جنگل و فرآورده‌های چوب، مجلهٔ منابع طبیعی ایران
دورهٔ ۷۲، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۸
ص ۳۳۸-۳۲۷
DOI: 10.22059/jfwp.2019.292266.1034

تأثیر تقویت‌کنندهٔ ورق فولاد گالوانیزه، آلومینیوم و الیاف شیشه بر عملکرد خمشی گلولام ساخته‌شده از صنوبر با اتصال‌دهندهٔ پیچ

اکبر رستم‌پور هفتخوانی*
استادیار گروه منابع طبیعی، دانشکدهٔ 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 لایهٔ 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) (۸۲/۹۶ MPa) و مدول الاستیسیته (MOE) (۱۰۱۶۶/۳۳ MPa) در گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ و کمترین MOR (۵۷/۸۲ MPa) و MOE (۴۳۹۷/۳۳ MPa) نیز در گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ مشاهده شد. MOR و MOE گلولام شاهد به‌ترتیب 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 به‌ترتیب ۷۲/۵، ۵۷/۸ و ۴۲/۶ درصد بود. این مقدار افزایش برای MOE به‌ترتیب 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

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 مهندسی‌شدهٔ چوبی که خواص برتری حتی نسبت به چوب دارد و به‌دلیل ابعاد بزرگ‌تر و متنوع‌تر نسبت به چوب در ساختمان‌سازی به‌عنوان تیر و ستون از آن استفاده می‌شود، تیرهای لایه‌ای معروف به گلولام[1] است که ساخت آنها از لایه‌های چوبی، امکان ساخت سازه‌های چوبی با دهانهٔ بلند را فراهم آورده و ساختمان‌های زیادی در سراسر جهان با آن ساخته شده است. چسب‌های معمول برای اتصال لایه‌ها در

* نویسندهٔ مسئول، تلفن: ۰۹۱۲۴۷۹۵۲۳۴
Email: arostampour@uma.ac.ir

۱. Glued Laminated Timber (Glulam)

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 دستهٔ 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 پوشیدهٔ 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- ۰/۰۱ است. برای پرس کردن لایه‌های چوبی با پرس هیدرولیک می‌توان فشاری معادل MPa ۱-۰/۱ و حتی بیشتر را اعمال کرد، اما با پرس خلأ این فشار معادل MPa ۰/۱- ۰/۰۵ است و با میخ و پیچ به MPa ۰/۲- ۰/۰۱ می‌رسد [۲]. زمانی که به‌منظور اعمال فشار برای ایجاد چسبندگی بین لایه‌های چوب از میخ و پیچ استفاده می‌شود، به‌دلیل تنش برشی بین لایه‌ها در خمش مقاومت آنها متأثر از توان نگهداری و مقاومت برشی اتصال‌دهندهٔ 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 هزینهٔ کمتر، اعمال فشار با پیچ به‌جای پرس انجام گرفت. استاندارد EN مدول الاستیسیته و مدول برشی را برای فولاد به‌ترتیب ۲۰۰ و GPa ۷۵، برای بتن ۳۰ و GPa ۱۲/۵ و برای چوب ۹ و GPa ۰/۵۶ 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 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[۱] به‌صورت ورق[۲]، نوار[۳] و میلگرد[۴] استفاده می‌شود. تحقیقات برای تقویت گلولام از ۵۰ سال پیش با انواع فلز به‌خصوص 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 دههٔ ۱۹۹۰ میلادی تقویت تیرهای چوبی با انواع FRP شروع شد. تحقیقات Kliger و همکاران (۲۰۱۵) نشان داد که دامنهٔ 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 Coleman و Hurst (۱۹۷۴) نشان داد که وقتی گلولام ساخته‌شده با میخ به‌تنهایی یا میخ به همراه چسب با ورق فلزی تقویت می‌شود، مقاومت خمشی آنها به‌ترتیب ۲۲-۸ درصد و ۳۷-۲۲ درصد افزایش و خیز آنها به‌ترتیب 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

