلی‌متر برش خورد. به‌منظور اتصال بهتر لایه‌ها با چسب، رطوبت چوب در زمان ساخت نمونه‌ها به ۸/۵ درصد کاهش داده شد. برای به‌دست آوردن خصوصیات مکانیکی چوب (جدول ۳) از نمونه‌های کوچک و کاملاً عاری از هرگونه عیب، از استاندارد ASTM-D143 استفاده شد [۱۱].

جدول ۲. خصوصیات چسب مصرفی لایه‌ها

خصوصیات مکانیکی	مقادیر (N/mm^2)
تنش برشی مقاوم	۵/۸۲
مدول الاستیسیتهٔ برشی	۸۶۶۵

جدول ۳. خصوصیات مکانیکی لایه‌های چوب

خصوصیات مکانیکی	مقادیر (N/mm^2)	انحراف معیار
مقاومت فشاری حد تناسب موازی با الیاف	۱۴/۲	۰/۲۱۶
مقاومت فشاری نهایی موازی با الیاف	۳۵/۲	۰/۱۷
مدول الاستیسیتهٔ فشاری موازی با الیاف	۱۷۶۵	۱۰/۸۰
مقاومت کششی حد تناسب موازی با الیاف	۱۶/۰۸	۰/۱۷
مقاومت کششی نهایی موازی با الیاف	۶۳/۳	۰/۳۵
مدول الاستیسیتهٔ کششی موازی با الیاف	۲۵۳۳	۶/۲۴
مقاومت برشی حد تناسب موازی با الیاف	۵/۶۱	۰/۲۲۵
مقاومت نهایی برشی موازی با الیاف	۷/۴۵	۰/۱۲
مدول الاستیسیتهٔ برشی موازی با الیاف	۳۵	۱/۶۳
مقاومت خمشی حد تناسب موازی با الیاف	۳۳/۵	۲/۶۸
مقاومت نهایی خمشی موازی با الیاف	۴۷/۵	۱/۰۸
مدول الاستیسیتهٔ خمشی موازی با الیاف	۷۱۸۷/۹	۲/۳۹

میلگردهای فولادی

میلگردهای تقویت‌کنندهٔ تیر، آرماتورهای نرم بدون آج (ϕ ۱۰) است که ۱۰ میلی‌متر قطر دارد و طول آن ۱۰۰۰ میلی‌متر برای ناحیهٔ فشاری است. جدول ۴ خصوصیات مکانیکی این میلگردها را نشان می‌دهد.

جدول ۴. خصوصیات میلگردهای فولادی

خصوصیات مکانیکی	مقادیر (N/mm^2)
مدول الاستیسیته (MPa)	۲×۱۰۵
تنش تسلیم (kg/cm^2)	۲۳۰۰
تنش نهایی (kg/cm^2)	۳۷۰۰

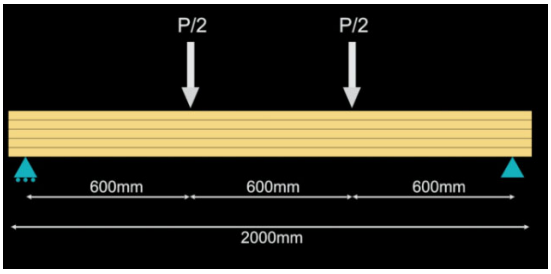
ساخت تیرها

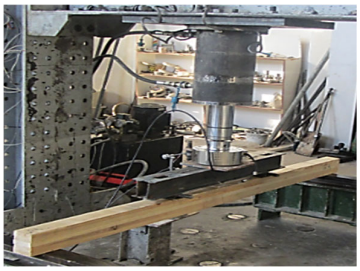
در مرحلهٔ اول ساخت تیرها ابتدا لایه‌ها با چسب به هم متصل شدند و ۲۴ ساعت تحت فشار قرار گرفتند. پس از خشک شدن چسب پاک‌سازی چسب اضافه انجام گرفت و ابعاد سطح مقطع در عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۸۰ میلی‌متر و ۱۲۵ میلی‌متر تنظیم شد. سپس شیارهایی گرد به قطر ۱۰ میلی‌متر در بالا و پایین تیر ایجاد شد تا میلگردها در آن قرار گیرد. علت ایجاد شیارهای گرد جلوگیری از تمرکز تنش در محل قرارگیری میلگردهاست. سپس برای مهار دو انتهای میلگرد کششی، دو انتهای تیر با زاویهٔ ۳۰ درجه برش داده شد و سوراخی به قطر ۱۰ میلی‌متر برای عبور میلگرد کششی در هر طرف ایجاد شد. سپس برای جلوگیری از تمرکز تنش در محل قوس میلگرد کششی، قطعات فلزی به ابعاد ۱۵۰×۱۰×۲ میلی‌متر روی چوب نصب شد. در پایان میلگردهای تقویت‌کنندهٔ بالا و پایین در محل خود قرار داده شدند.

