

بررسی توان نگهداری اتصال T شکل مقاوم سازی شده با کامپوزیت های تقویت شده با الیاف

پاتنه آ عمرانی^{*۱}، حمیده عبدالزاده^۲ و علی ادب^۳

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنایع چوب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران،
پست الکترونیک: pantea.omrani@gmail.com

۲- فارغ التحصیل دکترای علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه صنایع چوب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: شهریور ۱۳۹۹

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۹

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP) بر مقاومت اتصال های چوبی T شکل، تحت بار کششی بوده است. در این راستا اتصال های T شکل از گونه های چوبی راش و صنوبر ساخته شد و با تقویت ماتریس های پلیمری اپوکسی و وینیل استر، کامپوزیت ها با کمک ۱ تا ۲ لایه از الیاف کربن و شیشه مقاوم سازی شدند. اعضای اتصال به کمک دوپل های چوبی و چسب پلی وینیل استات ساخته شدند و بعد توان نگهداری اتصال های تقویت شده بررسی گردیدند. نتایج تجزیه واریانس نشان دادند که اثر مستقل گونه اعضای اتصال، نوع رزین و تعداد لایه الیاف در FRP بر توان نگهداری اتصال های ساخته شده در سطح ۵ درصد معنی دار بودند. نتایج نشان دادند که توان نگهداری اتصال های ساخته شده با گونه راش نسبت به گونه صنوبر بیشتر بود. بررسی تأثیر تعداد لایه ها نشان داد که توان نگهداری اتصال های تقویت شده با دو لایه از الیاف کربن و شیشه بیشتر از یک لایه است. نتایج بررسی FRP ها نشان داد که استفاده از ماتریس اپوکسی در مقایسه با ماتریس وینیل استر نتایج بهتری را دربردارد. علاوه بر این، الیاف کربن کارایی بهتری را در مقایسه با الیاف شیشه به عنوان عوامل تقویت کننده دارد. بر اساس نتایج بهترین تیمار، اتصال هایی از چوب راش و مقاوم سازی شده با کامپوزیتی از ماتریس اپوکسی و تقویت شده با دو لایه از الیاف کربن بود.

واژه های کلیدی: اتصال های چوبی، پلیمر تقویت شده با الیاف (FRP)، اتصال T شکل، راش، صنوبر، توان نگهداری.

مقدمه

در سازه های چوبی و مبلمان کلیه قطعه ها به حالت های مختلف به یکدیگر متصل می شوند و اتصال های سازه را که از بخش های اصلی یک سازه هستند، تشکیل می دهند، همچنین اتصال ها بار وارده را به طور پیوسته تحمل کرده و بنیان سازه را به وجود می آورند. از این رو می توان اتصال ها را عامل مهمی در تعیین مقاومت سازه ها دانست، به طوری که عدم توجه به طراحی درست آنها در سازه های چوبی از جمله مبلمان،

تأکیدی بر شدت نقاط ضعف سازه مبلمان خواهد بود. برای انجام درست طراحی مهندسی سازه های چوبی باید از اصول اساسی مربوط به اتصال ها آگاهی یافت. طراح باید شناخت جامعی از نوع اتصال ها و اتصال دهنده ها پیدا کند (Lashgari & Sinambari, 2012). برای شناخت کامل ویژگی های سازه باید اطلاعاتی درباره بار وارده بر سازه، طراحی اتصال برای تحمل بارهای وارده و تغییر شکل اتصال در زیر بار داشت. نیروهای محوری (کششی یا فشاری)، برشی، خمشی و

مورد نظر را برآورده سازد وجود ندارد (Beheshty & Rezadoust 2005). از مواد تقویت‌کننده تجاری و مهم سازه‌های چوبی می‌توان مواد پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه^۱ (GFRP) و الیاف کربن^۲ (CFRP) را نام برد. الیاف شیشه در مقایسه با سایر الیاف کربن و کولار^۳ از نظر اقتصادی مناسب‌ترند (Varasteh-Poor, 2008; Alam et al., 2009). در این ارتباط از نمونه‌های تجاری می‌توان به تقویت درونی گلولام (چوب لایه‌ای) اشاره کرد که افزودن ۱۸ درصد الیاف شیشه نسبت به حجم چوب، سختی و مقاومت سازه را به ترتیب ۴۰ و ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد (Rowlands et al., 1986). نتایج تقویت اتصال‌های پیچ در گونه چوبی نوئل با استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری و نوعی رزین اپوکسی نشان داد (Soltiset al., 1998) که استحکام اتصال‌ها با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه افزایش می‌یابد. در این باره مقاومت نهایی اتصال تقویت‌شده با سه لایه الیاف شیشه، ۳۳ درصد بیشتر از اتصال بدون تقویت‌کننده در راستای الیاف و بیشتر از ۱۰۰ درصد در راستای عمود بر الیاف گزارش شده است. Abdolzadeh و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی عملکرد سازه‌ای اتصال گوشه‌ای مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت شده با الیاف را تحت بارگذاری کشش قطری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج اندازه‌گیری نیرو و تغییر مکان در حد تسلیم، نشان داده‌اند که لایه‌های تقویت‌کننده تا حدی قادر به جلوگیری از باز شدن اتصال تحت بار هستند. همچنین نتایج نشان داده‌اند که به‌علت دشواری لایه‌گذاری با زاویه ۹۰ درجه و احتمال تشکیل حباب‌های هوا، چسبندگی مناسب کاهش پیدا می‌کند. نتایج بررسی رفتار تقویت‌کنندگی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف نشان داده‌اند که الیاف شیشه و کربن نسبت به الیاف کولار عملکرد بهتری داشته‌اند. Madhoushi و همکاران (۲۰۱۱) به منظور بررسی تقویت اتصال‌های چوبی، اتصال‌های دوگانه از چوب‌های کاج و صنوبر تهیه و با استفاده از اتصال‌دهنده پیچ و مهره به هم متصل نمودند. GFRP در دو نوع مختلف تجاری و در

