

عملکرد سازه‌ای اتصال گوشه مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف تحت بارگذاری کشش قطری

حمیده عبدالزاده^{۱*}، قنبر ابراهیمی^۲ و محمد لایقی^۳

۱- نویسنده مسئول، فارغ‌التحصیل دکترای علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

پست الکترونیک: h_abdolzadeh@ut.ac.ir

۲- استاد، علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۳- استادیار، علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

تاریخ پذیرش: دی ۱۳۹۴

تاریخ دریافت: دی ۱۳۹۳

چکیده

در این تحقیق عملکرد سازه‌ای اتصال گوشه مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف در ناحیه حداکثر تنش کششی (گوشه داخلی) تحت بارگذاری کشش قطری مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور ۱ تا ۳ لایه از پارچه‌های تک جهته الیاف شیشه، کربن و کولار مورد استفاده قرار گرفت و عمل لایه‌گذاری به صورت دستی و با استفاده از دو نوع رزین وینیل استر و اپوکسی انجام شد. 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. 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 شده است. همچنین به دلیل اینکه محل تقویت اتصال با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف دارای حداکثر مقدار تنش برشی است، جدا شدن الیاف از سطح چوب افزایش یافته است. به علت 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 وینیل استر در مقایسه با ماتریس اپوکسی و همچنین الیاف شیشه و کربن نسبت به الیاف کولار عملکرد بهتری داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: اتصال گوشه، پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، رزین وینیل استر و رزین اپوکسی.

مقدمه

و پایداری سازه می‌گردد؛ بنابراین پایداری و دوام سازه‌ها به‌طور عمده توسط اتصالات تأمین می‌شود (Snow, 2006). اتصالات چوب به چوب تا اواسط قرن بیستم با کمک و تجربه نجاران، طراحی و ساخته می‌شد. هزینه‌های بالای کارگری، نیازمندی زیاد به دانش فنی، مشکلات مونتاژ و ابعاد بزرگ اتصالات ساخته شده، باعث گرانی و تقاضای

اتصالات به‌عنوان یکی از قسمت‌های بسیار مهم در هر سازه چوبی، موجب انتقال نیرو بین اعضا شده و به یکپارچگی مجموعه سازه کمک می‌کند. شکل نامناسب و کافی نبودن تعداد اتصالات نه تنها منجر به فروریختگی سازه در اثر بارگذاری و اعمال تنش شده بلکه باعث کاهش دوام

کمتر از منابع چوبی پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف به طور 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 مرکب 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 مورد نظر را برآورده سازد، وجود ندارد (Beheshty and Rezaoust 2005). بارزترین ویژگی چند سازه‌های الیاف پلیمر مقاومت بالای آنها تحت تنش کششی است. با توجه به ویژگی‌های مختلف چوب و پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، مطالعه اثر همپوشانی خواص این دو ماده، برای برطرف کردن ضعف اعضای چوبی در اتصالات تحت تنش مرکب می‌تواند مفید واقع شود.

در اواسط دهه ۱۹۶۰ با مقرون به صرفه نبودن تقویت‌کننده‌های فلزی، تحقیقاتی در زمینه پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه انجام شد. به عنوان مثال تقویت سطح تخته خرده چوب با استفاده از الیاف شیشه یک جهت با رزین اپوکسی گزارش شده است. افزایش مقاومت و سفتی زمانی-که عضو تحت پیچش قرار گرفت در چندسازه اپوکسی الیاف شیشه گزارش شده است (Wangaard, 1964; Biblis, 1965). Daniel (1965) و همکاران نیز چوب را با استفاده از پارچه‌های الیاف شیشه دوجهدی به صورت ۱، ۲ و ۳ لایه تقویت کردند (Daniel et al., 1997). علاوه بر این محققان با بررسی انواع تقویت‌کننده‌ها نتیجه گرفتند که صفحات تقویت‌شده با الیاف کربن، بالاترین سفتی تحت کشش و بالاترین مقاومت کششی و مقاومت خمشی در سطح داخلی چسب‌خورده را داشتند (Chen, 2007). البته تحقیقات مربوط به اصلاح مناطق ضعیف اتصال برای جلوگیری از شکست اتصال در مناطق بحرانی روند متفاوتی داشته‌اند و روش‌های فیزیکی و شیمیایی و یا استفاده از وصله‌ها در مناطق بحرانی را شامل می‌شوند. محققان با مطالعات عددی و تجربی، استفاده از وصله‌های کامپوزیتی را برای تقویت اتصال و رفتار شکست نمونه‌های آزمونی پیشنهاد کرده‌اند (Campilho, et al., 2009). البته به اعتقاد برخی از محققان،

کمتر برای سازه‌های چوبی سنگین شد (Tannert, 2009). برای برطرف کردن مشکل ابعاد محصولات، سازه‌هایی با قاب‌های سبک رواج یافت و با روند آرامی جایگزین قاب‌های چوبی قدیمی شد (Tannert et al., 2010). بنابراین اطمینان از مقاومت اتصالات تحت بار یکی از اصلی‌ترین نگرانی‌ها در ساخت سازه‌های چوبی است. از طرفی قاب‌های چوبی در سازه‌های مختلف تحت تأثیر بارهای محوری، برشی، خمشی و حتی پیچشی و در برخی موارد ترکیبی از بارهای مختلف قرار می‌گیرند. ضعف چوب در سازه، زمانی به حداکثر خود می‌رسد که تنش‌های کشش عمود بر الیاف و برش موازی الیاف تحت بار به آن اعمال می‌شود (Ebrahimi 2007). این ضعف در سازه‌هایی با قاب‌های سبک به توجه خاصی نیاز دارد. در صورتی‌که به علت برخی از بارگذاری‌های خاص در سرویس، تنش‌های کششی عمود بر الیاف و برش موازی الیاف به‌طور همزمان سازه را متأثر سازند و سازه تحت تنش مرکب قرار گیرد، به دلیل افزایش احتمال گسیختگی سازه تحت این نوع تنش، تقویت سازه تحت بار مرکب قوت می‌گیرد.