معرفی آزمایش‌ها و مبانی نظری

آزمون خمشی

تیرها تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفتند که مطابق با روش استاندارد ASTM D198 مربوط به روش‌های آزمون استاتیکی استاندارد تیرهای چوبی در ابعاد سازه‌ای است [۱۲]. طول دهانه، ۱۸۰۰ میلی‌متر و طول هر یک از بخش‌ها ۶۰۰ میلی‌متر است (شکل ۲). هر افزایش بار (ΔP) و جابه‌جایی عمودی مربوط در وسط دهانهٔ تیر (Δu)، توسط یک سیستم ثبت داده‌ها ثبت شد.





شکل ۲. طرح استاتیکی نمونه‌ها

ضریب کشسانی ظاهری (MOE)

ضریب کشسانی یا ضریب یانگ، شیب منحنی تنش و کرنش محوری است که برای هر ماده یک ثابت است. به این دلیل که در آزمایش‌های خمش، تنش‌های برشی به وجود می‌آید و لنگر خمشی خالص موجب تغییر مکان تیر نمی‌شود. MOE را ضریب کشسانی ظاهری می‌نامند. مقدار MOE در آزمایش‌های خمش چهارنقطه‌ای با رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود. در این رابطه از اثر برش چشم‌پوشی شده است.

$$MOE = \frac{P_{pl} \times a}{48 I \delta}\left(3L^2 - 4a^2\right) \qquad (1)$$

در این رابطه P_{pl} نیرو درحد تناسب، δ تغییر مکان در ناحیهٔ حد تناسب، a فاصلهٔ لبهٔ تکیه‌گاه تا اولین نقطهٔ بارگذاری، L طول دهانهٔ بارگذاری و I گشتاور دوم سطح مقطع است.

ضریب گسیختگی (MOR)

ضریب گسیختگی که با MOR نشان داده می‌شود پرکاربردترین مقیاس مقاومت خمشی مواد مرکب چوب است. از طرفی MOR مانند ضریب کشسانی یک ضریب واقعی نیست. وقتی تنش از حد تناسب می‌گذرد، رابطهٔ بین تنش و کرنش دیگر خطی نیست. در نتیجه به‌علت درست نبودن توزیع خطی تنش در مقطع عرضی تیر، رابطهٔ MOR دارای محدودیت می‌شود. بنابراین MOR تنش واقعی نیست و تنها تقریبی از تنش حداکثر خمشی واقعی است. مقدار MOR از رابطهٔ ۲ به‌دست می‌آید.

$$MOR = \frac{3P_u a}{bh^2} \qquad (۲)$$

P_u بارگسیختگی، a فاصلهٔ لبهٔ تکیه‌گاه تا اولین نقطهٔ بارگذاری، b پهنا و h ارتفاع مقطع عرضی تیر است.

سفتی خمشی تیر

برای محاسبهٔ سفتی خمشی ($E_w I_{eq}$) تیرهای تحت آزمایش از رابطهٔ ۳ استفاده می‌شود که در آن E_w ضریب کشسانی، I_{eq} ممان اینرسی معادل در هر گام بارگذاری، L طول دهانهٔ تیر، a فاصلهٔ تکیه‌گاه تا اولین نقطهٔ اعمال بار، ΔP مقدار افزایش بار و Δu جابه‌جایی عمودی در وسط دهانهٔ تیر است.

$$E_w I_{eq} = \frac{\Delta p \times a}{48\Delta u} \times \left(3L^2 - 4a^2\right) \qquad (۳)$$

ازآنجا که فاصلهٔ بین دو نقطهٔ بارگذاری (L-2a)، برابر با a در نظر گرفته شد، با قرار دادن a = L/3 در رابطهٔ ۳، سفتی خمشی تیر به‌صورت رابطهٔ ۴ بیان می‌شود.

$$E_w I_{eq} = \frac{23 \times \Delta P \times L^3}{1296 \times \Delta u} \qquad (۴)$$

نتایج و بحث

عملکرد سازه‌ای در تیرهای گلولام تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ شاهد و با لایه‌های یکسره تحت آزمون خمش چهارنقطه‌ای براساس استاندارد ASTM D 198-99 در این بخش بررسی شده است. نمودار بار– جابه‌جایی وسط دهانهٔ تیر به‌صورت متفاوت برای نمونه‌ها ثبت شده است. نمودارهای بار– جابه‌جایی نشان می‌دهد که عملکرد تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشده متفاوت است.

