

بررسی خصوصیات مکانیکی تیرهای گلولام ساخته شده به کمک پیچ یا چسب و تقویت شده با تسمه‌های فولادی

چکیده

تقویت تیرهای گلولام برای جلوگیری از افزایش حجم عنصر سازه و به جهت کاهش مصرف چوب اجتناب‌ناپذیر است. مقدار افزایش مقاومت این محصولات مهندسی شده به همراه استفاده محدود از سایر مصالح این مهم را فراهم می‌سازد. در این مطالعه، تیرهای گلولام در دو گروه چسبی و پیچی که شماری از آن‌ها با تسمه تقویت و یا پیش‌تنیده شده بودند، ساخته شدند. نمونه‌های گلولام این دو گروه چسبی و پیچی با تسمه و میلگرد تقویت شدند و در یکی از تیمارهای پیچی دارای پیچ و مهره میلگردی پیش‌تنیدگی تقریبی ۵ کیلو نیوتنی ایجاد شد. پارامترهای رفتاری MOR، MOE، مقاومت و سختی نمونه‌ها با همدیگر مقایسه شد. همچنین تاثیر مهارهای انتهایی تیر مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه رفتار نمونه‌های پیچی با چسبی، از ضریب پیشنهادی لغزش بهره‌جویی گردید. در بررسی‌ها روش آنالیز واریانس یکطرفه و مقایسه میانگین با آزمون حداقل اختلاف معنی دار انجام شد. محاسبات و تجزیه تحلیل آماری اثر معنی‌دار طرح‌های تقویتی و افزایش مقاومت انواع تیرهای چسبی را نشان می‌دهد. مهارهای انتهایی در تیرهای گلولام با استفاده از تسمه فولادی، نقش مؤثری را از خود نشان می‌دهند. مهارها حرکت نسبی لایه‌ها بر روی یکدیگر را کنترل نموده و در نمونه‌های چسبی سبب کاهش ظرفیت اما در مورد نمونه‌های پیچی افزایش مقاومت نهایی را باعث شدند. از آنجا که سختی از جمله پارامترهای مهم رفتاری برای بررسی خیز و خدمت‌پذیری آن‌ها در طی بهره‌برداری است، ضریب لغزش می‌تواند به عنوان پارامتر رفتاری مناسب برای مقایسه‌ی دو حالت چسبی و پیچی در حضور اندرکنش عوامل طراحی بکار رود. پیش‌تنیدگی سبب کاهش قابل توجه ضریب کشسانی به دلیل تفوق تنش‌های برشی ناشی از دو عامل هم‌زمان مهار و پیش‌تنیدگی بر عوامل سختی نمونه‌ها شده است. بطور کلی استفاده از چسب و تسمه تقویتی اثرگذاری مناسبی بر روی نمونه‌ها داشته و برای شرایط مصرفی متنوع پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: تقویت مکانیکی، پیش‌تنیده، گلولام، لغزش.

داود مشایخی^۱

محمود رضا حسینی طباطبائی^{۲*}

علی بیات کشکولی^۳

^۱ کارشناسی ارشد گرایش سازه، دانشگاه زابل

^۲ استادیار گروه عمران، دانشگاه زابل

^۳ استاد گروه صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه زابل

مسئول مکاتبات:

mr.htabatabaei@uoz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۸

مقدمه

از ضعف‌های تیرهای گلولام مقاومت کششی عمود بر ایفای آن است و همچنین از جمله کاستی‌های چوب، مقاومت برشی کم آن در جهت ایفای می‌باشد [۲]. به طور

چوب در مقایسه با فولاد و بتن، مصالح ساختمانی سبک، تجدیدپذیر و سازگار با محیط‌زیست است [۱]. یکی

می‌دهد [۷]. روش دیگر، کاهش نیروهای کششی و فشاری (افزایش ظرفیت) از طریق تقویت تیر در نواحی این نیروها با مصالح با کیفیت بالا است. در زمینه فن‌های تقویت اجزا چوبی از مواد مصنوعی جدید مانند الیاف شیشه، کربن، آرامید که دارای ویژگی‌های مکانیکی بالایی می‌باشند، استفاده می‌شود [۸]. تحقیقات نشان داده است که بکارگیری این مواد می‌تواند مقاومت و انعطاف پذیری بیشتری را نسبت به عملکرد ذاتی چوب ارائه کند [۹]. برای ارتقاء خصوصیات مکانیکی تیرها و جلوگیری از انتشار و بازشدگی ترک‌ها، می‌توان از پیچ و چسب، صفحات یا میلگردهای فولادی یا پلیمری بهره برد. تأثیر هر روش بستگی به عوامل بسیاری از جمله شیوهی اتصال با چوب، منطقه تحت پوشش و مکانیزم توزیع و انتقال تنش دارد [۱۰]. یک فن برای بهبود خواص مکانیکی تیرهای چوبی گلولام وارد کردن میله‌های فولادی و اعمال یک سطح پیش‌تنیدگی متوسط است. کارایی تیرهای گلولام پیش‌تنیده شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد بطور عمده بهبود می‌یابد [۱۱]. استفاده از فلزات برای تقویت تیر در دهه‌های اخیر مورد بررسی قرار گرفته است [۳، ۱۲ و ۱۳]. استفاده از فلزات برای تقویت تیر می‌تواند انعطاف‌پذیری مناسبی را در سازه ایجاد کند [۱۴]. افزون بر استفاده از صفحات و میله‌های فولادی، تقویت کننده الیاف پلیمری شیشه‌ای، CFRP و GFRP ظرفیت بار را افزایش می‌دهد و استفاده از چوب‌های کم‌مقاومت را نیز توجیه اقتصادی می‌نماید [۱۵ و ۱۶]. باید افزود، تقویت با الیاف GFRP به دلیل کوچک بودن ضریب کشسانی تقویت کننده و محدودیت‌های چسبندگی، حداقل کمک را به سختی تیرهای گلولام می‌کند [۱۷]. تیرهای گلولامی که با الیاف و چسب اپوکسی تقویت می‌شوند در نهایت در سطح اتصال چسب با الیاف گسیخته نمی‌شوند ولی توده ای از الیاف از سطح چوب جدا می‌شود، زیرا مقاومت اتصال چسب به الیاف بیشتر از اتصال الیاف به الیاف چوب است [۱۸].

عملکرد خمشی گلولام های سه لایه ساخته شده از صنوبر و با آرایش های متفاوت و تقویت شده با ورق الومینیوم، گالوانیزه و الیاف شیشه بررسی شده است. عملکرد مناسب گلولام های تقویت شده و مخصوص

معمول، به منظور غلبه بر برخی ضعف‌های خواص مکانیکی چوب، از تیرهایی با مقطع قوی‌تر با ابعاد مقطع بزرگ، و در نتیجه سختی بزرگ، بهره‌جویی می‌شود. از یک سو روز به روز دسترسی به چوب‌های بلند و قطور سخت‌تر و قیمت آن گران‌تر می‌شود، از سوی دیگر، بکارگیری این مقاطع گاه، از نظر معیار طرح معماری با توجه به کاهش فضای داخلی ساخت و ساز امکان‌پذیر نیست، چراکه سبب از دست دادن جذابیت کاربردی ساختمان و اشغال فضای بسیار می‌شود [۳]. در این میان، محصولات مهندسی شده به طور کلی دارای خواص بهتر در ساختار و عملکرد در مقایسه با چوب ماسیو می‌باشند. هدف از ساخت این محصولات، استفاده‌ی مؤثر از الیاف چوب به منظور توزیع تنش و کاهش اثرات نقص‌های طبیعی چوب می‌باشد و به تولید محصولاتی با ساختارهای کارآمد و با عیوب کم منجر می‌شود [۱]. یکی از عناصر سازه‌ای که می‌تواند عملکرد کاربردی چوب به ویژه ظرفیت آن‌ها را به طور قابل توجهی افزایش دهد گلولام ها می‌باشند [۴]. انرژی کمتری در ساخت این فرآورده نسبت به سایر فرآورده‌های حاصل از مواد فلزی و پلاستیکی مصرف می‌شود و خسارت کمتری به محیط‌زیست وارد می‌کند [۵]. مقاومت بیشتر، ترک‌ها و تابیدگی‌های کمتر، اندازه مقطع بزرگ، طول بیشتر، تنوع شکل، ساخت در اندازه سفارشی و مطابقت با استاندارد از مزایای این فرآورده‌ها می‌باشد. از آن سو، در طراحی اعضای چوبی مانند تیرهای گلولام، گاه به دلیل بزرگی نیروهای فشاری و کششی، لازم است این اعضا به روش‌های گوناگون تقویت شود. باید افزود این نیروها بایستی به وسیله‌ی نیروهای برشی (تنش‌های برشی) بزرگ در لایه‌های افقی در ارتفاع مقطع به تعادل رسیده و لایه به لایه از فشاری به کششی (و بالعکس) انتقال یابد. در این صورت یک راهکار، تقویت لایه‌های افقی است [۶]. روش‌های تقویتی برای افزایش مقاومت می‌تواند از ترکیب اصلاح مکانیکی و حرارتی باشد که برای افزایش مکانیکی از اصلاح مکانیکی یا فشرده کردن و برای افزایش دوام از اصلاح حرارتی استفاده کرد. این روش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته خمشی گلولام‌ها را افزایش می‌دهد، ولی مقاومت برشی خط چسب آن‌ها را کاهش