۱. Fibre-reinforced polymer (FRP)
۲. Sheet
۳. Bar
۴. Rod or rebar

چوب است [۱۱]. علی‌رغم تقویت‌کنندگی بیشتر ورق فولادی، FRP وزن کمتر و مقاومت به خورندگی 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]. Raftery و Harte (۲۰۱۱) نشان دادند که حد تقویت‌کنندگی به آرایش تقویت‌کننده در بین لایه‌های چوب بستگی دارد. در این پژوهش، آنها الیاف FRP را بین دو لایهٔ 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 الاستیسیتهٔ کم گلولام ساخته‌شده با آن، تحقیق حاضر با هدف مقاوم‌سازی گلولام ساخته‌شده از صنوبر با پیچ به‌همراه چسب با ورق آلومینیوم، فولاد گالوانیزه و الیاف شیشه انجام گرفت. همچنین برای ساخت گلولام با هزینهٔ کمتر از پیچ به‌جای پرس برای اعمال فشار استفاده شد.

مواد و روش‌ها

برای اجرای این تحقیق ابتدا گرده‌بینه‌های چوب صنوبر (*Populus alba*) از شهرستان خلخال استان اردبیل تهیه و به لایه‌هایی با ابعاد ۲/۵×۱۰×۲۰۰ 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 پهنای ۸۰ میلی‌متر از چهار طرف (S4S[1]) رنده شدند. چگالی، مقاومت خمشی و مدول الاستیسیتهٔ چوب به‌کاررفته اندازه‌گیری‌شده با استاندارد ASTM D 143 [۱۶]، به‌ترتیب ۰/۳۸۱g/cm^3، ۴۹ MPa و ۶۲۰۰ MPa بود. چسب پلی‌اورتان با کد M518 از شرکت مواد مهندسی مکرر واقع در تهران تهیه شد که به رنگ کرم، با چگالی ۱/۳ g/cm^3 و درصد مواد جامد ۱۰۰ درصد بود. مقدار چسب پلی‌اورتان ۳۰۰ g/m^2 در نظر گرفته شد. برای تقویت مقاومت خمشی گلولام از ورق آلومینیوم و فولاد گالوانیزه به ضخامت ۱ میلی‌متر، الیاف شیشهٔ بافته‌شدهٔ دوجهته به ضخامت ۰/۲۳۶ میلی‌متر استفاده شد. ورق آلومینیوم و فولاد گالوانیزه 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 ۸×۱۵ cm^2 در لایهٔ 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

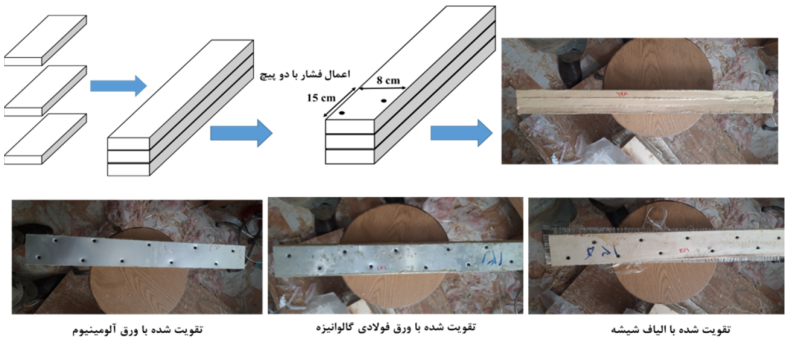
نوع تقویت‌کننده	ضخامت (mm)	وزن هر متر مربع (g/m^2)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
ورق فولاد گالوانیزه	۱	۷۸۵۰	۴۰۰	۲۰۰
ورق آلومینیوم	۱	۲۷۱۰	۲۹۰	۶۸/۹
الیاف شیشه	۰/۲۳۶	۶۰۰	۲۳۰۰	۹۰