نمودار بار– جابه‌جایی

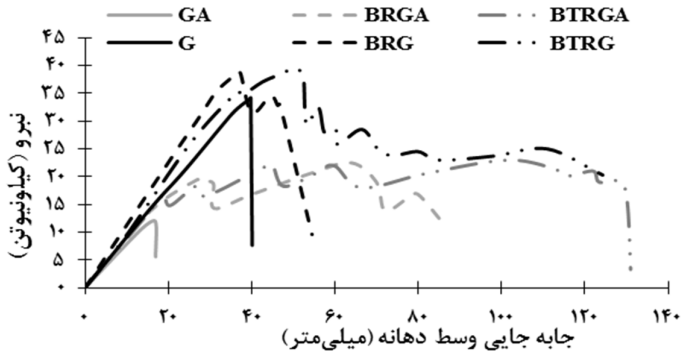
درصد افزایش تغییر مکان در ناحیهٔ تسلیم و پس از اولین شکست در تیرهای تقویت‌شدهٔ شاهد دارای افزایش زیاد نسبت به تیرهای تقویت‌نشده بود، ولی در تیرهای تقویت‌شده با لایه‌های یکسره این مقدار کاهش یافت (شکل ۳). در نتیجه تیرهای گلولام با لایه‌های یکسرهٔ تقویت‌شده برای سازه با محدودیت خیز قائم مناسب است، ولی تیرهای گلولام شاهد در سازه‌های انعطاف‌پذیر عملکرد خوبی خواهد داشت. منحنی‌های بار– جابه‌جایی تیرهای تقویت‌شده از هر دو نوع به‌دلیل پارگی تدریجی الیاف ناحیهٔ کششی چوب، دارای افت‌های پله‌ای در ناحیهٔ شکست بودند. نمودار بار جابه‌جایی نمایندهٔ تیرهای گروه‌های مختلف آزمایش‌شده نشان می‌دهد که گلولام با لایه‌های یکسره مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند، ولی نرخ افزایش مقاومت در نمودارهای گلولام شاهد در اثر تقویت بیشتر است. جذب انرژی در نمونه‌های تقویت‌شده در کشش و فشار در هر دو روش تقویت نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده در کشش و نمونهٔ شاهد بیشتر است (شکل ۳).

با توجه به شیب نمودارها نمونه‌های نوع BRG بیشترین سفتی خمشی و بار سرویس را دارد. بررسی منحنی‌ها نشان می‌دهد که آرایش منقطع لایه‌های چوبی در گلولام‌های شاهد، به استفاده از قطعات بدون استفاده منجر می‌شود و از نظر اقتصادی بسیار مقرون‌به‌صرفه است، ولی سبب کاهش ظرفیت مقطع می‌شود و برای جبران این نقص می‌توان با استفاده از تقویت، ظرفیت نهایی را تا دوبرابر و جابه‌جایی وسط دهانه را تا چهاربرابر افزایش

داد. در تیرهای گلولام با لایه‌های یکسره، تقویت تیر سبب افزایش حدود ۲۵ درصدی ظرفیت نهایی و سه‌برابر شدن جابه‌جایی نهایی وسط دهانه شد.

ضریب کشسانی MOE

مقادیر میانگین و میزان افزایش MOE تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ گلولام شاهد و با لایه‌های یکسره در جدول ۵ آورده شده است. مقدار متوسط MOE تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GA به‌ترتیب ۱۰/۲۰۴ و ۱۰/۲۱۶ کیلونیوتن بر میلی‌متر مربع به‌دست آمد. بیشترین افزایش MOE در گروه گلولام با لایه‌های یکسره، ۰/۱۱ درصد و برای گروه گلولام شاهد ۴/۴۵- درصد کاهش دیده شد. به‌طور کلی گروه گلولام شاهد، کاهش بیشتری در ضریب کشسانی، نسبت به نمونهٔ دارای لایه‌های یکسره داشت. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین کاهش ضریب کشسانی برای نمونهٔ BRGA نسبت به BRG بود که به مقدار ۱۲/۳۵ درصد محدود شده است و نشان می‌دهد که حتی با استفاده از نمونه‌های شاهد به‌جای نمونه‌های با لایه‌های یکسره، درصد کاهش بار سرویس چندان زیاد نیست.



