

## تأثیر تقویت‌کننده ورق فولاد گالوانیزه، آلومینیوم و الیاف شیشه بر عملکرد خمشی گلولام ساخته‌شده از صنوبر با اتصال دهنده پیچ

اکبر رستم‌پور هفتخوانی\*

استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۶

### چکیده

هدف این تحقیق، تقویت عملکرد خمشی گلولام ساخته‌شده از صنوبر (*Populus alba*) و پیچ بود. برای ساخت گلولام سه‌لایه از چسب پلی‌اورتان برای اتصال لایه‌ها و پیچ برای اعمال فشار استفاده شد. متغیرهای بررسی‌شده شامل نوع تقویت‌کننده (ورق آلومینیوم، فولاد گالوانیزه و الیاف شیشه) و آرایش قرارگیری تقویت‌کننده (آرایش ۱ (در قسمت پایین (کششی))، آرایش ۲ (در قسمت پایین (کششی) و بالا (فشاری))، آرایش ۳ (در پایین، بالا و بین دو لایه پایین) و آرایش ۴ (در پایین، بالا و بین لایه‌ها) بودند. آزمون خمش با ASTM D7341 و دستگاه اینسترون انجام گرفت. بیشترین مدول گسیختگی (MOR) (MPa) ۸۲/۹۶ و مدول الاستیسیته (MOE) (MPa) ۱۰۱۶۶/۳۳ در گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ و کمترین MOR (MPa) ۵۷/۸۲ و MOE (MPa) ۴۳۹۷/۳۳ نیز در گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ مشاهده شد. MOR و MOE گلولام شاهد به ترتیب ۴۸/۱ و ۴۳۳۰ MPa بود. مقدار افزایش MOR در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه، ورق آلومینیوم و الیاف شیشه نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب ۷۲/۵، ۵۷/۸ و ۴۲/۶ درصد بود. این مقدار افزایش برای MOR به ترتیب ۱۳۴/۸، ۵۷/۶ و ۲۸/۴ درصد بود. با کاربرد تقویت‌کننده تردشکنی به شکست نرم تغییر می‌کند و خواص خمشی بهبود می‌یابد. نتایج نشان داد که تأثیر مستقل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE و همچنین تأثیر متقابل آنها بر MOE در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار است.

**واژه‌های کلیدی:** الیاف شیشه، تقویت عملکرد خمشی، گلولام، ورق آلومینیوم، ورق فولادی گالوانیزه.

### مقدمه

مهندسی‌شده چوبی که خواص برتری حتی نسبت به چوب دارد و به دلیل ابعاد بزرگ‌تر و متنوع‌تر نسبت به چوب در ساختمان‌سازی به‌عنوان تیر و ستون از آن استفاده می‌شود، تیرهای لایه‌ای معروف به گلولام<sup>۱</sup> است که ساخت آنها از لایه‌های چوبی، امکان ساخت سازه‌های چوبی با دهانه بلند را فراهم آورده و ساختمان‌های زیادی در سراسر جهان با آن ساخته شده است. چسب‌های معمول برای اتصال لایه‌ها در

چوب از قدیمی‌ترین مصالحی است که برای ساخت خانه، پل و سازه‌های دیگر به‌کار می‌رود و حتی بعد از پیدایش فولاد و بتن به‌عنوان مصالح جایگزین آن نیز به‌طور گسترده‌ای در ساخت‌وسازها کاربرد دارد. فولاد و بتن از چوب مقاوم‌تر و متنوع‌ترند، اما نسبت مقاومت به وزن چوب از فولاد و بتن بیشتر است. یکی از چندسازه‌های

\* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۷۹۵۲۳۴

Email: arostampour@uma.ac.ir

۱. Glued Laminated Timber (Glulam)

چوب‌های جنگلی، بتن و فولاد، تقویت گلولام‌های ساخته‌شده با آنها ضرورت دارد. برای مقاوم‌سازی محصولات لایه‌ای ساخته‌شده از چوب از فلزاتی مانند فولاد و آلومینیوم و همچنین الیاف پلیمری FRP<sup>۱</sup> به صورت ورق<sup>۲</sup>، نوار<sup>۳</sup> و میلگرد<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. تحقیقات برای تقویت گلولام از ۵۰ سال پیش با انواع فلز به خصوص فولاد و آلومینیوم آغاز شد. مشکل تقویت با فلزات این بود که ناسازگاری بین چوب و فلز، اختلاف ضریب انبساط، ضریب جذب رطوبت و خستگی بین چوب فلز سبب شکست در خط چسب می‌شد. برای چیرگی بر این مشکل، در دهه ۱۹۹۰ میلادی تقویت تیرهای چوبی با انواع FRP شروع شد. تحقیقات Kliger و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که دامنه مقاوم‌سازی تیر ۱ تا ۵ درصد مساحت سطح مقطع است و وقتی مقاوم‌سازی مطلوب است که در هر دو طرف کششی و فشاری تیر اجرا شود، چنانکه مقدار بهینه آن ۲۵ تا ۳۰ درصد از حجم مقاوم‌سازی در قسمت فشاری است [۷]. تحقیق Hurst و Coleman (۱۹۷۴) نشان داد که وقتی گلولام ساخته‌شده با میخ به تنهایی یا میخ به همراه چسب با ورق فلزی تقویت می‌شود، مقاومت خمشی آنها به ترتیب ۲۲-۸ درصد و ۳۷-۲۲ درصد افزایش و خیز آنها به ترتیب ۳۵-۳۰ درصد و ۴۰ درصد کاهش می‌یابد [۸]. مطالعات Alam و Ansell (۲۰۱۲) نشان داد که در تیرهای چوبی تقویت‌شده، هرچه تراکم میخ در سطح بیشتر شود مقاومت خمشی کاهش و مدول الاستیسیته افزایش می‌یابد [۹]. Nowak و همکاران (۲۰۱۳) نشان دادند که افزایش مقاومت و سفتی در تیرهای چوبی تقویت‌شده با ورق فولادی بیشتر از FRP است [۱۰]. Ansell و همکاران (۲۰۱۵) نشان دادند که سازگاری الیاف FRP با چوب بیشتر از سازگاری فلز با چوب است، از طرف دیگر مدول کششی الیاف FRP بیش از ۱۰ برابر بیشتر از

