

## Reinforcement of Bolted Timber Joints Using GFRP Sheets in Poplar and Pine Woods

Mehrab Madhoushi<sup>1\*</sup>, Sahar Sadatzadeh<sup>1</sup>, and Ghanbar Ebrahimi<sup>2</sup>

1. Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Postal Code: 49138-15739, Gorgan, Iran
2. Department of Wood and Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, P.O. Box: 31585-4314, Karaj, Iran

Received 30 September 2010, accepted 7 September 2011

### ABSTRACT

Failure in timber structures occurs mainly in crucial points such as joints areas. Therefore, the idea of using composite sheets in timber joints has been introduced as a method in order to increase the strength and ductility behaviour of timber joints. This research aims to study the behaviour of bolted joints in poplar and pine woods, which are reinforced by two types of GFRP sheets. A single shear bolted joint consisted of 3 timber members whose length and width were 30 cm in length and 5 cm in width. The thickness of each member was 4 cm for internal part and 2 cm for external part. The employed steel bolt was 10 cm in length and 1 cm in diameter. In this respect, one layer of GFRP sheet was used to be bonded to timber members by using epoxy resin and left between the clamps for 24 hours. They were then kept at room temperature for three weeks. Also the effect of adding a wood veneer on the reinforced joints was investigated. The tensile strength of the reinforced and control samples (un-reinforced joints) was measured according to ASTM D5652-92 standard. The results show that the reinforced samples have higher tensile strength compared to that of reinforced joints, although it is not statistically significant. Also, two types of sheets influence the joint behaviour as the reinforced joints display more ductility behaviour.

#### Key Words:

bolted timber joints,  
composite, epoxy resin,  
reinforced connection,  
tensile strength

(\*To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: [mmadhoushi@hotmail.com](mailto:mmadhoushi@hotmail.com)

# تقویت اتصالات برشی دوگانه پیچ و مهره در سازه‌های چوبی با استفاده از صفحات GFRP

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،  
سال بیست و چهارم، شماره ۳،  
صفحه ۱۷۹-۱۷۱، ۱۳۹۰  
ISSN: 1016-3255

محراب مدهوشی<sup>۱\*</sup>، سحر سادات زاده<sup>۱</sup>، قنبر ابراهیمی<sup>۲</sup>

۱- گرگان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، کدپستی ۴۹۱۳۸-۱۵۷۳۹

۲- تهران، دانشگاه تهران، دانشکده منابع طبیعی، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، صندوق پستی ۴۳۱۴-۳۱۵۸۵

دریافت: ۸۹/۷/۲، پذیرش: ۹۰/۶/۱۶

## چکیده

به منظور بررسی تقویت اتصالات چوبی، اتصالات دوگانه از چوب‌های کاج و صنوبر تهیه و با استفاده از اتصال‌دهنده پیچ و مهره به هم متصل شدند. صفحات پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) در دو نوع مختلف تجاری و در ضخامت‌های ۰/۰۵ و ۱ mm به عنوان تقویت‌کننده و پوشش روی اتصالات با استفاده از رزین اپوکسی، استفاده شد. هم‌چنین، به منظور حفظ ظاهر اتصال و نمای طبیعی چوب، در نیمی از نمونه‌ها از لایه نازک چوب نیز روی کامپوزیت استفاده شد. در مجموع ۳۲ نمونه اتصال و ۸ نمونه به عنوان شاهد ساخته شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمون کشش روی آنها اجرا شد. نتایج نشان داد، 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 اتصالات موجب تغییر شکل شکست در نمونه‌های چوبی می‌شود، به طوری که هیچ یک 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.

## واژه‌های کلیدی

اتصال دوگانه پیچ و مهره چوبی،  
رزین اپوکسی، کامپوزیت،  
اتصال تقویت شده،  
استحکام کششی

## مقدمه

شکست در سازه‌های چوبی بیشتر در محل اتصالات رخ می‌دهد [۱]. به همین منظور، تقویت آنها اغلب به منظور افزایش مقاومت نهایی اتصال و اطمینان از ایمنی سازه انجام می‌شود. مطالعات متعدد نشان می‌دهد، تقویت فرآورده‌ها و سازه‌های چوبی هنگام ساخت، پس از آن یا حتی در هنگام سرویس، رفتار کشش‌پذیری (ductility) آنها را افزایش داده از بروز شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها جلوگیری می‌کند.