شکل ۳. نمودار بار جابه‌جایی وسط دهانهٔ تیرهای آزمایش‌شده

جدول ۵. مقادیر مربوط به متوسط تغییرات MOE (کیلو نیوتن بر میلی‌متر مربع)

گروه	نام تیر	میانگین	بیشترین	متوسط درصد نسبت به G	متوسط درصد نسبت به GA
گلولام با لایه‌های یکسره	G	۱۰/۲۰۴	۱۰/۹۲۹	۰	۸/۸۸
	BRG	۱۰/۲۱۶	۱۰/۸۴۵	۰/۱۱	۹/۰۱
	BTRG	۶/۹۲۰	۷/۸۱۲	-۳۲/۱۸	-۲۶/۱۵
گلولام شاهد	GA	۹/۳۷۱	۹/۹۶۸	-۸/۱۶	۰
	BRGA	۸/۹۵۴	۱۱/۰۸۷	-۱۲/۲۵	-۴/۴۵
	BTRGA	۶/۱۴۴	۷/۱۲۱	-۳۹/۷۸	-۳۴/۴۳

سفتی خمشی (EI)

مقادیر متوسط و میزان افزایش سفتی خمشی (EI) تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ گلولام شاهد و با لایه‌های یکسره در جدول ۶ ذکر شده است. با توجه به جدول، مقدار متوسط سفتی خمشی (EI) تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GA به‌ترتیب ۸۹/۶۰۷ و ۸۲/۲۹۲ ($KN.mm^2$) به‌دست آمد. بیشترین افزایش سفتی خمشی (EI) در گروه گلولام با لایه‌های یکسره، ۳۷/۸۹ درصد و برای گروه گلولام شاهد تا ۳۱/۵۹ درصد مشاهده شد. بیشترین کاهش سفتی خمشی برای نمونهٔ BRGA نسبت به BRG بود که به مقدار ۱۲/۳۵ درصد محدود شده و بیانگر این است که حتی با به‌کارگیری نمونه‌های شاهد به‌جای نمونه‌های با لایه‌های یکسره، درصد کاهش سفتی خمشی چشمگیر نیست.

جدول ۶. مقادیر مربوط به میانگین تغییرات سفتی خمشی (EI) ($KN.mm^2$)

گروه	نام تیر	میانگین	بیشترین	متوسط درصد نسبت به G	متوسط درصد نسبت به GA
	G	۸۹/۶۰۷	۵۹/۹۶۹	۰	۸/۸۸
گلولام با لایه‌های یکسره	BRG	۱۲۳/۵۶	۱۳۱/۱۴۸	۳۷/۸۹	۵۰/۱۴
	BTRG	۱۱۴/۷۵	۱۲۹/۵۳۰	۲۸/۰۵	۳۹/۴۴
	GA	۸۲/۲۹۲	۸۷/۵۲۶	−۸/۱۶	۰
گلولام شاهد	BRGA	۱۰۸/۲۹	۱۳۴/۰۸۰	۲۰/۸۴	۳۱/۵۹
	BTRGA	۱۰۱/۸۶	۱۱۸/۰۶۹	۱۳/۶۷	۲۳/۷۷

جدول ۷. مقادیر مربوط به متوسط تغییرات ضریب گسیختگی (MOR) (N/mm^2)

گروه	نام تیر	میانگین	بیشترین	متوسط درصد نسبت به G	متوسط درصد نسبت به GA
	G	۶۰/۱۸	۶۷/۰۹	۰	۱۴۹/۶۰
گلولام با لایه‌های یکسره	BRG	۶۱/۰۶	۶۳/۶۱	۱/۴۶	۱۵۳/۲۵
	BTRG	۳۷/۱۶	۴۰/۲۱	−۳۸/۲۵	۵۴/۱۲
	GA	۲۴/۱۱	۲۴/۳۵	−۵۹/۹۳	۰
گلولام شاهد	BRGA	۳۵/۵۶	۳۶/۴۶	−۴۰/۹۱	۴۷/۴۹
	BTRGA	۲۲/۶۵	۲۳/۷۸	−۶۲/۳۶	−۶/۰۵