کرد، اما مقاومت برشی اسمی در فصل مشترک چوب-چسب از ۶/۸ به ۲/۸ مگاپاسگال و برای فصل مشترک میلگرد-چسب از ۸/۹ به ۴/۷ مگاپاسگال کاهش یافت. در مطالعه‌ی تجربی مقاومت خمشی تیرگلولام ساخته شده از گونه صنوبر با اتصال دهنده‌های مکانیکی [۱۹]. نتایج نشان داد که بیشترین MOR و MOE به ترتیب مربوط به گلولام‌های ساخته شده با چهار عدد پیچ به همراه چسب (۶۹ MPa) و دو عدد میخ فولادی به همراه چسب (۶۷۳۷MPa) بود. کمترین MOR و MOE مربوط به گلولام‌های ساخته شده با دو عدد میخ شانهای بدون چسب به ترتیب ۲۳ و ۱۲۵۲ MPa بود. جهت بدست آوردن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی گلولام، چوب‌های با دانسیته متوسط برای ساخت گلولام پیشنهاد شده است [۲۶].

تیرهای گلولام به عنوان یک عضو بسیار مهم در سازه‌های داخلی و بیرونی است. بررسی رفتار این نوع تیرها به ویژه در ابعاد واقعی باعث استفاده بهینه از منابع رو به کاهش چوب می‌شود. اهمیت تیرهای گلولام تقویت شده در افزایش کارایی سازه مهندسی شده نمود پیدا می‌کند و عمر سازه را همراه با زیبایی و جذابیت ذاتی چوب افزایش می‌دهد. از اینرو، هدف این پژوهش ساخت و بررسی تیرهای گلولام در دو گروه چسبی و پیچی است که شماری از آن‌ها با تسمه تقویت و یا تحت پیش‌تنیدگی قرار گرفته‌اند، می‌باشد. تأثیر نوع ساختار تیرها (چسبی یا پیچی)، تقویت و پیش‌تنیدگی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با توجه به تفاوت ساز و کار انتقال تنش‌های برشی در لایه‌های افقی تیر برای اتصال‌های چسبی با پیچی، ضریبی نوین تعریف و از آن در بررسی این تفاوت بهره‌جویی شده است.

مواد و روش‌ها

چوب

برای ساخت تیمارها گونه چوبی نراد (Abies)، به تعداد ۱۴ الوار به طول ۶۰۰۰ میلیمتر با پهنای ۲۵۰ و ارتفاع ۶۰ میلیمتر خریداری شد. تعداد تکرار آزمایش‌ها ۳ بودند به جز در مورد برش که تعداد تکرار ۶ بود. چوب این گونه مصرفی دارای دانسیته ۰/۳۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب

تیرهای تقویت شده با ورق گالوانیزه مشهود بوده است [۱۹]. همچنین مقاومت خمشی گلولام‌هایی با اتصال مکانیکی شامل پیچ و میخ با تیرهای ساخته شده با چسب پلی‌اورتان تحت پرس سرد مقایسه شد. بیشترین مقاومت خمشی مربوط به تیرهای ساخته شده با چهار عدد پیچ و یا دو عدد میخ فولادی با چسب است و کمترین مقاومت مربوط به گلولام‌های ساخته شده با دو عدد میخ شانهای بدون چسب است [۲۰]. سختی خمشی تیرهای تقویت شده با استفاده از فولاد و FRP به صورت هم‌زمان در ناحیه فشار و کشش، نسبت به مقاومت خمشی آن بهتر است [۲۱]. براساس مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی رفتار طولانی مدت تیرهای چوبی تقویت شده با میله‌های FRP نزدیک سطح مشخص شد که کرنش ناشی از خزش و انحنای تیرهای تقویت شده کمتر از تیرهای تقویت نشده است [۲۲]. مقاومت و سختی ۲۴ تیر گلولام تقویت شده با استفاده از BFRP و GFRP به صورت پیش‌تنیده و بدون پیش‌تنیدگی بررسی شد [۲۳]. پیش‌تنیدگی در الیاف پلیمری، تأثیر چندانی بر روی سختی ندارد و همچنین، تنها درصد کمی از مقاومت BFRP (به‌طور متوسط حدود ۱۰ درصد) استفاده می‌شود و بهره‌وری از تیرهای تقویت شده پیش‌تنیده BFRP تقریباً دو برابر تیرهای تقویت شده به صورت ساده می‌باشد.

خواص مکانیکی تیرهای گلولام ساخته شده با آرایش متفاوت لایه‌ها و مسلح‌شده با میلگردهای فولادی بررسی شد [۲۴]. در پی تقویت در نمونه‌های شاهد اینگونه تیرها در مقایسه با تیرهای تقویت نشده، نیروی نهایی به ۱۱ تا ۸۵ درصد افزایش یافت. ضریب گسیختگی تیرهای تقویت شده ارتباط مستقیمی با نوع تقویت دارد. تیرهای تقویت شده‌ی شاهد نسبت به تیرهای تقویت شده با لایه‌ی یکسره، دارای درصد افت کمتر ضریب کشسانی بودند.

رفتار اتصال میلگرد فولادی و پلیمری در جهت موازی الیاف چوب سپیدار بلوک‌های گلولام بررسی شد [۲۵]. بیشترین مقاومت توان نگهداری میلگرد، مربوط به میلگردهای آجدار پلیمری متصل شده با چسب اپوکسی با طول اتصال ۳۰۰ میلیمتر برابر با ۸۲/۵ کیلو نیوتن بود. براساس نتایج، با افزایش طول اتصال، ظرفیت بار محوری جهت بیرون کشیدن میلگرد افزایش پیدا

و درصد رطوبت ۹/۵ بود. مشخصات مکانیکی چوب با استفاده از استاندارد ASTM D143 اندازه گیری و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- مقاومت و ضرایب کشسانی چوب مصرفی بر حسب MPa

نوع آزمایش	مقاومت چوب	مقادیر
مقاومت فشاری	حد تناسب موازی با الیاف	۱۴/۲
	فشار نهایی موازی با الیاف	۳۵/۲
	ضریب کشسانی موازی با الیاف	۱۷۶۵
مقاومت کششی	حد تناسب موازی با الیاف	۱۶/۰۸
	کشش نهایی موازی با الیاف	۶۳/۳
	ضریب کشسانی کششی موازی با الیاف	۲۵۳۳
مقاومت برشی	حد تناسب موازی با الیاف	۵/۶۱
	برش نهایی موازی با الیاف	۷/۴۵
	حد تناسب موازی با الیاف	۳۳/۵۰۸
مقاومت خمشی	نهایی خمشی موازی با الیاف	۴۷/۵
	ضریب کشسانی موازی با الیاف	۷۱۸۷/۹

چوب می باشد، استفاده شد. درصد مواد جامد و سایر مشخصات چسب مورد مصرف اندازه گیری و در جدول ۲ نشان داده شده است.

چسب پلی وینیل استات

در این پژوهش برای ساخت تیمارهای دسته اول شامل گروه‌های GB، GRB-EP، AGRB-EP از چسب پلی وینیل استات به عنوان چسب سرد و رایج در کار با

جدول ۲- مشخصات چسب مصرفی

رنگ و وضعیت ظاهری	سفید شیری، یکنواخت و بدون ذرات خارجی
اسیدیته	۳-۷
خاصیت تشکیل فیلم	یکنواخت، بی‌رنگ و شفاف
حداقل دمای تشکیل فیلم	۲۰°C
زمان انبار داری	۶ ماه
مواد جامد	٪۴۰
زمان مونتاژ	معمولا ده دقیقه
آماده سازی	نیاز ندارد
نیروی برشی مقاوم N	۱۳۱۱۱
ضریب کشسانی برشی MPa	۸۶۶۴/۵

اپوکسی با نام تجاری EPIKOTE 828 از شرکت مقاوم‌سازان افزیر تهران تهیه شد، جدول ۳.