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

۱. Surfaced four sides

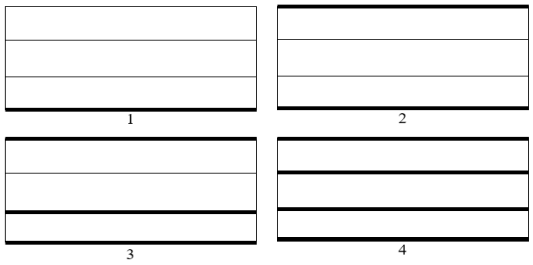
ساخته‌شده، پیچ استفاده‌شده برای این تحقیق، نحوهٔ قرارگیری تقویت‌کننده و آزمون خمش گلولام را نشان می‌دهد. مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ خمشی گلولام‌های ساخته‌شده با تبعیت از استاندارد ASTM D7341 به‌صورت سه‌نقطه‌ای با بار متمرکز در وسط دهانه با دستگاه اینسترون اندازه‌گیری شد [۱۷]. پهنای نمونه‌های آزمون خمش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

متغیرهای بررسی‌شده در این تحقیق شامل نوع 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 تجزیه‌وتحلیل آماری از آزمون فاکتوریل و برای مقایسهٔ میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن استفاده شد و نمونه‌ها در سطح اعتماد ۹۵ درصد از نظر آماری با نرم‌افزار SPSS تجزیه‌وتحلیل شدند.



الف) نمونهٔ گلولام

ب) پیچ به‌کاررفته در این تحقیق



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

د) آزمون خمشی

شکل ۱. الف) نمونه‌های گلولام‌های ساخته‌شده؛ ب)پیچ استفاده‌شده در این تحقیق (D قطر بیرونی، D_r قطر ریشه و L طول پیچ است)؛ ج) نحوهٔ قرارگیری تقویت‌کننده؛ د) آزمون خمش نمونه‌ها با دستگاه اینسترون

نتایج و بحث

نتایج تجزیهٔ 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 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.

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

منابع تغییرات	MOR (MPa)				MOE (MPa)			
	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Sig.	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	Sig.
نوع تقویت‌کننده	۲	۷۱۶/۵۰۳	۲۱/۹۵۶	۰/۰۰۰*	۲	۳۹۵۴۳۱۸۶/۱۱۱	۵۹/۸۰۹	۰/۰۰۰*
آرایش تقویت‌کننده	۳	۲۷۹/۵۶۷	۸/۵۶۷	۰/۰۰۰*	۳	۴۱۷۰۸۳۴/۲۵۹	۶/۳۰۸	۰/۰۰۳*
نوع تقویت‌کننده× آرایش تقویت‌کننده	۶	۲۹/۸۹۸	۰/۹۱۶	۰/۵۰۰ns	۶	۳۱۰۸۳۶۶/۱۴۸	۴/۷۰۱	۰/۰۰۳*

ns – معنی‌دار نبودن – * معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد

جدول ۳. مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ خمشی گلولام

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

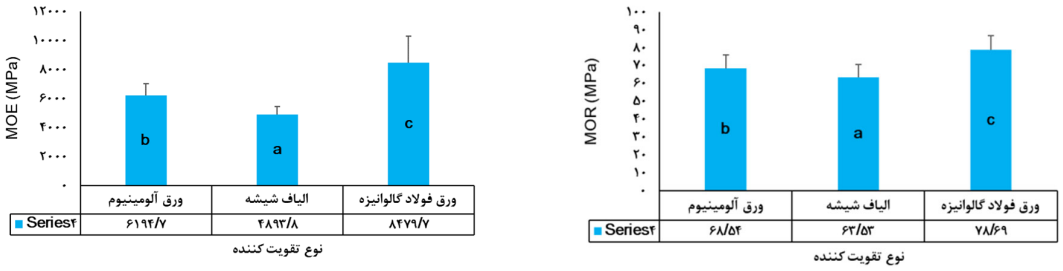
* اعداد داخل پرانتز انحراف معیار است. حروف بعد از پرانتز گروه‌بندی دانکن را نشان می‌دهند.

