

بررسی تجربی رفتار اتصال میلگرد فولادی و پلیمری در جهت موازی الیاف چوب سپیدار

محرّم حضرتی^{۱*}، حمید زارع حسین آبادی^۲، پیام مرادپور^۳، اصغر وطنی اسکویی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. دانشیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴. دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۰۷

چکیده

امروزه میلگردهای پلیمری به علت مقاومت ویژه زیاد و وزن کم در ساخت سازه‌های کامپوزیتی کاربرد بیشتری یافته است. از این رو در این تحقیق، رفتار میلگردهای پلیمری با آرایش سطح متفاوت (صاف و آجدار) در مقایسه با میلگردهای فولادی از نظر طول اتصال (۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر) و نوع چسب (اپوکسی و پلی‌استر) در جهت موازی الیاف در چوب سپیدار (*Populus alba*) به صورت تجربی بررسی شد. بدین منظور، پس از تهیه نمونه‌های آزمون بر اساس تیمارهای مختلف، مقاومت بیرون‌کشیدگی میلگردهای متصل شده به بلوک‌های گلولم، تنش‌های برشی در فصل مشترک چوب-چسب و میلگرد-چسب و همچنین مدهای شکست بررسی شدند. نتایج نشان دادند که بیشترین مقاومت بیرون‌کشیدگی میلگرد، مربوط به میلگردهای آجدار پلیمری متصل شده با چسب اپوکسی با طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر برابر با ۸۲/۵ کیلو نیوتن بود. بر اساس نتایج، با افزایش طول اتصال، ظرفیت بار محوری جهت بیرون کشیدن میلگرد افزایش پیدا 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. شایان ذکر است که مد شکست غالب، بیرون‌آمدگی میلگرد همراه با دسته‌های چوبی ناشی از شکست برشی چوب در راستای موازی با الیاف بود.

واژه‌های کلیدی: تنش برشی در فصل مشترک، چوب سپیدار، مد شکست، مقاومت بیرون‌کشیدگی، میلگرد پلیمری.

مقدمه

هستند. گلولام عموماً برای کاربردهایی که تحت بارها و تنش‌های زیاد قرار خواهد گرفت، طراحی می‌شود [۲، ۳]. مهندسی سازه‌های چوبی مدرن نیازمند استفاده از سیستم‌های اتصالی کارآمد است. به تازگی تحقیقات متعددی در زمینه افزایش مقاومت‌های مکانیکی گلولام از جمله افزایش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته با استفاده از انواع تقویت‌کننده مانند پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP)^۱ و الیاف کربن (CFR)^۲ و همچنین بهبود مقاومت

امروزه استفاده از چوب و فرآورده‌های مهندسی‌شده چوبی، یک انتخاب محبوب در ساخت سازه‌های مدرن است [۱]. محصولات مهندسی‌شده چوبی شامل محصولات متنوعی از جمله^۱ LVL،^۲ PSL،^۳ LSL،^۴ OSL،^۵ Glulam و^۶ CLT

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۴۹۲۸۲۵۰۸

Email: hazrati.moharam@gmail.com

1. Laminated veneer lumber
2. Parallel strand lumber
3. Laminated strand lumber
4. Oriented strand lumber
5. Glued laminated timber

6. Cross Laminated Timber
7. Glass fiber reinforced polymer

هم‌کشیدگی چسب طی گیرایی اولیه آن، حساسیت چسب به درجه حرارت زیاد، کیفیت پر شدن منافذ و فضاهای خالی و حساسیت چسب به تغییرات رطوبت به دلیل تغییرات شرایط آب‌وهوایی محلی قرار گیرد. از این رو این اثرات باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شوند [۶، ۷]. چسب مورد استفاده برای میلگردهای متصل شده با چسب (GIR)^۲ باید دارای ویژگی‌های خزش و خزش گسیختگی قابل قبول و استحکام و مقاومت زیاد باشد. به منظور ارزیابی این خواص آزمون‌هایی بر اساس روش‌های موجود مانند استحکام برش طولی بر اساس EN 302-1 و همچنین دستورالعمل‌های ویژه مربوط به سازه‌های چوبی اتصال داده شده با GIR [۸] ایجاد شده است. تاکنون چسب‌های مختلفی برای چسباندن و کاشتن میلگردها به کار رفته و ارزیابی شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به فنل رزورسینول، اپوکسی و چسب‌های پلی‌یورتان اشاره کرد [۸]. نتایج یک پروژه بزرگ در اروپا در زمینه بررسی تأثیر انواع چسب بر مقاومت میلگردهای کاشته شده در چوب بیانگر این واقعیت است که اتصالات ایجاد شده با چسب اپوکسی نسبت به چسب‌های دیگر بهترین عملکرد را در اتصال چوب و فولاد ایجاد کرده است [۹].

در آزمون بیرون کشیدن میلگرد از چوب ممکن است مدهای مختلفی از شکست در محل اتصال رخ دهند. در این زمینه می‌توان به مدهای زیر اشاره کرد: مد شکست (اول) که بیانگر شکست کششی میلگرد است؛ مد شکست (دوم) یعنی شکستی که در خود چسب اتفاق می‌افتد و مرتبط با نوع و ساختار چسب است؛ مد شکست (سوم) که شکست برشی چوب بوده و تحت تأثیر خواص چوب و پارامترهای مشترک مانند طول اتصال (عمق نفوذ میلگرد در چوب) و فاصله میلگرد کاشته شده از لبه است؛ و مد شکست (چهارم) که در آن شکست به صورت شکاف عرضی اتفاق می‌افتد و به تقسیم شدن چوب به دو قسمت منجر می‌شود. این مد