رزین اپوکسی

قبل از استفاده چسب، سطح موردنظر باید از هر گونه آلودگی به خصوص گرد و خاک و چربی پاک شود. چسب

جدول ۳- مشخصات چسب اپوکسی

مقدار	واحد	روش آزمایش	خواص
۱۴-۱۲	Pa.s	ASTM D445	ویسکوزیته در ۲۵°C
۵۴۲۰-۵۲۶۰	Mmol/kg	SMS2026	مقدار اپوکسی
۱۹۰-۱۸۴	G		حجم مولار
۱۰۰Max	Pt/Co	ASTM D1209	رنگ

برحسب میلی‌متر به ترتیب، ۶۰ و ۴۰ و نیروی برشی مجاز آن ۵۲۴۳ نیوتن بود.

تسمه فولادی و بولت

تسمه و پیچ که در این آزمایش استفاده شد از نوع ST-37 است که مشخصات فولاد شامل، ضریب کشسانی، تنش تسلیم و تنش نهایی بر حسب MPa به ترتیب عبارت بود از ۱۰۵*۲، ۲۴۰ و ۳۷۰. جدول ۴ مشخصات پیچ را نشان می‌دهد. شکل ۱ نمونه‌ی پیچ و شکل ۲ نمونه‌هایی از پیچ و تسمه‌ها را در حین ساخت تیرها نشان می‌دهد. فاصله‌ی پیچ‌ها از یکدیگر ۶۰ میلی‌متر و به صورت زیگزاگ بکار رفته است. ابعاد مقطع تسمه ها ۴*۲۸ میلی‌متر و در طول تیر بکار رفته است.

پیچ

برای اتصال لایه‌ها به یکدیگر پیچ‌ها از نوع معمولی انتخاب شدند. این نوع پیچ دارای ساق با بخش دندانه شده و یک بخش صاف است که قطر بیرونی بخش دندانه شده برابر با بخش صاف است. همچنین ناحیه دندانه‌دار، دارای قطر یکنواخت در کل طول تیر است که این مزیت کمک می‌کند تا بار یکنواخت بیشتری بین پیچ و عناصر چوب انتقال پیدا کند. قبل از انجام عملیات پیچ‌کاری، سوراخ‌های پیش ساخته ایجاد شد که برای جلوگیری از ایجاد ترک در نقاط مشخص شده، محل آن‌ها دریل کاری شد و قطر مته آن برابر با قطر هسته پیچ‌ها انتخاب شد. اندازه‌ی قطر بخش‌های گوناگون پیچ شامل سر، ساق، هسته و دندانه بر حسب میلی‌متر به ترتیب عبارت بود ۰٫۷، ۳/۵، ۲/۵ و ۳/۵ بود. طول کل پیچ و طول بخش دندانه‌ای



شکل ۱- نمونه‌ای پیچ

جدول ۴- مشخصات پیچ معمولی

مقدار	واحد	پیچ معمولی
۷	میلی‌متر	قطر سر پیچ (dh)
۲/۵	میلی‌متر	قطر ساق پیچ (ds)
۲/۵	میلی‌متر	قطر هسته (dc)
۳/۵	میلی‌متر	قطر دندانه پیچ (dt)
۶۰	میلی‌متر	طول کل پیچ (L)
۴۰	میلی‌متر	طول محدوده‌ی دندانه‌دار (Lg)
۵۲۴۳	N	نیروی برشی مجاز



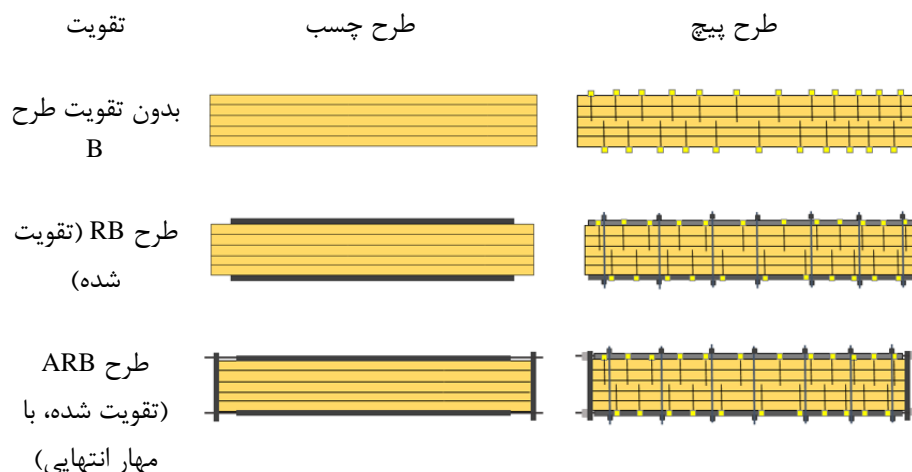
شکل ۲- تسمه‌ها و پیچ‌ها

دسته دوم از هیچ چسب یا مواد شیمیایی برای اتصال لایه‌ها یا مصالح تقویتی به کار گرفته نشد. دسته اول و دوم به ترتیب به عنوان دسته‌های چسبی (G) و پیچی (S) نام‌گذاری شدند. دسته چسبی شامل؛ گروه GB؛ تیرهای ساده بدون تقویت (چسبی G)، سه نمونه، تیر تقویت شده با تسمه بدون مهار انتهایی؛ GRB-EP، سه نمونه و تیر تقویت شده با تسمه و مهار شده در انتها؛ AGRB-EP، سه نمونه بود. همچنین گروه پیچی شامل؛ گروه SB؛ تیرهایی که با پیچ کردن لایه‌ها به هم ساخته شده، گروه SRB- BP، سه نمونه؛ تیرهای تقویت شده با تسمه و بدون مهار انتهایی و بدون پیش‌تنیدگی، سه نمونه؛ گروه ASRB-BP؛ تیرهای تقویت‌شده با تسمه‌ی مهار شده، سه نمونه و گروه PASRB-BP؛ تیرهای تقویتی و مهار شده‌ی پیش‌تنیده شده شامل سه نمونه و مجموعاً ۲۱ نمونه بود. لازم به ذکر است که برای مقایسه و تجزیه و تحلیل داده نمونه‌ها از گروه GB به عنوان گروه شاهد استفاده شد و علاوه بر این، تمام نمونه‌های پیچی با گروه SB مقایسه شدند (شکل ۳ را ببینید).

ساخت تیرها، دسته‌بندی و محاسبات پارامترها

الوارهای برش خورده چوب پس از خشک شدن در یارد چوب خشک‌کنی و قرار گرفتن در مجاورت جریان هوای آزاد، با رسیدن به رطوبت ۹/۵ درصد، به کارگاه برش دانشگاه زابل منتقل شدند. پس از رسیدن الوار به رطوبت مطلوب، برای انجام بهتر فرآیند چسب‌زنی و افزایش هرچه بیشتر سطح تماس لایه‌ها، سطوح لایه‌ها به واسطه دستگاه گندگی به صورت کامل و یکنواخت مسطح گردید. پس از عملیات چسب‌زنی و پیچ‌کاری، هفت نوع یا در مجموع ۲۱ نمونه‌ی تیر (۵ لایه) با ابعاد ۲۰۰۰×۷۵×۱۲۵ میلی‌متر ساخته شد. پهنای هر لایه ۷۵ و ضخامت آن ۲۵ میلی‌متر بود.

مطابق با اهداف پژوهش، دو دسته تیر برای انجام آزمون ساخته شد. دسته اول شامل تیرهای چند لایه‌ای هستند که اتصال در آن‌ها با استفاده از چسب صورت گرفت (مجموعاً ۹ نمونه). دسته دوم شامل تیرهای چندلایه‌ای می‌باشند که اتصال لایه‌ها با استفاده از پیچ صورت گرفت (مجموعاً ۱۲ نمونه). قابل توجه است در



شکل ۳- طرح‌های اتصال لایه‌ها (پنج لایه) و شیوه‌های تقویت

جنس فولاد ST-37. در ادامه جداول علائم بکار رفته و نامگذاری نمونه‌ها ارائه شده است.

عوامل ثابت در مرحله اول عبارتند از: گونه چوبی: نراد، رزین کامپوزیت: اپوکسی برای چسباندن تسمه به چوب، میلگرد رزوه شده: فولاد ST-37 و ماده کامپوزیت: تسمه از

جدول ۵. علائم نامگذاری نمونه‌ها.