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

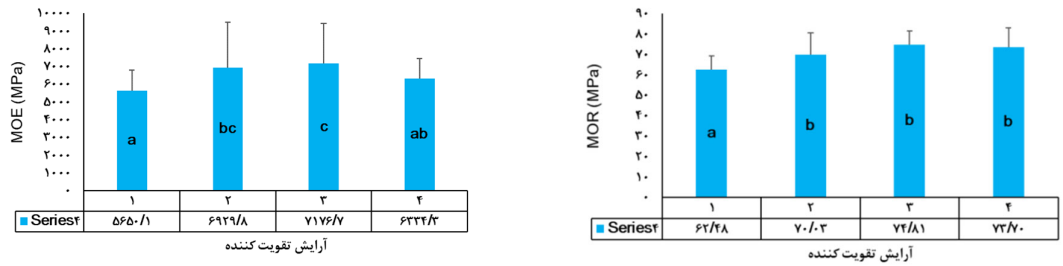
و بالا (فشاری) و کمترین MOR و MOE نیز مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه با آرایش ۱ (تقویت‌کننده در قسمت پایین (کششی) بود. بیشترین MOR و MOE در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه مربوط به گلولام‌های با آرایش ۴ (تقویت‌کننده در پایین، بالا و بین لایه‌ها)، در نمونه‌های تقویت‌شده با آلومینیوم مربوط به آرایش ۳ (تقویت‌کننده در پایین، بالا و بین دو لایهٔ 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 همهٔ 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 به‌ترتیب 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 به‌ترتیب ۱۳۴/۸، 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 الاستیسیتهٔ خمشی

شکل ۲ تأثیر مستقل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ خمشی را نشان می‌دهد. در شکل ۲الف، 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 به‌ترتیب 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 به‌ترتیب 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.



الف) نوع تقویت‌کننده



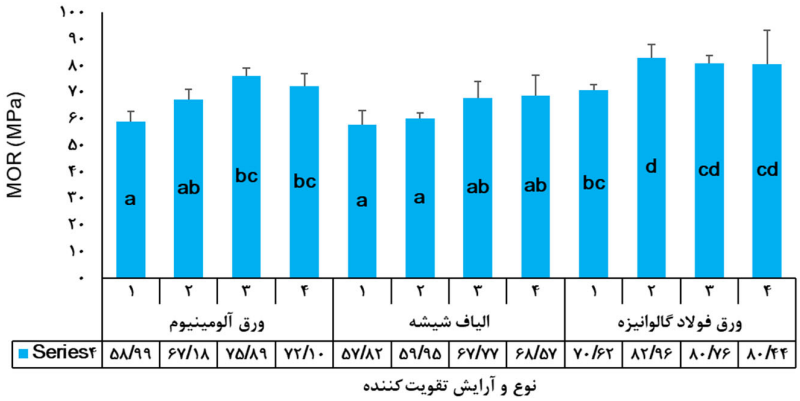
ب) آرایش تقویت‌کننده

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

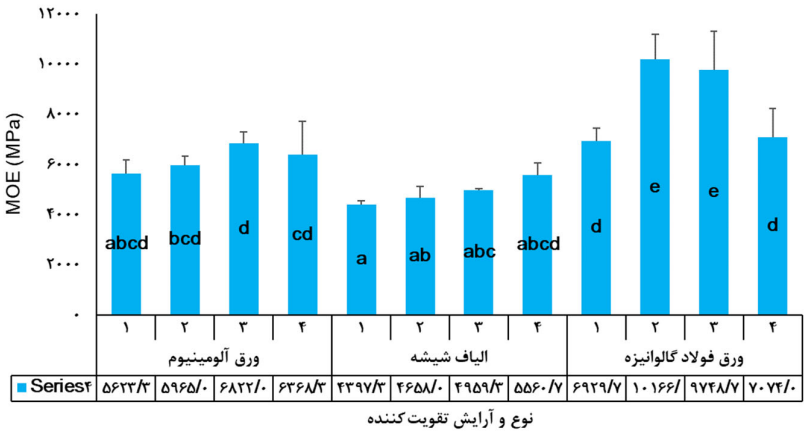
در شکل ۲ب، تأثیر مستقل آرایش تقویت‌کننده بر MOR و MOE ارائه شده است. مطابق این شکل بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با آرایش ۳ و کمترین آن مربوط به آرایش ۱ بوده و اختلاف بین آنها برای MOR حدود ۱۹/۷ درصد و برای MOE حدود ۲۷ درصد بود. نتایج گروه‌بندی دانکن نشان داد که اختلاف آماری بین MOR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