اتصالات گلولام با استفاده از انواع اتصال‌دهنده مکانیکی مانند میلگردهای فولادی، پلیمری و بین‌های چوبی به جای استفاده از چسب خالص انجام گرفته است [۱]. تقاضا برای اتصالات کارآمد با استحکام زیاد و همچنین دارای نقاط اتصال قوی، به تحقیقات متعدد در زمینه استفاده از اتصالات میلگردی در ترکیب با چسب منجر شده است. چنین اتصالاتی شامل استفاده از میلگردهایی است که در شیارها یا سوراخ‌های ایجاد شده در داخل چوب قرار داده می‌شوند و انتقال تنش در اجزای سازه را به خوبی انجام می‌دهند و از لحاظ اقتصادی و معماری نیز جذاب‌اند. نکته حائز اهمیت درباره انواع اتصال‌دهنده مورد استفاده در گلولام این است که هزینه اتصالات ممکن است از ۵ درصد تا بیش از ۵۰ درصد از هزینه تمام شده محصول نهایی را شامل شود. همچنین اتصالات در یک گلولام می‌توانند تعیین‌کننده ابعاد نهایی آن نیز باشند؛ به طوری که در حدود ۷۰ درصد از تلاش طراحان و مهندسان در طراحی یک گلولام مربوط به تعیین نوع اتصالات آن است و اگر این موضوع به خوبی رعایت نشده و جزئیات به طور دقیق مشخص نشوند، شکل ظاهری و نمای بصری تیر ساخته شده ممکن است غیرجذاب جلوه کند [۴]. استفاده از میلگردهای پلیمری تقویت شده با الیاف^۱ می‌تواند مزایای زیادی داشته باشد که از آن جمله می‌توان به وزن کم، مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های اسیدی یا مرطوب و هدایت حرارتی کمتر آن (در صورت آتش‌سوزی) اشاره کرد [۵].

قدرت نگهداری میلگردهای پلیمری تقویت شده به شدت وابسته به نوع چسب، ضخامت و طول خط چسب مورد استفاده است. با افزایش ضخامت خط چسب، امکان توزیع تنش در نواحی بیشتری وجود دارد و افزایش سطح اتصال، سبب تأخیر در شکست خط چسب تحت تنش می‌شود [۱]. به طور کلی مقاومت اتصالات ممکن است تحت تأثیر

1. Carbon fiber reinforced polymer

2. Fiber-reinforced polymer rods

3. Fiber-reinforced polymer rods

بر متر مکعب، ۷۶ مگاپاسکال، ۹/۹۸ گیگاپاسکال و ۱۰/۰۲ مگاپاسکال به دست آمدند.

میلگردهای پلیمری (مقاومت تسلیم ≥ 1000 مگاپاسکال، مقاومت تسلیم طراحی ≥ 445 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته کششی 60000 مگاپاسکال) و فولادی (مقاومت تسلیم 500 مگاپاسکال، مقاومت تسلیم طراحی 435 مگاپاسکال و مدول الاستیسیته کششی 200000 مگاپاسکال) مورد استفاده در این تحقیق از دو نوع ساده و آجدار بودند که از شرکت رادیاب تهران تهیه شدند.

در این تحقیق از دو نوع چسب اپوکسی با کد ۳۳۰۱ و ۳۰۱ (رنگ خاکستری، چگالی ۳۰۱ برابر با ۱/۶۵ و چگالی ۳۳۰۱ برابر با ۱/۵ کیلوگرم بر لیتر، مقاومت برشی $< 3/5$ مگاپاسکال، مقاومت کششی و خمشی < 30 مگاپاسکال، دمای مصرف ۶۵-۳۵ درجه سانتی گراد، گیرایی کامل ۷ روز، عمر مصرف ۶۰ دقیقه) تهیه شده از شرکت رادیاب تهران، و چسب پلی استر ارتوفتالیک غیراشباع (بی رنگ، چگالی ۱/۱۳ کیلوگرم بر لیتر، مقاومت کششی و خمشی < 55 دمای مصرف ۶۵-۱۵ درجه سانتی گراد، گیرایی کامل ۷ روز و عمر مصرف ۴۵-۲۵ دقیقه) تهیه شده از شرکت بسپار ماندگار کرج استفاده شد.

ساخت نمونه‌های آزمونی

در تحقیق حاضر با توجه به ابعاد نمونه‌های آزمونی و محدود بودن ضخامت الوار تهیه شده، به منظور دستیابی به نمونه‌های آزمونی سالم و بدون عیب، از بلوک‌های گلولام برای آزمون مقاومت به بیرون کشیدگی استفاده شد. در این بررسی برای ساخت گلولام سه لایه، از الوار چوب سپیدار با ابعاد اولیه $80 \times 220 \times 24$ میلی متر و از چسب اپوکسی دو جزئی (EPX) با کد اختصاری ۳۳۰۱ به مقدار ۲۰۰ گرم بر مترمربع استفاده شد. از پرس بورکله^۱ موجود در کارگاه مبلمان و فرآورده‌های چوبی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشگاه تهران در دمای محیط با فشار یک مگاپاسکال و زمان ۶۰ دقیقه برای

عموماً ناشی از فاصله کوتاه سوراخ یا شیار کاشت میلگرد از لبه‌هاست و سبب اعمال تنش بیش از حد در جهت عمود بر الیاف چوب می‌شود [۶، ۱۰]. در خصوص تأثیر طول اتصال در میلگردهای کاشته شده در چوب نیز تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که با افزایش طول اتصال، ظرفیت بار محوری جهت بیرون کشیدن میلگرد افزایش می‌یابد، اما به دلیل توزیع غیریکنواخت تنش برشی در امتداد طول اتصال، مقاومت برشی اسمی در اتصال کاهش نشان می‌دهد [۱۱].