ساخت گلولام شامل پلی‌اورتان و امولسیون ایزوسیانات، چسب‌های فنولیک و آمینوپلاست مانند اوره فرمالدهید، ملامین فرمالدهید، ملامین-اوره فرمالدهید و فنول رزرسینول فرمالدهید هستند. این چسب‌ها برحسب کاربرد نهایی در محیط‌های مختلف به دو دسته چسب‌های نوع I و II تقسیم می‌شوند. چسب‌های نوع I برای کاربردهای داخلی که رطوبت حداکثر چوب در آنها کمتر از ۱۲ درصد باشد مصرف می‌شود، درحالی که چسب‌های نوع II برای محیط‌هایی بیرونی و پوشیده ساختمان مانند پوشش زیرین بام، پوشش دیوار که در آنها رطوبت چوب کمتر از ۲۰ درصد باشد و همچنین برای محیط‌های بیرونی که در آنها رطوبت چوب بیش از ۲۰ درصد است، استفاده می‌شود [۱]. این چسب‌ها در حالت سرد به بیش از دو ساعت پرس نیاز دارند. چسب پلی‌اورتان برای چسبندگی به فشار کمتری نیاز دارد و حداقل فشار لازم برای ایجاد چسبندگی معادل MPa ۰/۱-۰/۱ است. برای پرس کردن لایه‌های چوبی با پرس هیدرولیک می‌توان فشاری معادل MPa ۰/۱-۱ و حتی بیشتر را اعمال کرد، اما با پرس خلأ این فشار معادل MPa ۰/۱-۰/۵ است و با میخ و پیچ به MPa ۰/۲-۰/۱ می‌رسد [۲]. زمانی که به منظور اعمال فشار برای ایجاد چسبندگی بین لایه‌های چوب از میخ و پیچ استفاده می‌شود، به دلیل تنش برشی بین لایه‌ها در خمش مقاومت آنها متأثر از توان نگهداری و مقاومت برشی اتصال‌دهنده مکانیکی خواهد بود. تحقیقات نشان داده‌اند که توان نگهداری و مقاومت برشی انواع پیچ بیشتر از میخ است [۳]. بنابراین در این پژوهش برای ساخت گلولام با هزینه کمتر، اعمال فشار با پیچ به جای پرس انجام گرفت. استاندارد EN مدول الاستیسیته و مدول برشی را برای فولاد به ترتیب ۲۰۰ و ۷۵ GPa، برای بتن ۳۰ و ۱۲/۵ GPa و برای چوب ۹ و ۰/۵۶ GPa گزارش کرده است [۴-۶]. مشاهده می‌شود که مدول‌های الاستیسیته و برشی چوب خیلی کمتر از بتن و فولاد است. با توجه به مدول الاستیک کم چوب گونه‌های تندرشد نسبت به

۱. Fibre-reinforced polymer (FRP)

۲. Sheet

۳. Bar

۴. Rod or rebar

مدول الاستیسیته چوب به‌کاررفته اندازه‌گیری شده با استاندارد ASTM D 143 [۱۶]، به‌ترتیب  $0.381 \text{ g/cm}^3$ ،  $49 \text{ MPa}$  و  $6200 \text{ MPa}$  بود. چسب پلی‌اورتان با کد M518 از شرکت مواد مهندسی مکرر واقع در تهران تهیه شد که به رنگ کرم، با چگالی  $1.3 \text{ g/cm}^3$  و درصد مواد جامد ۱۰۰ درصد بود. مقدار چسب پلی‌اورتان  $300 \text{ g/m}^2$  در نظر گرفته شد. برای تقویت مقاومت خمشی گلولام از ورق آلومینیوم و فولاد کالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر، الیاف شیشه بافته‌شده دوجته به ضخامت  $0.236$  میلی‌متر استفاده شد. ورق آلومینیوم و فولاد کالوانیزه از فروشگاه‌های آهن‌آلات شهر اردبیل و الیاف شیشه از شرکت کوانتوم ایران واقع در تهران تهیه شد. خواص تقویت‌کننده‌های به‌کاررفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. آرایش قرارگیری الیاف تقویت‌کننده در لایه‌ها در شکل ۱ ارائه شده است. از تخته‌های رنده‌شده نمونه‌های گلولام سه‌لایه ساخته شدند. برای ساخت گلولام، ابتدا لایه‌ها چسب‌زنی شدند، سپس برای اعمال فشار به‌ازای سطح  $8 \times 15 \text{ cm}^2$  در لایه رویی دو عدد پیچ نصب شد. به دلیل چگالی کم صنوبر و قطر کم اتصال‌دهنده‌ها، نصب پیچ بدون سوراخ پیش‌ساخته انجام گرفت. برای جلوگیری از ترکیدن چوب، پیچ‌ها طوری نصب شدند که در جهت طولی در یک راستا نباشند.