شرح	علامت
تیر	B (Beam)
چسبی	G (Glue)
پیچ-پیچی	S (Screw)
تقویت شده	R (Reinforced)
مهار شده (انتهایی)	A (Anchored)
پیش کشیده (تنیده)	P (Pretension)

جدول ۶. نام اختصاری و مشخصه‌ی تیمارها.

مشخصه	تیمار	گروه تیر
تیر چسبی	GB	
تیر چسبی تقویت شده	GRB	G (Glue)
تیر چسبی تقویت شده دارای مهار انتهایی	AGRB	
تیر پیچی	SB	
تیر پیچی تقویت شده	SRB	S (Screw)
تیر پیچی تقویت شده با مهار انتهایی	ASRB	
تیر پیچی تقویت شده با مهار انتهایی و پس کشیده	PASRB	

توسط کاردک بر روی سطح اتصال توزیع گردید [Marra, A.A. (1992) Technology of wood bonding principles in practice. Van Nostrand Reinhold, New York, USA]. در ادامه قطعات تیر توسط گیره مکانیکی روی یکدیگر سوار شدند (شکل ۴ سمت راست). هر نمونه

تیرهای چسبی

پس از آماده‌سازی و تفکیک تمام قطعات تیر، ساخت تیر انجام شد. در ابتدا لایه‌ها اندازه‌گیری، و آماده شدند، سپس چسب پلی‌وینیل‌استات به مقدار ۱۰۰ گرم بر مترمربع

به سطح چوب اتصال یابد. سپس، سطح تسمه‌ها توسط سنبله برقی از هرگونه آلودگی و زنگ‌زدگی تمیز شد. تسمه فولادی به واسطه گیره مکانیکی روی سطح تیر به مدت ۵ ساعت قرار گرفت. در آخرین مرحله از ساخت، مهار دو سر تیر به تسمه‌ها اتصال یافت (شکل ۴ سمت چپ). سه نوع یا در مجموع ۹ نمونه چسبی آماده شد.



به مدت ۲۴ ساعت زیر گیره قرار گرفت تا لایه‌ها به خوبی بر روی یکدیگر اتصال یابند. پس از کنترل و اطمینان از متصل شدن لایه‌ها، برای افزایش سطح تماس بین لایه چوبی و ورق فولادی، سطوح فوقانی و تحتانی گلولام دوباره توسط دستگاه گندگی صاف گردید، چرا که مهم است تسمه‌های فولادی به خوبی توسط چسب اپوکسی



شکل ۴- اتصال لایه‌های چوبی توسط چسب و گیره مکانیکی و مهار شدن دو سر تیر توسط قاب فولادی

فشاری و کششی تیر نصب شدند. در آخر مهارها در دو سر تیر قرار گرفته و تسمه‌ها در حالت ساده یا پیش‌تنیده تنظیم شدند. چهار نوع یا در مجموع ۱۲ نمونه پیچی آماده به ابعاد مقطع ۲۸ در ۴ میلی‌متر و نسبت مقطع فولاد به چوب ۲/۳۸ درصد آزمون شد و مقدار نیروی پیش‌تنیدگی یکی از تیمارها برابر ۴/۴۸ کیلو نیوتن بود.

محاسبه تعداد و فاصله پیچ

نخست بار مجاز تیر ($2V=$) بر حسب ظرفیت فشاری یا کششی چوب برآورد شد ($V=14234N$) و سپس با استفاده از رابطه‌های زیر و مقادیر بخش‌های ۲-۳ و ۴ فاصله‌ی پیچ‌ها از یکدیگر طراحی شد. در رابطه‌های زیر از عباراتی استفاده شده است که در ادامه می‌آید. Q لنگر استاتیک و I لنگر لختی مقطع تیر و V نیروی برشی یا واکنش تکیه‌گاهی، q جریان برش، q' جریان برش سهم هر پیچ و s فاصله‌ی طولی پیچ‌ها (هر مقطع، شامل دو پیچ می‌باشد، $q'=q/2$) و Fv نیروی مجاز برشی پیچ است.

تیرهای پیچی

مانند گروه یک پس از آماده‌سازی و تفکیک تمام قطعات تیر، عملیات ساخت آغاز شد. پس از اندازه‌گیری، نخست برای جلوگیری از حرکت لایه‌های چوبی در حین انجام ساخت، لایه‌ها توسط گیره بر روی یکدیگر قرار گرفته و نقاط پیچ‌ها مشخص شد (نقاط پیچ‌ها توسط رابطه‌های بخش محاسبه تعداد و فاصله پیچ مشخص گردید). در دو سوم قسمت انتهایی تیر به علت اثر نیروی برش بزرگ، پیچ‌ها در فاصله ۶۰ میلی‌متری از یکدیگر قرار گرفته و در یک سوم میانی به دلیل نیروی خمشی حداکثر و احتمال شکست بر روی خط پیچ، پیچ‌ها در فاصله ۹۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. در ادامه نقاط به صورت زیرک‌اک بر روی تیر علامت‌گذاری شده و عملیات سوراخ‌کاری توسط دریل که قطر مته آن برابر با هسته دندان پیچ می‌باشد، آماده گردید. سپس پیچ‌ها در محل سوراخ قرار گرفته و تیر لایه‌ای پیچی ساخته شد. با توجه به رابطه محاسبه محل پیچ‌ها تسمه‌های فولادی با استفاده از دستگاه دریل ایستاده، در هر ۱۲۰ میلی‌متر به قطر ۶۰ میلی‌متر سوراخ شد و توسط بولت در قسمت

$$I_0 = \frac{1}{12}(75)(125)^3 = 12207031 \text{ mm}^4 \quad I_{eq} = I_0 + 2(4 * 28)(62.5 + 2) = 13138927 \text{ mm}^4$$

$$Q_0 = (75) * \left(\frac{62.5^2}{2}\right) = 146484 \text{ mm}^3 \quad q_0 = \frac{VQ_0}{I_0} = \frac{14234.35 * 146484}{12207031} = 170.81 \text{ N/mm}$$

$$\dot{q} = \frac{q_0}{2} \rightarrow F_v = s_0 \dot{q} \rightarrow s_0 = 6.1 \text{ cm}$$

محاسبه‌ی رابطه‌ی ضرایب ظاهری MOE و MOR

بارگذاری گلولام‌های در اندازه واقعی انجام شد (شکل ۵). ضریب کشسانی ظاهری با مشاهدات بار و تغییر مکان در ناحیه کشسانی، به کمک روش تیرمزدوج (روشی در تحلیل سازه‌ها برای یافتن رابطه‌ی بار-تغییرشکل در تیرها) محاسبه گردید. مطابق با این روش، در آغاز مزدوج تیر اصلی رسم شد. سپس نمودار لنگر تیر اصلی را بر سفتی خمشی تیر اصلی تقسیم نموده و سپس روی تیر مزدوج بارگذاری شده است، سرانجام با توجه به این قضیه که لنگر در هر نقطه از تیر مزدوج برابر با جابه‌جایی در تیر اصلی است، ضریب کشسانی در وسط دهانه به کمک رابطه‌ی ایستایی گشتاور محاسبه شد.

$$M_0 = \Delta = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2) \rightarrow$$

$$MOE = \frac{Pa}{24\Delta I_{eq}} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

محاسبه فاصله اتکا جانبی

باتوجه به احتمال کمانش در تسمه‌های فشاری، باید اتکا جانبی آن‌ها تامین گردد. فاصله مناسب جهت اتکا جانبی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$(L_e = KL)P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (1)$$

که در رابطه فوق، E؛ ضریب کشسانی، I؛ گشتاور اینرسی، L؛ طول عضو فشاری، L_e؛ طول موثر، K؛ ضریب طول موثر که اینجا در جهت اطمینان از عدم کمانش برابر یک پنداشته شده است و P_{cr}؛ بار بحرانی فشاری می‌باشد. محاسبات نشان دادند که فاصله‌ی بدست آمده از کنترل پیچ‌ها پاسخگوی عدم کمانش ورق‌ها نیز می‌باشد.



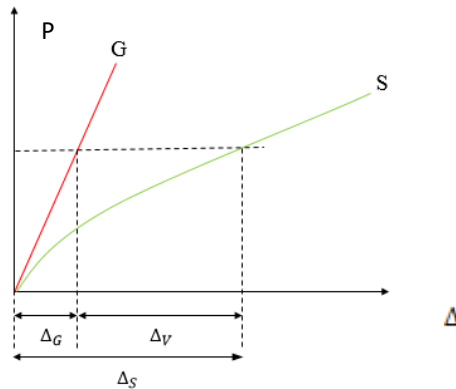
شکل ۵- روش بارگذاری تیرهای گلولام در اندازه واقعی

I_{eq}؛ لنگر لختی معادل مقطع تقویت شده (مقطع تبدیل یافته که در مورد مقطع مرکب چوب-ورق، ورق به چوب هم‌ارز تبدیل شده است) می‌باشد.