یکی از مهمترین شکل‌های اتصال در قاب‌های چوبی، اتصال گوشه بوده که احتمال اعمال تنش مرکب در آن تحت بار وجود دارد. البته تنش مرکب در اثر بارمحوری و تنش حاصل از لنگر خمشی و تنش برشی در حالت قطری بودن بار به وجود می‌آید. تنش مرکب به وجود آمده از یکسو و ضعف چوب در کشش عمود بر الیاف و برش موازی الیاف طراح را واداشته تا از روش‌های مختلف، اعضای چوبی را تحت بار مرکب تقویت کند و ظرفیت تحمل تنش را در اتصال و اعضای چوبی با فنون مختلف افزایش دهد. یک رویکرد برای این شرایط، تقویت محل اتصال است. در بسیاری از موارد از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف برای تقویت چوب استفاده شده است و نتایج تحقیقات مختلف افزایش مقاومت اعضای سازه را با این روش ثابت کرده‌اند. البته تأثیر تقویت محل اتصال با استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف در کارایی اتصال قابل بررسی است. به منظور تأمین همزمان استحکام بالاتر سازه و استفاده

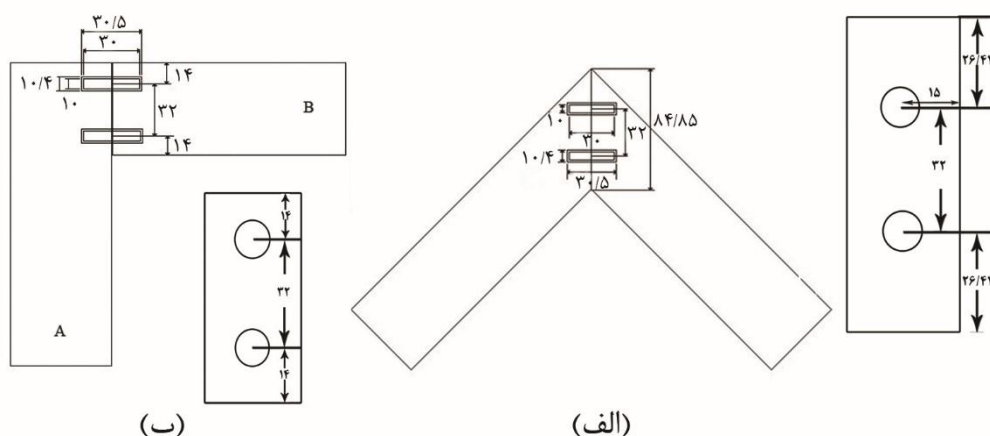
مواد و روش‌ها

ساخت نمونه‌های اتصال گوشه

در این تحقیق برای ساخت اعضای اتصال از چوب راست‌تار و عاری از معایب راش ایرانی (*Fagus orientalis*) استفاده شد. همچنین پین‌هایی با قطر ۱۰ و طول ۳۰ میلی‌متر به‌عنوان اتصال‌دهنده مکانیکی از گونه مذکور تهیه گردید. این پین‌ها پس از آغشته‌سازی با چسب‌های پلی‌وینیل استات و اپوکسی به‌عنوان نمونه شاهد برای مونتاژ اتصال‌های فارسی و سربه‌سر مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۱ جزئیات قرارگیری این پین‌ها را نشان می‌دهد.

پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف در کاربردهای مربوط به مهندسی عمران در مقایسه با مهندسی مواد پیشرفت بسیار زیادی داشته‌اند (Raftery et al., 2009).

این تحقیق به دنبال افزایش ظرفیت تحمل تنش مرکب در اتصال گوشه با استفاده از لایه‌های FRP شکل گرفته است. بدین منظور، عملکرد سازه‌ای اتصال مقاوم‌سازی شده با لایه‌های FRP تحت تنش مرکب مورد آزمون قرار خواهد گرفت. همچنین بررسی اثر نوع و تعداد لایه الیاف شیشه، کربن و آرامید (کولار) در ساختار FRP‌ها بر کارایی نهایی اتصال گوشه تحت کشش قطری و اثر نوع ماتریس پلیمری بر کارایی اتصالات مقاوم‌سازی شده با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۱- محل و ابعاد پین‌های چوبی در اتصال فارسی (الف) و سربه‌سر (ب) (اعداد برحسب mm)

مقاوم‌سازی اتصال با پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف (FRP) پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه‌گرید E (GFRP)، کربن (CFRP) و آرامید (KFRP) به صورت لایه‌های تک‌جهته (UD) با مساحت 120×30 میلی‌متر مربع برای مقاوم‌سازی اتصالات ساخته شده با چسب PVAC مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الیاف به تعداد ۱ تا ۳ لایه از هریک بر سطوح گوشه داخلی اتصال به صورت دستی لایه‌گذاری شدند (شکل ۲).

