مقاله پژوهشی

نشریه علمی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۵ شماره ۳، صفحه ۲۴۵-۲۳۲، (۱۳۹۹)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/IJWPR.2020.342846.1612
شناسه دیجیتال (DOR): 98.1000/1735-0913.1399.35.232.72.3.1592.41

ظرفیت تحمل تنش اتصال فارسی مقاوم‌سازی شده با پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP)

پانتهآ عمرانی[1*]، حمیده عبدل‌زاده[2] و محسن عابدی[3]

۱*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه صنایع چوب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

پست الکترونیک: pantea.omrani@gmail.com

۲- فارغ‌التحصیل 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 دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۹

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد اتصال‌های گوشه‌ای فارسی (L شکل) مقاوم‌سازی شده با پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) در ناحیه حداکثر تنش تحت بارگذاری فشاری قطری است. در این راستا عملکرد سازه‌ای اتصال‌های گوشه ساخته‌شده از دو گونه چوبی راش و نراد با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با یک و دو لایه از الیاف کربن و شیشه در ماتریس پلیمری اپوکسی مقاوم‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفتند. پس از ساخت اتصال‌های فارسی با کمک دوبل چوبی و چسب پلی‌وینیل استات، اتصال‌ها با کامپوزیت‌های FRP تقویت شده و بعد تحت بارگذاری فشاری قطری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که لایه‌های تقویت‌کننده از باز شدن اتصال تحت بار جلوگیری می‌کنند، ولی با افزایش بار با جدا شدن الیاف از سطح چوب و یا شکست اعضا در محل دوبل‌ها به دلیل تمرکز تنش، گسیختگی در اتصال رخ داده است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر مستقل گونه اعضای اتصال و تعداد لایه الیاف در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که استفاده از چوب راش در مقایسه با چوب نراد، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن نسبت به الیاف شیشه و همچنین استفاده از ۲ لایه الیاف نسبت به ۱ لایه الیاف، برای مقاوم‌سازی اتصال‌ها عملکرد بهتری داشته‌اند. اتصال‌های ساخته‌شده از چوب راش و مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با ۲ لایه از الیاف کربن، بهترین عملکرد را تحت بارگذاری فشاری قطری از خود نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: تنش مرکب، اتصال گوشه، پلیمرهای تقویت شده با الیاف، رزین اپوکسی، پلی‌وینیل استات.

مقدمه

اجزاء سازه‌های چوبی به روش‌های متفاوت (گوشه‌ای، سربه‌سر، متقاطع، عرضی و غیره) و با اتصال‌دهنده‌های گوناگون (پین یا دوبل، بیسکویتی، دم چلچله، قلیف و غیره) به هم متصل می‌شوند (Jones & Lutes, 1993). اتصال‌ها یکی از قسمت‌های بسیار مهم و قابل بحث در هر سازه چوبی هستند، چون نیروها را بین اعضاء انتقال می‌دهند و یکپارچگی مجموعه سازه را حفظ می‌کنند. بیشتر فروریختگی‌ها که در طول بارگذاری‌های زیاد اتفاق می‌افتند، به نامناسب بودن و یا کافی نبودن اتصال‌ها مربوط می‌شوند، علاوه بر آن پایداری و دوام سرویس‌دهی سازه‌ها به‌طور عمده توسط اتصال‌ها تأمین می‌شود (Snow و همکاران ۲۰۰۶). نیروهایی که اتصال باید آنها را تحمل کند، نیروهای محوری (کششی یا فشاری)، برشی، خمشی و پیچشی وارد بر اعضای اتصال هستند

(Jones & Lutes, 1993). در اتصال گوشه‌ای که یکی از اتصال‌های مهم در قاب‌های چوبی به‌شمار می‌رود احتمال اعمال تنش مرکب در آن تحت بار وجود دارد. این تنش در اثر بار محوری و تنش حاصل از لنگر خمشی و تنش برشی در حالت قطری بودن بار به وجود می‌آید، بنابراین برای طراحی سازه چوبی یا مبلمان باید اطلاعات دقیقی در مورد بار وارد شده بر سازه و تغییر شکل آن پیدا کرد. البته شناخت و طراحی مناسب اتصال‌های سازه می‌تواند بر استحکام، دوام و عمر مصرف سازه بیفزاید که این امر می‌تواند به‌نوعی در حفظ بیشتر منابع طبیعی و نیز به‌لحاظ اقتصادی مفید باشد.

حفظ ظرافت و در عین حال فراهم آوردن حداکثر استحکام در سازه مبلمان از نکات بسیار مهم در صنعت مبلمان است (Ebrahimi, 2007). امروزه با وجود افزایش جمعیت و تقاضا و کمبود منابع چوبی، نیازمند ساخت سازه‌ای هستیم که علاوه بر استفاده از گونه‌های چوبی ارزان‌تر و تندرشد دارای اتصال‌هایی با مقاومت لازم بوده و کاهش هزینه تمام شده را دربر داشته باشد. تحقیقاتی برای انتخاب گونه‌های چوبی و اتصال‌دهنده‌های مکانیکی و شیمیایی مناسب و غیره برای ساخت سازه چوبی یا مبلمان با استحکام بالا انجام شده است؛ اما این به‌تنهایی کافی نبوده و امروزه در بسیاری از کاربردهای مهندسی شده به تلفیق خواص مواد نیاز است و امکان استفاده از یک نوع ماده که همه خواص مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد. بنابراین یک روش تأمین یا افزایش استحکام سازه می‌تواند مقاوم‌سازی اتصال‌ها با استفاده از تقویت‌کننده‌هایی مانند پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف باشد که در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه بوده و در سازه‌های چوبی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه Varasteh-Poor (۲۰۰۸) و Alam و همکاران (۲۰۰۹) بیان کرده‌اند از مواد تقویت‌کننده تجاری و مهم سازه‌های چوبی می‌توان پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه[1] (GFRP)، پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن[2] (CFRP) و پلیمر تقویت‌شده با الیاف کِولار[3] (KFRP) را نام برد. الیاف شیشه در مقایسه با الیاف کربن و کِولار از نظر اقتصادی مناسب‌ترند. بارزترین ویژگی چندسازه‌های الیاف پلیمر مقاومت بالای آنها تحت تنش کششی است. با توجه به ویژگی‌های مختلف چوب و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، مطالعه اثر همپوشانی خواص آنها و چوب، برای برطرف کردن ضعف اعضای چوبی در اتصال‌ها تحت تنش مرکب می‌تواند مفید واقع شود؛ بنابراین برای نیل به هدف افزایش استحکام اتصال‌های سازه، ضروری است که تحقیقات در انواع سازه‌ها و اتصال‌های چوبی با مواد و ویژگی‌های متفاوت انجام و توسعه یابد تا بتوان به راهکارهای عملی و مناسبی دست یافت. ازجمله تحقیقات انجام شده می‌توان بدین موارد اشاره نمود:

Abdolzadeh و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی عملکرد سازه‌ای اتصال گوشه مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف را در ناحیه حداکثر تنش کششی (گوشه داخلی) تحت بارگذاری کششی قطری مورد مطالعه قرار دادند. بدین‌منظور ۱ تا ۳ لایه از پارچه‌های تک جهته الیاف شیشه، کربن و کِولار مورد استفاده قرار گرفت و عمل لایه‌گذاری به‌صورت دستی و با استفاده از دو نوع رزین وینیل‌استر و اپوکسی انجام شد. نتایج اندازه‌گیری نیرو و تغییرمکان در حد تسلیم نشان داده‌اند که لایه‌های تقویت‌کننده تا حدی قادر به جلوگیری از باز شدن اتصال تحت بار هستند. به‌طوری‌که با افزایش بار و با جدا شدن الیاف از سطح چوب و یا شکست اعضا در ناحیه‌ای نزدیک به سطح مشترک، گسیختگی در اتصال مشاهده شد. همچنین به دلیل اینکه محل تقویت اتصال با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف دارای حداکثر مقدار تنش برشی بود، جدا شدن الیاف از سطح چوب افزایش یافت. 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 ماتریس وینیل‌استر در مقایسه با ماتریس اپوکسی و همچنین الیاف شیشه و کربن نسبت به الیاف کولار عملکرد بهتری داشته‌اند.

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

Raftery و همکاران (۲۰۱۵) کارایی الوارهای لایه‌ای به هم چسبانده شده درجه پایین را که با چسب معمولی به هم چسبانده شده و با ورقه‌های الیاف شیشه تقویت شده بودند بررسی نمودند. هدف این تحقیق، استفاده از چسب‌های مشابه دیگر برای تقویت اتصال‌ها بود، به‌نحوی‌که هزینه استفاده از چسب اپوکسی در اتصال چوب و FRP کم شود. بر اساس نتایج، چسب متداول که برای چسباندن لایه‌ها استفاده می‌شود، اتصال قوی بین چوب و FRP تشکیل داد. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از ورقه های تقویت‌شده FRP مد شکست را تغییر می‌دهند.

Morales-conde و همکاران (۲۰۱۵) تیرهای چوبی را با استفاده از لایه‌های GFRP در برابر نیروهای خمشی و برشی تقویت کردند. الیاف شیشه را با رزین اپوکسی به‌کاربرده و با این روش انتهای تیرها و یا مرکز تیرهای در معرض خطر را تقویت کردند و ظرفیت مقاومتی را افزایش دادند. ظرفیت تحمل بار نیز تا ۵۰ درصد افزایش پیدا کرد. مصرف کامپوزیت GFRP می‌تواند به‌عنوان راه حل مناسبی برای بهبود و یا تقویت تیرها باشد. آزمون‌ها نشان دادند که تقویت تیرها اثر کمتری در برابر نیروی برشی دارد.

Madhoushi و همکاران (۲۰۱۱) به‌منظور 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 ضخامت‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر به‌عنوان تقویت‌کننده و پوشش روی اتصال‌ها با استفاده از رزین اپوکسی استفاده شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون کشش روی آنها انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار بار و تنش اعمال‌شده 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، به‌طوری‌که هیچ‌یک از نمونه‌های تقویت‌شده 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. نتایج بررسی Soltis و همکاران (۱۹۹۸) مبنی بر تقویت اتصال‌های پیچ در چوب نوئل با استفاده از صفحات کامپوزیتی و رزین اپوکسی نشان داد که استحکام اتصال‌ها با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه افزایش می‌یابد. دراین‌باره مقاومت نهایی اتصال تقویت‌شده با سه لایه الیاف شیشه در جهت موازی الیاف ۳۳ درصد و در جهت عمود بر الیاف بیشتر از ۱۰۰ درصد بیشتر از اتصال بدون تقویت‌کننده الیاف گزارش شده است.

Campilho و همکاران (۲۰۱۰) امکان استفاده از کامپوزیت GFRP در تیرهای چوبی را مورد بررسی قرار دادند. استقاده از این کامپوزیت‌ها باعث افزایش مقاومت‌های مکانیکی شد. همچنین می‌توان از این تقویت‌کننده‌ها در حد فاصل تیرهای چوبی در سقف ساختمان به‌ویژه در بناهای قدیمی، کف ساختمان با مصالح بنایی و حتی تیرهای پوسیده و اعضای خرپا یا پل‌های قدیمی استفاده کرد. اتصال صفحات GFRP به تیرهای قدیمی منجر به افزایش ۶۲ درصدی در ظرفیت تحمل بار و نیز رفتار کشش‌پذیری سازه شد. امکان شبیه‌سازی رفتار این سازه‌های تقویت‌شده نیز اطلاعات مفیدی را برای اعتبار نتایج آزمایشگاهی دربر داشت. Alam و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر شکل تقویت کردن بر روی ظرفیت خمشی تیرهای شکسته شده در خمش را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تقویت در هر دو سطح کششی و فشاری با لایه‌های GFRP انجام شد. نتایج نشان داد که مدول‌گسیختگی به‌طور متوسط ۱۵/۵ درصد افزایش یافت. در این تیرها شکست به‌صورت برش‌های افقی در نزدیکی محور خنثی تیرها مشاهده شد. Gomez و همکاران (۲۰۰۸) در تحقیقی با عنوان تقویت تیرهای چوبی، رفتار تیرهای چوبی تقویت‌شده با ورقه‌های GFRP را بررسی کردند. تیرها در برابر نیروهای برشی و خمشی تقویت شدند. تقویت پیشنهاد شده موجب بهبود سختی بین ۵ تا ۵۳ درصد می‌شود.