پیچشی در سازه بر اعضای اتصال و اتصال‌ها وارد می‌شود (Ebrahimi, 2007). درحالی‌که مقطع عرضی یک عضو در محل اتصال به مقطع طولی عضو دیگر برسد (اتصال T شکل)، ساخت اتصال با رعایت اصول درست کار عملی است. استحکام چنین اتصالی در معرض تنش فشاری محدود به مقاومت فشاری عمود بر الیاف عضو است که مقطع طولی آن درگیر اتصال می‌باشد. در صورتی‌که به این اتصال تنش کششی وارد شود، توان اتصال‌دهنده روی عضو که با مقطع عرضی در اتصال شرکت کرده است، تعیین‌کننده خواهد بود. اگر تنش خمشی به این اتصال وارد شود هر دو عضو اتصال در محدودیت ظرفیت تنش آن دخالت خواهند داشت. به دلیل اینکه ضعف چوب در کشش، بیشترین اثر منفی را در استحکام اتصال دارد، تقویت اتصال‌های ساخته‌شده و بررسی توان نگه داری اتصال تحت کشش ضروری به نظر می‌رسد. از سوی دیگر تقویت اتصال‌ها، استحکام و ایمنی سازه و نیز عمر مصرف آن را افزایش می‌دهد. همچنین با توجه به کمبود منابع جنگلی برای تأمین نیاز صنعت چوب کشور، تقویت اتصال‌های سازه‌های چوبی می‌تواند به نوبه خود این نیاز و مشکل را کاهش داده و همچنین به لحاظ اقتصادی، حفظ منابع جنگلی و محیط‌زیست نیز مفید واقع گردد؛ از این رو نیاز به تحقیقات و مطالعات بیشتری در این زمینه احساس می‌شود تا بتوان به راهکاری عملی و مناسب دست یافت.

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف از جمله تقویت‌کننده‌هایی هستند که به صورت وصله‌های کامپوزیتی برای تقویت ناحیه اتصال دو قطعه مورد استفاده قرار می‌گیرند. به منظور تأمین همزمان استحکام بالاتر سازه و استفاده کمتر از منابع چوبی، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف به‌طور گسترده‌ای برای مقاوم‌سازی اعضا در سازه‌های چوبی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش رویکردی است که می‌توان از آن برای تقویت اتصال تحت بار استفاده کرد. امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی شده، به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص

3- Kevlar

1- Glass Fiber Reinforced Polymer
2- Carbon Fiber Reinforced Polymer

بین چوبی نیز از چوب ممرز انتخاب گردید. نتایج آزمون‌های مکانیکی نشان داد که بیشترین مقاومت کششی مربوط به اتصال‌های گونه راش و کمترین مقدار آن مربوط به گونه نوئل بوده است. بیشترین و کمترین مقاومت کششی به ترتیب مربوط به بین با قطر ۸ و ۱۰ میلی‌متر بوده است. به نحوی که با افزایش قطر بین از ۶ به ۸ میلی‌متر مقاومت کششی افزایش و با افزایش قطر بین به ۱۰ میلی‌متر مقاومت مزبور کاهش یافته است. بیشترین مقاومت کششی مربوط به فاصله ۲۵ میلی‌متری بوده است. همچنین Omrani و همکاران (۲۰۱۹) میزان توان نگه‌داری اتصال‌های T شکل ساخته شده با بیسکویت چوبی را بررسی نمودند. گونه اعضای اتصال از چوب‌های راش و نراد، اندازه بیسکویت شامل ۱۰ و ۲۰ (۱ عدد بیسکویت در هر اتصال) و چسب‌های پلی‌وینیل استات، پلی‌اورتان و اوره فرمالدئید به‌عنوان متغیرهای این تحقیق در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که اثر مستقل گونه اعضای اتصال و نیز نوع چسب بر توان نگه‌داری اتصال‌های بیسکوییتی در سطح ۱ درصد معنی‌دار، ولی اثر مستقل اندازه بیسکویت معنی‌دار نمی‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که توان نگه‌داری اتصال‌های ساخته شده با گونه راش نسبت به گونه نراد بیشتر بوده است. چسب پلی‌اورتان نسبت به سایر چسب‌ها بهترین عملکرد را داشته است. در نهایت بهترین عملکرد اتصال‌های ساخته شده با بیسکویت (گونه راش، بیسکویت ۱۰ و چسب پلی‌اورتان) با اتصال‌های ساخته شده با دویل چوبی مقایسه شد که اتصال‌های ساخته شده با بیسکویت، توان نگه‌داری بیشتری را نشان دادند.

با توجه به مطالب بیان شده و اهمیت تقویت اتصال‌های چوبی، هدف از این تحقیق، بررسی توان نگه‌داری اتصال T شکل مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت‌های FRP می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مواد

اعضای اتصال T شکل از چوب راش (*Fagus orientalis*) و صنوبر (*Populus deltoides*) تهیه و به ابعاد ۱۵×۵×۲/۵ سانتی‌متر (عضو افقی) و ۱۰×۵×۲/۵

ضخامت‌های ۵/۰ و ۱ میلی‌متر به‌عنوان تقویت‌کننده و پوشش روی اتصال‌ها با استفاده از رزین اپوکسی استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار بار و تنش اعمال شده با تقویت اتصال افزایش می‌یابد و در این ارتباط تنها اثر نوع صفحات کامپوزیتی معنی‌دار است و نوع گونه اثر معنی‌داری ندارد. همچنین نتایج نشان داد، تقویت اتصال‌ها موجب تغییر شکل شکست در نمونه‌های چوبی می‌شود، به طوری که هیچیک از نمونه‌های تقویت شده در محل اتصال با پیچ دچار شکست نشده و تنها در محل پیچ دچار لهیدگی می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت با تقویت اتصال، ضریب اطمینان سازه افزایش می‌یابد و ترک‌های ناگهانی و عمیق در اتصال چوبی ایجاد نمی‌شود. Osmannezhad و همکاران (۲۰۱۳) اثر GFRP را بر مقاومت خمشی گلولام مورد بررسی قرار دادند. گلولام با استفاده از ۵ لایه راش و صنوبر ساخته شد. روند تقویت توسط GFRP با استفاده از ۴ روش شامل استفاده از ۱ لایه و ۲ لایه GFRP زیر لایه‌های گلولام و ۲ لایه و ۴ لایه GFRP بین لایه‌های گلولام انجام شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین مقاومت در نمونه‌های ساخته شده با چسب اپوکسی به دست آمد. همچنین نمونه‌های تقویت شده گلولام با استفاده از ۴ لایه GFRP بیشترین مقاومت را نشان دادند. باین حال نمونه‌های ساخته شده از چوب راش دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده از چوب صنوبر بود.