با توجه به لزوم استفاده از تقویت کننده‌ها و اتصال دهنده‌های مکانیکی با بهترین عملکرد که بتوانند وزن سازه را نیز کاهش دهند، همچنین رفتار متفاوت گونه‌های چوبی مختلف در سیستم اتصال میلگرد-چوب، این تحقیق پایه‌ریزی شد تا هدف اصلی آن بررسی تجربی رفتار اتصال میلگردهای پلیمری در مقایسه با میلگردهای رایج فولادی در چوب سپیدار در جهت موازی الیاف باشد. در این راستا تأثیر نوع و آرایش سطح میلگرد، طول اتصال و نوع چسب بر مقاومت به بیرون کشیدگی، تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب و تنش برشی در فصل مشترک میلگرد-چسب ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

گرده‌بین‌های سپیدار (*Populus alba*) با طول ۴ متر و قطر بیشتر از ۴۰ سانتی متر و رطوبت اولیه ۸۰ درصد از سایت چوب‌فروشان شهرستان کرج خریداری شده و به الوار با ضخامت ۴/۵ سانتی متر و عرض ۲۵ سانتی متر تبدیل شدند. سپس الوار چوبی به کارگاه مبلمان و فرآورده‌های چوبی گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران انتقال یافتند و به مدت ۳ ماه در هوای آزاد تا رطوبت ۱۴ درصد خشک شدند. چگالی خشک، مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی و مقاومت برشی موازی الیاف الوار براساس استاندارد ASTM D143 اندازه‌گیری شده و به ترتیب ۴۳۲ کیلوگرم

چسب دوجزئی اپوکسی (EPX) و چسب دوجزئی پلی‌استر ارتوفتالیک غیراشباع (UPR) به صورت جداگانه آماده شده و سپس حدود یک سوم از کل حجم سوراخ ایجاد شده از چسب پر شد. پس از این مرحله، میلگردها به آرامی در داخل سوراخ‌های ایجاد شده تعبیه شدند. بعد از پایان عملیات چسب‌زنی و کاشت میلگردها در داخل بلوک‌های چوبی، نمونه‌ها به مدت دو هفته در دمای محیط نگهداری شدند تا گیرایی چسب کامل شود. در انتها، نمونه‌ها به مدت دو ماه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد (براساس استاندارد EN-26891) در اتاق کلیما مشروط‌سازی نگهداری شدند.

آزمون مقاومت به بیرون‌کشیدگی میلگرد

میلگردهای کاشته شده در بلوک‌های گلولام (شکل ۲) با استفاده از یک آزمونگر مکانیکی جهانی با سلول بار ۱۰۰ کیلو نیوتن و سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه براساس استاندارد EN-26891 تا حد گسیختگی تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند [۱۳]. بار گسیختگی برای هر یک از نمونه‌ها به عنوان پارامتر مقاومت به بیرون‌کشیدگی ثبت و تنش‌های برشی در فصل مشترک چوب - چسب (τ_1) و فصل مشترک میلگرد - چسب (τ_2) به ترتیب با استفاده از معادله‌های ۱ و ۲ محاسبه شد [۹، ۱۴].

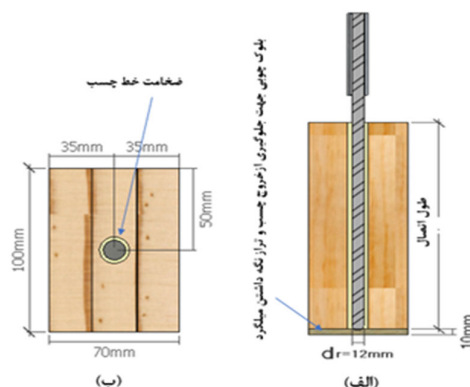
$$\tau_1 = \frac{P}{\pi \times d_h \times l_b} \quad (1)$$

$$\tau_2 = \frac{P}{\pi \times d_r \times l_b} \quad (2)$$

که در آنها (P): نیروی به دست آمده از آزمون مقاومت به بیرون‌کشیدگی میلگرد، (l_b): طول اتصال، (d_h): قطر سوراخ و (d_r): قطر میلگرد است. پس از هر آزمون، مدهای شکست نیز برای تیمارهای مختلف بررسی شدند. به منظور تحلیل نتایج به دست آمده، از طرح پایه کاملاً تصادفی تحت آزمایش‌های فاکتوریل کامل استفاده شد. بر این اساس از ترکیب سطوح عوامل متغیر، ۱۶ تیمار (دو نوع

فشردگی الوار استفاده شد. ابعاد نهایی گلولام‌های ساخته شده ۷۰×۲۲۰×۸۰ میلی‌متر بود و سپس بلوک‌هایی با طول ۲۰۰ میلی‌متر و ۳۰۰ میلی‌متر برای کاشت میلگرد از آنها استحصال شد. سپس نمونه‌های آماده شده به مدت یک ماه در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد در اتاق متعادل‌سازی نگهداری شدند.

برای کاشت میلگرد در بلوک‌های استحصال شده از گلولام، سوراخی در مقطع بلوک‌ها و در جهت موازی الیاف توسط دریل ستونی و با استفاده از مته شترگلو نیش‌دار^۱ ایجاد شد. قطر سوراخ‌های ایجاد شده در همه بلوک‌ها به طور ثابت ۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شد. طول سوراخ‌ها بسته به نوع تیمار متفاوت بود و از دو طول مختلف ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متر برای این منظور استفاده شد. از آنجا که قطر میلگردهای استفاده شده ۱۲ میلی‌متر و قطر سوراخ‌های ایجاد شده ۱۶ میلی‌متر بود، ۲ میلی‌متر شکاف از هر طرف به عنوان ضخامت خط چسب منظور شد [۱۲]. با توجه به توصیه یورو کد ۵ که حداقل فاصله سوراخ ایجاد شده از لبه مقطع باید ۲/۵ برابر قطر میلگرد باشد [۱۲]، فاصله سوراخ‌های ایجاد شده در مقطع بلوک‌ها ۳۵ میلی‌متر از لبه در نظر گرفته شد. شکل ۱ تصویر شماتیک از نحوه قرارگیری میلگردها در بلوک‌های چوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح شماتیک از نمونه‌های آزمونی و نحوه قرارگیری میلگردها در بلوک‌های چوبی (الف) نمای جانبی؛ (ب) نمای بالا.