Chen و همکاران (۲۰۰۳) از الیاف شیشه برای تقویت دو سطح چوب استفاده کردند. ماتریس این کامپوزیت‌ها رزین اپوکسی و نیز از میخ برای اتصال استفاده شد. پس از تقویت کردن مشاهده شد که ترک و شکستی در چوب رخ نداده و تنها کمی لهیدگی در اطراف سوراخ ایجاد شده است. همچنین Chen و همکاران (۲۰۰۷) با بررسی انواع تقویت‌کننده‌ها نتیجه گرفتند

که صفحات تقویت‌شده با الیاف کربن، بالاترین سفتی را تحت کشش و بالاترین مقاومت کششی و مقاومت خمشی را در سطح داخلی چسب خورده حاصل می‌کنند.

Li و همکاران (۲۰۰۷) طی تحقیقاتی مدل رفتاری اتصال تقویت‌شده با الیاف FRP را ارائه نمودند. نتیجه این تحقیقات نشان داد که استفاده از ورقه‌های FRP برای تقویت اتصال‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای در افزایش ظرفیت باربری و سختی سازه مؤثر است. Premrov و همکاران (۲۰۰۴) با مطالعه قاب چوبی تقویت‌شده با الیاف کربن به این نتیجه دست یافتند که استفاده از لایه‌های تقویت‌کننده CFRP ظرفیت تحمل بار را کاملاً افزایش می‌دهد.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تقویت ظرفیت تحمل تنش اتصال‌های چوبی در حالت بارگذاری فشاری قطری کمتر مورد توجه قرار گرفته است، ازاین‌رو این تحقیق با هدف مقاوم‌سازی اتصال فارسی L شکل تقویت‌شده با FRP به‌منظور افزایش ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری انجام شده است.

مواد و روش‌ها

مواد

برای ساخت اتصال‌های مورد آزمون، از دو گونه چوبی راش (*Fagus orientalis*) با دانسیته حدود ۰/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب و گونه نراد (*Abies alba*) با دانسیته حدود ۰/۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب به‌عنوان اعضای اتصال، از پین چوبی گونه راش شیاردار با قطر ۸ میلی‌متر به‌عنوان اتصال‌دهنده مکانیکی و همچنین برای مونتاژ اعضای اتصال و دوبل‌ها از چسب پلی‌وینیل استات استفاده شد. از پلیمر اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) گرید E و الیاف کربن (CFRP) به‌صورت لایه‌های دو جهته نیز برای مقاوم‌سازی اتصال‌های گوشه‌ای فارسی استفاده گردید. در جدول ۱، خواص مکانیکی الیاف شیشه و کربن ارائه شده است. برای ساخت کامپوزیت‌ها، ماتریس پلیمری اپوکسی با الیاف شیشه و کربن تقویت شده و با کمک رزین اپوکسی به سطح اتصالات چسبانده شد. الیاف و رزین اپوکسی از شرکت ماندگار بسپار فجر آسیا در کرج تهیه شد.

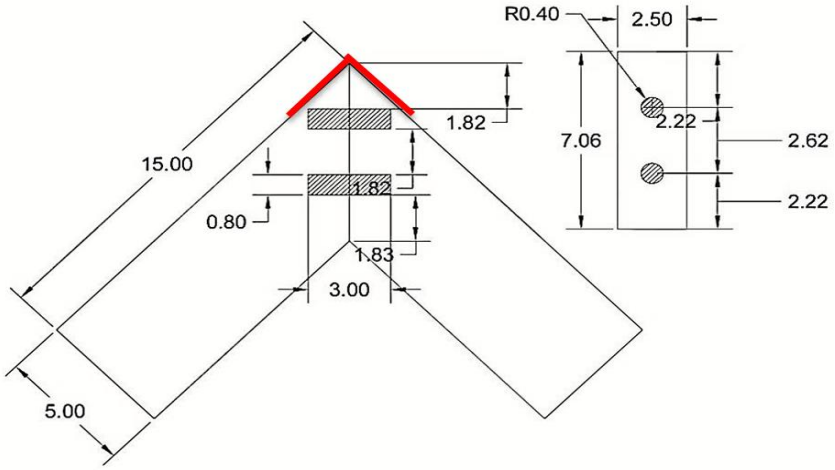
جدول ۱- خواص مکانیکی الیاف شیشه و کربن

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

ساخت اتصال‌های فارسی و مقاوم‌سازی آنها با الیاف FRP

ابتدا اعضای اتصال به ابعاد ۲/۵×۵×۱۵ سانتی‌متر برش داده شده و بعد با دستگاه فارسی‌بر یک طرف آنها به‌صورت فارسی (۴۵ درجه) برش داده شد. سپس متناسب با قطر و طول پین چوبی، سوراخ‌کاری محل قرارگیری پین‌های چوبی روی اعضای اتصال انجام شد. برای مونتاژ یا ساخت اتصال‌ها، محل قرارگیری پین‌های چوبی روی اعضای اتصال و سطح پین‌های چوبی با قطر ۸ و طول ۳۰ میلی‌متر به چسب پلی‌وینیل استات آغشته و برای تکمیل فرایند گیرایی چسب، اتصال‌های ساخته‌شده به مدت ۲۴ ساعت در گیره‌های دستی تحت فشار قرار گرفتند. پس از ساخت نمونه‌ها، از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن دو جهته در ابعاد ۳×۷ سانتی‌متر مربع برای مقاوم‌سازی اتصال‌ها استفاده شد. این الیاف به تعداد ۱ تا ۲ لایه بر روی سطوح اعضای اتصال در محل گوشه بیرونی اتصال‌ها، به‌صورت دستی لایه گذاری شدند؛ برای این کار پس از آماده شدن رزین اپوکسی (به ازاء هر ۱۰۰ گرم رزین اپوکسی، ۱۳ گرم هاردنر)، ابتدا سطح چوب را به لایه‌ای از رزین آغشته کرده و بعد لایه‌ای از الیاف روی آن چسبانده شد، سپس سطح الیاف را به رزین آغشته کرده