از مواد تقویت‌کننده تجاری و مهم سازه‌های چوبی می‌توان مواد پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP) یا الیاف کربن (CFRP) را نام برد. هر چند الیاف شیشه در مقایسه با سایر الیاف (کربن و کولار) از نظر اقتصادی مناسب‌ترند [۲،۳]. در این ارتباط از نمونه‌های تجاری می‌توان به تقویت درونی گلولام (Glulam، 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 [۴].

امروزه نظریه تقویت تیرهای چوبی با استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری موجب معرفی نوع جدیدی از فرآورده‌ها به نام الوارهای هیبریدی (hybrid lumber) شده است که جایگاه خود را در سطح پژوهش‌ها و صنعت گشوده است [۵-۷]. مطابق نتایج مطالعات انجام شده، استفاده از صفحات قالبی GFRP در تیرهای چوبی می‌تواند به افزایش مقاومت‌های مکانیکی منجر شود. هم‌چنین، می‌توان از این نوع تقویت‌کننده‌ها در حد فاصل تیرهای چوبی در سقف ساختمان (به ویژه در بناهای قدیمی) [۶]، کف ساختمان با مصالح بنایی [۸،۹] و حتی تیرهای چوبی پوسیده [۱۰-۱۲] و اعضای خرپای پل‌های چوبی [۱۳] استفاده کرد. مثلاً اتصال صفحات GFRP به تیرهای قدیمی منجر به افزایش ۶۲٪ در ظرفیت تحمل بار و نیز رفتار کشش‌پذیری سازه شد [۱۳]. امکان شبیه‌سازی رفتار این سازه‌های تقویت شده نیز اطلاعات مفیدی در باره اعتبار نتایج آزمایشگاهی در دسترس قرار داده است [۸].

دامنه نظریه استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری در سازه‌های چوبی به کاربرد آنها در تقویت اتصالات منتهی شده است. نتایج تقویت اتصالات پیچ در گونه چوبی نوئل با استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری و نوعی رزین اپوکسی نشان داد [۱] که استحکام اتصالات با افزایش تعداد لایه‌های الیاف شیشه افزایش می‌یابد. در این باره مقاومت نهایی اتصال تقویت شده 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 شد.

در این ارتباط، حتی نتایج قابل توجهی از امکان عملی استفاده از الیاف شیشه به شکل میله‌های اکستروژده GFRP به جای میله‌های فلزی به عنوان تقویت‌کننده در بارگذاری‌های ایستا [۱۴] و پویا و رفتار خستگی [۱۵-۱۷] به همراه داشته است. چرا که این کامپوزیت‌های پلیمری سبک‌ترند و از دوام بیشتر در برابر شرایط محیطی و نیز امکان اتصال بهتر با چوب برخوردارند. باید اضافه کرد، تقویت اتصالات چوبی با صفحات کامپوزیتی نه تنها استحکام اتصال را افزایش می‌دهد، بلکه محافظ مناسبی برای اتصال محسوب می‌شود. در پژوهشی [۱۸] از الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده در دو سطح چوب استفاده شد که به وسیله چسب اپوکسی چسبانده و از میخ برای اتصال استفاده شد. پس از تقویت‌کردن مشاهده شد، ترک و شکستی در چوب رخ نمی‌دهد و تنها کمی لهیدگی در اطراف سوراخ ایجاد می‌شود.

امکان استفاده از صفحات کامپوزیتی پلیمری پارچه‌ای، که در آنها الیاف شیشه و آرامید یا کربن، شبکه بافت تار و پود و چندمحوری را تشکیل می‌دهند، نیز مطالعه شده است [۱۹]. بررسی نتایج نشان داد که تقویت اتصالات چوب نراد با رطوبت ۸٪ به وسیله لایه‌های پارچه‌ای ظرفیت تحمل بار را افزایش می‌دهد.