که در این رابطه M₀؛ لنگر وسط دهانه‌ی تیر مزدوج (خیز تیر اصلی، Δ) و P؛ بار کل وارده از جک به تیر، a؛ فاصله یک نقطه بارگذاری تا تکیه‌گاه، L؛ طول دهانه تیر، Δ؛ جابه‌جایی وسط دهانه تیر اصلی و

مقطع، در چوب تنش‌های لهیدگی ایجاد می‌گردد. به تدریج با رسیدن تنش موجود به تنش لهیدگی چوب، پیچ‌ها درون چوب نفوذ کرده و سبب لغزش لایه‌ها آن بر روی هم می‌شود. این لغزش افزون بر لغزش لایه‌های چوب در اثر تنش‌های برشی موجود در لایه‌های افقی آن است. بنابراین خیز کل تیر (بدست آمده از آزمایش) مجموع خیز ناشی از دو عامل یادشده است. برای بررسی میزان لغزش ناشی از تنش روی پیچ در اثر لهیدگی چوب، در این پژوهش از ضریبی به نام ضریب لغزش بهره‌جویی شده است. با استفاده از ضریب لغزش می‌توان نسبت میزان لغزش بین لایه‌های تیرهای چندلایه پیچی را به تیرهای چندلایه چسبی محاسبه نمود. شکل ۶ نمودار رفتاری معمول در تیرهای گلولام پیچی و چسبی را نشان می‌دهد. با انتخاب دو نقطه دارای بار یکسان بر روی نمودار بار-جابجایی گلولام پیچی و چسبی، رابطه زیر محاسبه شد. در این تحقیق ضریب لغزش برای گروه‌های SB-GB، GRB-SRB و AGRB-ASRB محاسبه شد.

$$\Delta_S = \Delta_G + \Delta_p \quad (5)$$



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی وسط دهانه‌ی تیرهای با اتصال پیچی و چسبی.

در مکانیک جامدات، سختی واقعی تیر (شیب نمودار نیرو-جابجایی مدل اتصال پیچی شکل ۶) را از مجموع وارون سختی تیر بدون لغزش و سختی ناشی از لغزش بدست آورد. باید افزود وارون سختی در مباحث مکانیک جامدات و تحلیل ماتریسی سازه‌ها تحت عنوان نرمی شناخته می‌شود. بر این پایه، نرمی تیر پیچی برابر است با مجموع نرمی تیر چسبی و نرمی ناشی از لغزش لایه‌ها در اثر لهیدگی اتکای پیچ‌ها با چوب است.

همچنین از رابطه‌ی زیر می‌توان مقادیر MOR برای نمونه‌ها را برآورد کرد.

$$MOR_{0/eq} \cong \frac{P_{ah}}{2I_{0/eq}} \quad (3)$$

محاسبه سختی

سازه‌ها در هنگام بهره‌برداری از آن‌ها باید سختی لازم را داشته باشد تا تغییر شکل آن از حد مجاز تجاوز ننماید و یا در صورت وجود بارهای زنده یا ضربه‌ای و نوسانی دامنه‌ی ارتعاشات ایجاد شده در حد مجاز بماند. در این صورت در تحلیل و طراحی تیرها نیاز به محاسبه و کنترل سختی می‌باشد. رابطه زیر، محاسبه سختی تیر تقویت شده در برابر ایجاد خیز را در وسط دهانه نشان می‌دهد که پارامترهای آن، پیشتر تعریف شده‌اند.

$$k = \frac{24EI_{eq}}{a(3L^2 - 4a^2)} \quad (4)$$

ضریب پیشنهادی لغزش

به دلیل تماس اتکایی بدنه‌ی پیچ‌ها با چوب در ارتفاع

که در این رابطه Δ_S جابجایی وسط دهانه تیر (بدست آمده از آزمایش) در مدل پیچی، Δ_G جابجایی وسط دهانه (بدست آمده از آزمایش) در مدل چسبی، و Δ_p اختلاف خیز مدل پیچی و چسبی (جابجایی لغزشی) است. کل خیز تیر همان مجموع خیز ناشی از خمش و تغییرشکل برشی تیر با خیز ناشی از لغزش لایه‌های چوب بر روی هم و همچنین ناشی از نفوذ پیچ‌ها درون چوب (لهیدگی چوب در تماس با پیچ) است. بر این اساس می‌توان با توجه به شکل ۶ و تعریف اتصال فنرهای پی‌درپی (سری)

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{K_G} + \frac{1}{K_\beta} \rightarrow f_s = f_G + f_\beta \quad (1)$$

$$\beta = \frac{f_\beta}{f_G} = \frac{f_s - f_G}{f_G} \rightarrow \beta = \frac{f_s}{f_G} - 1 \quad (2)$$

S، همه نمونه‌ها متوسط ضریب کشسانی کمتری نسبت به حالت تقویت نشده داشتند. این امر در عمل دور از انتظار نیست چرا که افزایش آن هنگامی روی می‌دهد که (۱) قفل و بست ورق‌های تقویت با تیر به صورت ایده‌ال و بر اساس رابطه‌های کلاسیک مکانیک جامدات باشد (افزایش قابل توجه P در رابطه‌ی ۲) و (۲) هیچگونه لغزشی میان لایه‌های تیر (در هنگام انتقال تنش‌های برشی) اتفاق نیفتد ($\beta=0$). در این صورت انتظار می‌رفت لنگر لختی و از آنجا ضریب کشسانی ظاهری مقطع در اثر تقویت به طور کامل سبب افزایش ظرفیت و سختی تیرها شود. نکته دیگر در مورد مقادیر جدول اینکه مهار انتهایی برای نمونه چسبی سبب کاهش مدول الاستیسیته و در مورد نمونه‌ی پیچی سبب افزایش آن گردیده است. که این امر را می‌توان اینگونه توجیه کرد که (۱) وجود مهارهای انتهایی (که نیروی موازی و در راستای لایه‌های افقی تیر به آن وارد می‌کنند) تنش‌های برشی در لایه‌های افقی نمونه‌ها و از آنجا تمایل به لغزش را افزایش می‌دهند، (۲) اما در مراحل نخستین بارگذاری، علی‌رغم مورد (۱)، میزان لغزش در نمونه‌های پیچی به دلیل سختی برشی بالای پیچ‌ها (فلزی بودن) کم بوده است. اما پیش‌تنیدگی در هر دو نمونه سبب کاهش قابل توجه ضریب کشسانی به دلیل تفوق تنش‌های برشی ناشی از دو عامل هم‌زمان مهار و پیش‌تنیدگی بر عوامل سختی نمونه‌ها شده است.

نتایج آنالیز واریانس یکطرفه‌ی MOE نشان می‌دهد که تیمارها در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای اختلاف معنی دار بوده است (جدول ۱۱ را ببینید). همچنین استفاده از ورق فولادی و پیچ یا چسب بر روی میزان MOE تاثیر معنی داری را نشان می‌دهد و اثرات متقابل این دو فاکتور بر روی همدیگر در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی داری داشته است. نتایج مقایسه‌ی میانگین MOE تیمارها در جدول ۱۲ آورده شده است.

K_s و f_s به ترتیب سختی و نرمی تیر برای تغییرمکان وسط دهانه مدل پیچی، K_G و f_G ؛ سختی و نرمی یادشده برای مدل چسبی، K_β و f_β ؛ سختی و نرمی حاصل از لغزش در مدل پیچی و β ؛ ضریب لغزش می‌باشد. این ضریب به طور معمول مثبت است. اگر مقدار آن منفی شود به این معنی است که طرح چسب ضعیف تر از طرح پیچ می‌باشد. هرچه این مقدار کوچکتر باشد بیانگر میزان لغزش و در نتیجه لهیدگی کمتر در محل تماس پیچ‌ها با چوب است. روشن است که این مقدار بستگی به تنش‌های اتکایی میان پیچ و چوب دارد. بنابراین انتظار می‌رود با افزایش قطر و شمار پیچ‌ها تنش‌های اتکایی کاهش یافته و ضریب لغزش نیز کاهش یابد و به یک نزدیکتر شود. مطابق با استاندارد ASTM D4761-02a تیرهای تقویت شده و تقویت نشده مورد آزمایش خمش چهار نقطه قرار گرفتند. در جداول ۷ تا ۱۱ مقادیر پارامترهای مهم رفتاری مانند مدول‌های کشسانی و گسیختگی، بار نهایی و سختی و ضریب لغزش ارائه شده است» جایگزین شده است.