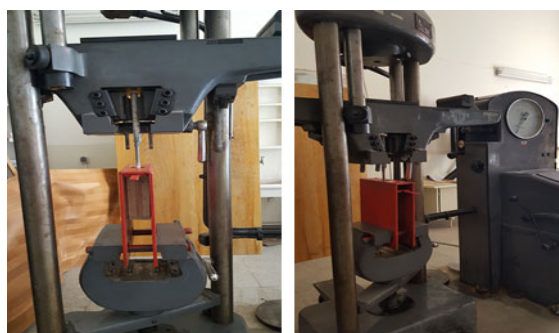
1. Sharp auger bit

- چسب و میلگرد - چسب نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد (۸۲/۵kN) مربوط به میلگرد پلیمری با آرایش سطح آجدار (GRR) با طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر و چسب اپوکسی است. کمترین مقاومت به بیرون کشیدگی (۲۸/۵kN) نیز در میلگرد فولادی با آرایش سطح صاف (SPR) با طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر و چسب پلی‌استر مشاهده شد. میانگین‌ها در چهار طبقه مختلف گروه‌بندی شده‌اند.

میلگرد، دو آرایش سطح متفاوت، دو طول اتصال و دو نوع چسب) به دست آمد که با احتساب سه تکرار برای هر تیمار، در مجموع ۴۸ نمونه آزمونی تهیه شد. بعد از جمع‌آوری داده‌ها برای مقایسه و تحلیل نتایج از آزمون تجزیه واریانس چندطرفه استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون دانکن بررسی شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱، مقادیر میانگین و انحراف معیار مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد و تنش برشی در فصل مشترک چوب



شکل ۲. آزمون مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد در جهت موازی الیاف چوب سپیدار

جدول ۱. مقادیر میانگین و انحراف معیار مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد و تنش برشی در فصل مشترک چوب- چسب و میلگرد- چسب برای رزین‌های اپوکسی و پلی‌استر (SPR)^{*}: میلگرد ساده فلزی- (SRR): میلگرد فلزی آجدار- (GPR): میلگرد ساده پلیمری - (SRR): میلگرد آجدار پلیمری. ^{**} مقادیر داخل پرانتز انحراف معیار داده‌ها را نشان می‌دهد. ^{***} حروف انگلیسی بزرگ طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر و حروف انگلیسی کوچک طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر را در گروه‌بندی دانکن تیمارها نشان می‌دهد).

نوع چسب	آرایش سطح میلگرد	طول اتصال میلگرد (mm)	مقاومت به بیرون کشیدگی (kN)	تنش برشی در فصل مشترک (MPa)
اپوکسی	SPR [*]	۲۰۰	۴۴/۱ ^{b***} (۴/۶۳) ^{**}	۵/۸۴ ^b (۰/۶۱) [*]
		۳۰۰	۵۲/۴ ^B (۳/۳۳)	۴/۷۲ ^C (۰/۳۹)
	SRR	۲۰۰	۶۰/۶ ^a (۷/۶۸)	۸/۰۴ ^a (۱/۰۲)
		۳۰۰	۷۹/۵ ^A (۴/۹۲)	۷/۰۳ ^a (۰/۴۴)
	GPR	۲۰۰	۶۱/۳ ^c (۵/۶۹)	۸/۱۹ ^a (۰/۷۵)
		۳۰۰	۸۱ ^A (۲/۸۶)	۷/۱۷ ^a (۰/۲۶)
پلی‌استر	GRR	۲۰۰	۶۷/۱ ^a (۸/۶۰)	۸/۹۱ ^a (۱/۱۴)
		۳۰۰	۸۲/۵ ^A (۶/۵۶)	۷/۳ ^a (۰/۵۸)
	SPR [*]	۲۰۰	۲۸/۵ ^c (۴/۰۷)	۳/۷۸ ^{c***} (۰/۵۴)
		۳۰۰	۴۰ ^C (۵/۵۷)	۳/۵۴ ^C (۰/۴۹)
	SRR	۲۰۰	۴۵ ^B (۳/۲۸)	۵/۹۶ ^b (۰/۴۴)
		۳۰۰	۶۶ ^B (۶/۳۹)	۵/۸۴ ^B (۰/۵۶)
پلی‌استر	GPR	۲۰۰	۳۹ ^b (۲)	۵/۱۸ ^b (۰/۲۷)
		۳۰۰	۷۲ ^B (۲/۶)	۶/۳۷ ^B (۰/۲۳)
	GRR	۲۰۰	۴۳/۲ ^b (۴/۷۳)	۴/۷۵ ^b (۰/۵۱)
		۳۰۰	۶۸/۴ ^C (۳/۵۶)	۶/۰۵ ^B (۰/۳۲)

جدول ۲. تجزیه واریانس اثر مستقل و متقابل متغیرها بر مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد، تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب و میلگرد-چسب

میانگین مربعات			درجه آزادی	منابع تغییرات
تنش برشی میلگرد-چسب	تنش برشی چوب-چسب	مقاومت به بیرون کشیدگی		
۴۰/۸۰۵ ^{**}	۲۲/۹۵۳ ^{**}	۳۰۶۴/۴۸۵ ^{**}	۱	نوع چسب
۲/۴۵۶ ^{**}	۱/۳۸۱ [°]	۴۴۲۸/۰۹۷ ^{**}	۱	طول اتصال میلگرد
۴۹/۶۲۹ ^{**}	۹/۳۶۳ ^{**}	۱۵۱۱/۶۱۳	۳	نوع میلگرد
۶/۵۳۴ ^{**}	۳/۶۷۶ ^{**}	۱۴۵/۰۸۱ [°]	۱	نوع چسب × طول اتصال میلگرد
۰/۲۳۴ ^{ns}	۰/۱۳۳ ^{ns}	۱۳/۶۸۳ ^{ns}	۳	نوع چسب × نوع میلگرد
۰/۳۸۸ ^{ns}	۰/۲۱۸ ^{ns}	۱۲۶/۸۵۷ [°]	۳	طول اتصال میلگرد × نوع میلگرد
۰/۳۶۵ ^{ns}	۰/۲۰۵ ^{ns}	۲۴/۸۰۶ [°]	۳	نوع چسب × طول اتصال میلگرد × نوع میلگرد
۰/۳۵۱	۰/۱۹۷	۲۶/۰۶۱	۳۲	خطا
-	-	-	۴۸	کل
۸/۸ درصد	۸/۵ درصد	۸/۱۹ درصد	-	ضریب تغییرات