در اتصال صفحات تقویت‌کننده کامپوزیتی به چوب، رزین اپوکسی نقش به‌سزایی دارد، به طوری که رزین‌های اپوکسی در شرایط معمولی با انواع الیاف تقویت‌کننده (شیشه، کربن و کولار) کارایی فوق‌العاده‌ای دارند [۴]. علت این مسئله به خواص آن نظیر مقاومت زیاد در برابر تغییرات زیاد رطوبت [۲۰-۲۲]، تنوع تجاری، تفاوت در انواع ویژگی‌های آن نظیر گیراشدن (در دمای محیط و با رطوبت ۲۰ درصد برای چوب)، سفتی، مقاومت و گرانشی انواع آن، قدرت پرمکندگی و دوام زیاد در برابر خوردگی [۱۵] اشاره کرد. هر چند باید به این نکته اشاره کرد که افزون بر قیمت غیراقتصادی این رزین و مشکلات متعدد در حمل و نقل آن، تفاوت مقدار جذب رطوبت در این چسب و چوب می‌تواند منجر به بروز تنش‌های برشی شود که سطوح اتصال بین چوب و چسب را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۱]. با این وجود، رزین اپوکسی به دلایل مختلف ذکر شده از قدرت رقابت زیادی در این زمینه برخوردار است.

به طور کلی، مرور منابع دلالت بر این دارد که با تقویت کردن از راه اتصال صفحات کامپوزیتی پلیمری به سازه‌های مهندسی چوبی، رفتار غیرخطی اتصالات هنگام بارگذاری را می‌توان در محل اتصالات مکانیکی کنترل کرد و به دلیل افزایش قدرت تحمل بار و رفتار کشش‌پذیری اتصالات، از شکست‌های آنی آنها جلوگیری کرد [۲۳-۲۵].

در این پژوهش، اثر استفاده از صفحات پلیمری تقویت‌شده با الیاف

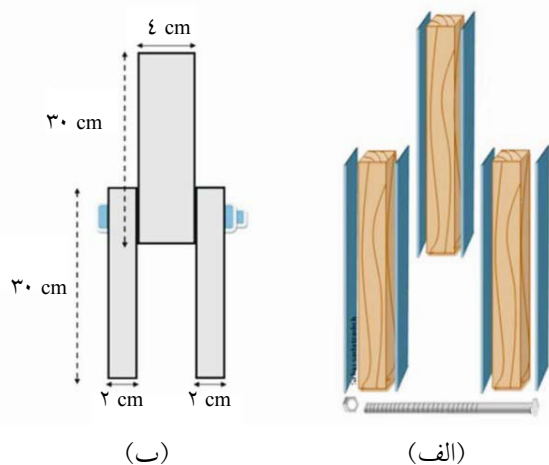
اتصال، از پیچ فولادی نیم رزوه با طول ۱۲ mm و قطر ۱۰ mm استفاده شد. مقاومت خمشی و کششی فولاد استفاده شده در پیچ و مهره به ترتیب ۴۵۰ و ۷۸۰ MPa بود. از ماشین‌آلات متعارف درودگری نیز برای برش و صاف کردن سطح قطعات و از ماشین Instron برای اندازه‌گیری‌های کشش اتصالات استفاده شد.

## روش‌ها

### ساخت نمونه و اندازه‌گیری

ابتدا از درون چوب سالم گونه‌های کاج و صنوبر، الوار درجه یک تهیه شد. پس از سپری شدن مدتی در هوای آزاد به منظور کاهش رطوبت، سطح آنها با ابزار درودگری صاف و سپس به وسیله اهر گرد به طوری که پهنای الوار در جهت مماسی قرار گیرد، برش نهایی به ابعاد ۲×۵×۳۰ cm (برای قطعات جانبی) و ۴×۵×۳۰ cm (برای قطعات میانی) داده شد (پهنای الوار در جهت مماسی قرار گرفت). در مجموع تعداد ۴۰ عدد قطعه جانبی و ۲۰ عدد قطعه میانی برای هریک از گونه‌های کاج و صنوبر ساخته شد (شکل ۱). سپس، سطوح آنها پیش از چسبندگی، از گرد و غبار پاک شد [۶].