با توجه به ساخت تیرها در دو دسته گلولام چسبی و گلولام پیچی، رفتار هر دسته تشریح شده و سپس نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. روش آنالیز واریانس یکطرفه و مقایسه میانگین با آزمون حداقل اختلاف معنی دار (LSD = Least Significant Difference) انجام شد. باید توجه داشت به دلیل وجود نیروی برشی در آزمون خمشی چهار نقطه و همچنین مدول برشی ضعیف چوب به خصوص در جهت موازی با الیاف چوبی، نسبت تغییر مکان برشی به خمشی محاسبه گردید.

بحث و نتایج

نتایج ضریب کشسانی ظاهری MOE و ضریب

گسیختگی MOR

جدول ۷ نتایج و مقادیر مربوط به ضریب کشسانی ظاهری را نشان می‌دهد. به طور کلی در گروه G و گروه

جدول ۷- مقادیر مربوط به تغییرات MOE تیرهای تقویت شده و تقویت نشده

گروه تیرها	نام تیرها	میانگین مدول الاستسیته ظاهری (MOE)	بیشترین مدول الاستسیته ظاهری (MOE)	متوسط درصد افزایش تقویت شده نسبت به GB	متوسط درصد افزایش تقویت نشده نسبت به SB
	GB	۷۳۴۳/۲۱	۷۸۲۴/۲۵	-	-
G	GRB	۶۵۵۹/۹۶	۶۹۱۱/۰۱	۱۰/۶۶	-
	AGRB	۵۵۹۱/۰۹	۵۸۸۴/۵۲	۲۳/۸۶	-
	SB	۲۴۴۵/۲۶	۲۷۱۰/۶۰	۶۶/۷۰	-
S	SRB	۱۵۳۶/۰۴	۱۹۶۲/۷۷	۷۹/۰۸	۳۷/۱۸
	ASRB	۲۰۵۶/۰۸	۲۵۶۱/۴۵	-۷۲	۱۵/۹۱
	PASRB	۱۶۰۰/۶۹	۱۶۲۴/۴۱	۷۸/۲۰	۵۳/۳۴

جدول ۸ مقادیر ضریب گسیختگی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. هرچند بیشترین ضریب گسیختگی نمونه‌ی GRB به نمونه‌ی شاهد آن نزدیک است، مقدار متوسط آن‌ها تفاوت زیادی دارند. همچنین مهار انتهایی سبب کاهش ضریب گسیختگی شده است. که دلایل آن را می‌توان همان دلایل بیان شده برای ضریب کشسانی ظاهری دانست. در مورد نمونه‌های پیچی و تقویت شده‌ی آن نیز چنین رویدادی دیده شد، با این تفاوت که مهار و پیش‌تنیدگی سبب افزایش ضریب گسیختگی متوسط نمونه‌ی تقویتی شده است. برای بررسی بهتر تاثیر نسبی طرح‌ها، تقویت، مهار و

پیش‌تنیدگی در ادامه به مقادیر دیگر بدست آمده از آزمایش یعنی بار نهایی و سختی پرداخته می‌شود.

نتایج آنالیز واریانس یکطرفه‌ی MOR نشان می‌دهد که تیمارها در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای اختلاف معنی دار بوده است (جدول ۱۱). همچنین استفاده از ورق فولادی و پیچ یا چسب بر روی میزان MOR تاثیر معنی داری نشان می‌دهد و اثرات متقابل این دو فاکتور بر روی همدیگر در سطح ۹۹ درصد اختلاف معنی داری داشته است. باید افزود، پیش‌تنیدگی تاثیر جزئی بر روی گلولام‌های پیچی تقویتی دارد. ولی بر روی نمونه‌ی پیچی تقویتی مهار شده تاثیر نداشت. میانگین MOR تیمارهای متفاوت در جدول ۱۲ مقایسه شده است.

جدول ۸- متوسط تغییرات مدول گسیختگی MOR نمونه‌های تقویت شده، نشده و مقایسه آن‌ها با نمونه شاهد

گروه تیرها	نام تیرها	متوسط مدول گسیختگی (MOR) (N/mm ²)	بیشترین مدول گسیختگی (MOR) (N/mm ²)	متوسط درصد افزایش تقویت شده نسبت به GB	متوسط درصد افزایش تقویت نشده نسبت به SB
	GB	۴۷/۹	۵۳/۵۹	-	-
G	GRB	۱۸/۶	۴۷/۲۷	-۶۱/۱۷	-
	AGRB	۱۳/۵۱	۱۶/۸۴	-۷۱/۷۹	-
	SB	۲۰/۵۳	۲۴/۰۱	-۵۷/۱۳	-
S	SRB	۱۳/۲۲	۱۴/۹۵	-۷۲/۳۹	-۳۵/۵۸
	ASRB	۱۵/۹۳	۱۷/۳۴	-۶۶/۷۳	-۲۲/۳۹
	PASRB	۱۵/۰۳	۱۵/۶۵	-۶۸/۶۱	-۲۶/۷۷

حدود ۱۴ درصد شده است. گفتنی است تنها نمونه‌ی تقویتی مهارشده‌ی پیچی دارای ظرفیت بیشتری از نمونه‌ی شاهد چسبی می‌باشد. این نکته بیانگر تاثیر زیاد لغزش یا لهیدگی پیچ‌ها بر مقاومت تیرها دارد.

نتایج آنالیز واریانس یکطرفه‌ی نیروی حد نهایی نشان می‌دهد که تیمارها در سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار بوده است (جدول ۱۱ را ببینید). همچنین استفاده از ورق فولادی و پیچ یا چسب بر روی میزان نیروی حد نهایی دارای تاثیر معنی‌داری است و اثرات متقابل این دو فاکتور بر روی همدیگر در سطح ۹۵ درصد اختلاف معنی‌داری نداشته است. تقویت و مهارشدگی به همراه پیش‌تنیدگی نسبت به نمونه‌ی شاهد اثر مناسبی داشته است. اما خود پیش‌تنیدگی به تنهایی اثر قابل توجهی بر حد نهایی نمونه‌های تقویتی نداشته است. میانگین نیروی حد نهایی تیمارها در جدول ۱۲ با همدیگر مقایسه شده است.

جدول ۹- متوسط نیروی حد نهایی تیرهای تقویت شده و نشده، و مقایسه آن نسبت به نمونه‌های شاهد

گروه تیرها	نام تیرها	متوسط نیروی حد نهایی (Fu) (N)	بیشترین نیروی حد نهایی (Fu) (N)	متوسط درصد افزایش/کاهش نسبت به GB	متوسط درصد افزایش نسبت به SB
	GB	۳۱/۱۹	۳۴/۸۹	-	-
G	GRB	۳۷/۸۴	۵۵/۸۹	۲۱/۳۱	-
	AGRB	۲۷/۴۹	۳۴/۲۷	- ۱۱/۸۵	-
	SB	۱۳/۳۷	۱۵/۶۳	- ۵۷/۱۳	-
S	SRB	۲۶/۹۰	۳۰/۴۲	- ۱۳/۷۳	۱۰/۱۲۷
	ASRB	۳۲/۴۲	۳۵/۲۹	۳/۹۵	۱۴۲/۵۲
	PASRB	۳۰/۵۹	۳۱/۸۵	- ۱/۹۳	۱۲۸/۸

پیش‌تنیدگی توانسته است اثر مثبت مهار انتهایی را در افزایش سختی از بین ببرد و آن را کاهش دهد. نتایج آنالیز واریانس یکطرفه‌ی سختی نشان می‌دهد که تیمارها در سطح اطمینان ۹۹ درصد دارای اختلاف معنی‌دار بوده است (جدول ۱۱). همچنین استفاده از ورق فولادی و پیچ یا چسب بر روی میزان سختی تاثیر معنی‌داری را نشان می‌دهد و اثرات متقابل این دو فاکتور بر روی همدیگر در سطح ۹۹ درصد اختلاف معنی‌داری داشته است. نتایج مقایسه‌ی میانگین سختی تیمارها در جدول ۱۲ درج شده است.