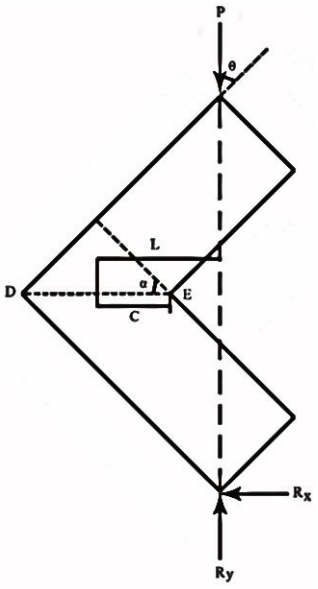
و لایه‌گذاری دوم نیز انجام شد. همچنین نمونه‌هایی نیز به‌عنوان نمونه‌های شاهد، بدون الیاف FRP برای مقایسه با نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف ساخته شدند. شکل ۱ جزئیات ساخت اتصال‌های فارسی ساخته و تقویت‌شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- جزئیات ساخت اتصال‌های فارسی تقویت‌شده (ابعاد برحسب سانتی‌متر)

روش آزمون و محاسبه ظرفیت تحمل تنش اتصال‌های ساخته‌شده با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP)

پس از پایان مراحل ساخت، نمونه‌ها به مدت چهار هفته در شرایط رطوبت نسبی ۵ ± ۶۵ درصد و دمای ۲ ± ۲۰ درجه‌سانتی‌گراد مشروط‌سازی شده و بعد برای تعیین تنش مرکب، اتصال‌های آماده شده به‌وسیله دستگاه آزمون مکانیکی Tensile Tester مدل STT-5T با سرعت بارگذاری ۵ میلی متر بر دقیقه تحت بارگذاری فشاری قطری مورد آزمون قرار گرفتند. شکل ۲، طرح شماتیک از ترتیب قرار گرفتن اتصال‌های فارسی تحت بارگذاری فشاری قطری و واکنش تکیه‌گاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۲- طرح شماتیک از ترتیب قرار گرفتن اتصال‌های فارسی تحت بارگذاری فشاری قطری و واکنش تکیه‌گاهی

توزیع تنش در اتصال‌ها، تحت نیروی محوری و لنگر خمشی به وجـود می‌آید که برای محاسبه تنش مرکب وارد بر اتصال‌های فارســی (□۴۵= α) از روابط ۱ تا ۹ استفاده شد (Omrani *et al*., 2019).

$$M = PL \qquad (۱)$$

درصورتی‌که L= ۷۰/۷۱ میلی‌متر باشد:

$$C = \frac{b}{2\cos\alpha} \qquad (۲)$$

بنابراین حداکثر تنش‌های محوری موازی با الیاف σ_a به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I = \frac{tb^3}{12cos^3\alpha} \qquad (۳)$$

$$\sigma_a = -\frac{P\ \cos\theta}{tb} \pm \frac{MC}{I} \qquad (۴)$$

$$\sigma_a = -\frac{P\ \cos\theta}{tb} \pm PL\left(\frac{b}{2cos\alpha}\right)\frac{12\ cos^3\alpha}{tb^3} \qquad (۵)$$

$$\sigma_{a)_D} = -\frac{P\ \cos\theta}{tb} + \frac{6PL\ cos^2\alpha}{tb^2} \qquad (۶)$$

$$\sigma_{a)_E} = -\frac{P\ \cos\theta}{tb} - \frac{6PL\ cos^2\alpha}{tb^2} \qquad (۷)$$

رفتـار اعضـای چـوبی تحت بارگذاری فشاری تا مرحله شکست بررسی شده و مقـادیر بـار در مـرحله شکست ثبت گردید. مقدار σ_a آزمـونه‌ها در دو گـــوشه بیرونی و داخلی اتصال‌ها (به‌ترتیب در نقاط D و E) با مقادیر α و θ بر اساس معادلات به‌دست‌آمد. بنابرایـن با تـــوجه به اینکه در اتصال فارسی □۴۵= θ و □۴۵= α است، مقدار تنش σ_a با روابط ۸ و ۹ به‌دست می‌آید.

$$\sigma_{a)_D} = -0.7071\ \frac{P}{tb} + \frac{3PL}{tb^2} \qquad (۸)$$

$$\sigma_{a)_E} = -0.7071\ \frac{P}{tb} - \frac{3PL}{tb^2} \qquad (۹)$$

σ_a: تنش محوری (MPa)، P: نیرو (N)، t: ضخامت عضو اتصال (mm) و b: عرض عضو اتصال (mm) می‌باشد.

بعد از انجام آزمون از روش تجزیه‌وتحلیل واریانس در برنامه SPSS برای بررسی نتایج استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها نیز با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌داری انجام شد.

نتایج

جدول ۲ میانگین مقادیر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری را نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل متغیر بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری را نشان می‌دهد. طبق جدول ۳، اثر مستقل نوع اعضای اتصال و تعداد الیاف FRP بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بوده ولی اثر مستقل نوع الیاف FRP معنی‌دار نیست.

شکل ۳، اثر مستقل نوع اعضای اتصال بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ظرفیت تحمل تنش در اتصال‌های ساخته‌شده با چوب راش بیشتر از چوب نراد می‌باشد. همچنین ظرفیت تحمل تنش در گوشه داخلی اتصال در هر دو نوع اعضای اتصال بیشتر از گوشه بیرونی است.