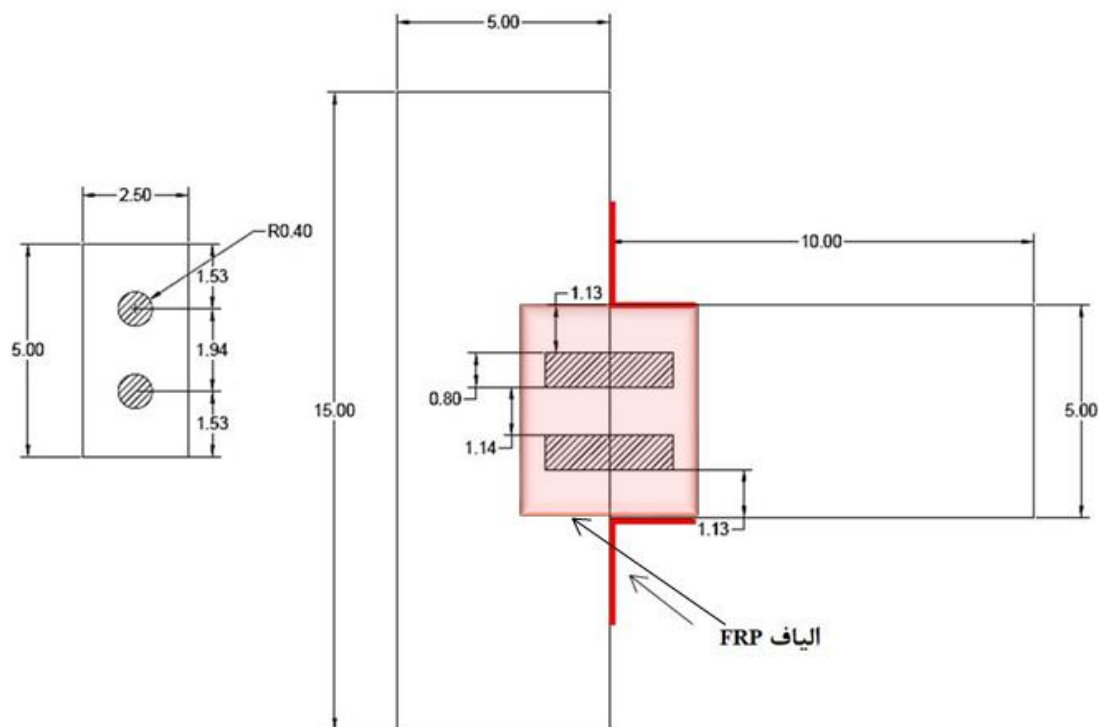
در توان نگه‌داری اتصال‌های چوبی عوامل مختلفی نقش دارند، به طوری که Vassiliou و همکاران (۲۰۱۶) فاکتورهای تأثیرگذار بر ظرفیت تحمل تنش کششی اتصال‌های گوشه‌ای T شکل را در قاب‌های مبلمان ساخته شده با اتصال بین چوبی، کام و زبانه مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد اتصال‌های T شکل قوی‌تر از گوشه‌ای، کام و زبانه قوی‌تر از بین چوبی و همچنین چوب راش بهتر از اقاقای سیاه بوده است. Lashgari (۲۰۱۱) به منظور بررسی مقاومت کششی در اتصال بین چوبی، اثر قطر بین چوبی در سه سطح ۶، ۸ و ۱۰ میلی‌متر و فاصله بین بین‌ها در سه سطح ۲۰، ۲۵ و ۳۰ میلی‌متر در ۳ نوع گونه چوبی راش، توسکا و نوئل را به‌عنوان متغیر انتخاب نمود. برای ساخت اتصال‌های T شکل،

شد. همچنین از دو نوع ماتریس پلیمری اپوکسی و وینیل استر برای چسباندن وصله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده استفاده شد. چسب پلی‌وینیل استات از شرکت چسب شمال و رزین‌های اپوکسی و وینیل استر از شرکت ماندگار بسیار فجر آسیا کرج تهیه شد.

سانتی‌متر (عضو عمودی) تبدیل و آماده شدند. دوپل چوبی نیز از گونه راش با سطح شیاردار، طول ۳۰ و قطر ۸ میلی‌متر تهیه و استفاده شد. برای مقاوم‌سازی اتصال‌ها از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) با دو نوع الیاف کربن و شیشه دو جهت استفاده گردید (جدول ۱). برای مونتاژ اتصال T شکل از چسب چوب پلی‌وینیل استات استفاده

جدول ۱- خواص مکانیکی الیاف شیشه و کربن

ویژگی‌ها	شیشه (۲۰۰ گرمی)	کربن (۲۰۰ گرمی)
مقاومت کششی (MPa)	۳۵۰۰	۴۲۱۰
مدول کششی (GPa)	۷۲/۴	۲۳۰



شکل ۱- طرح شماتیک جزئیات قرارگیری اجزای اتصال (ابعاد بر حسب سانتی‌متر می‌باشد)

دو دوپل چوبی و چسب پلی‌وینیل استات به هم متصل شده و به مدت ۲۴ ساعت در گیره دستی تحت فشار قرار گرفتند تا چسب به گیرایی کامل برسد. ابعاد قطعات و موقعیت استقرار

ساخت اتصال‌های T شکل و مقاوم‌سازی آنها با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) برای ساخت اتصال‌های T شکل، اعضای اتصال به کمک

وصله‌های کامپوزیتی (τ_c) در اثر اعمال نیروی کششی برای انفصال اتصال اعمال می‌گردد.