سختی K

جدول ۱۰، متوسط سختی وسط دهانه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. افزایش سختی در اثر تقویت برای هر دو نمونه‌ی چسبی و پیچی به میزان ۱۷۹ و ۹۶ درصد نسبت به نمونه‌های شاهد هر کدام است. در مورد نمونه‌ی پیچی، مهار انتهایی سبب افزایش سختی به مقدار ۶۲ درصد و برای چسبی سبب کاهش ۴۲ درصدی نسبت به حالت بدون مهار شده است. بنابراین در مورد سختی مهار انتهایی با اتصال پیچی سازگاری مناسب‌تری در انتقال نیروهای درون تیر داشته است. اما می‌توان گفت وجود

جدول ۱۰- متوسط تغییرات سختی نمونه‌های تقویت شده، نشده و مقایسه آن‌ها با نمونه شاهد

روه تیرها	نام تیرها	متوسط تغییرات سختی وسط دهانه تیر S (N/mm2)	حداکثر سختی وسط دهانه تیر S (N/mm2)	متوسط درصد افزایش/کاهش نسبت به GB	متوسط درصد افزایش نسبت به SB
	GB	۸۶۶/۰۷	۹۲۲/۸۱	-	-
G	GRB	۲۴۱۷/۶۷	۲۵۴۷/۰۵	۱۷۹/۱۵	-
	AGRB	۲۰۶۰/۵۹	۲۱۶۸/۷۴	۱۳۷/۹۲	-
	SB	۲۸۸/۳۹	۳۱۹/۷	- ۶۶/۷۰	-
S	SRB	۵۶۶/۱۱	۷۲۳/۳۸	- ۳۴/۶۳	۹۶/۲۹
	ASRB	۷۵۷/۷۶	۹۴۴/۰۲	- ۱۲/۵۰	۱۶۲/۷۴
	PASRB	۵۸۹/۹۳	۵۹۸/۶۸	- ۳۱/۸۸	۱۰۴/۵۵

جدول ۱۱. نتایج آنالیز واریانس بکطرفه جهت بررسی پارامترهای رفتاری نمونه‌ها.

سطح معنی داری	F محاسباتی	درجه‌ی آزادی	میانگین مربعات	جمع مربعات	MOE
.۰/۰۰۰**	۱۳۵/۵۳	۶	۱/۹* ۱۰ ^۷	۱/۱۴۵* ۱۰ ^۸	میان گروهی
		۱۴	۱۴۰۸۴۰	۱۹۷۱۷۶۲	درون گروهی
		۲۰		۱/۱۶۵* ۱۰ ^۸	کل
MOR					
.۰/۰۰۰**	۱۷/۱۰	۶	۴۵۳	۲۷۲۱	میان گروهی
		۱۴	۲۶	۳۷۱	درون گروهی
		۲۰		۳۰۹۲	کل
نیروی حد نهایی F_u					
.۰/۰۴۶*	۲/۹۳۴	۶	۱۷۳	۱۰۴۰	میان گروهی
		۱۴	۵۹	۸۲۷	درون گروهی
		۲۰		۱۸۶۷	کل
سختی K					
.۰/۰۰۰**	۱۴۵/۹۳	۶	۲۰۱۵۶۹۸	۱/۲۰۹* ۱۰ ^۷	میان گروهی
		۱۴	۱۳۸۱۲	۱۹۳۳۷۵	درون گروهی
		۲۰		۱/۲۲۹* ۱۰ ^۷	کل

جدول ۱۲. مقایسه‌ی اختلاف معنی داری میانگین پارامترهای مورد بررسی تیمارها براساس آزمون LSD

تیمارها	MOE	MOR	نیروی حد نهایی (F _u)	سختی (K)
GB	بقیه‌ی تیمارها	بقیه‌ی تیمارها	SB	بقیه‌ی تیمارها به جز ASRB
GRB	بقیه‌ی تیمارها	GB	SB	بقیه‌ی تیمارها
AGRB	بقیه‌ی تیمارها	GB	SB	بقیه‌ی تیمارها
SB	بقیه‌ی تیمارها به جز ASRB	GB	ASRB و SRB	بقیه‌ی تیمارها
SRB	بقیه‌ی تیمارها به جز PASRB و ASRB	GB	SB	بقیه‌ی تیمارها به جز ASRB و PASRB
ASRB	بقیه‌ی تیمارها به جز PASRB	GB	SB	بقیه‌ی تیمارها به جز PASRB

ضریب لغزش

جدول ۱۳ نسبت‌هایی از ضریب پیشنهادی لغزش را برای اتصال پیچ و چسب نشان می‌دهد. در بخش نخست جدول ($\beta_{S-R-A-P/\beta_G}$) تیرهای با اتصال پیچی در حالت تقویت با مهار انتهایی و بدون پیش‌تنیدگی کمترین لغزش را نسبت به نمونه‌ی شاهد چسبی نشان می‌دهد (۱/۱۴). بیشترین مقدار لغزش (۲) نیز مربوط به نمونه‌ی شاهد پیچی در مقایسه با نمونه‌ی شاهد چسبی است. بنابراین چنین می‌توان گفت که مهار انتهایی در نمونه‌ی تقویتی پیچی به خوبی با اتصال پیچ‌ها در جلوگیری از لغزش سازگاری دارد. اما پیش‌تنیدگی در نمونه‌ی تقویتی پیچی

با مهار انتهایی، سبب کاهش اثر مثبت مهار در مقایسه با نمونه‌ی G شده است. در بخش دوم جدول (β_{S-R-A}) در مقایسه‌ی نمونه‌های همانند چسبی و پیچی، تیرهای پیچی تقویتی لغزش زیادی داشته‌اند (شکل ۷). جالب آن‌که مهار جانبی توانسته است این میزان لغزش نسبی را در نمونه‌ی پیچی به حدود نصف کاهش دهد. این نتایج در مقایسه‌ی نتایج دیگر ارائه شده در بالا بر اساس پارامترهای بدست آمده از آزمایش‌ها نیز بیان گردید. بنابراین پارامتر پیشنهادی لغزش β را می‌توان پارامتر مناسبی برای ارزیابی نسبی دو حالت ساخت نمونه‌های پیچی و چسبی در نظر گرفت.

جدول ۱۳ - ضریب پیشنهادی لغزش برای تیمارهای آزمون

نسبت Ratio	حالت Type	مقدار The amount
	S	۲
$\beta_{S-R-A-P/\beta_G}$	SR	۱/۵۳
	SRA	۱/۱۴
	SRAP	۱/۴۷
$\beta_{S-R-A/\beta_{G-R-A}}$	SR-GR	۳/۲۷
	SRA-GRA	۱/۷۲



شکل ۷- لغزش لایه‌های تیر

بهبتر خود را نشان داده و در انتهای نمونه‌ها به خوبی مشهود است.

مقایسه نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات اثر چسب و روش‌های تقویت را نشان می‌دهد و گلولام‌های تقویت شده نیروهای وارده را تا چند برابر نسبت نمونه‌های شاهد تحمل می‌کند. این افزایش مقاومت در تحقیقات دیگر گزارش شده است [۲۱ و ۲۴]. همچنین، اثر واضح چسب

بطور کلی همان طوریکه در شکل ۷ مشخص است لغزش لایه‌ها بیشتر به دلیل عدم وجود چسب در گلولام با پیچ است که در نمونه‌های چسبی کمتر اتفاق می‌افتد. البته در تست خمش چهار نقطه‌ای اگر بارها به تکیه‌گاه نزدیک شوند، برش در تکیه‌گاهها

مراحل اولیه اعمال نیرو جلوگیری می نماید اما لغزش گلولام های تقویت نشده در مراحل اولیه اعمال نیرو رشد بیشتری نسبت به مراحل انتهایی دارد. ضریب کشسانی در نمونه های چسبی و پیچی به دلیل اثر مهار انتهایی و پیش تنیدگی کاهش قابل توجه ای داشته است. عملکرد خوب نمونه های تقویت شده این تحقیق در افزایش تحمل نیرو می تواند باعث جذابیت کاربردی و کاهش فضای اشغال شده تیرهای گلولام شود. از طرف دیگر، باتوجه به افزایش نقص های طبیعی مانند گره، شکاف و شیب الیاف و به عبارتی افت درجه چوب مصرفی، این روش های تقویت باعث توزیع تنش و کاهش اثرات عیوب در عنصر سازه ای می شود. بطور کلی استفاده از چسب و تسمه تقویتی اثرگذاری مناسبی بر روی نمونه ها داشته و برای شرایط مصرفی متنوع پیشنهاد می شود.