(***) معنی دار در سطح ۱ درصد، (*) معنی دار در سطح ۵ درصد، (ns) غیر معنی دار

بررسی اثر مستقل و متقابل متغیرها بر مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد

همان‌طور که در جدول ۱ دیده می‌شود، با افزایش طول اتصال مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد به میزان ۳۹ درصد افزایش یافت. نتایج نشان می‌دهد که مقاومت میلگردهای کاشته‌شده با چسب اپوکسی نسبت به میلگردهای کاشته‌شده با چسب پلی‌استر ۳۱ درصد بیشتر بوده است. براساس مطالعات مختلف، مشخص شد که مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد علاوه بر گونه چوب، به‌طور ویژه‌ای به نوع چسب بستگی دارد. به‌طور کلی چسب پلی‌استر خواص پرکنندگی خوبی برای درزها ندارد و در مقایسه با چسب اپوکسی شکننده‌تر است [۷]. براساس نتایج، طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر نیز در مقایسه با طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر سبب افزایش معنی‌دار مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد شد. در خصوص تأثیر عامل مستقل نوع و آرایش سطح میلگرد بر مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد نیز نتایج نشان داد که نمونه‌های ساخته‌شده با میلگرد پلیمری آجدار، بیشترین و میلگرد فولادی ساده کمترین مقاومت را دارند؛ بنابراین می‌توان گفت آجدار بودن سبب افزایش مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد شده است، چراکه بیشتر نیز تحقیقات نشان داده است که افزایش زبری سطح تماس و نفوذپذیری برای افزایش محل

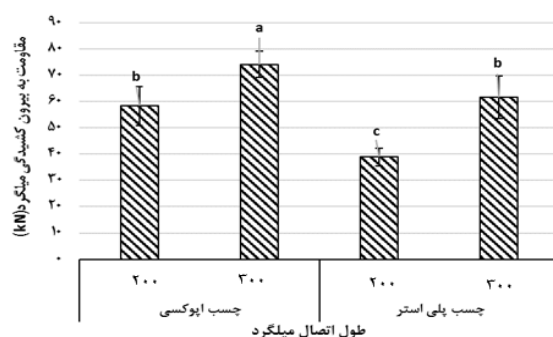
تماس بین چسب و مواد پایه می‌تواند راهی مؤثر برای بهبود استحکام اتصال باشد [۱۵]. همچنین، در آزمون بیرون کشیدن میلگرد از چوب، طی اعمال نیروی کشش محوری، انتقال نیرو بین چوب و میلگرد توسط برش چسب کنترل می‌شود و بسته به مقاومت چسب و ویژگی‌های سطح میلگرد (ساده یا آجدار)، لنگر ایجادشده بین میلگرد آجدار و چسب به‌عنوان یک اتصال مکانیکی ممکن است به‌صورت یک پیچ عمل کند [۱۶، ۵]. با توجه به نتایج، میلگرد فولادی ساده نسبت به میلگردهای دیگر، ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. بیشترین مقاومت برای میلگرد پلیمری آجدار به‌دست آمد.

اثر متقابل نوع چسب و طول اتصال میلگرد بر مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش طول اتصال، مقاومت به بیرون کشیدن میلگرد به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد، به‌طوری که نمونه‌های ساخته‌شده با طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر و چسب اپوکسی نسبت به نمونه‌های دیگر بیشترین مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد را داشت (۶۵/۷ kN) و کمترین مقاومت (۳۸/۹ kN) نیز برای نمونه‌های ساخته‌شده با چسب پلی‌استر و طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر به‌دست آمد. همچنین در گروه‌بندی دانکن اثر متقابل نوع چسب و طول اتصال میلگرد بر مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد در سه گروه مختلف قرار گرفتند.

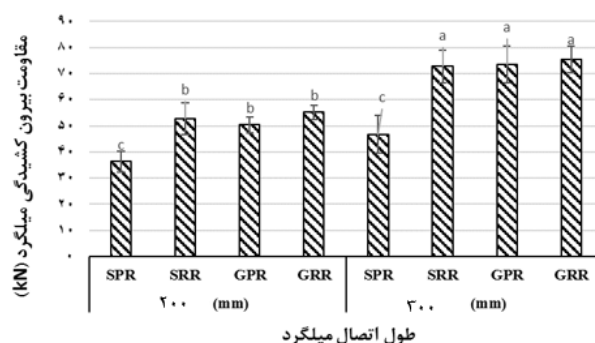
و طول اتصال میلگرد بر تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که همانند مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد، چسب اپوکسی بهترین عملکرد را بر مقاومت برشی اسمی داشته، بطوریکه مقادیر آن در فصل مشترک چوب-چسب به میزان ۳۴ درصد و در فصل مشترک میلگرد-چسب به میزان ۳۹ درصد از چسب پلی استر بیشتر است. همچنین نتایج مشابهی نیز در زمینه نوع میلگرد به دست آمد و میلگرد آجدار پلیمری بهترین عملکرد را بر افزایش تنش مذکور نشان داد. برخلاف آزمون مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد، با افزایش طول اتصال از ۲۰۰ میلی متر به ۳۰۰ میلی متر، تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب به میزان ۸ درصد و فصل مشترک میلگرد-چسب به میزان ۷ درصد کاهش نشان داد.

در شکل ۴، اثر متقابل نوع، آرایش سطح و طول اتصال میلگرد بر مقاومت به بیرون کشیدگی آن نشان داده شده است. براساس این شکل، نمونه‌های ساخته شده با میلگرد پلیمری آجدار و طول اتصال ۳۰۰ میلی متر بیشترین و نمونه‌های ساخته شده با میلگرد فولادی ساده با طول اتصال ۲۰۰ میلی متر کمترین مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد را نشان داده‌اند. در کل می‌توان گفت جنس و آرایش سطح میلگرد (آجدار یا ساده) تأثیر متفاوتی بر مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد داشتند و میلگردهای فولادی آجدار و میلگرد تقویت شده با الیاف شیشه عملکرد بهتری از میلگرد فولادی ساده داشتند.