برای تکمیل فرایند گیرایی چسب، اتصالات ساخته شده به مدت ۲۴ ساعت در داخل گیره قرار گرفتند. ابعاد اعضای اتصالات سربه‌سر برای عضو A اتصال، $30 \times 60 \times 160$ میلی‌متر مکعب و برای عضو B اتصال، $30 \times 60 \times 100$ میلی‌متر مکعب بوده است. در اتصالات فارسی اعضا در ابعاد $30 \times 60 \times 160$ میلی‌متر مکعب برش داده شدند و بعد مقطع اعضا فارسی‌بری شد. پین‌هایی با طول ۳۰ میلی‌متر با فاصله ۳۲ میلی‌متر از هم برای مونتاژ اتصال مورد استفاده قرار گرفت.

پس از پایان عملیات مقاوم‌سازی اتصال با وینیل استر تقویت‌شده با الیاف به مدت ۴۸ ساعت در داخل اتو با دمای ۴۰ درجه قرار گرفت و بعد از آن برای تکمیل فرایند گیرایی^۱ به مدت ۲ هفته در دمای اتاق مشروط‌سازی شدند.

پس از آماده شدن رزین، ابتدا سطح چوب را به لایه‌های از رزین آغشته کرده و بعد لایه‌های از الیاف با ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مشخص (جدول ۱) روی آن گذاشته شد. سپس سطح الیاف را بار دیگر به رزین آغشته کرده و این کار تا تکمیل لایه‌گذاری تا حداکثر ۳ لایه ادامه یافت.

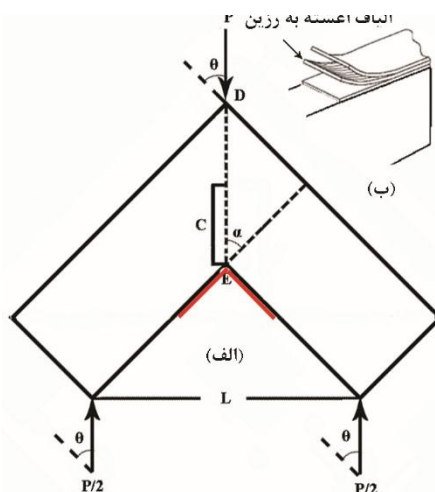
جدول ۱- خواص مکانیکی الیاف شیشه، کربن و کولار

ویژگی‌ها	شیشه (UD ۶۰۰ گرمی)	کربن (UD ۶۰۰ گرمی)	کولار (UD ۳۰۰ گرمی)
مقاومت کششی (MPa)	۳۰۰۰-۱۵۰۰	۲۵۵۰	۲۷۶۰
مدول کششی (GPa)	۷۲	۱۳۵	۵۸
کرنش کششی (%)	۱/۸	۱/۷	۴
مقاومت خمشی (MPa)	-	۱۶۷	-

روش آزمون

۶۵٪ و دمای ۲۵ درجه سلسیوس مشروط‌سازی شدند و بعد آزمون در دمای اتاق و با ماشین آزمایش (Instron 4486) با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد و نمودار نیرو تغییر مکان به دست آمده برای تمام آزمون‌ها تحت کشش قطری ثبت شد.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، برای فراهم کردن تنش مرکب، اتصالات آماده شده تحت بارگذاری کششی قطری قرار گرفتند (Tankut and Tankut 2004). این نیروها باعث ایجاد لنگر خمشی در محل اتصال می‌شوند. آزمون‌ها به مدت ۴ هفته در شرایط رطوبت نسبی



شکل ۲- ترتیب قرار گرفتن آزمون‌های اتصال گوشه تحت بارکشش قطری (الف) طرح شماتیک از لایه‌گذاری دستی الیاف در گوشه داخلی اتصال (ب)

۱ - معادل لغت Curing که در فرایند ساخت پلیمرها به مفهوم بخت آنهاست

نتایج

الیاف FRP

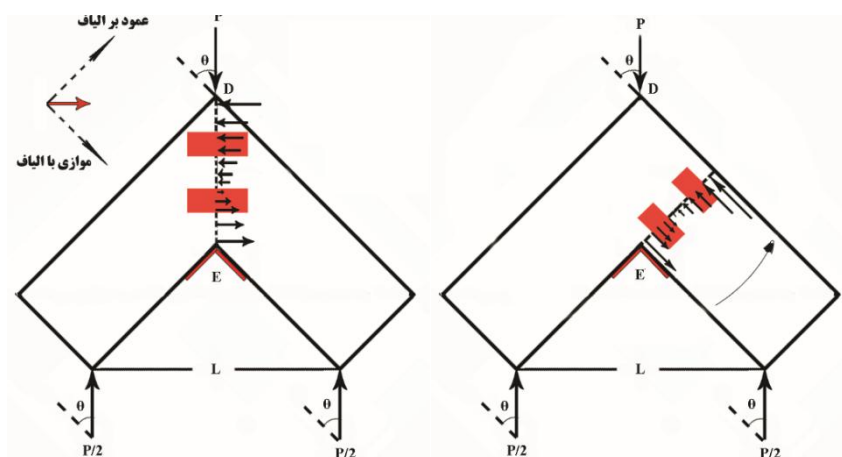
تحلیل نتایج بر اساس نمودار نیرو-تغییر مکان اتصالات گوشه که در ناحیه حداکثر تنش کششی (گوشه داخلی اتصال)، با کمک FRP (۱ تا ۳ لایه) تقویت شده‌اند، انجام شده است. مقادیر میانگین نیرو و تغییر مکان آزمون‌ها در اتصالات سربه‌سر