همانند این تحقیق در گزارش دیگر نیز تأیید شده است [۱۹]. این روش های تقویت باعث توزیع تنش و کاهش اثرات عیوب در عنصر سازه ای می شود. این موارد در سایر تحقیقات نیز گزارش شده است [۳۱]. همچنین کاهش مدول الاستیسیته و گسیختگی تیمارهای تقویت شده، افزایش سختی آن ها و عملکرد مناسب سختی نسبت به مقاومت خمشی نیز تأیید شده است [۳].

نتیجه گیری

خصوصیات مکانیکی تیرهای گلولام ساخته شده با پیچ یا چسب و تقویت شده با تسمه های فولادی و یا پیش تنیده شده نشان می دهد که گلولام های چسبی عملکرد بهتری دارند و مهارهای انتهایی بسیار موثر بوده است و مانع افزایش لغزش می گردد. تقویت تیرها از لغزش در

منابع

- [1] Milner, H.R., 2009. Sustainability of engineered wood products in construction. in JM Khatib (ed.), Sustainability of Construction Materials. 1 edn, Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, pp. 184 - 212.
- [2] Triantafillou, T.C., 1997. Shear reinforcement of wood using FRP materials. Journal of materials in civil engineering, 9(2): 65 – 69.
- [3] Soriano, J., Bruno, P.P. and Mascia, N.T., 2016. Mechanical performance of glued-laminated timber beams. Composite Structures, 150: 200 – 207.
- [4] Guan, Z.W., Rodd, P.D. and Pope, D. J., 2005. Study of glulam beams pre-stressed with pultruded GRP. Computers and structures, 83(23): 2476 – 2478.
- [5] Moody, R.C., Hernandez, R., 1997. Engineered wood products-A guide for specifiers, designers and users. Forest products laboratory, Madison, First Edition, Chapter 1, pp. 1-39.
- [6] Dietsch, P. and Brandner, R., 2015. Self-tapping screws and threaded rods a reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. Construction and Building Materials, 97: 78 – 79.
- [7] Hajihassani, R., Mohebbi, B. and Kazemi Najafi, S., 2020. The effect of hygro-thermo-mechanical modification on the applied properties of glulam made from poplar. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 11(2): 241-253.
- [8] Ebrahimi, Gh., 2009. Engineering design of wooden structures. Publisher University of Tehran, 990p. ISBN 978-964-03-5860-3. (In Persian)
- [9] Borri, A., Corradi, M. and Speranzini, E., 2013. Reinforcement of wood with natural fibers. Composites Part B: Engineering, 53: 1 – 8.
- [10] Ardalany, M., Fragiaco, M., Carradine, D. and Moss, P., 2013. Experimental behavior of Laminated Veneer Lumber (LVL) joists with holes and different methods of reinforcement. Engineering Structures, 56(6): 2154-2164.

- [11] Mei, L., Guo, N., Li, L., Zuo, H. and Zhao, Y., 2021. Study on flexural performance of prestressed glulam continuous beams under control influence. *J Wood Sci*, doi; 10.1186/s10086-021-01980-w.
- [12] Jasienko, J. and Nowak, T.P., 2014. Solid timber beams strengthened with steel plates Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63(1): 81 - 8.
- [13] Negrao, J.H., 2012. Prestressing systems for timber beams. *Proceedings of 12th world conference on timber engineering (WCTE/12)*. Auckland, New Zealand, PP. 252–62.
- [14] De Luca, V. and Marano, C., 2012. Prestressed glulam timbers reinforced with steel bars. *Construction and Building Materials*, 30: 206–217
- [15] Klinger, R., Johansson, M. and Crocetti, R., 2008. Strengthening timber with CFRP or steel plates – short and long-term performance. In: *Proceedings of 9th world conference on timber engineering*. Miyazaki, Japan; pp. 517–22.
- [16] Raftery, G.M. and Harte, A.M., 2011. Low-grade glued laminated timber reinforced with FRP plate. *Composites Part B: Engineering*, 42(4): 724–35.
- [17] Fiorelli, J. and Dias, A., 2006. Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model. *Materials research*, 9(3): 263 – 9.
- [18] Hosseini-Tabatabaei, M.R., Bayatkashkoli, A., Mollaenia M.R., Kool F., Rahmani Ardakani M., and Madahi N.K., 2020, Investigating the effects of rehabilitation and the use of curved-integrated members on the behavior of chairs, *Journal of Wood Science*, 66:48, <https://doi.org/10.1186/s10086-020-01893-0>
- [19] Rostampour Haftkhani, A., 2019. Experimental study on flexural performance of poplar glued-laminated timber constructed by mechanical fastener and comparing them with those made with cold press. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 10 (3): 347 - 360. (In Persian).
- [20] Rostampour Haftkhani, A. 2020. 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. *Forest and Wood Products*, 72(4), 327-338. doi: 10.22059/jfwp.2019.292266.1034
- [21] Yang, H., Liu, W., Lu, W., Zhu, S. and Geng, Q., 2016. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Construction and Building Materials*, 106:550-563.
- [22] Qingfeng, X., Lingzhu, C., Harries, K.A., Zhang, F., Zhuolin, W. and Chen, X., 2017. Experimental study and numerical simulation of long-term behavior of timber beams strengthened with near surface mounted CFRP bars. *Materials and Structures*, 50 (1): 45.
- [23] [Thorhallsson](#), E.R., [Hinriksson](#), G.I. and [Snæbjörnsson](#), J.T., 2017. Strength and stiffness of glulam beams reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering*, in press, 115:300-307.
- [24] Alikhajeh, P., Hosseini- Tabatabaei, M.R., Rahdar, H.A. and Bayatkashkoli, A., 2019. Mechanical properties of glulam beams made from different arrangements of layers and reinforced by steel rebars. *Iranian Journal of Forest and Wood Products*, 72 (3): 263 - 273. (In Persian)
- [25] Hazrati, M., Zarea Hosseinabadi, H., Moradpour, P. and Vatani Oskoe, A., 2020. Experimental investigation of the behavior of joints by glued- in steel and glass fiber reinforced plastic rods parallel to poplar wood grain. *Iranian Journal of Forest and Wood Products*, 73 (1): 63 - 75. (In Persian)
- [26] Hadi, Y.S., Hermawan, D., Sulastiningsih, I.M., Basri, E., Pari, G., Pari, R. and Abdillah, I.B., 2021. Color Change and Physical-Mechanical Properties of Polystyrene-Impregnated Glulam from Three Tropical Fast-Growing Wood Species. *Forests*, 1420 (12): doi; 10.3390/f12101420.

Investigation of mechanical properties of glulam beams made with screws or glue and reinforced with steel plates

Abstract

Reinforcement of glulam beams is inevitable to prevent the increase in the volume of structural elements and to reduce wood consumption. The increased strength of these engineered products along with the limited use of other materials makes this important. In this study, glulam beams were made in two groups, glue and screw, some of which were reinforced or prestressed with belts. The glulam samples of these two glue and screw groups were reinforced with belts and rebars, and in one of the screw treatments with rebar bolts and nuts, a prestress of approximately 5 kN was created. Behavioral parameters MOE, MOR, strength and hardness of the samples were compared with each other. Also, the impact of beam end restraints was investigated. To compare the behavior of screw samples with glue, the proposed sliding coefficient was used. In the studies, one-way analysis of variance and mean comparison with the least significant difference test were performed. Calculations and statistical analysis show the significant effect of reinforcement designs and increasing the strength of all types of glued beams. End restraints in glulam beams using steel belts show an effective role. The restraints controlled the relative movement of the layers on each other and caused a decrease in the capacity of the adhesive samples, but an increase of the final strength in the case of the screw samples. Since hardness is one of the important behavioral parameters to check their resilience and serviceability during operation, the slip coefficient can be used as a suitable behavioral parameter to compare the two modes of adhesion and screwing in the presence of the interaction of design factors. Prestressing has caused a significant decrease in the elasticity coefficient due to the superiority of the shear stresses caused by the two simultaneous factors of restraint and prestressing over the hardness factors of the samples. In general, the use of glue and reinforcing belt has a good effect on the samples and is recommended for various usage conditions.

Keywords: Mechanical reinforcement, Pre-tensioned, Glulam, Sliding.

D. Mashayekhi¹
M. R. Hosseini-Tabatabaei^{2*}
A. Bayatkashkoli³

¹ MSc in Structural Engineering,
University of Zabol

² Assistant professor of Civil
Engineering Department, University of
Zabol, Corresponding author

³ Professor of Wood and Paper
Industries Department, University of
Zabol

Corresponding author:
mr.htabatabaei@uoaz.ac.ir

Received: 2023/01/11
Accepted: 2023/05/18