جدول ۱. خواص مهندسی تقویت‌کننده‌های استفاده‌شده در این

تحقیق				
مدول الاستیسیته (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن هر متر مربع ( $\text{g/m}^2$ )	ضخامت (mm)	نوع تقویت‌کننده
۲۰۰	۴۰۰	۷۸۵۰	۱	ورق فولاد کالوانیزه
۶۸/۹	۲۹۰	۲۷۱۰	۱	ورق آلومینیوم
۹۰	۲۳۰۰	۶۰۰	۰/۲۳۶	الیاف شیشه

برای یکنواختی رطوبت، نمونه‌های گلولام به‌مدت دو هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵ درصد و دمای ۲۰ درجه سلسیوس مشروط‌سازی شدند. شکل ۱ نمونه‌های گلولام

چوب است [۱۱]. علی‌رغم تقویت‌کنندگی بیشتر ورق فولادی، FRP وزن کمتر و مقاومت به خوردگی بیشتری دارد که بر کیفیت چسبندگی مؤثرترند [۱۲]. تحقیقات نشان داده‌اند که با تقویت تیرهای چوبی با FRP، مدول الاستیسیته تا ۲۰ درصد افزایش یافت [۱۳]، اما در حالت تقویت با ورق فولادی، مدول الاستیسیته تا ۸۰ درصد افزایش یافت [۱۴]. Harte و Raftery (۲۰۱۱) نشان دادند که حد تقویت‌کنندگی به آرایش تقویت‌کننده در بین لایه‌های چوب بستگی دارد. در این پژوهش، آنها الیاف FRP را بین دو لایه آخری در قسمت کششی و همچنین در قسمت زیرین قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که وقتی FRP بین لایه‌ها قرار گرفت، مقاومت بهتری نشان داد [۱۵]. در این تحقیق، با توجه به افزایش روزافزون مصرف چوب و لزوم کاهش برداشت چوب از جنگل‌های طبیعی و نیاز به تأمین چوب با گونه‌های چوبی تندرشد، گلولام از چوب صنوبر ساخته شد. با توجه به چگالی کم صنوبر و در نتیجه مقاومت و مدول الاستیسیته کم گلولام ساخته‌شده با آن، تحقیق حاضر با هدف مقاوم‌سازی گلولام ساخته‌شده از صنوبر با پیچ به‌همراه چسب با ورق آلومینیوم، فولاد کالوانیزه و الیاف شیشه انجام گرفت. همچنین برای ساخت گلولام با هزینه کمتر از پیچ به‌جای پرس برای اعمال فشار استفاده شد.

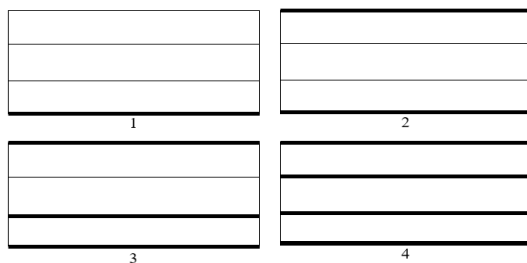
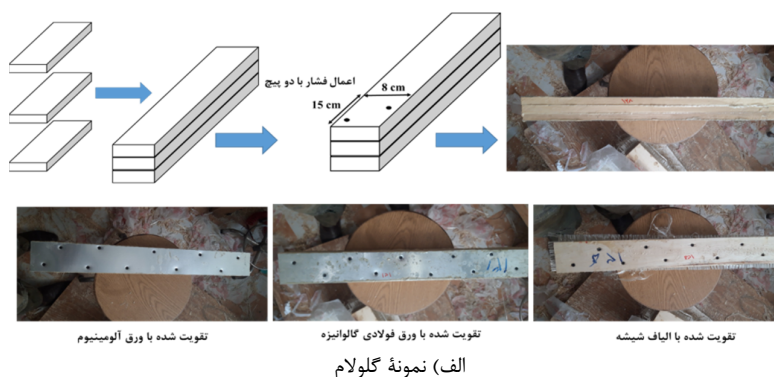
## مواد و روش‌ها

برای اجرای این تحقیق ابتدا گرده‌بین‌های چوب صنوبر (*Populus alba*) از شهرستان خلخال استان اردبیل تهیه و به لایه‌هایی با ابعاد  $200 \times 10 \times 2/5$  سانتی‌متر (به‌ترتیب طول، پهنا و ضخامت) تبدیل شده و سپس در هوای آزاد به‌مدت ۲ ماه تا رطوبت ۱۵ درصد خشک شدند. تخته‌ها سپس به‌صورت نظری درجه‌بندی شده و تخته‌های درجه یک با دستگاه رنده و گندگی تا ضخامت ۲۰ میلی‌متر و پهنا ۸۰ میلی‌متر از چهار طرف ( $S4S^1$ ) رنده شدند. چگالی، مقاومت خمشی و

۱. Surfaced four sides

تقویت‌کننده (ورق آلومینیوم، ورق فولاد گالوانیزه و الیاف شیشه) و آرایش تقویت‌کننده (چهار آرایش) بود (شکل ۱، ج). در مجموع ۱۲ تیمار و برای هر تیمار ۳ تکرار در نظر گرفته شد. سپس مقاومت خمشی گلولام‌های تقویت‌شده با گلولام شاهد (بدون تقویت‌کننده) مقایسه شدند. برای تجزیه و تحلیل آماری از آزمون فاکتوریل و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد و نمونه‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری با نرم‌افزار SPSS تجزیه و تحلیل شدند.