و فارسی به ترتیب در جدول ۲ و ۳ آورده شده است. نتایج نشان داد که استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف در لبه داخلی اتصال گوشه بر مقادیر ظرفیت باربری و تغییر مکان اتصال تحت بارگذاری کشش قطری مؤثر است و ظرفیت باربری اتصال تقویت شده با سه لایه از الیاف در اتصالات سربه‌سر تا ۳۱/۴۳ درصد افزایش یافته است (جدول ۴).

جدول ۲- نتایج تجربی اتصالات سربه‌سر تقویت شده با لایه‌های FRP

ماتریس اپوکسی	ماتریس وینیل استر		آزمون‌ها	
	نیروی در حد تسلیم (kN)	تغییر مکان در حد تسلیم (mm)		نیروی در حد تسلیم (kN)
۶/۷۱ (۰/۵۸۵)	۶/۱۰۲ (۰/۳۹۸)	۶/۷۱ (۰/۵۸۵)	۶/۱۰۲ (۰/۳۹۸)	شاهد (چسب PVAc)
۶/۲۹ (۰/۳۲۴)	۷/۴۱ (۰/۸۰۹)	۶/۲۹ (۰/۳۲۴)	۷/۴۱ (۰/۸۰۹)	شاهد (چسب اپوکسی)
۸/۷۲ (۱/۹۰)	۶/۹۰ (۱/۳۴)	۵/۸۵ (۱/۷۵)	۶/۵۸ (۱/۰۹)	GFRP
۸/۱۱۴ (۱/۲۰)	۸/۰۲ (۱/۱۹)	۶/۰۷ (۱/۴۹)	۷/۴۵ (۰/۸۰۹)	
۷/۹۳ (۱/۱۸)	۸/۰۷ (۱/۴۵)	۶/۷۳ (۱/۰۲)	۸/۰۲ (۰/۵۴)	
۶/۲۷ (۰/۵۲)	۶/۲۱ (۰/۵۱)	۶/۷۸ (۱/۷۸)	۶/۱۱ (۰/۳۶)	CFRP
۶/۴۲ (۰/۲۲)	۶/۴۳ (۰/۳۹)	۶/۴۲ (۲/۴۶)	۷/۲۷ (۱/۶۵)	
۶/۹۲ (۱/۳۳)	۷/۵۰ (۰/۴۶)	۶/۰۳ (۱/۵۶)	۷/۶۳ (۱/۰۹)	
۶/۶۶ (۰/۴۶)	۶/۴۱ (۰/۴۴)	۶/۳۹ (۰/۶۵)	۶/۷۹ (۱/۲۲)	KFRP
۶/۲۷ (۰/۷۶)	۶/۸۲ (۰/۳۷)	۶/۲۵ (۰/۵۸)	۶/۹۲ (۰/۰۵)	
۵/۹۹ (۰/۵۲)	۷/۶۲ (۱/۰۰)	۶/۱۰ (۰/۵۱)	۷/۱۲ (۰/۱۲)	

مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف از معیار است.



شکل ۳- نحوه توزیع تنش در سطح اتصالات فارسی و سربه‌سر تقویت شده با لایه‌های FRP

همان‌طور که در جدولهای ۲ و ۳ آمده است تغییر مکان قائم اتصال در بیشتر موارد و باربری چوب نسبت به نمونه‌های شاهد (چسب PVAC) افزایش داشته است که نشانه نرم شدن اتصال تحت بار است.

جدول ۳- نتایج تجربی اتصالات فارسی تقویت‌شده با لایه‌های FRP

ماتریس اپوکسی		ماتریس وینیل استر		آزمونه‌ها
تغییر مکان در حد تسلیم (mm)	نیروی در حد تسلیم (kN)	تغییر مکان در حد تسلیم (mm)	نیروی در حد تسلیم (kN)	
۴/۰۶ (۰/۴۳۸)	۶/۴۰ (۰/۵۲۶)	۴/۰۶ (۰/۴۳۸)	۶/۴۰ (۰/۵۲۶)	شاهد (چسب PVAC)
۳/۳۰ (۰/۴۳)	۴/۹۸ (۰/۴۸)	۳/۳۰ (۰/۴۳)	۴/۹۸ (۰/۴۸)	شاهد (چسب اپوکسی)
۳/۷۴ (۰/۷۰)	۶/۴۱ (۰/۶۹)	۳/۳۸ (۰/۶۹)	۶/۵۳ (۰/۷۰)	۱ لایه
۴/۷۶ (۰/۶۶)	۶/۷۸ (۰/۴۱)	۴/۳۸ (۰/۴۷)	۸/۷۸ (۰/۰۹)	۲ لایه
۵/۴۹ (۱/۰۶)	۸/۵۷ (۱/۰۱)	۴/۵۴ (۰/۶۲)	۸/۸۴ (۰/۹۳)	۳ لایه
۴/۳۰ (۰/۱۷)	۶/۸۹ (۰/۸۰)	۴/۰۱ (۰/۶۳)	۶/۵۱ (۰/۱۳)	۱ لایه
۳/۹۲ (۰/۱۳)	۷/۰۶ (۰/۳۹)	۳/۹۶ (۰/۳۵)	۶/۶۸ (۰/۳۷)	۲ لایه
۳/۹۲ (۰/۶۰)	۷/۱۴ (۰/۶۵)	۳/۸۹ (۰/۵۸)	۷/۰۲ (۰/۸۴)	۳ لایه
۳/۶۸ (۰/۳۲)	۶/۴۷ (۰/۲۶)	۳/۷۰ (۰/۲۰)	۶/۶۱ (۰/۷۸)	۱ لایه
۴/۲۵ (۰/۷۰)	۶/۸۲ (۰/۹۲)	۴/۰۷ (۰/۶۳)	۷/۳۰ (۰/۴۹)	۲ لایه
۴/۳۲ (۱/۰۵)	۶/۸۶ (۰/۵۱)	۴/۳۳ (۰/۹۵)	۸/۰۶ (۰/۶۷)	۳ لایه