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

شکل ۳ تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ 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 به‌ترتیب ۴۳/۵ و ۱۳۱/۲ درصد بود.



الف) تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOR



ب) تأثیر متقابل نوع و آرایش تقویت‌کننده بر MOE

شکل ۳. تأثیر متقابل نوع تقویت‌کننده و آرایش تقویت‌کننده بر مقاومت و مدول الاستیسیتهٔ خمشی گلولام

نتایج نشان داد که MOR و MOE نمونه‌های تقویت‌شده با فلزاتی مانند ورق فولاد گالوانیزه و آلومینیوم بیشتر از الیاف شیشه است. با مقایسهٔ مدول الاستیسیته و مقاومت کششی الیاف شیشه و ورق آلومینیوم درمی‌یابیم که مقدار آنها برای الیاف شیشه بیشتر است، اما ضخامت الیاف شیشه حدود پنج‌برابر کمتر است. مقاومت کششی الیاف شیشه خیلی بیشتر از ورق فولاد است، اما مدول کمتری دارد. بیشتر بودن MOR و MOE گلولام تقویت‌شده با ورق فلزات را می‌توان به ضخامت زیاد آنها نسبت داد. نتایج تحقیقات گذشته نشان داد که تقویت‌کنندگی فلزات برای افزایش عملکرد خمشی در تیرهای لایه‌ای از FRP بیشتر است [۱۵–۸].

نتایج مربوط به آرایش محل قرارگیری تقویت‌کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE برای گلولام‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه در نمونه‌های با آرایش ۴، برای گلولام‌های تقویت‌شده با ورق آلومینیوم در نمونه‌های تقویت‌شده با آرایش ۳ و برای گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه در نمونه‌های با آرایش ۲ دیده شد. از طرف دیگر شکست در فولاد از نوع چکش‌خوار یا نرم[۱] و در بتن از نوع ترد[۲] است. شکست نرم در ایمنی مصالح اهمیت زیادی دارد، چنانکه اگر شکست در عضوی از سازه به‌صورت نرم باشد، با تغییر شکل زیاد پلاستیک یا ویسکوالاستیک قبل از شکست سبب پراکندگی تنش، اتلاف انرژی ناشی از تنش، ضربه و نیروی زلزله می‌شود. چوب شکستی بینابینی دارد، به‌طوری که در قسمت کششی بیشتر شکست ترد دیده می‌شود و در قسمت فشاری شکست نرم. شکست در FRP به‌صورت ترد است، ولی با کاربرد صحیح آن بین لایه‌های چوب می‌توان 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 می‌گیرد، شکست در آنها به‌صورت کششی به‌صورت ترد در قسمت زیرین، فشاری به‌صورت نرم در قسمت بالایی و شکست برشی در وسط دیده می‌شود [۱۸]. شکست ترد کششی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش واردشده در ناحیهٔ کششی از تنش مجاز چوب بیشتر باشد، اما تنش در ناحیهٔ فشاری در دامنهٔ الاستیک باشد و این شکست بیشتر در تیرهای تقویت نشده دیده می‌شود و از نوع ترد است. نوع دیگر شکست در خمش، شکست فشاری به‌صورت نرم است که وقتی اتفاق می‌افتد که تیر در ناحیهٔ کششی تقویت شود، در این حالت تنش فشاری توزیع‌شده در ناحیهٔ فشاری از تنش مجاز چوب بیشتر شده و سبب