دو نوع صفحه کامپوزیتی پلیمری انتخاب شده به ابعاد ۳۰×۵ cm و هر کدام به تعداد ۹۶ عدد با قیچی آهن‌بر بریده و با چسب به سطح چوب متصل شدند. برای گیرایی سریع‌تر چسب و دستیابی به اتصال مناسب صفحات چسب خورده به مدت حداقل ۲۴ h در دمای محیط زیر فشار قرار گرفتند. قطعات حاوی کامپوزیت پس از گیرایی کامل چسب آماده سوراخ‌کاری شدند. در نزدیک انتهای هر عضو و در محل مربوط، سوراخی به قطر ۱۱ mm برای عبور پیچ و در نزدیک انتهای دیگر عضو سوراخی به قطر ۲۱ mm برای عبور فک



شکل ۱- (الف) نحوه قرارگیری صفحات کامپوزیتی پلیمری و (ب) ابعاد عضوهای اصلی اتصال.

شیشه (GFRP) به عنوان تقویت‌کننده خارجی بر مقاومت اتصالات برشی دوگانه پیچ و مهره (bolted connections) در دو گونه چوبی کاج و صنوبر مطالعه شد. گونه کاج که معمولاً استحکام مناسبی در اتصالات نشان می‌دهد، کاربردهای سازه‌ای گسترده‌ای دارد و تقویت اتصالات آن مناسب به نظر می‌رسد. گونه صنوبر نیز به دلیل سبکی و کم بودن مقاومت‌ها چندان مناسب کاربردهای سازه‌ای نیست. به همین دلیل، نظریه تقویت اتصالات ساخته شده با این گونه شاید بتواند کاربردهای آن را نیز توسعه بخشد.

## تجربی

### مواد و دستگاه‌ها

گونه‌های چوبی مورد استفاده برای ساخت اتصالات شامل کاج تهران (*Pinus eldarica*) و صنوبر دلتوئیدس (*Populus deltoides*) بود که از الوارهای سالم استحصال شده از ۴ اصله برای هرگونه انتخاب شدند. نوع صفحات تقویت‌کننده شامل کامپوزیت پلیمری نوع ۱ تقویت شده با الیاف شیشه (الیاف به طور تصادفی در ماده زمینه) با ضخامت ۱ mm و کامپوزیت پلیمری نوع ۲ با الیاف شیشه منظم (ردیفی) با ضخامت ۰/۵ mm استفاده شدند. جدول ۱، مشخصات این کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. به منظور اتصال صفحات کامپوزیتی به چوب از رزین اپوکسی با نام تجاری Kukdo استفاده شد. خواص رزین مصرفی عبارت بود از: مدول کشسانی ۳۴۱۶ MPa، مقاومت کششی ۵۶-۸۳ MPa، مقاومت فشاری حداکثر ۱۳۸-۱۰۴ MPa، مقاومت خمشی ۶۹-۹۰ MPa و ازدیاد طول تا پارگی ۱۰-۲٪.

برای اتصال قطعات چوبی از پیچ و مهره فولادی نیم رزوه با سر چندضلعی استفاده شد. در ۲۴ نمونه از پیچ فولادی با طول ۱۰ mm و قطر ۱۰ mm و در ۱۶ نمونه دیگر به دلیل افزایش ضخامت قطعات

جدول ۱- خواص کامپوزیت‌های استفاده شده.

| کامپوزیت   |            | خواص  |
|------------|------------|---|
| نوع ۲ (C2) | نوع ۱ (C1) |   |
| $\geq 340$ | $\geq 280$ | مقاومت خمشی عمود بر صفحه (MPa)                    |
| $\geq 33$  | $\geq 25$  | مقاومت ضربه‌ای موازی با صفحه ( $\text{kJ/m}^2$ )  |
| ۱/۸۵       | ۰/۶        | چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )                         |
| ۱۷-۷۳      | $\leq 19$  | مقدار جذب آب ( $\text{mg/m}^3$ )                  |
| ۵/۰×۱۰۸    | ۵/۰×۱۰۸    | مقدار عایق بودن پس از غوطه‌وری در آب ( $\Omega$ ) |

جدول ۲- ترکیب نمونه‌های آزمونی.