جدول ۲- میانگین مقادیر تنش مرکب وارد بر اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری

نوع اعضای اتصال	نوع الیاف	تعداد الیاف	گوشه داخلی (MPa)	گوشه بیرونی (MPa)
چوب راش		شاهد (بدون الیاف)	-۹/۵۴۵	۶/۸۱۸
	الیاف کربن	۱ لایه	-۱۳/۹۳۸	۹/۹۵۶
		۲ لایه	-۱۷/۵۰۵	۱۲/۵۰۳
	الیاف شیشه	۱ لایه	-۱۲/۹۹۳	۹/۲۸۱
		۲ لایه	-۱۵/۲۳۸	۱۰/۸۸۴
چوب نراد		شاهد (بدون الیاف)	-۶/۹۰۰	۴/۹۲۸
	الیاف کربن	۱ لایه	-۷/۰۷۳	۵/۰۵۲
		۲ لایه	-۸/۹۷۱	۶/۴۰۸
	الیاف شیشه	۱ لایه	-۶/۹۶۱	۴/۹۷۲
		۲ لایه	-۷/۹۶۳	۵/۶۹۲

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس عوامل متغیر بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری

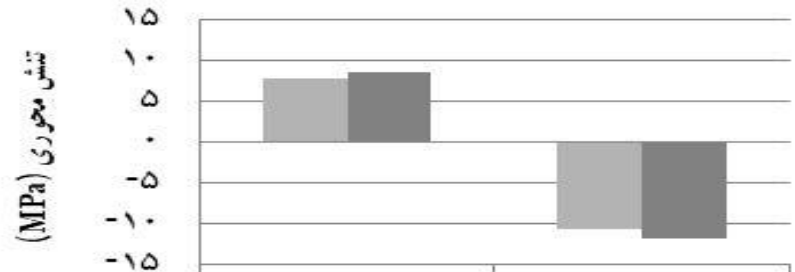
منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات		F	sig
		گوشه داخلی	گوشه بیرونی		
نوع اعضای اتصال	۱	۴۰۶/۷۹۹	۲۰۷/۵۶۸	۸۰/۱۶۶	۰/۰۰۰*
نوع الیاف	۱	۹/۳۶۵	۴/۷۷۴	۱/۸۴۴	۰/۱۸۳ n.s
تعداد الیاف	۱	۳۷/۹۹۲	۱۹/۳۸۶	۷/۴۸۷	۰/۰۰۹*
نوع اعضای اتصال × نوع الیاف	۱	۲/۲۰۲	۱/۱۲۴	۰/۴۳۴	۰/۵۱۴n.s
نوع اعضای اتصال × تعداد الیاف	۱	۴/۲۲۴	۲/۱۵۵	۰/۸۳۲	۰/۳۶۷n.s
نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۲/۴۴۶	۱/۲۴۸	۰/۴۸۲	۰/۴۹۲n.s
نوع اعضای اتصال × نوع الیاف × تعداد الیاف	۱	۰/۰۹۳	۰/۰۴۷	۰/۰۱۸	۰/۸۹۳n.s

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

شکل ۴، اثر مستقل نوع الیاف بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ظرفیت تحمل تنش در اتصال‌های ساخته‌شده با الیاف کربن بیشتر از الیاف شیشه است. همچنین ظرفیت تحمل تنش در گوشه داخلی اتصال در هر دو نوع اعضای اتصال بیشتر از گوشه بیرونی می‌باشد.

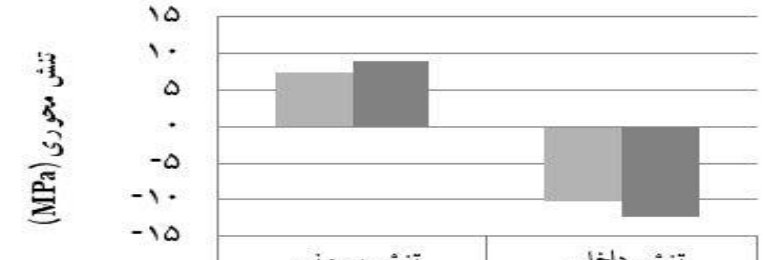
	تنش بیرونی	تنش داخلی
نراد	۵/۴۱۱	-۷/۵۷۶
راش	۹/۸۸۹	-۱۳/۸۴۴