به‌طوری‌که مقادیر باربری در اتصالات فارسی مقاوم‌سازی شده با وینیل استر تقویت‌شده با الیاف شیشه مقادیر بیشتری را به خود اختصاص داده است که کاملاً با مقادیر به‌دست آمده از اتصال سربه‌سر از این نظر متفاوت است. درحالی‌که تغییر مکان و به دنبال آن نرمی هر دو نوع اتصال مقاوم-سازی شده با اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه نسبت به آزمونه‌های شاهد مقادیر بالاتری را داشته است.

الیاف کربن (CFRP)

همان‌طور که در جدولهای ۲ و ۳ آمده است، باربری اتصالات مقاوم‌سازی شده با CFRP نسبت به آزمونه‌های شاهد افزایش داشته است ولی تغییر مکان قائم اتصال تحت بارگذاری در بیشتر موارد کاهش یافته است که نشانه افزایش سفتی اتصال تحت بار است. همچنین نتایج نشان دادند که اتصالات فارسی مقاوم‌سازی شده با لایه‌های الیاف

همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است اتصالات فارسی مقاوم شده با FRPها نیز مقاومت بیشتری را در برابر بار کششی قطری از خود نشان دادند. مقایسه میانگین باربری اتصالات فارسی تقویت‌شده با سه لایه از الیاف شیشه نشان داد که مقادیر باربری تا ۳۸/۳۴ در آزمونه‌ها تحت کشش قطری افزایش می‌یابد (جدول ۴). این مقاومت با افزایش کارایی اتصال تحت بار و تغییر در نرمی اتصال همراه بوده است. همراه با افزایش مقدار باربری، مقادیر تغییر مکان عمودی نیز تحت بار در بیشتر موارد افزایش یافته که مقدار آن نسبت به آزمونه‌های شاهد با چسب اپوکسی واضح‌تر است. مقایسه مقادیر افزایش مقاومت اتصال با استفاده از لایه‌های FRP در دو نوع ماتریس پلیمری نسبت به آزمونه شاهد در جدول ۴ آورده شده است. البته نوع ماتریس به‌کار رفته در ساخت چندسازه‌ها نیز بر مقادیر باربری و تغییر مکان اتصال تحت بار مؤثر است.

ظرفیت باربری و تغییر مکان اتصال مؤثر است و افزایش این مقادیر با اتصالات مقاوم‌سازی شده با سه لایه از الیاف کولار افزایش بیشتری نشان داده است. باربری اتصالات مقاوم‌سازی شده با KFRPها نسبت به آزمون‌های شاهد با چسب PVAc افزایش داشته است. در حالی که تغییر مکان قائم اتصال در بیشتر موارد کاهش داشته است که افزایش سفتی اتصال تحت بار را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد، بر خلاف آزمون‌های اتصال سربه‌سر، در بیشتر موارد مقادیر تغییر مکان اتصالات فارسی مقاوم‌سازی شده نسبت به آزمون‌های شاهد افزایش داشته است. علاوه بر این، استفاده از ماتریس وینیل استر تأثیر بیشتری بر مقادیر باربری و تغییر مکان اتصالات فارسی مقاوم‌سازی شده تحت بار داشته است.

استفاده از KFRP بر سطوح اتصال استحکام آن را نسبت به آزمون‌های شاهد افزایش داده است. البته افزایش مقاومت این اتصالات نسبت به آزمون‌های شاهد با چسب اپوکسی بیشتر بوده و مقادیر تغییرات آنها افزایش چشمگیری را نشان داده است.

مقادیر باربری و تغییر مکان در اتصالات مقاوم‌سازی شده با وینیل استر تقویت شده با الیاف کولار نسبت به آزمون‌های شاهد مقادیر بالاتری را به خود اختصاص دادند. هرچند برای اظهار نظر در رابطه با چسبندگی بین چندسازه تقویت شده با الیاف و چوب بررسی سطح مشترک این دو با آزمون‌های دیگر ضروریست، ولی با مقایسه نتایج به دست آمده از چندسازه‌های تقویت شده با الیاف شیشه و کربن با الیاف کولار و ارزیابی و معاینه اتصالات تقویت شده بعد از شکست می‌توان نتیجه گرفت که پوشش دهی و چسبندگی رزین وینیل استر با الیاف کولار و شیشه مناسب‌تر از اپوکسی است که در مورد الیاف کربن این حالت بعکس است. در اتصالات فارسی با افزایش تعداد لایه‌ها، مقادیر باربری و نرمی اتصال افزایش می‌یابد ولی در اتصالات سربه‌سر مقادیر نرمی روند کاهشی دارد.