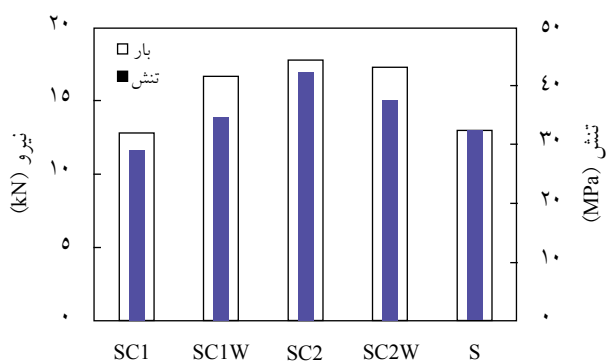
| ویژگی اتصال تقویت شده  | نام نمونه                  | نوع گونه |
|--|----------------------------|----------|
| کامپوزیت نوع ۱<br>کامپوزیت نوع ۱ + لایه چوبی<br>کامپوزیت نوع ۲<br>کامپوزیت نوع ۲ + لایه چوبی | SC1<br>SC1W<br>SC2<br>SC2W | کاج      |
| کامپوزیت نوع ۱<br>کامپوزیت نوع ۱ + لایه چوبی<br>کامپوزیت نوع ۲<br>کامپوزیت نوع ۲ + لایه چوبی | HC1<br>HC1W<br>HC2<br>HC2W | صنوبر    |
| اتصال تقویت نشده (شاهد)  | S                          | کاج      |
| اتصال تقویت نشده (شاهد)  | H                          | صنوبر    |

سه‌عاملی انجام و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چنددامنه‌ای دانکن با استفاده از نرم افزار SPSS استفاده شد.

## نتایج و بحث

### مقدار بار و تنش

مقادیر میانگین بار اندازه‌گیری شده و تنش محاسباتی مربوط به نمونه‌های کاج و صنوبر به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. به‌طور کلی مشاهده شد، نمونه‌های شاهد کاج نسبت به نمونه‌های شاهد صنوبر مقاومت به تحمل بار و تنش بیشتری نشان می‌دهند. هم‌چنین کامپوزیت نوع ۲، بار و تنش بیشتری را نسبت به



شکل ۳- مقادیر میانگین نیرو و تنش برای اتصالات تقویت شده گونه کاج در مقایسه با نمونه شاهد.

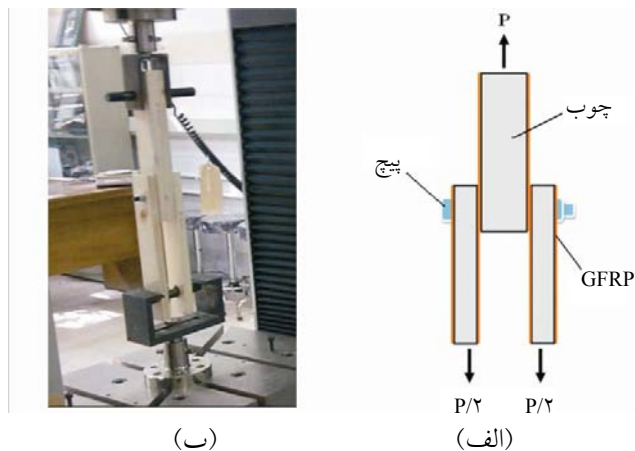
دستگاه آزمون مقاومت مکانیکی، به وسیله دریل تعبیه شد. اتصال برش دوطرفی (برش دوگانه) با استفاده از پیچ و مهره برقرار و برای تعدادی از نمونه‌ها، لایه‌ای چوبی برای تزیین و بررسی اثر وجود آن بر مقاومت اتصالات به کار گرفته شد (شکل ۲). از آن جا که مقدار سفت کردن پیچ‌ها در استحکام اتصال می‌تواند اثرگذار باشد، برای این منظور از نیرویی در حد متعارف استفاده شد.

در مجموع هشت نمونه (جدول ۲) از نمونه‌های تقویت‌شده و دو نمونه شامل نمونه‌های شاهد کاج و صنوبر منظور شد. ویژگی نمونه‌ها شامل نوع کامپوزیت، نوع ۱ (C1) و نوع ۲ (C2)، نوع گونه چوبی کاج (S)، صنوبر (H) و وجود لایه چوبی (W) یا عدم وجود آن بود. در مجموع با احتساب ۴ تکرار برای هر نمونه، ۴۰ نمونه ساخته شد.