تنش محوری از طریق تفاضل بار وارده بر دو نوع آزمونه شاهد قابل محاسبه است (رابطه ۱):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه σ : تنش محوری در محل تماس دو عضو اتصال، F : مقدار نیروی به‌دست‌آمده از تفاضل نیروهای محوری به‌دست‌آمده از دو نوع آزمونه شاهد و A : مساحت سطح محل تماس دو عضو اتصال می‌باشد.

برای تعیین مقدار تنش در محل دابل‌ها، از مقادیر نیروی به‌دست‌آمده از آزمونه‌های شاهد نوع اول که در آنها فقط دابل‌های چوبی چسب‌زنی و چسبانده شده بودند (و نه اعضای اتصال) استفاده شد (رابطه ۲):

$$\tau_a = \frac{F}{2A} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه τ_a : تنش برشی در محل دابل‌ها، F : مقدار نیروی به‌دست‌آمده از آزمونه شاهد نوع اول و A : مساحت سطح تماس دو دابل با محل سوراخ دابل در اعضای اتصال است.

برای تعیین مقدار تنش حاصل در محل وصله‌های کامپوزیتی از مقادیر تفاضل نیروهای به‌دست‌آمده از اتصال‌های تقویت‌شده با وصله‌ها از آزمونه‌های شاهد نوع دوم به‌دست آمد (رابطه ۳):

$$\tau_c = \frac{F}{2A} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه τ_c : تنش برشی در محل وصله‌های کامپوزیتی، F : مقدار نیروی به‌دست‌آمده از تفاضل آزمونه‌های تقویت‌شده با وصله‌های کامپوزیتی و آزمونه شاهد نوع دوم و A : مساحت سطح تماس وصله‌های کامپوزیتی با اعضای اتصال است.

بنابراین توان نگه‌داری اتصال‌های T شکل ساخته‌شده با دابل‌های چوبی و چسب پلی‌وینیل استات و نیز تقویت‌شده با FRP بوسیله رابطه ۴ تعیین می‌شود.

دابل‌ها در شکل ۱ مشخص شده است.

برای مقاوم‌سازی اتصال‌های T شکل از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، شامل شیشه (GFRP) و کربن (CFRP) به ابعاد 50×40 میلی‌متر و به‌صورت لایه‌های دو جهته استفاده شد. این الیاف به تعداد ۱ تا ۲ لایه در چهار طرف اتصال T شکل لایه‌گذاری شدند (شکل ۱). برای این کار، پس از آماده شدن رزین اپوکسی و وینیل استر، ابتدا سطح چوب را به لایه‌ای از رزین آغشته کرده و بعد لایه‌ای از الیاف روی آن گذاشته شد. برای نمونه‌های با دو لایه الیاف، سطح لایه اول چسبانده شده، به رزین آغشته شده و لایه دیگر از الیاف روی آن چسبانده شد. پس از پایان عملیات لایه‌گذاری، اتصال مقاوم‌سازی شده با الیاف و رزین وینیل استر به مدت ۴۸ ساعت در داخل اتو با دمای 40°C درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و بعد از آن برای تکمیل فرایند گیرایی به مدت دو هفته در محیط آزمایشگاهی با شرایط رطوبت نسبی $5 \pm 65\%$ درصد و دمای $2 \pm 20^\circ\text{C}$ درجه سانتی‌گراد مشروط‌سازی شدند.

بعد از ساخت اتصال‌های T شکل، تعدادی آزمونه شاهد ساخته شد که در آنها محل تماس اعضای اتصال چسب‌زنی نشد و فقط دابل‌ها چسبانده شدند که برای حصول نتیجه قطعی در محل تماس دو قطعه، از کاغذ مومی استفاده شد. آزمونه‌های شاهد دیگری نیز ساخته شد که هم دابل‌ها و هم محل تماس دو عضو چسب‌زنی گردید.

آزمون توان نگه‌داری اتصال‌ها و محاسبات

برای تعیین توان نگه‌داری، آزمونه‌های ساخته‌شده توسط ماشین آزمایش Tensile Tester مدل STT-5T با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه تحت بار کششی قرار گرفتند.

سهمی از توان نگه‌داری اتصال‌های T شکل ساخته‌شده با دابل چوبی و چسب پلی‌وینیل استات و مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف (وصله‌های کامپوزیتی)، مربوط به ناحیه چسبانده شده در محل تماس دو عضو که تحت تنش محوری (σ) قرار گرفته، می‌باشد. علاوه بر آن تشهبی‌مانند تنش برشی در محل دو دابل به‌عنوان اتصال‌دهنده (τ_a) و نیز تنش برشی حاصل در محل چسبانده

در قالب طرح کاملاً تصادفی در سطح احتمال ۵ درصد معنی داری استفاده شد. گروه‌بندی میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

= توان نگهداری اتصال‌های تقویت‌شده

$$\sigma + \tau_d + \tau_c \quad \text{رابطه (۴)}$$

تجزیه و تحلیل آماری

با توجه به متغیرها و سطوح آنها، نمونه‌های آزمونی ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفتند. سپس برای تجزیه و تحلیل نتایج به دست آمده، از نرم‌افزار SPSS و آزمون آنالیز واریانس

نتایج

جدول ۲ نتایج میانگین مقادیر توان نگهداری اتصال‌های T شکل تقویت‌شده با FRP را نشان می‌دهد.

جدول ۲- نتایج میانگین عوامل متغیر بر توان نگهداری اتصال‌های T شکل تقویت‌شده

توان نگهداری (MPa)	تیمارها
۵/۱۷	آزمونه شاهد هم دابل و هم محل تماس اعضا چسبانده شدند
۴/۹۶	۱ لایه
۵/۲۳	۲ لایه
۵/۰۱	۱ لایه
۵/۳۳	۲ لایه
۵/۳۲	۱ لایه
۵/۳۵	۲ لایه
۵/۳۵	۱ لایه
۵/۴	۲ لایه
۴/۳۵	آزمونه شاهد هم دابل و هم محل تماس اعضا چسبانده شدند
۴/۴۲	۱ لایه
۴/۸۳	۲ لایه
۴/۵	۱ لایه
۴/۶۷	۲ لایه
۴/۷۶	۱ لایه
۴/۷۶	۲ لایه
۴/۷۹	۱ لایه
۴/۸۶	۲ لایه