ساخته‌شده، پیچ استفاده‌شده برای این تحقیق، نحوه قرارگیری تقویت‌کننده و آزمون خمش گلولام را نشان می‌دهد. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی گلولام‌های ساخته‌شده با تبعیت از استاندارد ASTM D7341 به صورت سه نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه با دستگاه اینسترون اندازه‌گیری شد [۱۷]. پهنای نمونه‌های آزمون خمش ۸۰ میلی‌متر و ضخامت آنها برحسب نوع لایه تقویت‌کننده متغیر بود. نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع برای نمونه‌های بررسی‌شده ۱۲ در نظر گرفته شد. متغیرهای بررسی‌شده در این تحقیق شامل نوع



ج) آرایش قرارگیری تقویت‌کننده در بین لایه‌های گلولام (خطوط ضخیم‌تر محل لایه تقویت‌کننده را نشان می‌دهد)



ب) پیچ بانلی رزوه درشت

ب) پیچ به‌کاررفته در این تحقیق



د) آزمون خمشی

شکل ۱. الف) نمونه‌های گلولام‌های ساخته‌شده؛ ب) بیج استفاده‌شده در این تحقیق (D قطر بیرونی، D<sub>r</sub> قطر ریشه و L طول بیج است)؛ ج) نحوه قرارگیری تقویت‌کننده؛ د) آزمون خمشی نمونه‌ها با دستگاه اینسترون

نتایج و بحث  
نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE و همچنین تأثیر متقابل آنها بر MOE در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری معنی‌دار است.

نتایج تجزیه واریانس تأثیر مستقل و متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE گلولام‌های مطالعه‌شده در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان داد که تأثیر مستقل

جدول ۲. جدول تجزیه واریانس مربوط به تأثیر مستقل و متقابل نوع تقویت‌کننده و آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE نمونه‌های گلولام

مناخ تغییرات	درجه آزادی	MOR (MPa)		MOE (MPa)		Sig.	مقدار F	Sig.
		میانگین مربعات	مقدار F	میانگین مربعات	مقدار F			
نوع تقویت‌کننده	۲	۷۱۶/۵۰۳	۲۱/۹۵۶	۳۹۵۴۳۱۸۶/۱۱۱	۵۹/۸۰۹	۰/۰۰۰*	۰/۰۰۰*	۲
آرایش تقویت‌کننده	۳	۲۷۹/۵۶۷	۸/۵۶۷	۴۱۷۰۸۳۴/۲۵۹	۶/۳۰۸	۰/۰۰۳*	۰/۰۰۳*	۳
نوع تقویت‌کننده × آرایش تقویت‌کننده	۶	۲۹/۸۹۸	۰/۹۱۶	۳۱۰۸۳۶۶/۱۲۸	۴/۷۰۱	۰/۰۰۳*	۰/۰۰۳*	۶

ns - معنی‌دار نبودن - \* معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد

جدول ۳. مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی گلولام

نوع تقویت پانل	آرایش تقویت‌کننده	MOR (MPa)	MOE (MPa)	درصد افزایش MOR	درصد افزایش MOE
ورق آلومینیوم	۱	۵۸/۹۹(۳/۷۵) <sup>bc</sup>	۵۶۲۳/۳(۵۵۵/۸۲) <sup>abcde</sup>	۲۲/۶	۲۹/۹
	۲	۶۷/۱۸(۳/۸۳) <sup>bcd</sup>	۵۹۶۵(۳۴۳/۱۲) <sup>bcde</sup>	۳۹/۷	۳۷/۸
	۳	۷۵/۸۹(۳/۱۵) <sup>def</sup>	۶۸۲۲(۴۷۳/۸۷) <sup>de</sup>	۵۷/۸	۵۷/۶
	۴	۷۲/۱(۴/۷۳) <sup>de</sup>	۶۳۶۸/۳(۱۳۳۰/۸۵) <sup>cde</sup>	۴۹/۹	۴۷/۱
الیاف شیشه	۱	۵۷/۸۲(۵/۲۳) <sup>b</sup>	۴۳۹۷/۳(۱۵۰/۴۴) <sup>a</sup>	۲۰/۲	۱/۶
	۲	۵۹/۹۵(۲/۲۹) <sup>bc</sup>	۴۶۵۸(۴۷۰/۸۶) <sup>ab</sup>	۲۴/۶	۷/۶
	۳	۶۷/۷۷(۶/۲) <sup>bcd</sup>	۴۹۵۹/۳(۶۰/۰۴) <sup>abc</sup>	۴۰/۹	۱۴/۵
	۴	۶۸/۵۷(۷/۹) <sup>cd</sup>	۵۵۶۰/۷(۴۹۹/۲۳) <sup>abcd</sup>	۴۲/۶	۲۸/۴
ورق فولادی گالوانیزه	۱	۷۰/۶۲(۲/۱) <sup>de</sup>	۶۹۲۹/۷(۵۱۴/۷۸) <sup>de</sup>	۴۶/۸	۶۰/۰
	۲	۸۲/۹۶(۴/۸۴) <sup>f</sup>	۱۰۱۶۶/۳(۱۰۱۵/۹۹) <sup>f</sup>	۷۲/۵	۱۳۴/۸
	۳	۸۰/۷۶(۲/۹۱) <sup>ef</sup>	۹۷۴۸/۷(۱۵۴۵/۲۳) <sup>f</sup>	۶۷/۹	۱۲۵/۱
	۴	۸۰/۴۴(۱۲/۶۸) <sup>ef</sup>	۷۰۷۴(۱۱۵۲/۹۸) <sup>c</sup>	۶۷/۲	۶۳/۴
نمونه شاهد	بدون تقویت‌کننده	۴۸/۱(۲/۷۴) <sup>a</sup>	۴۳۳۰(۲۷۸/۷۵) <sup>a</sup>	---	---

\* اعداد داخل پرانتز انحراف معیار است. حروف بعد از پرانتز گروه‌بندی دانکن را نشان می‌دهند.