ضریب گسیختگی (MOR)

مقادیر متوسط و میزان افزایش ضریب گسیختگی (MOR) تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ گلولام شاهد و با لایه‌های یکسره در جدول ۷ ذکر شده است. مقدار متوسط ضریب گسیختگی (MOR) تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GA به‌ترتیب ۶۰/۱۸ و ۲۴/۱۱ (N/mm^2) به‌دست آمد. بیشترین افزایش ضریب گسیختگی (MOR) در گروه گلولام با لایه‌های یکسره، ۱/۴۶ درصد و برای گروه گلولام شاهد تا ۴۷/۴۹ درصد دیده شد. همچنین رشد منفی در نمونه‌های دارای میلگرد فشاری مشاهده شد. با توجه به این جدول، بیشترین کاهش ضریب گسیختگی برای نمونهٔ GA نسبت به G بوده که به ۵۹/۹۳ درصد محدود شده و بیانگر این است که با افزایش درصد مصالح تقویت، درصد تغییرات نسبی استفاده از نمونه‌های شاهد به‌جای نمونه‌های با لایه‌های یکسره کاهش می‌یابد.

نیروی حد نهایی (F_u)

مقدار متوسط نیروی حد نهایی (F_u) تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GA به‌ترتیب ۳۱/۶۲ و ۱۲/۰۷ کیلو نیوتن به‌دست آمد. بیشترین افزایش نیروی حد نهایی (F_u) در گروه گلولام با لایه‌های یکسره، ۲۲/۴۹ درصد و برای گروه گلولام شاهد تا ۸۵/۱۱ درصد مشاهده شد. به‌طور کلی گروه گلولام با لایه‌های یکسره دارای مقادیر بیشتر و رشد کمتر نیروی حد نهایی (F_u)، نسبت به نمونهٔ تقویت‌نشدهٔ خود در مقابل گروه گلولام شاهد است.

تغییر مکان حد تناسب (D_p)

مقادیر متوسط و میزان افزایش تغییر مکان حد تسلیم (D_p) تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ گلولام با لایه‌های یکسره و شاهد در جدول ۸ ذکر شده است. با توجه به جدول، مقدار متوسط تغییر مکان حد تسلیم (D_p) تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GA به‌ترتیب ۳۲/۳۸ و ۱۰/۰۷ میلی‌متر به‌دست آمد. بیشترین افزایش تغییر مکان حد تسلیم (D_p) برای گروه گلولام شاهد تا ۹۵/۹۲ درصد مشاهده شد.

با توجه به جدول ۸، بیشترین کاهش تغییر مکان حد تسلیم برای نمونهٔ GA نسبت به G بود که به ۶۸/۹۰ درصد محدود شده و بیانگر این است که با استفاده از نمونه‌های شاهد به‌جای نمونه‌های با لایه‌های یکسره درصد کاهش تغییر مکان حد تسلیم افزایش چشمگیری می‌یابد.

جدول ۸. مقادیر مربوط به متوسط تغییرات تغییر مکان حد تناسب (میلی‌متر)

گروه	نام تیر	میانگین	بیشترین	متوسط درصد نسبت به G	متوسط درصد نسبت به GA
گلولام با لایه‌های یکسره	G	۳۲/۳۸	۳۶/۷	۰	۲۲۱/۵۴
	BRG	۳۲/۶۸	۳۵	۰/۹۲	۲۲۴/۵۲
	BTRG	۳۲/۴۹	۳۴/۵	۰/۳۳	۲۲۲/۶۴
	GA	۱۰/۰۷	۱۲/۹۹	-۶۸/۹۰	۰
گلولام شاهد	BRGA	۱۵/۳۷	۱۷/۱	-۵۲/۵۳	۵۲/۶۳
	BTRGA	۱۹/۷۳	۲۱/۵۱	-۳۹/۰۶	۹۵/۹۲

جدول ۹. مقادیر مربوط به متوسط تغییرات تغییر مکان حد نهایی (میلی‌متر)