بررسی اثر مستقل و متقابل متغیرها بر تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب و میلگرد-چسب در جدول ۱ تأثیر نوع رزین، جنس و آرایش سطح میلگرد



شکل ۳. اثر متقابل نوع چسب و طول اتصال بر مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد

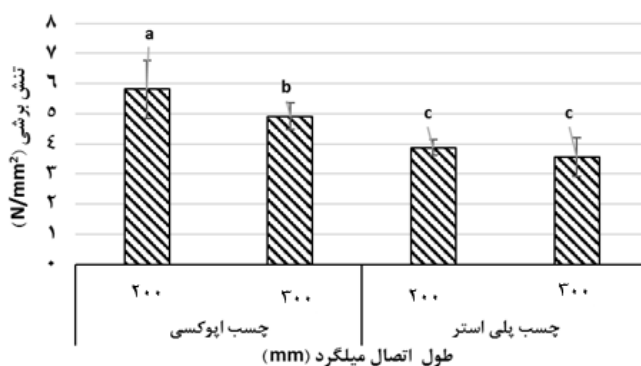


شکل ۴. اثر متقابل طول اتصال، نوع و آرایش سطح میلگرد بر مقاومت به بیرون کشیدگی آن

که شکست در فصل مشترک چوب-چسب بیشتر از شکست در فصل مشترک میلگرد-چسب اتفاق افتاد که این موضوع ممکن است مؤید اتصال بهتر چسب و میلگردها نسبت به اتصال چسب و الیاف چوبی باشد.

تأثیر نوع چسب و طول اتصال بر تنش برشی در فصل مشترک چسب-چوب در شکل ۵ ارائه شده است. به طور کلی می‌توان گفت افزایش طول اتصال سبب کاهش معنی‌دار تنش برشی در فصل مشترک چسب-چوب می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های ساخته‌شده با چسب اپوکسی و طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر بیشترین و نمونه‌های ساخته‌شده با چسب پلی‌استر و طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر کمترین مقاومت به تنش برشی در فصل مشترک چسب-چوب را به خود اختصاص دادند.

تحقیقات قبلی نیز نشان داده‌اند که به دلیل توزیع غیریکنواخت تنش برشی در امتداد طول اتصال، مقاومت برشی اسمی در فصل مشترک چوب-چسب و میلگرد-چسب کاهش نشان می‌دهد [۱۴]. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین تنش برشی در سطح اتصال چوب-چسب به ترتیب ۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع و ۲/۶ نیوتن بر میلی‌متر مربع بوده است، در حالی که این مقاومت برای چوب ماسیو ۱۰ نیوتن بر میلی‌متر ثبت شد. در حین اجرای آزمون تنش برشی مشاهده شد که خروج میلگردها اغلب به علت شکست فصل مشترک چوب-چسب و شکست چسب در فصل مشترک میلگرد یا شکستگی چوب نزدیک به فصل مشترک چوب و چسب اتفاق می‌افتد. همچنین براساس مشاهدات عینی می‌توان گفت



شکل ۵. اثر متقابل نوع چسب و طول اتصال بر تنش برشی (τ_1) در فصل مشترک چوب-چسب

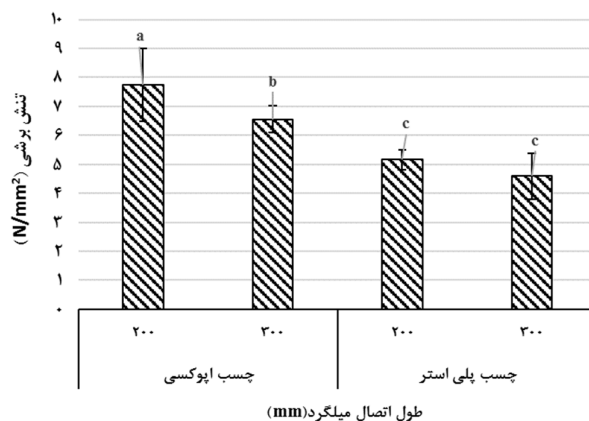
به دست آمد و بیشترین مقاومت برش اسمی به مقدار $8/9 \text{ MPa}$ نیز مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده با میلگرد آجدار پلیمری با چسب اپوکسی و طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر بود.

اثر متقابل نوع چسب و طول اتصال میلگرد بر تنش برشی در فصل مشترک میلگرد-چسب (τ_2) در شکل ۶ آمده است. با توجه به شکل ۶ مشخص شد که نمونه‌های ساخته‌شده با چسب اپوکسی و طول اتصال ۲۰۰ میلی‌متر بیشترین مقاومت برشی و نمونه‌های ساخته‌شده با چسب پلی‌استر و طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر نیز کمترین مقاومت

در جدول ۱ تأثیر متقابل نوع، آرایش سطح میلگرد و طول اتصال آن بر تنش برشی در فصل مشترک میلگرد-چسب (τ_2) مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش طول اتصال، مقاومت برشی در فصل مشترک میلگرد-چسب کاهش معنی‌داری داشت. همچنین، نوع و آرایش سطح میلگرد تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت برشی دارد، به طوری که کمترین تنش برشی در فصل مشترک میلگرد-چسب به مقدار $3/8 \text{ MPa}$ در نمونه‌های ساخته‌شده با میلگرد فولادی ساده با چسب پلی‌استر و طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر

سبب کاهش معنی‌دار مقاومت مذکور و چسب اپوکسی نیز سبب افزایش معنی‌دار آن شده است.