بیشتر بود. در بین نمونه‌های تقویت‌شده، بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ (تقویت‌کننده در قسمت پایین (کششی)

میانگین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های بررسی‌شده در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که MOR و MOE همه نمونه‌های تقویت‌شده از نمونه شاهد

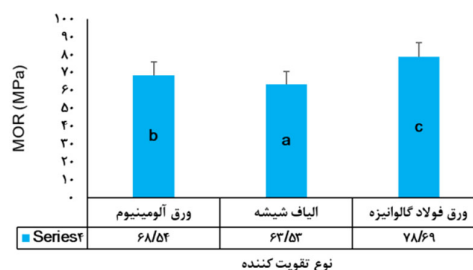
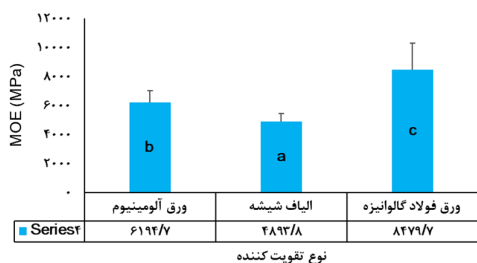
۵۷/۶ و ۲۸/۴ درصد بود. بیشترین افزایش MOR و MOE در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه مشاهده شد.

### تأثیر مستقل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و

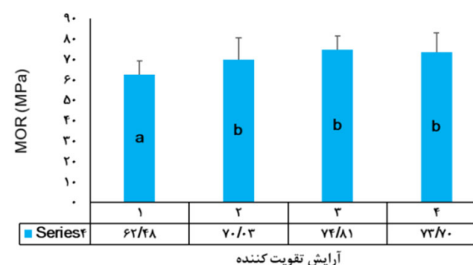
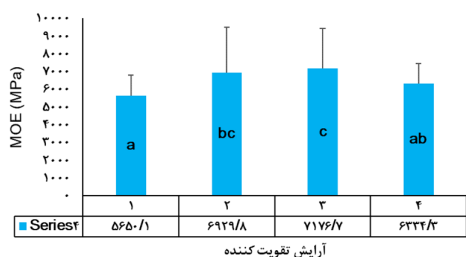
#### مدول الاستیسیته خمشی

شکل ۲ تأثیر مستقل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی را نشان می‌دهد. در شکل ۲ الف، تأثیر مستقل نوع تقویت‌کننده بر MOR و MOE ارائه شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه و کمترین آنها مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بوده است. MOR گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه و آلومینیوم به ترتیب ۲۳/۹ و ۷/۹ درصد بیشتر از الیاف شیشه بود. همچنین نتایج نشان داد که MOE گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه و آلومینیوم به ترتیب ۷۳/۳ و ۲۶/۶ درصد بیشتر از الیاف شیشه بود. نتایج گروه‌بندی دانکن نشان داد که بین MOR و MOE گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه، ورق فولاد گالوانیزه و آلومینیوم از نظر آماری اختلاف معنی‌داری وجود دارد.

و بالا (فشاری) و کمترین MOR و MOE نیز مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ (تقویت‌کننده در قسمت پایین (کششی) بود. بیشترین MOR و MOE در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه مربوط به گلولام‌های با آرایش ۴ (تقویت‌کننده در پایین، بالا و بین لایه‌ها)، در نمونه‌های تقویت‌شده با آلومینیوم مربوط به آرایش ۳ (تقویت‌کننده در پایین، بالا و بین دو لایه پایین) و در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه مربوط به آرایش ۲ (تقویت‌کننده در قسمت پایین (کششی) و بالا (فشاری)) بود. کمترین MOR و MOE در همه گلولام‌های تقویت‌شده مربوط به آرایش ۱ (تقویت‌کننده در قسمت پایین (کششی)) بود. مقدار افزایش MOR و MOE گلولام‌های تقویت‌شده نسبت به نمونه‌های شاهد نیز در جدول ۳ ارائه شده است. مقدار افزایش MOR در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه، ورق آلومینیوم و الیاف شیشه به ترتیب ۷۲/۵، ۵۷/۸ و ۴۲/۶ درصد بود. همچنین نتایج نشان داد که مقدار افزایش MOE در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه، ورق آلومینیوم و الیاف شیشه نیز به ترتیب ۱۳۴/۸،



الف) نوع تقویت‌کننده



ب) آرایش تقویت‌کننده



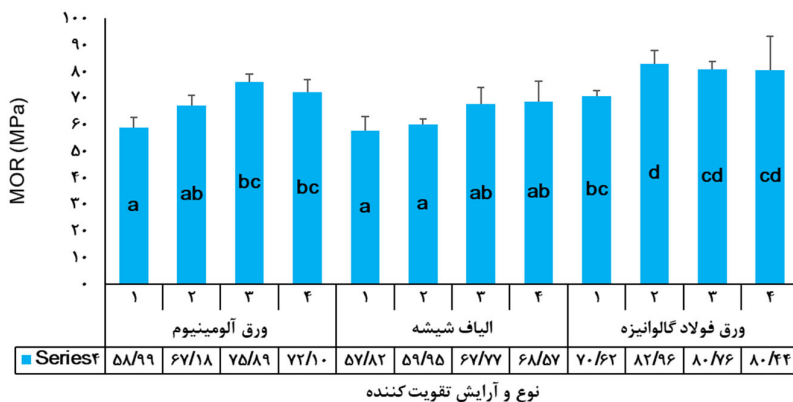
شکل ۲. تأثیر مستقل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی گلولام