۱. Ductile
۲. Brittle

شکست فشاری می‌شود. نوع دیگر شکست در خمش، شکست برشی است. این شکست بیشتر در تیرهای تقویت‌شده دیده می‌شود. وقتی تیر چوبی در ناحیهٔ فشاری و کششی تقویت می‌شود، شکست در آن از حالت کششی و فشاری به حالت برشی تغییر می‌یابد، چنانکه در این حالت تنش برشی توزیع‌شده در سطح مقطع تیر از تنش برشی مجاز چوب بیشتر شده و سبب شکست برشی می‌شود که به‌صورت ناگهانی در جهت موازی الیاف خواهد بود. شکل ۴ مدهای شکست گلولام در حالت‌های تقویت‌شده و تقویت‌نشده را نشان می‌دهد. گلولام‌هایی که به‌دلیل وجود تقویت‌کننده، شکست در آنها به‌صورت برشی دیده می‌شود، مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. گلولام‌هایی هم که شکست در آنها به‌صورت فشاری دیده می‌شود، در مقایسه با نمونه‌های با شکست کششی مقاومت بیشتری از خود نشان داده‌اند. شکست در نمونه‌های گلولام تقویت‌نشده به‌صورت کششی مشاهده شد (شکل ۴الف). شکست در گلولام‌های با آرایش ۱ به‌خصوص نمونه‌های تقویت‌شده با ورق آلومینیوم و فولاد به‌صورت فشاری دیده شد (شکل ۴ب). شکست در نمونه‌های تقویت‌شده با آرایش‌های ۲، ۳ و ۴ به‌صورت کششی، فشاری و برشی دیده شد (شکل ۴ج). با تقویت گلولام با ورق آلومینیوم با آرایش ۴ و ورق گالوانیزه با آرایش‌های ۳ و ۴، تنش برشی به‌حدی زیاد بود که سبب شکست برشی خط چسب و پیچ شد و کاهش مقاومت

الف) شکست کششی و ترد در گلولام تقویت‌نشده

ب) شکست فشاری در گلولام (گلولام تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۱)

گلولام تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲

گلولام تقویت‌شده با ورق آلومینیوم با آرایش ۳

ج) شکست برشی در گلولام

د) شکست برشی پیچ در اثر تنش برشی بین لایه‌ها

ه) شکست برشی و ترد ورق آلومینیوم در اثر کشش

شکل ۴. مدهای شکست در گلولام‌های بررسی‌شده

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

کمترین مقادیر مرجع MOR و MOE برای درجهٔ 16F-1.3E گلولام بر اساس آیین‌نامهٔ NDS به‌ترتیب ۱۱ و ۸۹۶۳ MPa است [۱۹]. مقادیر MOR و MOE انواع گلولام در کتاب راهنمای چوب برای جرم مخصوص ۰/۰-۴/۶ به‌ترتیب ۲۸/۶۱-۶۲/۶۲ و ۹۰۰۰-۱۴۵۰۰ MPa است [۲۰]. بیشترین MOR و MOE مشاهده‌شده برای گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه با آرایش ۲ به‌ترتیب ۸۲/۹۶ و ۱۰۱۶۶/۳۳ MPa بود که فراتر از حد استاندارد است، با اینکه نمونه‌ها از صنوبر با چگالی کم ($0/381 g/cm^3$) و همچنین با پیچ به‌جای 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 گالوانیزه نشان داد که MOR و MOE همهٔ نمونه‌های تقویت‌شده از نمونهٔ 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 گالوانیزه مربوط به آرایش ۲ بود. نتایج تأثیر مستقل نوع تقویت‌کننده نشان داد که بیشترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های تقویت‌شده با ورق فولاد گالوانیزه و کمترین آنها مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بود. نتایج تأثیر مستقل آرایش تقویت 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

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., Jasieńko, 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., Jasieńko, 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., Jasieńko, 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]. Jasienko, 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