بیشتر است. با بررسی اثر مستقل نوع رزین، مشخص شد که توان نگهداری اتصال‌ها با استفاده از رزین اپوکسی به‌عنوان ماتریس وصله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف (FRP) برای مقاوم‌سازی اتصال‌ها، نسبت به رزین وینیل استر حدود ۳/۳۸ درصد بیشتر می‌باشد. بررسی اثر مستقل نوع الیاف بر توان نگهداری اتصال‌ها نشان داد که اتصال‌های تقویت‌شده با الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه توان نگهداری بیشتری داشتند. طبق جدول ۴، اثر مستقل تعداد لایه الیاف در FRP بر توان نگهداری اتصال‌ها نشان می‌دهد که اتصال‌های تقویت شده با FRP که در ساخت آنها از دو لایه الیاف استفاده شده است، نسبت به کاربرد یک لایه الیاف دارای توان نگهداری بیشتری می‌باشند.

جدول ۳ نتایج تجزیه واریانس عوامل متغیر بر توان نگهداری اتصال‌های ساخته و تقویت‌شده را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر مستقل گونه اعضای اتصال، نوع رزین و تعداد لایه الیاف در FRP در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر متقابل نوع رزین و تعداد لایه الیاف در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. طبق جدول ۳ بیشترین مقدار معنی‌داری به ترتیب مربوط به اثر نوع اعضای اتصال ($F: ۸۰۴/۳۵۹$)، نوع رزین، تعداد الیاف و بعد نوع الیاف می‌باشد.

جدول ۴، اثر مستقل هر یک از متغیرهای مورد بررسی را بر توان نگهداری اتصال‌ها و گروه‌بندی دانکن آنها نشان می‌دهد. بر اساس این جدول، توان نگهداری اتصال‌های ساخته شده با چوب راش نسبت به چوب صنوبر حدود ۱۳ درصد

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل متغیر مورد بررسی بر توان نگهداری اتصال‌های T شکل تقویت‌شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	sig
نوع اعضای اتصال	۱	۱۰/۴	۸۰۴/۳۵۹	۰/۰۰۰*
نوع رزین	۱	۰/۵۵۲	۴۲/۶۶۳	۰/۰۰۰*
نوع الیاف	۱	۰/۰۱۹	۱/۴۹۶	۰/۲۲۴ ^{n.s}
تعداد الیاف	۱	۰/۴۴۲	۳۴/۱۴۷	۰/۰۰۰*
نوع اعضای اتصال × نوع رزین	۱	۰/۰۰۵	۰/۳۸۵	۰/۵۳۶ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × نوع الیاف	۱	۰/۰۰۸	۰/۶۵۵	۰/۴۲ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × تعداد الیاف	۱	۰/۰۰	۰/۰۲۱	۰/۸۸۶ ^{n.s}
نوع رزین × نوع الیاف	۱	۰/۰۰۵	۰/۳۹۴	۰/۵۳۲ ^{n.s}
نوع رزین × تعداد الیاف	۱	۰/۲۵۲	۱۹/۴۷۳	۰/۰۰۰*
نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۰/۰۰۳	۰/۲۴۷	۰/۶۲۱ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × نوع رزین × نوع الیاف	۱	۰/۰۱۶	۱/۲۰۳	۰/۲۷۳ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × نوع رزین × تعداد الیاف	۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰	۰/۹۹۹ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۰/۰۱۳	۱/۰۳۸	۰/۳۱۱ ^{n.s}
نوع رزین × نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۰/۰۲	۱/۵۴۹	۰/۲۱۶ ^{n.s}
نوع اعضای اتصال × نوع رزین × نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۰/۰۳	۲/۳۱۹	۰/۱۳۱ ^{n.s}

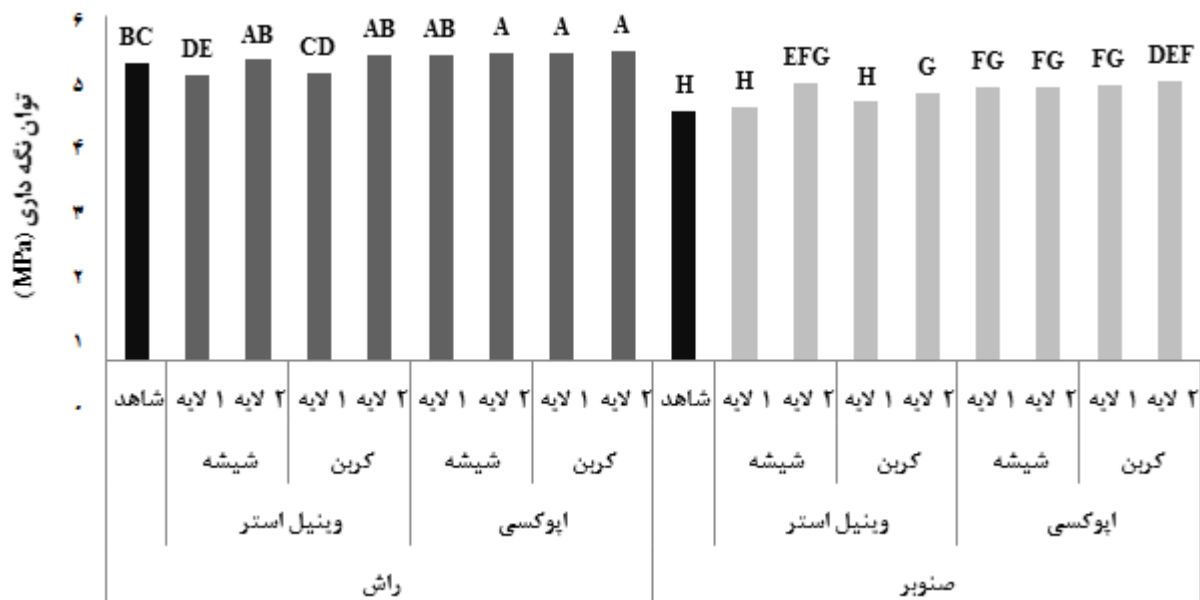
*: معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ^{n.s}: عدم معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد

جدول ۴- اثر مستقل متغیرهای مورد بررسی بر توان نگه‌داری اتصال‌ها

عوامل متغیر	سطوح	توان نگه‌داری (MPa)	گروه‌بندی دانکن
گونه اعضای اتصال	راش	۵/۲۳۴	A
	صنوبر	۴/۶۳۳	B
نوع رزین	اپوکسی	۵/۰۱۶	A
	وینیل استر	۴/۸۵۲	B
نوع الیاف FRP	کربن	۴/۹۹۴	A
	شیشه	۴/۹۵۹	A
تعداد الیاف FRP	۱ لایه	۵/۰۶	B
	۲ لایه	۴/۸۹۳	A

چوبی، توان نگه‌داری اتصال‌های چوبی را تقویت می‌کند. شکل ۲ نشان می‌دهد که استفاده از گونه راش نسبت به گونه صنوبر، کاربرد رزین اپوکسی نسبت به رزین وینیل استر، الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه و تعداد ۲ لایه از الیاف نسبت به یک لایه از الیاف در توان نگه‌داری اتصال‌های ساخته شده تأثیر بیشتری داشته‌اند.

شکل ۲ اثر متقابل همه عوامل متغیر یا مقادیر میانگین توان نگه‌داری اتصال‌های T شکل تقویت شده با FRP را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که اتصال‌های مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با دو لایه از الیاف کربن، در هر دو گونه چوبی بیشترین توان نگه‌داری را داشتند. بر اساس نتایج به دست آمده، استفاده از FRP‌ها در ساخت اتصال‌های



شکل ۲- اثر متقابل عوامل متغیر بر توان نگه‌داری اتصال‌ها

بحث

به دست آورده، کارهای بسیار کمی در زمینه تقویت کامپوزیتی سازه‌های چوبی منتشر شده است. البته هنوز استفاده از چندسازه‌های CFRP به گستردگی مصرف GFRP نیست. حتی در تحقیقات Dagher و Lindyberg (۲۰۰۰) مقایسه مشابه CFRP و GFRP از نظر سفتی و بهبود مقاومت به عنوان بازدهی از قیمت تقویت‌کننده‌ها، نشان داد که مقادیر مدول یانگ در جهت طولی در CFRP نسبت به GFRP بالاتر و تغییر شکل شکست کمتر است.

همچنین نتایج نشان داد اتصال‌های تقویت‌شده با FRP که در ساخت آنها از دو لایه الیاف استفاده شده است، نسبت به کاربرد یک لایه الیاف، توان نگهداری بیشتری دارند. Daniel و همکاران (۱۹۹۷) در تحقیقی بر روی الیاف شیشه برای افزایش ظرفیت تحمل اتصال‌های پیچ و مهره چوبی بدین نتایج دست یافتند که با افزایش تعداد لایه‌های شیشه میزان تقویت‌کنندگی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش زمانی اتفاق می‌افتد که اولین لایه به اتصال تقویت‌نشده اضافه شود. مقاومت نهایی اتصال‌های تقویت‌شده با ۳ لایه الیاف شیشه در مقایسه با اتصال‌های تقویت‌نشده ۳۳ درصد برای بارگذاری در حالت موازی الیاف و بیش از ۱۰۰ درصد در بارگذاری عمود بر الیاف افزایش نشان داد. مهمتر اینکه در حالت بارگذاری موازی الیاف تقویت با الیاف شیشه باعث شد مد شکست از حالت ناگهانی که مربوط به تنش کششی عمود بر الیاف است به یک نوع شکل‌پذیر همراه با تحمل تنش‌ها تبدیل شود. Haller و همکاران (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای که از الیاف شیشه، آرامید یا کربن چند جهتی برای تقویت نمونه‌های چوبی متصل شده با میخ استفاده نمودند، به این نتیجه رسیدند که تقویت اتصال‌های چوبی با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد که حتی یک لایه نازک بافت تقویت‌کننده، مقاومت و سفتی میخ را در چوب افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج تحقیق Osmannezhad و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی اثر GFRP بر مقاومت خمشی گلولام نشان داده است که نمونه‌های گلولام تقویت‌شده با استفاده از ۴ لایه GFRP بیشترین مقاومت را نسبت به استفاده از ۲ لایه دارند.

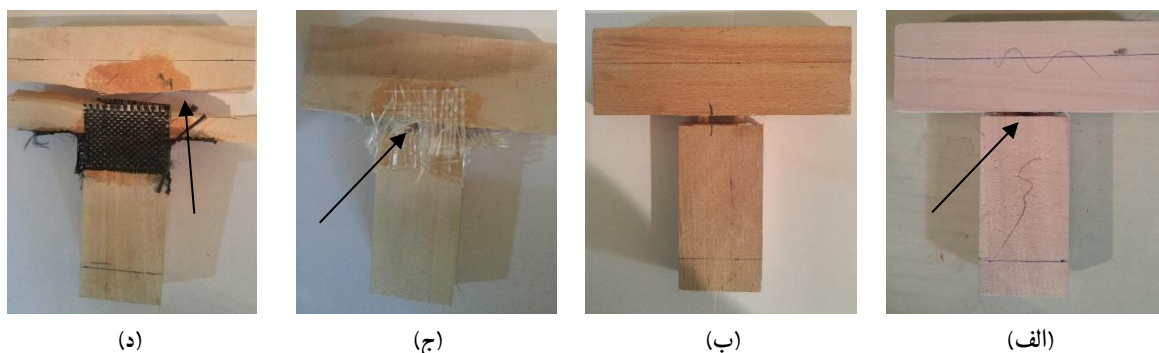
نتایج نشان داد که اثر مستقل نوع اعضای اتصال بر توان نگهداری اتصال‌ها معنی‌دار است، به طوری که اتصال‌های ساخته‌شده با چوب راش نسبت به چوب صنوبر توان نگهداری بیشتری را داشتند. چوب راش یک گونه پهن‌برگ با دانسیته بالاتر نسبت به چوب صنوبر است. از آنجایی که دانسیته رابطه مستقیمی با خواص مکانیکی چوب‌ها دارد، هرچه دانسیته چوبی بالاتر باشد مقاومت آن در برابر تنش و نیروی وارد شده افزایش می‌یابد. همچنین دانسیته بیشتر یعنی سطح چسبندگی بیشتر بین اعضای اتصال و اتصال‌دهنده که این خود نیز می‌تواند توان نگهداری را افزایش دهد. نتایج تحقیق Osmannezhad و همکاران (۲۰۱۳) در بررسی اثر GFRP بر مقاومت خمشی گلولام نشان داد، نمونه‌های ساخته شده از چوب راش دارای مقاومت بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده از چوب صنوبر بودند.