بین آرایش‌های ۲ و ۳ اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی

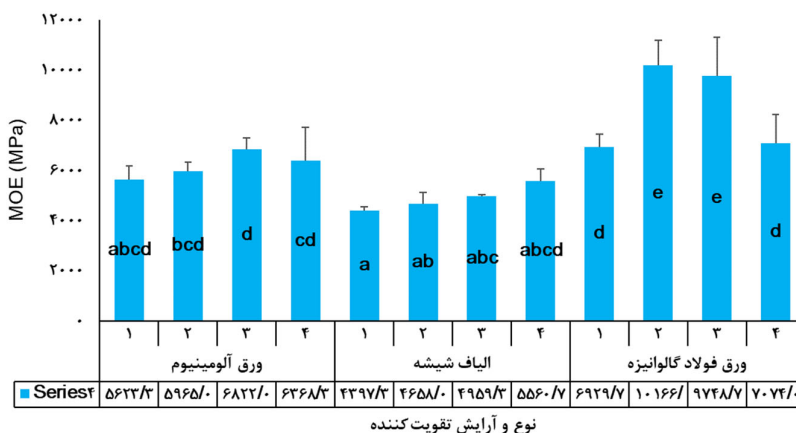
شکل ۳ تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی گلولام‌های تقویت‌شده را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ و کمترین آنها مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ بود. نتایج نشان داد که اختلاف بین بیشترین و کمترین MOR و MOE به ترتیب ۴۳/۵ و ۱۳۱/۲ درصد بود.

در شکل ۲، تأثیر مستقل آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE ارائه شده است. مطابق این شکل بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با آرایش ۳ و کمترین آن مربوط به آرایش ۱ بوده و اختلاف بین آنها برای MOR حدود ۱۹/۷ درصد و برای MOE حدود ۲۷ درصد بود. نتایج گروه‌بندی دانکن نشان داد که اختلاف آماری بین MOR گلولام‌های ساخته‌شده با آرایش ۱ با بقیه معنی‌دار است، اما اختلاف بین آرایش‌های ۲، ۳ و ۴ معنی‌دار نیست. همچنین نتایج گروه‌بندی دانکن نشان داد که بین MOE گلولام‌های ساخته‌شده با آرایش‌های ۱ و ۳ اختلاف آماری معنی‌داری وجود دارد، اما بین آرایش‌های ۱ و ۴ و همچنین



الف) تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOR





ب) تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت کننده بر MOE

شکل ۳. تأثیر متقابل نوع تقویت کننده و آرایش تقویت کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی گلولام

چنانکه اگر شکست در عضوی از سازه به صورت نرم باشد، با تغییر شکل زیاد پلاستیک یا ویسکوالاستیک قبل از شکست سبب پراکندگی تنش، اتلاف انرژی ناشی از تنش، ضربه و نیروی زلزله می شود. چوب شکستی بینابینی دارد، به طوری که در قسمت کششی بیشتر شکست ترد دیده می شود و در قسمت فشاری شکست نرم. شکست در FRP به صورت ترد است، ولی با کاربرد صحیح آن بین لایه های چوب می توان به شکست نرم رسید. نتایج تحقیقات گذشته نشان داده است که تقویت قسمت کششی تأثیر بیشتری بر عملکرد خمشی دارد. همچنین نتایج نشان داد که وقتی تیر چوبی از بالا تحت بار خمشی قرار می گیرد، شکست در آنها به صورت کششی به صورت ترد در قسمت زیرین، فشاری به صورت نرم در قسمت بالایی و شکست برشی در وسط دیده می شود [۱۸]. شکست ترد کششی زمانی اتفاق می افتد که تنش وارد شده در ناحیه کششی از تنش مجاز چوب بیشتر باشد، اما تنش در ناحیه فشاری در دامنه الاستیک باشد و این شکست بیشتر در تیرهای تقویت نشده دیده می شود و از نوع ترد است. نوع دیگر شکست در خمش، شکست فشاری به صورت نرم است که وقتی اتفاق می افتد که تیر در ناحیه کششی تقویت شود، در این حالت تنش فشاری توزیع شده در ناحیه فشاری از تنش مجاز چوب بیشتر شده و سبب

نتایج نشان داد که MOR و MOE نمونه های تقویت شده با فلزاتی مانند ورق فولاد گالوانیزه و آلومینیوم بیشتر از الیاف شیشه است. با مقایسه مدول الاستیسیته و مقاومت کششی الیاف شیشه و ورق آلومینیوم درمی یابیم که مقدار آنها برای الیاف شیشه بیشتر است، اما ضخامت الیاف شیشه حدود پنج برابر کمتر است. مقاومت کششی الیاف شیشه خیلی بیشتر از ورق فولاد است، اما مدول کمتری دارد. بیشتر بودن MOR و MOE گلولام تقویت شده با ورق فلزات را می توان به ضخامت زیاد آنها نسبت داد. نتایج تحقیقات گذشته نشان داد که تقویت کنندگی فلزات برای افزایش عملکرد خمشی در تیرهای لایه ای از FRP بیشتر است [۱۵-۸].