کربن دامنه تغییرات بیشتری را (به‌ویژه نسبت به آزمون‌های شاهد با چسب اپوکسی) نشان دادند و استفاده از ماتریس وینیل استر تأثیر بیشتری بر مقادیر باربری و تغییر مکان داشته است.

با کاربرد FRP با دو لایه الیاف کربن، روند تغییرات نیرو و تغییر مکان در اتصالات مقاوم‌سازی شده، شیب (درصد افزایش) بیشتری داشته ولی با استفاده از ۳ لایه شیب آن کمتر شده است.

اتصالات فارسی نیز مانند اتصالات سربه‌سر مقاوم‌سازی شده با CFRPها با لایه‌های مختلف مقاومت بیشتری را در برابر بار از خود نشان دادند. البته همراه با افزایش مقدار باربری اتصال، کاهش مقادیر تغییر مکان عمودی اتصال مقاوم‌سازی شده تحت بار را نسبت به آزمون‌های شاهد با چسب PVAc می‌توان به وضوح مشاهده کرد. یعنی استفاده از لایه‌های FRP بر روی سطوح اتصال باعث افزایش مقاومت آنها تا ۹/۷۹ درصد در مقایسه با آزمون‌های ساخته شده با چسب‌های PVAc می‌شود. البته افزایش مقاومت این اتصالات نسبت به آزمون‌های شاهد با چسب اپوکسی بیشتر بوده و مقادیر تغییرات آنها افزایش واضحی را نشان داده است.

استفاده از چسب اپوکسی در خط اتصال و نیز استفاده از تقویت‌کننده‌های الیاف پلیمر کربن باعث کاهش نرمی اتصال می‌شود که این عامل باعث کاهش مقادیر تغییر مکان اتصالات مقاوم‌سازی شده با CFRP نسبت به آزمون‌هایی با چسب اپوکسی در خط اتصال می‌شود. در مورد تقویت‌کننده‌های CFRP نیز نوع ماتریس پلیمری به کار رفته در ساخت چندسازه‌ها بر مقادیر باربری و تغییر مکان اتصال تحت بار مؤثر است. به هر حال مقادیر باربری و تغییر مکان در اتصالات مقاوم‌سازی شده با اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن نسبت به آزمون‌های شاهد مقادیر بالاتری را به خود اختصاص دادند.

الیاف کولار (KFRP)

نتایج جدول‌های ۲ و ۳ نشان داد که الیاف کولار بر

جدول ۴- درصد تأثیرگذاری مقاوم‌سازی با FRP بر عملکرد سازه‌ای اتصال گوشه

تیمار	اتصال سربه‌سر		اتصال فارسی	
	نیرو در حد تسلیم (kN)	دامنه تغییرات نسبت به آزمون شاهد (%)	نیرو در حد تسلیم (kN)	دامنه تغییرات نسبت به آزمون شاهد (%)
شیشه	۶/۵۸	۷/۹۱	۶/۵۳	۲/۱۱
	۷/۴۵	۲۲/۱۲	۸/۷۸	۳۷/۲۰
	۸/۰۲	۳۱/۴۳	۸/۸۴	۳۸/۳۴
ماتریس وینیل استر	۶/۱۱	۰/۰۹	۶/۵۱	۱/۷۰
	۶/۲۱	۱۹/۱۷	۶/۶۸	۴/۳۹
	۷/۲۷	۲۵/۰۴	۷/۰۲	۹/۷۹
کولار	۶/۷۹	۱۱/۲۶	۶/۶۱	۳/۴۱
	۶/۹۲	۱۳/۴۳	۷/۳۰	۱۴/۰۸
	۷/۱۲	۱۶/۶۸	۸/۰۶	۲۶/۰۳
شیشه	۶/۹۰	۱۳/۱۴	۶/۴۱	۰/۲۰
	۸/۰۲	۳۱/۱۵	۶/۷۸	۶/۰۲
	۸/۰۷	۳۲/۲۰	۸/۵۷	۳۳/۹۷
ماتریس اپوکسی	۶/۲۱	۱/۸۰	۶/۸۹	۷/۷۲
	۶/۴۳	۵/۳۵	۷/۰۶	۱۰/۴۳
	۷/۵۰	۲۲/۹۰	۷/۱۴	۱۱/۷۱
کولار	۶/۴۱	۵/۱۰	۶/۴۷	۱/۱۶
	۶/۸۲	۱۱/۷۲	۶/۸۲	۶/۵۹
	۷/۶۲	۲۴/۹۰	۶/۸۶	۷/۲۹

بحث

بررسی آزمون‌ها در هر دو نوع اتصال و معاینه آنها بعد از شکست نشان داد که استفاده از FRPها در لبه داخلی می‌تواند در برابر باز شدن اتصال تحت بار تا حدی مقاومت کند ولی با بالا رفتن بار و افزایش تغییر مکان عمودی ضعف کلی چوب در کشش عمود بر الیاف و برش موازی الیاف باعث شکست چوب می‌شود.