شکل ۳- اثر مستقل نوع اعضای اتصال بر ظرفیت تحمل تنش



	تنش بیرونی	تنش داخلی
الیاف شیشه	۷/۷۰۸	-۱۰/۷۹۱
الیاف کربن	۸/۴۸۱	-۱۱/۸۷۲

شکل ۴- اثر مستقل نوع الیاف بر ظرفیت تحمل تنش



	تنش بیرونی	تنش داخلی
الیاف یک لایه	۷/۳۱۶	-۱۰/۲۴۲
الیاف دولایه	۸/۸۷۳	-۱۲/۴۲۱

شکل ۵- اثر مستقل تعداد لایه الیاف بر ظرفیت تحمل تنش

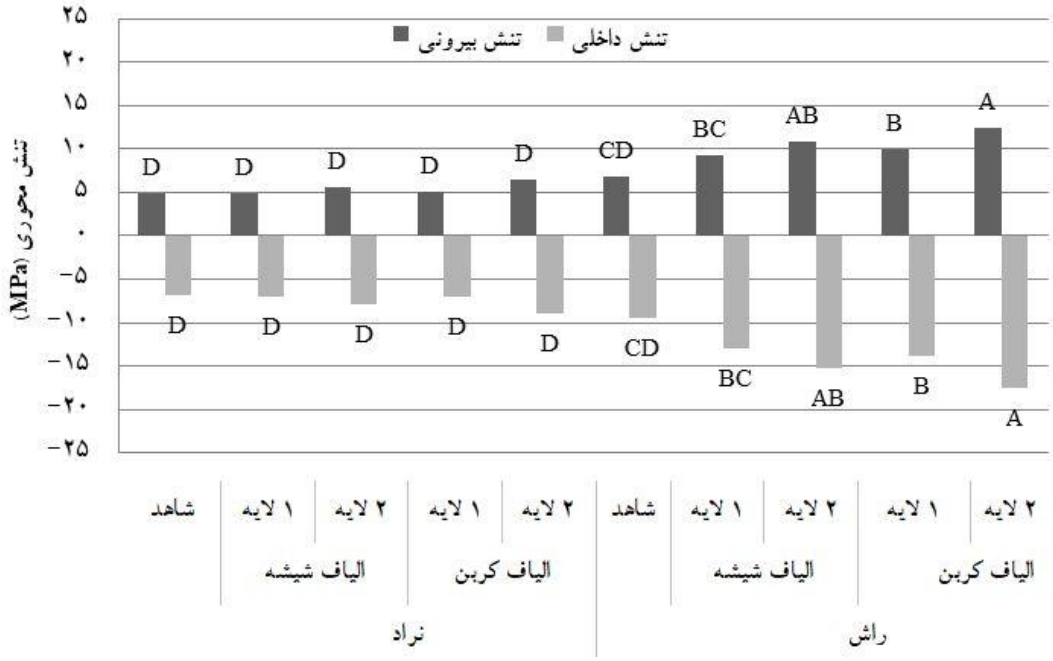
شکل ۵، اثر مستقل تعداد لایه الیاف بر ظرفیت تحمل تنش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ظرفیت تحمل تنش در اتصال‌های ساخته‌شده با دو لایه از الیاف، بیشتر از یک لایه است. همچنین ظرفیت تحمل تنش فشاری اتصال‌ها در گوشه داخلی اتصال‌های تقویت‌شده با هر دو نوع الیاف بیشتر از گوشه بیرونی می‌باشد.

جدول ۴ نیز مقادیر اثرهای متقابل عوامل متغیر بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها را نشان می‌دهد. طبق جدول ۴، در اثر متقابل نوع اعضای اتصال و نوع الیاف بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها تحت بارگذاری فشاری قطری، بالاترین مقاومت مربوط به اتصال ساخته‌شده با چوب راش و الیاف کربن بوده است. در اثر متقابل نوع اعضای اتصال و تعداد الیاف بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها نیز بالاترین مقاومت مربوط به اتصال ساخته‌شده با چوب راش و تعداد دو لایه الیاف می‌باشد. همچنین بر اساس جدول ۴، در اثر متقابل نوع الیاف و تعداد الیاف بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها، بالاترین مقاومت مربوط به اتصال ساخته‌شده با وصله‌های کامپوزیتی با دو لایه از الیاف کربن می‌باشد.

جدول ۴- اثرهای متقابل عوامل متغیر بر ظرفیت تحمل تنش

اثرهای متقابل	عوامل متغیر		گوشه داخلی (MPa)	گوشه بیرونی (MPa)
نوع اعضای اتصال × نوع الیاف	چوب راش	الیاف کربن	-۱۵/۷۲۲	۱۱/۲۳۱
		الیاف شیشه	-۱۴/۱۱۶	۱۰/۰۸۳
	چوب نراد	الیاف کربن	-۸/۰۲۳	۵/۷۳۱
		الیاف شیشه	-۷/۴۶۶	۵/۳۳۳
نوع اعضای اتصال × تعداد الیاف	چوب راش	۱ لایه	-۱۳/۴۶۶	۹/۶۱۹
		۲ لایه	-۱۶/۳۷۲	۱۱/۶۹۵
	چوب نراد	۱ لایه	-۷/۰۱۸	۵/۰۱۳
		۲ لایه	-۸/۴۷۱	۶/۰۵۱
نوع الیاف × تعداد الیاف	الیاف کربن	۱ لایه	-۱۰/۵۰۶	۷/۵۰۵
		۲ لایه	-۱۳/۲۳۸	۹/۴۵۶
	الیاف شیشه	۱ لایه	-۹/۹۷۸	۷/۱۲۷
		۲ لایه	-۱۱/۶۰۴	۸/۲۸۹

شکل ۶، مقادیر میانگین یا اثر متقابل همه عوامل متغیر یعنی نوع اعضای اتصال، نوع الیاف و تعداد لایه الیاف بر ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶- اثر متقابل نوع اعضای اتصال، نوع الیاف و تعداد لایه بر ظرفیت تحمل تنش

نتایج در شکل ۶ نشان می‌دهد که استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف در تقویت اتصال‌های ساخته‌شده از هر دو گونه چوبی نسبت نمونه‌های شاهد، سبب مقاوم‌سازی و به‌عبارتی دیگر افزایش ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها در گوشه‌های داخلی و بیرونی شده است. بالاترین مقاومت مربوط به اتصال ساخته‌شده با چوب راش و وصله‌های کامپوزیتی با دو لایه از الیاف کربن و کمترین آن مربوط به اتصال ساخته‌شده با چوب نراد و یک لایه از الیاف شیشه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از کامپوزیت‌های FRP در تقویت اتصال‌هایی از گونه راش تأثیر بیشتری نسبت به استفاده از آن در گونه نراد داشته است.