نتایج مربوط به آرایش محل قرارگیری تقویت کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE برای گلولام های تقویت شده با الیاف شیشه در نمونه های با آرایش ۴، برای گلولام های تقویت شده با ورق آلومینیوم در نمونه های تقویت شده با آرایش ۳ و برای گلولام های تقویت شده با ورق فولاد گالوانیزه در نمونه های با آرایش ۲ دیده شد. از طرف دیگر شکست در فولاد از نوع چکش خوار یا نرم<sup>۱</sup> و در بتن از نوع ترد<sup>۲</sup> است. شکست نرم در ایمنی مصالح اهمیت زیادی دارد،

۱. Ductile  
۲. Brittle

شکست در آنها به صورت فشاری دیده می شود، در مقایسه با نمونه های با شکست کششی مقاومت بیشتری از خود نشان داده اند. شکست در نمونه های گلولام تقویت نشده به صورت کششی مشاهده شد (شکل ۴ الف). شکست در گلولام های با آرایش ۱ به خصوص نمونه های تقویت شده با ورق آلومینیوم و فولاد به صورت فشاری دیده شد (شکل ۴ ب). شکست در نمونه های تقویت شده با آرایش های ۲، ۳ و ۴ به صورت کششی، فشاری و برشی دیده شد (شکل ۴ ج). با تقویت گلولام با ورق آلومینیوم با آرایش ۴ و ورق گالوانیزه با آرایش های ۳ و ۴، تنش برشی به حدی زیاد بود که سبب شکست برشی خط چسب و پیچ شد و کاهش مقاومت

شکست فشاری می شود. نوع دیگر شکست در خمش، شکست برشی است. این شکست بیشتر در تیرهای تقویت شده دیده می شود. وقتی تیر چوبی در ناحیه فشاری و کششی تقویت می شود، شکست در آن از حالت کششی و فشاری به حالت برشی تغییر می یابد، چنانکه در این حالت تنش برشی توزیع شده در سطح مقطع تیر از تنش برشی مجاز چوب بیشتر شده و سبب شکست برشی می شود که به صورت ناگهانی در جهت موازی الیاف خواهد بود. شکل ۴ مدهای شکست گلولام در حالت های تقویت شده و تقویت نشده را نشان می دهد. گلولام هایی که به دلیل وجود تقویت کننده، شکست در آنها به صورت برشی دیده می شود، مقاومت بیشتری از خود نشان داده اند. گلولام هایی هم که



ب) شکست فشاری در گلولام (گلولام تقویت شده با ورق فولاد کالوانیزه با آرایش ۱)



الف) شکست کششی و ترد در گلولام تقویت نشده



گلولام تقویت شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳



گلولام تقویت شده با ورق فولاد کالوانیزه با آرایش ۲

ج) شکست برشی در گلولام



د) شکست برشی پیچ در اثر تنش برشی بین لایه ها



ه) شکست برشی و ترد ورق آلومینیوم در اثر کشش  
شکل ۴. مدهای شکست در گلولام‌های بررسی شده

گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد کالوانیزه با آرایش ۲ به ترتیب ۸۲/۹۶ و ۱۰۱۶۶/۳۳ MPa بود که فراتر از حد استاندارد است، با اینکه نمونه‌ها از صنوبر با چگالی کم ( $0.381 \text{ g/cm}^3$ ) و همچنین با پیچ به جای پرس برای اعمال فشار ساخته شد.

### نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر نوع و آرایش محل قرارگیری تقویت‌کننده بر MOR و MOE گلولام تقویت‌شده با الیاف شیشه، ورق آلومینیوم و فولاد کالوانیزه نشان داد که MOR و MOE همه نمونه‌های تقویت‌شده از نمونه شاهد بیشتر است. بیشترین MOR و MOE در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه مربوط به گلولام‌های با آرایش ۴، در نمونه‌های تقویت‌شده با آلومینیوم مربوط به آرایش ۳ و در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد کالوانیزه مربوط به آرایش ۲ بود. نتایج تأثیر مستقل نوع تقویت‌کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد کالوانیزه و کمترین آنها مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بود. نتایج تأثیر مستقل آرایش تقویت‌کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با آرایش ۳ و کمترین آن مربوط به آرایش ۱ بود. نتایج بررسی تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با

گلولام‌ها را در پی داشت (شکل ۵۴) به همین دلیل مقاومت گلولام‌های تقویت‌شده با آلومینیوم با آرایش ۴ از آرایش ۳ کمتر بود و مقاومت گلولام‌های تقویت‌شده با ورق کالوانیزه با آرایش‌های ۳ و ۴ نیز کمتر از نمونه‌های تقویت‌شده با آرایش ۲ بود. مقاومت و مدول گلولام‌های تقویت‌شده با ورق کالوانیزه بیشتر از ورق آلومینیوم بود. دلیل این موضوع را می‌توان مقاومت و مدول بیشتر فولاد نسبت به آلومینیوم دانست. از طرف دیگر، شکست ورق آلومینیوم به واسطه سطح مقطع ناخالص متأثر از سوراخ پیچ سبب شد که در این مواد شکست به صورت ترد رخ دهد (شکل ۵۴)، اما در نمونه‌های تقویت‌شده با ورق فولاد کالوانیزه چنین شکستی دیده نشد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌های FRP به طور پیوسته MOR و MOE افزایش می‌یابد. پژوهشگران در پژوهش پیشین نشان داده‌اند که وقتی از الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌شود، کیفیت چسبندگی بهتری با لایه‌های چوب ایجاد می‌کند [۱۲]، در نتیجه با افزایش تعداد لایه‌های آن MOR و MOE به طور پیوسته تقویت می‌شود و افزایش می‌یابد.