گروه	نام تیر	میانگین	بیشترین	متوسط درصد نسبت به G	متوسط درصد نسبت به GA
	G	۳۸/۵۵	۴۳/۶۹	۰	۱۵۲/۷۸
گلولام با لایه‌های یکسره	BRG	۳۸/۴۳	۳۹/۸۶	-۰/۳۱	۱۵۲
	BTRG	۴۲/۶۵	۴۹/۶۶	۱۰/۶۳	۱۷۹/۶۷
	GA	۱۵/۲۵	۱۶/۶۹	-۶۰/۴۴	۰
گلولام شاهد	BRGA	۶۳/۳۴	۶۴/۲۳	۶۴/۳۰	۳۱۵/۳۴
	BTRGA	۸۳/۵۴	۱۰۰/۸۰	۱۱۶/۷۰	۴۴۷/۸۰

تغییر مکان حد نهایی D_u

مقادیر میانگین و میزان افزایش تغییر مکان حد نهایی (D_u) تیرهای تقویت‌شده و تقویت‌نشدهٔ گلولام با لایه‌های یکسره و شاهد در جدول ۹ ذکر شده است. با توجه به جدول، مقدار میانگین تغییر مکان حد نهایی (D_u) تیرهای تقویت‌نشدهٔ G و GAبه‌ترتیب ۳۸/۵۵ و ۱۵/۲۵ میلی‌متر به‌دست آمد. بیشترین افزایش تغییر مکان حد نهایی (D_u) در گروه گلولام با لایه‌های یکسره، ۱۰/۶۳ درصد و در گروه گلولام شاهد تا ۴۴۷/۸۰ درصد مشاهده شد. به‌طور کلی گروه گلولام شاهد مقدار رشد بسیار زیادی داشت. عملکرد این محصولات مرکب تقویت‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد بهبود پیدا می‌کند. تیرهای گلولام تقویت‌شده با میلگردهای فولادی در قسمت تحت فشار و کشش دارای خصوصیات مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های شاهد هستند و این عملکرد بهتر در بیشتر تحقیقات گذشته تأیید شده است [۸-۵]. گلولام‌های با لایه‌های یکسره دارای مقاومت مکانیکی بهتری نسبت به گلولام‌های شاهد با لایه‌های منقطع با اتصال سربه‌سر است که علت آن، خواص خمشی (مدول گسیختگی و ضریب ارتجاعی) لایه‌های بلندتر گلولام‌های با لایه‌های یکسره است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های مکانیکی تیرهای چوبی گلولام شاهد و گلولام با لایه‌های یکسره، تقویت‌شده و تقویت‌نشده پرداخته شد. براساس نتایج آزمایش‌ها، در گروه گلولام با لایه‌های یکسره که تنها با میلگرد ناحیهٔ کششی تقویت شده بود، مقدار سختی خمشی در مقایسه با نمونهٔ تقویت‌نشدهٔ آن، ۳۷/۸۹ درصد افزایش یافت. برای نمونهٔ BTRG که دارای میلگرد تقویتی در ناحیهٔ فشاری و کششی بود، در مقایسه با نمونهٔ تقویت‌نشدهٔ نظیر آن، سختی خمشی ۲۸/۰۵ درصد افزایش یافت. در نتیجهٔ به‌کارگیری میلگرد ناحیهٔ فشاری با مشخصات این پژوهش، برای گروه گلولام با لایه‌های یکسره، نرخ افزایش سفتی خمشی نسبت به نمونهٔ BRG کاهش یافت. در گروه گلولام شاهد که تنها یک میلگرد در ناحیهٔ کششی داشت، مقدار سفتی خمشی در مقایسه با نمونهٔ تقویت‌نشده ۳۱/۵۹ درصد افزایش یافت. برای نمونهٔ BTRGA که دارای میلگرد ناحیهٔ فشاری و کششی بود، مقدار افزایش سفتی خمشی در مقایسه با نمونهٔ تقویت‌نشده ۲۳/۷۷ درصد بود. تمام تیرهای تقویت‌شده