بحث

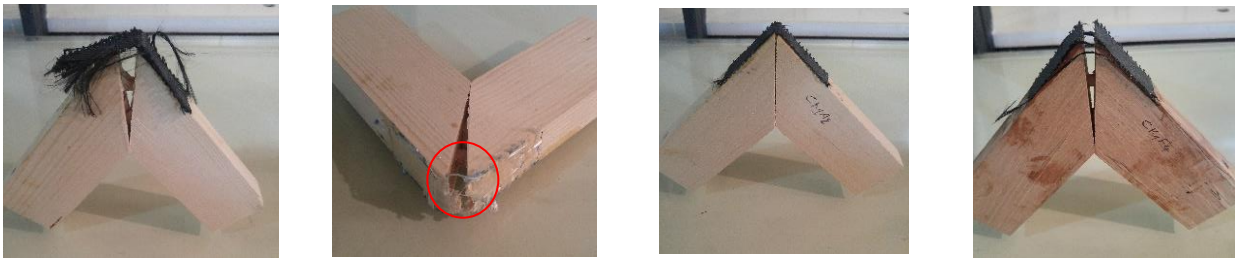
نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان داد که اثر مستقل نوع اعضای اتصال در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، به‌طوری‌که ظرفیت تحمل تنش اتصال‌های ساخته‌شده (در گوشه داخلی و بیرونی) با گونه راش بیشتر از گونه نراد می‌باشد. به‌طورکلّی، استحکام و سفتی اعضای اتصال و اتصال‌دهنده‌های به‌کاررفته در سازه چوبی در تعیین استحکام نهایی سازه اهمیت دارند (Smardzewski, 2009). بنابراین می‌توان گفت ازآنجایی‌که دانسیته چوب‌ها تأثیر مستقیمی بر مقاومت اتصال‌های ساخته شده از آنها دارد، اتصال‌های ساخته‌شده با چوب راش به دلیل دانسیته بیشتر، مقاومت بالاتری نسبت به چوب نراد نشان داده اند. تحقیقات Omrani و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان داده است که ظرفیت تحمل تنش فشاری اتصال فارسی ساخته شده با گونه راش بیشتر از نراد بوده است. همچنین دانسیته بیشتر یعنی سطح تماس بیشتر که می‌تواند سبب چسبندگی بهتر در گونه راش نسبت به گونه نراد باشد.

نتایج نشان داد (جدول ۶) که استفاده از FRP، در تقویت اتصال‌های ساخته‌شده با هر یک از گونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد آن ظرفیت تحمل تنش را افزایش داده است. نتایج نشان داد که الیاف کربن تأثیر بیشتری نسبت به الیاف شیشه بر مقاوم‌سازی اتصال‌های فارسی ساخته‌شده تحت بارگذاری فشاری قطری داشته‌اند. در تحقیقات Dagher و Lindyberg (۲۰۰۰) مقایسه مشابه CFRP و GFRP از نظر سفتی و بهبود مقاومت به‌عنوان 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 مطالعه Premrov و همکاران (۲۰۰۴) بر قاب چوبی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن نشان داد که استفاده از لایه‌های تقویت‌کننده CFRP ظرفیت تحمل بار را کاملاً افزایش می‌دهد. Chen و همکاران (۲۰۰۷) نیز با بررسی انواع تقویت‌کننده‌ها نتیجه گرفتند که صفحات تقویت‌شده با الیاف کربن، بالاترین سفتی را تحت کشش و بالاترین مقاومت کششی و مقاومت خمشی را در سطح داخلی چسب خورده حاصل می‌کنند.

نتایج نشان دادند که با توجه به ویژگی‌های FRP، کاربرد یک لایه از آن هم ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها را افزایش می‌دهد، به‌نحوی‌که با افزایش آن نیز ظرفیت تحمل تنش اتصال‌ها بهبود می‌یابد. به‌طوری‌که نتایج تحقیقات Soltis و همکاران (۱۹۹۸) نیز مبنی بر تقویت اتصال‌های پیچ در چوب نوئل با استفاده از صفحات کامپوزیتی و رزین اپوکسی نشان داد که استحکام اتصال‌ها با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه افزایش می‌یابد.

با بررسی آزمونه‌های تحت بارگذاری فشاری قطری بعد از شکست اتصال‌های فارسی، دو نوع شکست مشاهده شد. نحوه شکست اتصال‌های مقاوم‌سازی شده را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود. در اتصال‌های تقویت‌شده تحت بارگذاری فشاری قطری، در برخی از مواقع با جدایی لایه‌های چندسازه از سطح چوب تحت مد ترکیبی (شکل ۷- د) و در برخی موارد نیز با پاره شدن الیاف در چندسازه‌ها (شکل ۷- الف) گسیختگی اتفاق افتاد. مقدار بازشدگی در اتصال‌های ساخته‌شده از چوب نراد به‌مراتب کمتر از چوب راش بود که نشان‌دهنده رخ دادن شکست‌های ریز در محل قرارگیری دوبل در اعضای چوبی است. چون گونه دوبل‌ها از چوب مقاوم‌تری است و در اثر بارگذاری دچار شکست نمی‌شوند. تمرکز تنش در ناحیه قرارگیری دوبل‌ها رخ می‌دهد و با انتقال تنش به اعضا که دارای مقاومت کمتری هستند با رخ دادن شکست‌های ریز درون اعضای اتصال، شکست نهایی اتصال قبل از باز شدن آنها رخ می‌دهد (شکل ۷- ب).



(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۷- نحوه شکست اتصال‌های فارسی تقویت‌شده تحت بارگذاری فشاری قطری

بررسی نمودارهای نیرو- تغییرمکان و بررسی قطعات پس از شکست نشان داد که رفتار اتصال تحت بار خطی شروع شده و با افزایش بار و تغییرمکان در حد تسلیم، در برخی از آزمونه ها به‌صورت الاستیک غیرخطی درآمده است. بعد از رسیدن بار به حداکثر مقدار خود، الیاف از چوب جدا شده و شکست ناگهانی در ناحیه کششی (گوشه بیرونی) رخ داده است.

شکست‌های مشاهده شده در اتصال‌های فارسی مقاوم‌سازی شده با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن کششی بودند که با جدا شدن لایه‌های چندسازه از سطح چوب در ناحیه کششی و یا با شکست کششی اعضا در نزدیکی محل چسباندن لایه‌های چندسازه‌ای به چوب (شکل ۷) همراه بوده است.