با مقایسه نتایج حاصل از الیاف کربن با الیاف شیشه استنباط می‌شود که پوشش‌دهی رزین اپوکسی به عنوان ماتریس چندسازه‌های الیاف کربن مناسب‌تر از وینیل استر

است که در مورد الیاف شیشه این حالت کاملاً بعکس است. نتایج تحقیقات نشان داده است که در اتصالات سربه‌سر اعضا تحت مد II (مد برش) دچار شکست و گسیختگی می‌شوند (Abdolzadeh, 2014). از آنجاکه مقادیر مقاومت چوب و چندسازه بسیار متفاوت است و حداکثر تنش کششی در لبه داخلی و در مرز چوب با چندسازه اتفاق می‌افتد، تمرکز تنش به وجود آمده و به‌طور همزمان متأثر شدن اتصال از مد II، باعث شکست اتصال در محل اتصال چوب با چندسازه می‌شود که شکل ۴ نیز این موضوع را به‌خوبی تأیید می‌کند. البته در اتصالات فارسی اتصال تحت مد

اعضا و در نتیجه، رسیدن به حداکثر مقدار خود در سطح مشترک چوب و چندسازه، جدا شدن راحت الیاف از سطح چوب را فراهم می‌آورد و با وجود مقاومت کششی بالا در الیاف FRP (تحت بار کشش قطری لبه داخلی اتصال دارای بالاترین مقدار تنش کششی است)، جدا شدن پلیمر تقویت‌شده با الیاف از سطح چوب تحت بار با شکست اتصال همراه شده است. علاوه بر آن، لایه‌گذاری دستی FRP در گوشه اتصال با زاویه ۹۰ درجه کار مشکلی است که احتمال تشکیل حباب‌های هوا را در این حالت افزایش داده و به دنبال آن مقاومت اتصال تقویت‌شده تحت بار کاهش می‌یابد.

ترکیبی دچار شکست می‌شود. بنابراین در اتصالات تقویت‌شده نیز چوب در ناحیه تماس با لایه‌های FRP در اثر برش به وجود آمده و تمرکز تنش حاصل از تفاوت مقاومت دو ماده تحت بار دچار گسیختگی می‌شود و یا در نواحی نزدیک به آن و در چوب گسیختگی به علت ضعف چوب در کشش عمود بر الیاف و برش موازی الیاف و تحت مد ترکیبی اتفاق می‌افتد. علاوه بر آن، در این اتصالات چندسازه الیاف پلیمر با انتقال مستقیم بار به طور مستقیم تحت نیروی مرکب قرار گرفته است، به دلیل ایجاد تنش محوری و تنش حاصل از لنگر خمشی و اعمال تنش برشی در اثر آنکه به علت زاویه ۴۵ درجه بار نسبت به امتداد

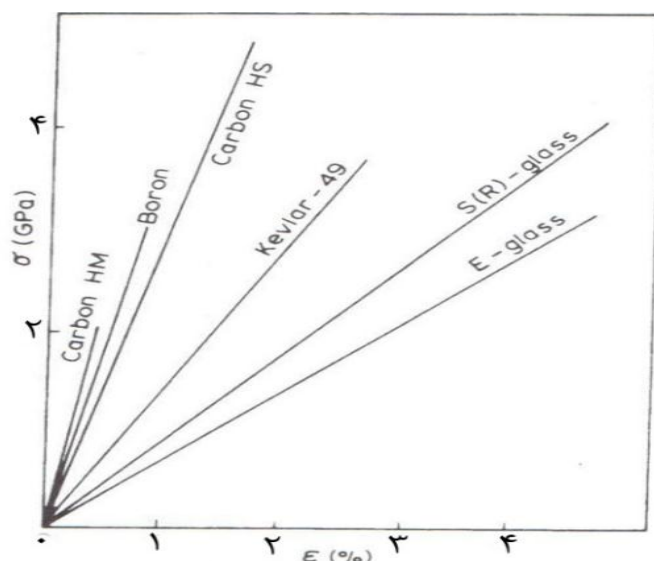


شکل ۴- نحوه شکست اتصالات فارسی و سربه‌سر تحت بارگذاری کشش قطری

جابجایی در طی بارگذاری تا شکست کمتر است (Dagher and Lindyberg, 2000). منحنی‌های تنش-کرنش مهمترین الیاف تقویت‌کننده مورد استفاده در صنعت چندسازه به دست آمده از تحقیقات Bunsell (شکل ۵)، می‌تواند کمک مؤثری در درک علت اثرات الیاف مختلف بر مقادیر نیرو و تغییر مکان اتصال تحت بارگذاری داشته باشد. همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد الیاف شیشه مدول پایینی در مقایسه با الیاف کربن و کولار دارند ولی ازدیاد طول آنها در نقطه شکست بالاست، از این رو چقرمگی چندسازه را افزایش خواهند داد. البته خطی بودن رفتار تنش-کرنش الیاف با مدول بالا و میزان کم کرنش در شکست یکی از مشخصه‌های مهم آنهاست.