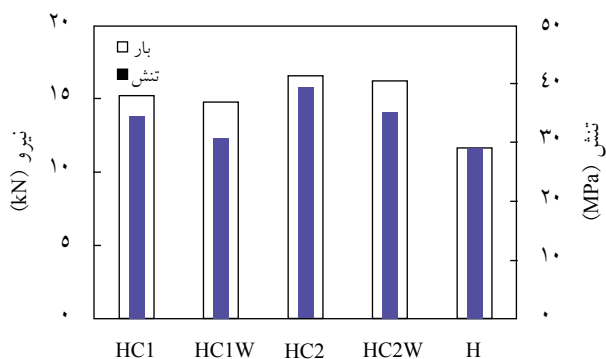
مقاومت کششی اتصالات (نیرو) با استفاده از دستگاه آزمون مکانیکی Instron (شکل ۲) و مطابق استاندارد ASTM D5652-92 اندازه‌گیری شد [۲۶]. مقدار تنش اعمال شده بر اتصالات نیز از تقسیم نیروی وارد شده بر سطحی از پیچ که درگیر اتصال است، طبق معادله (۱) محاسبه شد:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  تنش،  $P$  نیروی وارد شده (N) و  $A$  سطحی از پیچ است که نیرو به آن وارد می‌شود ( $m^2$ ). هم‌چنین در پایان آزمایش شکل شکست نمونه‌ها بررسی شد تا اثر وجود تقویت‌کننده بر رفتار کشش‌پذیری اتصالات مشخص شود. تحلیل آماری به منظور بررسی نتایج از طرح آماری کاملاً تصادفی به کمک آزمون فاکتوریل



شکل ۲- (الف) تصویر کلی از نمونه‌های تقویت‌شده و (ب) نمونه واقعی در دستگاه آزمایش.



شکل ۴- مقادیر میانگین نیرو و تنش برای اتصالات تقویت شده گونه صنوبر در مقایسه با نمونه شاهد.

شده در مقایسه با نمونه‌های تقویت نشده (شاهد) در هر یک از گونه‌های کاج و صنوبر، مشخص شد که در حالت کلی اختلاف معنی داری بین آنها وجود ندارد. بیشترین افزایش مقدار تحمل بار در نمونه SC2 بود که نسبت به نمونه‌های شاهد کاج ۳۷٪ افزایش را نشان داد.

در گونه صنوبر، نمونه‌های تقویت شده و نشده (شاهد) نیز هیچ اختلاف معنی داری در مقدار تحمل بار و تنش نشان ندادند که علت آن شاید به کم بودن مقاومت اولیه نمونه‌های کنترل و عدم قابلیت تقویت‌کننده در افزایش مقاومت اتصال مربوط باشد. نمونه HC2 با ۱۷/۴۱٪ بیشترین مقدار افزایش و نمونه HC1W کمترین مقدار

کامپوزیت نوع ۱ تحمل می‌کند و افزودن یک لایه چوب تریپنی مقدار تحمل بار و تنش را افزایش می‌دهد.

بر اساس نتایج تحلیل واریانس (جدول ۳) مشخص شد که اثر مستقل نوع گونه چوبی (G) روی مقدار تحمل بار و تنش، در سطح ۵ درصد معنی دار نیست. در مقابل، نوع صفحه کامپوزیتی (C) روی مقدار تحمل بار نمونه‌ها در سطح ۵ درصد و مقدار تنش اتصال در سطح ۱ درصد، اثر معنی دار دارد. افزون بر این نتایج نشان داد، وجود لایه چوبی (W) یا عدم وجود آن همراه با صفحه کامپوزیتی روی مقدار تحمل بار و تنش اتصالات اثر معنی داری در سطح ۵ درصد ندارد. در ارتباط با اثر متقابل متغیرها، نتایج حاکی از آن است که هیچ یک از متغیرها با متغیر دیگر روی مقدار تحمل بار و هم‌چنین تنش نمونه‌ها اثر متقابل ندارد.