نتایج نشان داد که اثر مستقل نوع رزین بر توان نگهداری اتصال‌ها معنی‌دار است، به طوری که توان نگهداری اتصال‌ها هنگام استفاده از ماتریس اپوکسی در کامپوزیت‌های FRP برای مقاوم‌سازی اتصال‌ها نسبت به رزین وینیل استر بیشتر بود. Rowlands و همکاران (۱۹۸۶) نیز دریافتند که چسب‌های اپوکسی در شرایط خشک، اتصال عالی را با الیاف شیشه، آرامید و کربن برای تولید محصولات تقویت‌شده تشکیل می‌دهند. از علت‌های این مسئله می‌توان به خواص آن مانند مقاومت زیاد در برابر تغییرات زیاد رطوبت (Alam et al., 2009; Beheshty & Rezaoust 2005; Raftery et al., 2009; Raftery & Harte, 2011)، تنوع تجاری، تفاوت در انواع ویژگی‌های آن مانند گیرشدن (در دمای محیط و با رطوبت ۲۰ درصد برای چوب)، سفتی، مقاومت و گرانروی انواع آن، قدرت پرکنندگی و دوام زیاد در برابر خوردگی (Madhoushi & Ansell, 2004) اشاره نمود.

نتایج نشان داد که اتصال‌های تقویت‌شده با الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه توان نگهداری بیشتری داشتند، بررسی‌های Pirvu و همکاران (۲۰۰۴) نشان داده است با وجود اینکه چندسازه‌های تقویت‌شده با الیاف، طرفدارن بسیاری را

اتصال در برابر تنش وارده می‌تواند رخ دهد. در این صورت مقاومت اتصال تحت نیروی انفصال افزایش چشمگیری خواهد داشت. ولی متأسفانه اتصال‌ها وارد این مرحله نشدند. عوامل مختلفی در این موضوع دخیل بوده‌اند، مهمترین عاملی که پس از انجام پژوهش و با معاینه اتصال‌های شکسته شده مشخص شد، وجود معایب ریز (ترک‌های ریزی که با چشم غیر مسلح خیلی قابل رؤیت نبودند) در ساختار چوب اعضای اتصال به‌ویژه چوب راش بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی در چوب‌های با معایب هرچند کوچک نمی‌تواند مفید باشد، بلکه در برخی از موارد با جلوگیری از باز شدن اتصال تحت بار و انتقال تنش بیشتر به محل اتصال‌دهنده‌های مکانیکی مانند دوپل باعث شکست زودتر اتصال تحت بارهای کمتر خواهد شد.

البته شکست آزمون‌های شاهد تحت نیروی انفصال اتصال با غلبه بر نیروی برشی در محل دوپل‌ها با باز شدن اتصال‌ها رخ می‌دهد. به طوری که مقایسه شکست آزمون‌های شاهد و تقویت شده نشان می‌دهد که استفاده از وصله‌های کامپوزیتی یا FRP بر مقاومت اتصال‌ها مؤثر است، ولی با محدودیت‌هایی نیز همراه است. نحوه شکست اتصال‌های مقاوم‌سازی شده را می‌توان در (شکل ۳) مشاهده نمود. اتصال‌های تقویت شده تحت نیروی انفصال اتصال، در بیشتر مواقع با شکست عضو افقی اتصال (عضوی که تحت کشش عمود بر الیاف قرار دارد) شکسته شده‌اند (شکل ۳-د) و متأسفانه به ندرت با جدا شدن الیاف از سطح چوب شکست رخ داده است (شکل ۳-ج)، البته مواردی از پاره شدن الیاف در چند سازه‌ها مشاهده نشد. در صورتی که تمرکز تنش از محل قرارگیری دوپل‌ها به وصله‌های کامپوزیتی انتقال یابد، شکست در محل وصله‌های کامپوزیتی پس از مقاومت



شکل ۳- نحوه شکست اتصال‌های T شکل تقویت شده تحت آزمون توان نگه‌داری

کامپوزیت‌های FRP بود، نتایج زیر به دست آمد. نتایج نشان داد که نحوه شکست اتصال‌ها در آزمون‌های شاهد با آزمون‌های تقویت شده متفاوت است، به عبارتی نتایج نشان داد که استفاده از لایه‌های FRP بر روی سطوح اتصال ساخته شده تا حدی مقاومت اتصال‌ها را افزایش می‌دهد. اثر نوع چوبی بر توان نگه‌داری اتصال‌های تقویت شده نشان داد که بالاترین مقاومت‌ها مربوط به گونه راش بود ولی اثر وصله‌های کامپوزیتی در گونه صنوبر بهتر بود. نتایج نشان داد

بررسی آزمون‌های تقویت شده پس از شکست نشان داد که بیشتر اتصال‌ها از ناحیه تمرکز تنش در انتهای دوپل‌ها که باعث شکست تحت بار کشش عمود بر الیاف است، رخ داده است. این موضوع را با افزایش طول وصله‌های کامپوزیتی و پوشش دادن سطح بیشتری از عضو افقی تحت نیروی انفصال می‌توان حل نمود.