نتایج نشان داد که با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه میزان تقویت‌کنندگی افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش زمانی اتفاق می‌افتد که اولین لایه به اتصال تقویت‌نشده افزوده می‌گردد. البته مقاومت نهایی اتصالات تقویت‌شده با ۳ لایه الیاف شیشه در مقایسه اتصالات تقویت‌نشده بیش از ۳۰٪ افزایش داشته است. مشابه این نتایج در تحقیقات دیگری نیز مشاهده شده است (Daniel et al., 1997).

نتایج به دست آمده در رابطه با مقاومت و سفتی اتصال تقویت‌شده در تحقیقات محققان دیگر نیز مشاهده شده است. 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 آزمون‌ها در منحنی نیرو-



شکل ۵- منحنی‌های تنش-کرنش مهمترین الیاف تقویت‌کننده مورد استفاده در چندسازه (Gustafsson, 2003)

- modification of wood. *BioResources*. 9(3): 5302-5310.
- Beheshty, M.H. and Rezadoust, A.M., 2005. Reinforced plastics (Polymer Composites). Tehran, Iran Polymer & Petrochemical Institute, 446p.
- Biblis, E. J., 1965. Analysis of wood- fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. *Forest Products Journal*. 15(2): 81-88.
- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F., Barreto, A.M.J. P., Morais, J. J. L. and Domingues, J. J. M. S., 2009. Fracture behavior of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch. *Composites: Part A*. 40: 852-859.
- 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 Ma*:1-8.
- Daniel, F.W., Lawrence, A.S., and Robert J.R., 1997. Feasibility of fiberglass-reinforced bolted wood connections. Madison, Wisconsin, Forest Products Laboratory.
- Ebrahimi, G., 2007. Engineering design of structure of furniture. Tehran, University of Tehran, 491p.
- Gustafsson, P. J., 2003. Fracture perpendicular to grain - structural applications. *Timber engineering*. S. landerson and H. J. Larsen, Wiley & Sons.
- Raftery, G. M., Harte, A.M., and Rodd, P.D., 2009. Bond quality at the FRP-wood interface using wood-laminating adhesives. *International Journal of*

با توجه به هدف اصلی این تحقیق می‌توان نتایج حاصل از تحقیق را در موارد زیر خلاصه کرد:

نوجه به ضعف چوب تحت بارگذاری کشش قطری و لزوم تقویت محل اتصال به‌عنوان ضعیف‌ترین قسمت سازه نتایج این تحقیق نشان داد در صورت استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف، مقاومت اتصال افزایش می‌یابد. در چنین شرایطی با توجه به مقادیر بار مجاز، استفاده از ماده چوبی در شرایط یکسان کاهش می‌یابد که در کشور ما که با کمبود مواد اولیه مواجه است رویکرد مناسبی به‌شمار می‌رود. نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر تغییر مکان تحت بار افزایش می‌یابد، یا به عبارت دیگر اتصالات نرم‌تری تحت بار خواهیم داشت که در این صورت استفاده از چنین تقویت‌کننده‌هایی از شکستگی سریع اتصال تحت بار و از گسیختگی فاجعه‌بار جلوگیری می‌کند.

منابع مورد استفاده

- Abdolzadeh, H., Layeghi, M., Ebrahimi, G. and Ghassemieh, M., 2014. Study of stress capacity improvement of L-type joint by chemical

- Dovetail Connections. Vancouver, Canada, British Columbia University. PhD Thesis.
- Tannert, T., Lam, F. and Vallée, T., 2010. Structural performance of rounded dovetail connections: experimental and numerical investigations. *European Journal of Wood and Wood Product*. 69: 471-482.
- Wangaard, F.F., 1964. Elastic deflection of wooden-fiberglass composite beam. *Forest Products Journal*. 14(6): 256-260.
- Adhesion & Adhesives. 29: 101- 110.
- 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.
- Tankut, A.N. and Tankut, N., 2004. Effect of some factors on the strength of furniture corner joints constructed with wood biscuits. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 28: 301-309.
- Tannert, T. (2009). Structural Performance of Rounded

Structural performance of corner joint reinforced by FRP under diagonal tension loading

H. Abdolzadeh^{1*}, Gh. Ebrahimi² and M. Layeghi³

1*- Corresponding author, PhD., Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran, E mail: h_abdolzadeh@ut.ac.ir

2- Professor, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

3- Assistant Professor, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

Received: Jan., 2015

Accepted: Jan., 2016

Abstract

In this study, structural performance of corner joint reinforced by fiber reinforced polymers (FRP) at the area of maximum tension stress was investigated under diagonal tension loading. Therefore 1 to 3 layers of unidirectional woven Glass, Carbon and Kevlar fibers were used and hand lay-up was done by vinyl ester and epoxy resins. Results of load-displacement curve at yield point exhibited capability of the reinforcing layers in preventing joint opening to some extent under load. However, failure was observed at the joint due to picking fibers from wood surface or members fracture near the interface when loading increased. Since the reinforced zones of the joints by FRP show the maximum shear stress, consequently the separation of fibers from wood surfaces increased at these locations. The adhesion of FRP layers to joint surface was not appropriate due to difficult process of layering at right angle of joints followed by probable formation of air bubbles. The results of assessing FRPs reinforcing behaviour indicated that application of vinyl ester in comparison with epoxy as matrix exhibited better performance. In addition, glass and carbon fibers showed better performance than Kevlar fibers as reinforcing agents.

Key words: Corner joint, fiber reinforced polymer, vinyl ester resin and epoxy resin.