برشی در فصل مشترک میلگرد- چسب را نشان داده است. در حالت کلی می‌توان گفت که افزایش طول اتصال



شکل ۶. اثر نوع چسب و طول اتصال میلگرد بر تنش برشی در فصل مشترک میلگرد- چسب (T2)

۷- b نشان داده شده است. در ۱۲ نمونه نیز شکست در فصل مشترک چوب- چوب رخ داد که در شکل ۷- c مشاهده می‌شود. ۱۰ نمونه از میلگردهایی که با چسب پلی‌استر و چسب اپوکسی کاشته شده بودند در آنها شکست در فصل مشترک میلگرد- چسب اتفاق افتاد که در شکل ۷- d مشاهده می‌شود. این نوع شکست بیشتر برای میلگردهای ساده فولادی و پلیمری مشاهده شد. سه مد شکست به صورت بیرون‌آمدگی میلگرد در اثر انفصال چسب اپوکسی و پلی‌استر از سطح میلگرد فولادی ساده بود (شکل ۷- e). همچنین در شکل ۷- f مشخص شده است که یک مورد شکست با ترک طولی در نمونه آزمایشی اتفاق افتاده است. شکست با ترک طولی ناشی از شکست کششی در چوب است که عمود بر سطح صفحه شعاعی بوده و به علت استحکام کششی کم عمود بر الیاف چوب در آن اتفاق می‌افتد [۱۴]. شکست در فصل مشترک چوب- چسب اغلب به علت شکست برشی چوب در خط چسب است. حالت شکست مشابه نیز توسط Gardelle و همکاران مشاهده شد [۱۷] که بیانگر این واقعیت است که سطح اتصال چسب با میلگردها، قوی‌تر

مد شکست در نمونه‌ها پس از اجرای آزمون بیرون‌کشیدگی میلگرد

نوع و تعداد شکست مشاهده‌شده توسط آزمون بیرون‌کشیدگی میلگرد برای تیمارهای مختلف در جدول ۳ و مد شکست‌ها نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. این مدهای شکست بسته به طول اتصال میلگرد، نوع چسب و آرایش سطح میلگرد متفاوت بودند. مد شکست غالب که در ۲۰ نمونه از ۴۸ نمونه اتفاق افتاده بود، بیرون کشیده شدن دسته‌های چوبی در اطراف میلگردها بود که ناشی از شکست برشی چوب در راستای موازی با الیاف چوب است. البته در بیشتر نمونه‌ها، دسته‌های چوبی جدا شده از نمونه‌هایی که با میلگردهای آجدار فولادی و پلیمری با چسب اپوکسی کاشته شده بودند، به نسبت بزرگ‌تر از نمونه‌های دیگر بود که این مد در شکل ۷- a دیده می‌شود. در دو مورد از نمونه‌هایی که با چسب اپوکسی کاشته شده بودند و در آنها از میلگردهای آجدار از نوع فولادی و پلیمری استفاده شده بود، شکست کششی میلگرد مشاهده شد. شایان ذکر است که این نمونه‌ها دارای طول اتصال میلگرد ۳۰۰ میلی‌متر بودند که در شکل

گزارش Bernasconi نیز می‌توان گفت که ظرفیت اتصال مطلوب هنگامی رخ می‌دهد که شکست برشی در چوب اتفاق افتد [۱۸].

از چوب است. این نوع مد شکست در نمونه‌های آزمونی به‌طور معمول با کشیدن میلگردها با دسته‌ای از الیاف چوب متصل به میلگرد همراه بود. براساس

جدول ۳. مد و تعداد شکست مشاهده شده برای نمونه‌های آزمونی

میلگرد پلیمری ساده (GPR)		میلگرد پلیمری آجدار (GRR)		میلگرد فولادی ساده (SPR)		میلگرد فولادی آجدار (SRR)		نوع میلگرد
EPX	UPR	EPX	UPR	EPX	UPR	EPX	UPR	نوع چسب
۶	۱	۴	۱	۲	۱	۳	۲	خارج شدن میلگرد همراه با دسته‌ای از الیاف چوب
-	-	-	-	۱	۲	-	-	بیرون آمدگی میلگرد
-	۲	۱	۳	۱	۲	-	۳	شکست در فصل مشترک چسب / چوب
-	-	۱	-	-	-	۱	-	شکست کششی میلگرد
-	-	-	-	-	-	۱	-	ترک خوری بلوک گلولام
-	۳	-	۳	۲	۱	۱	۱	شکست در فصل مشترک میلگرد / چسب

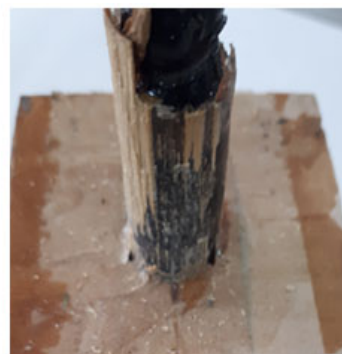
(UPR): رزین پلی استر غیراشباع، (EPX): رزین اپوکسی



(a) بیرون آمدگی میلگرد همراه با دسته ای از الیاف چوبی



(b) شکست کششی میلگرد



(c) شکست چوب در فصل مشترک چسب / چوب



(d) شکست در فصل مشترک میلگرد / چسب



(e) بیرون آمدگی میلگرد



(f) شکست ترک دار نزدیک به فصل مشترک چسب

شکل ۷. مدهای شکست مختلف در آزمون مقاومت به بیرون کشیدگی میلگرد در جهت موازی الیاف چوب اسپیدار

بیشترین مد شکست در آزمون مقاومت به بیرون کشیدگی، بیرون آمدگی میلگرد همراه با دسته‌های چوبی ناشی از شکست برشی چوب بود، می‌توان گفت که مقاومت کششی اتصال به ناحیه سطح میلگرد و همچنین مقاومت برشی چوب در فصل مشترک چوب - چسب وابسته است.

تشکر و قدردانی

این تحقیق در قالب رساله دکتری با حمایت مالی معاونت علمی دانشکده منابع طبیعی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با شماره گرنت ۲۹۹۷۱/۶/۱۱ انجام گرفت. بخشی از هزینه‌های تحقیق نیز از طریق دریافت جایزه سالانه (حمایت از رساله‌های دکتری) مرحوم دکتر یارساپژوه تأمین شد.