کمترین مقادیر مرجع MOR و MOE برای درجه ۱6F-1.3E گلولام بر اساس آیین‌نامه NDS به ترتیب ۱۱ و ۸۹۶۳ MPa است [۱۹]. مقادیر MOR و MOE انواع گلولام در کتاب راهنمای چوب برای جرم مخصوص  $0.4/6 - 0.4/6$  به ترتیب  $28/61 - 62/62$  و  $14500 - 9000$  MPa است [۲۰]. بیشترین MOR و MOE مشاهده‌شده برای

ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ و کمترین آنها مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ بود.

## References

- [1]. BS EN 301. (2013). Adhesives, Phenolic and Aminoplastic, for Load-Bearing Timber Structures-Classification and Performance Requirements. British Standards Institution.
- [2]. Gagnon, S., and Pirvu, C. (2011). CLT handbook: cross-laminated timber. FPInnovations.
- [3]. Eckelman, C. A. (2003). Textbook of Product Engineering and Strength Design of Furniture, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 65-67.
- [4]. BS EN 338:2009. Structural timber. Strength classes.
- [5]. BS EN 1992-1-1. Eurocode 2. Design of concrete structures.
- [6]. EN 1993-1-1. Eurocode 3: Design of Steel Structures.
- [7]. Kliger, I.R., Haghani, R., Brunner, M., Harte, A.M., and Schober, K.U. (2016). Wood-based beams strengthened with FRP laminates: improved performance with pre-stressed systems. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3): 319-330.
- [8]. Coleman, G., and Hurst, H. (1974). Timber structures reinforced with light gage steel. *Forest Products Journal*, 24: 45-53.
- [9]. Alam, P., and Ansell, M. (2012). The effects of varying nailing density upon the flexural properties of flitch beams. *Journal of Civil Engineering Research*, 2(1): 7-13.
- [10]. Nowak, T.P., Jasiński, J., and Czepiżak, D. (2013). Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *Construction and Building Materials*, 40: 197-206.
- [11]. Ansell, M. P. (2015). *Wood Composites*, Woodhead Publishing.
- [12]. Nowak, T., Jasiński, J., Kotwica, E., and Krzosek, S. (2016). Strength enhancement of timber beams using steel plates—review and experimental tests. *Drewno*, 59(196):75-90.
- [13]. Jankowski, L.J., Jasiński, J., and Nowak, T.P. (2010). Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique. *Materials and Structures*, 43(1):141-150.
- [14]. Jasiński, J. (2001). Glue joints used for reinforcing the damaged ends of wooden beams. *Structural Engineering International*, 11(4): 246-250.
- [15]. Raftery, G.M., and Harte, A.M. (2011). Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites Part B: Engineering*, 42(4): 724-735.
- [16]. Standard method of testing small clear specimens of timber. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.10, D 143. 2018.
- [17]. Standard Practice for Establishing Characteristic Values for Flexural Properties of Structural Glued Laminated Timber by Full-Scale Testing. *Annual Book of ASTM Standard*, 04.10, D 7341, 2018.
- [18]. Franke, S., Franke, B., and Harte, A.M. (2015). Failure modes and reinforcement techniques for timber beams-State of the art. *Construction and Building Materials*, 97: 2-13.
- [19]. NDS (2018). National design specification for wood construction: recommended practice for structural design.
- [20]. Bergman, R., Cai, Zh., Carll, C G., Clausen, C A., Dietenberger, M A., Falk, R H., Frihart, C R., Glass, S V., Hunt, C G., Ibach, R E., Kretschmann, D E., Rammer, D R and Ross, R J. (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p.

## Effect of reinforcement of the galvanized steel, Aluminum sheet and Glass fiber reinforcement polymer wrapped on flexural behavior of screwed glued laminated timber (glulam) made with poplar

A. Rostampour Haftkhani\*; Assist. Prof., Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, I.R. Iran

(Received: 10 November 2019, Accepted: 07 December 2019)

### ABSTRACT

The aim of this study was to investigate flexural strengthening of screwed Glulam made with poplar (*Populus alba*). Polyurethane adhesive and screw were used for joining layers and applying pressure for manufacturing of three-layer glulam. The variables of this study were types of reinforcing (galvanized steel, aluminum sheet and glass fiber reinforcement polymer) and arrangements of reinforcing: No. 1 (bonded on the bottom (tension) side); No. 2 (bonded on the bottom and top (Tension and compression) side); No. 3 (bonded on the bottom, top and between two bottom layers); No. 4 (bonded on the bottom, top and among layers). Bending test was conducted by Instron according to ASTM D7341. The highest MOR (82.96 MPa) and MOE (1066.33 MPa) were both observed in Glulams reinforced by galvanized steel sheet with arrangement of No. 2 and the lowest MOR (57.82 MPa) and MOE (4397.33 MPa) were both related to Glulams reinforced by GFRP wrapped with arrangement of No. 1. MOR and MOE of control Glulams were 48.1 and 4330 MPa. The increasing percentage of MOR due to reinforcing by galvanized steel, aluminum sheet and GFRP Wrapped were 72.5, 57.8 and 42.6, respectively. The increasing percentages for MOE were 134.2, 57.6 and 28.4, respectively. Failure modes of Glulams changed from brittle to ductile by reinforcing resulted in improving of flexural behavior. The independent effect of types and arrangements of reinforcing on MOR and MOE and also the interaction of types and arrangements of reinforcing on MOE were statistically significant.

**Keywords:** Flexural behavior reinforcement, Glued laminated timber (Glulam), Aluminum sheet, Galvanized steel sheet, GFRP wrapped.

---

\* Corresponding Author: Email: arostampour@uma.ac.ir, Tel: +989124795234