در نهایت با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق مطالعه تجربی عملکرد سازه‌ای اتصال T شکل مقاوم‌سازی شده با

- Lashgari, A., 2011. Investigation the tensile strength of wooden pin joint of hornbeam. *Journal of Natural Resources Science and Technology*, 6(2): 115-126
- Lashgari, A. and Sinambari, P., 2012. Bending strength of screwed T-typed furniture joints. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 27(3): 536-544.
- Madhoushi, M. and Ansell, M.P., 2004. Experimental Study of Static and Fatigue Strengths of Pultruded GFRP Rods Bonded into LVL and Glulam. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 24: 319-325.
- Madhoushi, M., Sadatzadeh, S. and Ebrahimi, Gh., 2011. Reinforcement of Bolted Timber Joints Using GFRP Sheets in Poplar and Pine Woods. *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 24(3): 171-179.
- Omrani, P., Ebrahimi, Gh. and Kahvand, M. 2019. The investigation of the affecting factors on withdrawal resistance of the wooden biscuit joints, *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, Available Online from 27 September 2019.
- Osmannezhad, S., Faezipoue, M. and Ebrahimi, Gh., 2013. Effects of GFRP on bending strength of Glulam made of poplar (*Populus deltoides*) and beech (*Fagus orientalis*). Faculty of Natural Resources, university of Tehran, Iran.
- Pirvu, A., D.J. Gardner, and R. Lopez-Anido., 2004. Carbon fiber-vinyl ester composite reinforcement of wood using the VARTM/SCRIMP fabrication process. *Composites. Part A*: 1257-1265.
- Raftery, G.M. and Harte, A.M., 2011. Low-grade Glued Laminate Timber Reinforced with FRP Plate. *Composites, Part B: Engineering*, 42: 724-735.
- Raftery, G.M., Harte, A.M. and Rodd, P.D., 2009. Bonding of FRP Materials to Wood Using Thin Epoxy Glue lines, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29: 580-588.
- Rowlands, R.E., Van Deweghe, R.P., Laufenberg, T.L. and Krueger, G.P., 1986. Fiber-Reinforced Wood Composites. *Wood Fiber Science*, 18: 39-57.
- Soltis, A.L., Ross, R.J. and Windorski, D.F., 1998. Fiberglass-Reinforced Bolted Wood Connection. *Forest Products Journal*, 48: 63-67.
- Varasteh-Poor, H., 2008. Application of Advanced Composites in Constructions, Ministry of Energy, Iran, 87.
- Vassiliou, V., Barboutis, I. and Kamperidou, V., 2016. Strength of Corner and Middle Joints of Upholstered Furniture Framse Constructed with Black locust and Beech wood. *Wood Research*, 61(3): 495-504.
- که در بین تیمارها، اتصال‌های ساخته‌شده از چوب راش و تقویت‌شده با دو لایه از الیاف کربن در ماتریس رزین اپوکسی دارای بیشترین و اتصال‌های ساخته‌شده از گونه صنوبر با یک لایه الیاف شیشه در ماتریس رزین وینیل استر کمترین مقدار توان نگهداری اتصال‌های تقویت‌شده را داشتند. عوامل مختلف دیگری مانند گونه‌های چوبی متنوع، نوع اتصال و اتصال‌دهنده، نوع چسب برای مونتاژ اتصال، نوع ماتریس کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف، انواع لایه‌های تقویت‌کننده دیگر FRP با مشخصات متفاوت و غیره می‌توانند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرند تا بتوان به دستاوردهای بهتر و کارآمد بیشتری به‌ویژه برای استفاده در صنعت دست یافت.

منابع مورد استفاده

- Abdolzadeh, H., Ebrahimi, Gh. and Layeghi, M., 2016. Structural performance of corner joint reinforced by FRP under diagonal tension loading. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 31(1): 118-129.
- Alam, P., Ansell, M.P. and Smedley D., 2009. Mechanical Repair of Timber Beams Fractured in Flexure Using Bonded-in Reinforcements. *Composites, Part B: Eng.* 40: 95-106.
- Beheshty, M.H. and Rezadoust, A.M., 2005. Reinforced Plastic Composites. *Iran Polymer and Petrochemical Institute*, 447: 69-75.
- Dagher, H.J. and Lindyberg, R., 2000. FRP-wood hybrids for bridges: a comparison of E-glass and carbon reinforcements. *Proceedings of ASCE conference, Philadelphia, USA, 7-10 March*: 1-8.
- Daniel, F.W., Lawrence, A.S. and Robert, J.R., 1997. Feasibility of fiberglass-reinforced bolted wood connections. *Forest Products Laboratory: Madison, Wisconsin*.
- Ebrahimi, G., 2007. Engineering design of furniture structure. Tehran university publication, Iran, 491p.
- Haller, P., Birk, T., Offerman, P. and Cebulla, H., 2006. Fully Fashioned Biaxial Weft Knitted and Stitch Bonded Textile Reinforcements for Wood Connection. *Composites, Part B: Engineering*, 37: 278-285.

Investigation on withdrawal strength of reinforced T-shaped joint reinforced using fiber reinforced composites

P. Omrani^{1*}, H. Abdolzadeh² and A. Adab³

1*-Corresponding Author, Assistant Prof., Wood Science and Technology Department, The faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran. Email: pantea.omrani@gmail.com.

2-PhD, Department of Wood Science & Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

3-M.Sc., Wood Science and Technology Department, The faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

Received: April, 2020

Accepted: Sep., 2020

Abstract

The aim of this research was to investigate the effect of fiber reinforced polymer (FRP) on the strength of T-shaped wooden joints under tension load. In this regard, T-shaped joints were fabricated with beech and poplar species and were reinforced with 1 and 2 layer of carbon and glass fiber reinforced epoxy and vinylester polymers. Joint members were assembled using wooden dowels and polyvinyl acetate adhesive and then withdrawal strength of reinforced joints were studied. Results of analysis of variance showed that the independent effect of species of joint members, resin type and number of fiber layers at FRPs was significant at 5% level. Results have indicated that withdrawal strength of joints fabricated with beech species was more than the poplar wood. The investigation of the effect of number of layers showed that the withdrawal resistance of the joints reinforced by two layers of carbon and glass fibers was more than one layer. Results of FRPs investigation indicated that use of epoxy matrix in comparison with vinyl ester matrix exhibited better results. In addition, carbon fibers have shown better performance than glass fiber as reinforcing agents. According to the results, the best treatment was the joints of beech wood and reinforced by composites with epoxy matrix and reinforced with two layers of carbon fibers.

Key words: Wooden joints, fiber reinforced polymers (FRP), T-shaped joint, beech, poplar, withdrawal resistance.