نتایج آزمون مقاومت به بیرون کشیدن میلگرد و تنش برشی در فصل مشترک چوب-چسب و میلگرد-چسب نشان داد که مقاومت به بیرون کشیدگی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع چسب، طول اتصال و آرایش سطح میلگرد مورد استفاده است. همچنین بیشترین مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد در نمونه‌های ساخته‌شده با چسب اپوکسی و میلگرد آجدار پلیمری با طول اتصال ۳۰۰ میلی‌متر حاصل شد. همانند مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد، تنش برشی در فصل مشترک چوب - چسب و میلگرد-چسب نیز در نمونه‌های ساخته‌شده با چسب اپوکسی نسبت به چسب پلی‌استر به‌طور معنی‌داری بیشتر بود. مقاومت برشی در فصل مشترک چوب-چسب و همچنین میلگرد و چسب با افزایش طول اتصال از ۲۰۰ میلی‌متر به ۳۰۰ میلی‌متر کاهش یافت. با توجه به اینکه

References

- [1]. Vahedian, A., Shrestha, R., and Crews, K. (2019). Experimental and analytical investigation on CFRP strengthened glulam laminated timber beams: Full-scale experiments. *Composites Part B: Engineering*, 164: 377-389.
- [2]. ASTM, D 3737 (2012). Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glued Laminated Timber (Glulam).
- [3]. Osmannezhad, S., Faezipour, M., and Ebrahimi, G. (2014). Effects of GFRP on bending strength of glulam made of poplar (*Populus deltoids*) and beech (*Fagus orientalis*). *Construction and Building Materials*, 51: 34-39.
- [4]. Batchelar, M. L., and McIntosh, K. A. (1998). Structural joints in glulam. In *Proceedings of the 5th World conference in Timber Engineering*, Montreux (pp. 17-20).
- [5]. Deng, J. X. (1997). Strength of epoxy bonded steel connections in glue-laminated timber.
- [6]. Tlustochowicz, G., Serrano, E., and Steiger, R. (2011). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and Structures*, 44(5): 997-1020.
- [7]. Ansell, M. P., and Harvey, K. (2000). Improved timber connections using bonded-in GFRP rods. In *Proceedings of 6th WCTE world conference in timber engineering*, Whistler, Canada.
- [8]. Bengtsson, C., and Johansson, C. J. (2001). Glued-in rods- Development of test methods for adhesives. In *International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures*, RILEM Publications sarl, Stuttgart, Germany (pp. 393-402).
- [9]. Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D., and Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 97: 90-105.
- [10]. Zhu, H., Faghani, P., and Tannert, T. (2017). Experimental investigations on timber joints with single glued-in FRP rods. *Construction and Building Materials*, 140: 167-172.
- [11]. Steiger, R., Gehri, E., and Widmann, R. (2007). Pull-out strength of axially loaded steel rods bonded in glulam parallel to the grain. *Materials and Structures*, 40(1): 69-78.

- [12]. Riberholt, H. (1988, September). Glued Bolts in Glulam, Proposal for CIB Code International Council for Building Research Studies and Documentation Working Commission W18. In Proceedings CIB-W18, Meeting (Vol. 21).
- [13]. DIN, E., 26891, (1991). Timber structures; Joints made with mechanical fasteners; General principles for the determination of strength and deformation characteristics (ISO 6891), DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Germany.
- [14]. Yeboah, D., Taylor, S., McPolin, D., Gilfillan, R., and Gilbert, S. (2011). Behaviour of joints with bonded-in steel bars loaded parallel to the grain of timber elements. *Construction and Building Materials*, 25(5): 2312-2317.
- [15]. Yan, Y., Liu, H., Zhang, X., Wu, H., and Huang, Y. (2016). The effect of depth and diameter of glued-in rods on pull-out connection strength of bamboo glulam. *Journal of Wood Science*, 62(1), 109-115.
- [16]. Brühwiler, E., Vogel, T., Lang, T., and Lüchinger, P. (2012). Swiss standards for existing structures. *Structural Engineering International*, 22(2): 275-280.
- [17]. Gardelle, V., and Morlier, P. (2007). Geometric parameters, which affect the short-term resistance of an axially loaded glued-in rod. *Materials and structures*, 40(1): 127-138.
- [18]. Bernasconi, A. (2001, October). Behavior of axially loaded glued-in rods—requirements and resistance, especially for spruce timber perpendicular to the grain direction. In Proceedings of the CIB-W18 Meeting Thirty-Four, Venice, Italy.

Experimental investigation of the behavior of joints by glued- in steel and glass fiber reinforced plastic rods parallel to poplar wood grain

M. Hazrati*; Ph.D. Student, Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

H. Zarea Hosseinabadi; Assoc., Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

P. Moradpour; Assist., Prof., Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. Vatani Oskoe; Assoc., Prof., Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajae Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran

(Received: 24 November 2019, Accepted: 27 January 2020)

ABSTRACT

Nowadays, using of fiber reinforced plastic (FRP) rods in composites structures has been increased due to their light weight and high specific strength. In this research, the behavior of steel and glass-FRP rods with different surface patterns (plain, ribbed) were experimentally investigated in the points of bonding length (200, 300 mm) and adhesive type (unsaturated polyester, epoxy) view, parallel to poplar (*Populus alba*) wood grain. In this regards, after specimens preparation based on the above mentioned situations, tensile pull-out strength, shear stress, as well as failure modes in wood-adhesive and rod-adhesive interfaces were investigated. The maximum value for pull-out strength, i.e. 82.5 kN was achieved for ribbed glass-FRP rods, and 300 mm anchorage length. In addition, while pull-out load carrying capacity increased with increasing bonding length, nominal shear stresses were decreased from 6.8 to 3.8 MPa, and 8.9 to 4.7 MPa, respectively for wood-adhesive, and rod-adhesive interfaces. Worth noting, the most common failure mode was pull-out of rods with attached wood, due to shear failure parallel to the wood grains.

Keywords: Glass- FRP rod, poplar wood, pull- out strength, interface shear stress, failure mode.

*Corresponding Author, Email: hazrati.moharam@ut.ac.ir, Tel: +989149282508