دارای افزایش معنی‌دار ضریب گسیختگی با سطح اطمینان ۹۹ درصد نسبت به تیرهای تقویت‌نشده بودند. نتایج نشان داد که اندازهٔ ضریب گسیختگی تیرهای تقویت‌شده ارتباط مستقیمی با نوع تقویت دارد؛ به‌گونه‌ای که مشخص شد تیرهایی که فقط در ناحیهٔ کششی تقویت شدند، دارای رشد مثبت ضریب گسیختگی و تیرهای تقویت‌شده در ناحیهٔ کشش و فشار، دارای رشد منفی ضریب گسیختگی هستند. با توجه به نمودار بار- جابه‌جایی گلولام‌های با لایه‌های یکسره بیشترین شیب در ناحیهٔ الاستیک مرتبط با نمونهٔ BRG است که بیانگر سختی خمشی بیشتر این نمونه است. نمونهٔ تقویت‌شده در ناحیهٔ کشش و فشار (BTRG) بیشترین سطح زیر نمودار و در نتیجه بیشترین جذب انرژی را دارد. با توجه به نمودار گلولام‌های با لایه‌های یکسره و شاهد، نمودارهای گلولام‌های با لایه‌های یکسره مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند، ولی نمودارهای گلولام‌های شاهد در اثر تقویت سرعت رشد بیشتری در درصد افزایش بار دارند.

References

[1]. Wegner, T.H., Winandy, J.E., and Ritter, M.A. (2005). Nanotechnology opportunities opportunities in residentiazand non-residential constructions. 2nd International Symposium Nanotechnology in Construction, 13-16 November, Bilbao, Spain. Bagneux, France.

[2]. Madhoushi, M., and Ansell, M.P. (2004). Experimental study of static and fatigue strengths of pultruded GFRP rods bonded into LVL and glulam. International Journal of Adhesion and Adhesives, 24(4): 319- 523.

[3]. Yeou-Fong, Li. Yao-Ming, Xie., and Ming-Jer, Tsai. (2009). Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets. Construction and Building Materials, 23: 411-224.

[4]. Borri, A., Corradi, M., and Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. Composites: part B., 36: 143-153.

[5]. Nowak, T.P., Jankowski, L.J., and Jasienko, J. (2010). Application of photoelastic coating technique in tests of solid wooden beams reinforced with CFRP strips. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10(2): 53-66.

[6]. Negrao, J.H., (2012). Prestressing systems for timber beams. In: Proceedings of 12th world conference on timber engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July. P.252-262.

[7]. De Luca, V., and Marano, C. (2012). Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars, Construction and Building Materials, 30, 206–217.

[8]. Huifeng, Y., Weiqing, L., Weidong, L., Shijun, Z., and Qifan, G. (2016). Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. Construction and Building Materials, 106: 550-563.

[9]. Bayatkashkoli, A., Shamsian M., and Mansourfard, M. (2011). Effects of layer arrangements on bending strength properties of laminated lumber made of poplar (*Populus nigra L.*). Scientific Research and Essays, 6(26): 6116-6119.

[10]. Soriano, J., Bruno, P.P., and Mascia, N.T. (2016). Mechanical performance of glued-laminated timber beams. Composite Structures, 150: 200- 207.

[11]. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM D143, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2000.

[12]. Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, ASTM D198 West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2014.

Mechanical properties of glulam beams made from different arrangements of layers and reinforced by steel rebars

P. Alikhajeh; M.Sc. Graduate, Department of Engineering, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

M.R. Hosseini- Tabatabaei*; Assist. Prof., Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

H.A. Rahdar; Assist. Prof., Department of Civil Engineering, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

A. Bayatkashkoli; Prof., Department of Paper, Wood Technology and Sciences, University of Zabol, Zabol, I.R. Iran

(Received: 22 October 2019, Accepted: 10 November 2019)

ABSTRACT

The glued laminated beam is one of the useful engineered wood products for building constructions. The glulam beam can be used in design of the large-scale composite structures. The main concern about using glulam beams is their resistance, stiffness, and displacement. In this paper, glulam beams with different designs were reinforced with a rebar in bottom, top or both, and their mechanical properties were investigated using four-point bending tests. The test results showed that the ultimate loads of the reinforced beams increased compared to the unreinforced ones. The increasing of the maximum loads was 22% to 49% in the glulam beams with entire layers and 11-85% in the control glulam beams. The absorption of energy in the samples reinforced at the tensile and pressure parts is higher than the specimens only reinforced at the tensile part and the control ones. The amount of MOR depended on the type of reinforcement methods, originally. The reinforced control beams had a greater loss of MOE compared to the reinforced beams with entire layers. Also reinforcing resulted in a significant increase in the ductility of the beams reinforced in the tensile and pressure areas. Consequently, this is particularly important in the designing of the earthquake resistant beams.

Keywords: Wooden beams, Flexural behavior, Reinforced glulam, Different arrangement.

* Corresponding Author, Email: mr.htabatabaei@uoz.ac.ir, Tel: +985431232020