درنهایت با توجه به اینکه هدف اصلی این تحقیق مطالعه تأثیر پلیمر تقویت‌شده با الیاف (FRP) بر مقاومت اتصال‌های فارسی بوده است، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از FRPها برای تقویت اتصال گوشه با اعضای چوب ماسیو، ظرفیت تحمل تنش مرکب این نوع اتصال را افزایش می‌دهد. البته الیاف مختلف به‌کاررفته در ساخت FRP (شیشه یا کربن) تأثیر متفاوتی بر مقاومت اتصال‌های ساخته‌شده داشتند. همچنین نتایج آزمون‌ها نشان داد که با استفاده از الیاف کربن و شیشه تا ۲ لایه، عملکرد اتصال افزایش چشمگیرتر و معنی‌داری را خواهد داشت. تقویت اتصال‌ها با وصله‌های کامپوزیتی در گونه راش نسبت به گونه نراد، مقاومت اتصال‌ها را تحت تنش مرکب بیشتر تحت تأثیر قرار داد. بر اساس نتایج، بهترین عملکرد اتصال‌های تقویت‌شده تحت بارگذاری فشاری قطری مربوط به اتصال مقاوم‌سازی شده چوب راش با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با دو لایه از الیاف کربن می‌باشد. با توجه به این نتایج و تجربیات حاصل از این تحقیق، انجام آزمون‌های چسبندگی و بررسی باز شدن لایه روی اتصال‌های مقاوم‌سازی شده با FRPها برای تحلیل بهتر نتایج، مدل‌سازی رفتار FRPها بر سطح اتصال‌ها و تعیین تأثیر استفاده از روش‌های لایه‌گذاری بهتر مانند روش‌های تحت خلأ؛ استفاده از پارچه‌هایی با الیاف هیبریدی برای تقویت اتصال و بررسی نحوه شکست در اتصال‌های تقویت‌شده دیگر چوبی را می‌توان به‌عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آینده ارائه کرد.

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: Engineering, 40: 95–106.

-Altun, S., Burdurlu, E. and Kılıç, M., 2010. Effect of adhesive type on the bending moment capacity of miter frame corner joints. BioResources, 5(3): 1473-1483.

-Campilho, R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Barreto, A.M.J.P., Morais, J.J.L. and Domingues, J.J.M.S., 2010. Experimental and Numerical Evaluation of Composite Repairs on Wood Beams Damaged by Cross-graining. Construction and Building Materials, 24: 531–537.

-Chen, C.J., Lee, T.L. and Jeng, D.S., 2003. Finite Element Modeling for the Mechanical Behavior of Dowel-Type Timber Joints, Computers & Structures, 81: 2731-2738.

-Chen, C.J., 2007. The study on improved mechanical properties of reinforced traditional Chuan-Dou timber joints in taiwan. Journal of Cultural Property Conservation, 1(3): 5-14.

-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.

-Ebrahimi, G., 2007. Engineering design of furniture structure. Tehran university publication, 491 pp.

-Fiorelli, F. and Dias, A.A., 2003. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber. Materials Research, 6(2): 193–202.

-Gomez, S. and Svecova, D., 2008. Behavior of split timber stringers reinforced with external GFRP sheets. Journal of Composites for Construction, 12(2): 202–211.

-Jones, A. and Lutes, R., 1993. Handbook of joinery. New York, USA, Sterling Press, 144 pp.

-Li, A.J., Samali, B., Ye, L. and Bakoss, S., 2007. Behavior of concrete beam–column connections reinforced with hybrid FRP sheet. Centre for Built Infrastructure Research, Faculty of Engineering, University of Technology, Sydney, Australia.

-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.

-Morales-conde, M.J., Rodriguez-linan, C. and Rubio-de H.P., 2015. Bending and shear reinforcements for timber beams using GFRP plates. Construction and Building Materials, 96: 461–472.

-Omrani, P., Ebrahimi, Gh. and Kahvand, M., 2019. Investigating the stress carrying capacity of miter corner joints made with biscuit under diagonal tension and compression loading. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 10 (3): 323-336.

-Premrov, M., Dobrila, P. and Bedenik, B.S., 2004. Analysis of timber-framed walls coated with CFRP strips strengthened fibre-plaster board. International Journal of Solids and Structures, 41: 7035–7048.

-Raftery, G.M. and Rodd, P.D., 2015. FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. Construction and Building Materials, 91: 116–125.
-Smardzewski, J., 2009. Reliability of joints and cabinet furniture. Wood Resarch, 54(1):67-76.
-Snow, M., Chen, A.A.Z. and Chui, Y.H., 2006. North American practices for connection in wood construction. Progress in Structural Engineering and Materials, 8(2): 39-48.
-Soltis, A.L., Ross, R.J. and Windorski, D.F., 1998. Fiberglass-Reinforced Bolted Wood Connection. Forest Products Journal, 48: 63-67.

Stress carrying capacity of miter joint reinforced with fiber reinforced polymer (FRP)

P. Omrani[1*], H. Abdolzadeh[2] and M. Abedi[3]

1*-Corresponding author, Assistant Prof., Wood Science and Technology Department, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran. Email: pantea.omrani@gmail.com.
2-Ph.D., Department of Wood Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
3-M.Sc., Wood Science and Technology Department, The faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

Received: May, 2020 Accepted: Oct., 2020

Abstract

The aim of this study was to investigate the performance of mitered corner joints (L-shaped) reinforced by fibers reinforced polymer (FRP) at maximum stress area under diagonal compression loading. In this way, the performance of fabricated corner joints of two wood species (beech and fir) reinforced by fiber reinforced compopste using epoxy as matrix and one and two layer of carbon and glass fibers as reinforcement were determined . After fabrication of the mitered joints with using dowel and polyvinyl acetate adhesive, the joints were reinforced with FRP composites and then were subjected to diagonal compression loading. Results have indicated that reinforcing layers prevent joint opening. However, failure was occurred at the joint by peeling fibers from wood surface or members fracture near the joints due to stress concentration. The results of analysis of variance showed that the independent effect of species in joint members and numbers of fibers layer were significant at 95% confidence level. The results showed that use of beech wood in comparison with fir wood, composites reinforced by carbon fibers compared to glass fibers, as well as the use of two layers of fiber compared to 1 layer of fibers, illustrated better performance in fabricated joints. The joints made with beech wood and reinforced with 2 layers of composites reinforced by carbon fibers showed the best performance under diagonal compression loading.

Keywords: Corner joint, fiber reinforced polymers, stress carrying capacity, epoxy resin, polyvinyl acetate.