اثر معنی دار فقط وجود کامپوزیت‌های پلیمری بر افزایش مقاومت، اهمیت تقویت اتصالات با این فرآورده‌ها را می‌تواند آشکار کند. نتایجی که با یافته‌های سایر پژوهشگران [۱، ۶، ۱۸] مطابقت دارد. کامپوزیت نوع ۲ (جدول ۲) کیفیت بهتری نسبت به کامپوزیت نوع ۱ دارد که در عمل نیز خواص استحکامی بیشتری را در ترکیب اتصال هنگام آزمون نشان می‌دهد. در نتیجه، استفاده از صفحات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه به اصطلاح با وزن (گرم) بیشتر (نسبت الیاف شیشه به ماده زمینه) شاید بتواند مؤثرتر باشد. با وجود افزایش مقدار تحمل بار و مقدار تنش نمونه‌های تقویت

جدول ۳- تحلیل واریانس مقدار تحمل بار و تنش نمونه‌های آزمونی.

| معنی دار بودن |        | F     |       | مجموع مربعات |         | درجه آزادی | منبع             |
|---------------|--------|-------|-------|--------------|---------|------------|------------------|
| تنش           | بار    | تنش   | بار   | تنش          | بار     |            |                  |
| ۰/۰۸۶         | ۰/۲۵۷  | ۲/۰۷۵ | ۰/۳۸۴ | ۵۲۸/۵۰۷      | ۷۲/۶۱۳  | ۷          | نمونه            |
| ۰/۶۷۴         | ۰/۶۵۶  | ۰/۱۸۲ | ۰/۲۰۳ | ۶/۶۱۷        | ۱/۵۲۴   | ۱          | گونه چوبی (G)    |
| ۲۰/۰۰۶        | ۱۰/۰۳۹ | ۸/۹۵۴ | ۴/۷۴۴ | ۳۲۵/۷۳۷      | ۵۳/۵۶۸  | ۱          | نوع کامپوزیت (C) |
| ۰/۴۲۵         | ۰/۴۹۹  | ۰/۶۶  | ۰/۴۷۲ | ۲۴/۰۰۱       | ۳/۵۳۶   | ۱          | لایه چوبی (W)    |
| ۰/۴۲۶         | ۰/۴۶۵  | ۰/۶۵۶ | ۰/۵۵۱ | ۲۳/۸۶۵       | ۴/۱۲۹   | ۱          | G×C              |
| ۰/۳۰۷         | ۰/۲۹۱  | ۱/۰۸۹ | ۱/۱۶۴ | ۳۹/۵۹۹       | ۸/۷۲۷   | ۱          | G×W              |
| ۰/۲۱۶         | ۰/۲۷۸  | ۱/۶۱۵ | ۱/۲۳۲ | ۵۸/۷۶۸       | ۹/۲۴    | ۱          | C×W              |
| ۰/۲۵۳         | ۰/۲۶۲  | ۱/۳۷۲ | ۱/۳۱۹ | ۴۹/۹۱۹       | ۹/۸۸۹   | ۱          | G×C×W            |
| -             | -      | -     | -     | ۸۷۳/۱۰۹      | ۱۷۹/۹۳۳ | ۲۴         | خطا              |
| -             | -      | ۲/۰۷۵ | -     | ۱۴۰۱/۶۱۶     | ۲۵۲/۵۴۵ | ۳۱         | کل               |

(۱) معنی دار در سطح ۵٪، (۲) معنی دار در سطح ۱٪.



(ب)



(الف)

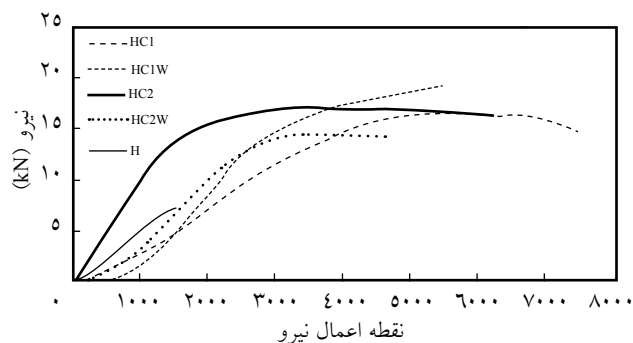
شکل ۵- شکل شکست اتصالات در نمونه‌ها: (الف) شاهد و (ب) تقویت شده.

نتیجه، اتصال شکسته نشد که هدف اصلی تقویت یک اتصال چوبی و افزایش ایمنی سازه را تأمین می‌کند.

شکل‌های ۶ و ۷ روند تغییرات نیروی اعمال شده و افزایش رفتار کشش‌پذیری اتصالات تقویت شده را به ترتیب در نمونه‌های کاج و صنوبر نشان می‌دهد. افزایش لهیدگی در اتصالات تقویت شده به طور منطقی به افزایش رفتار کشش‌پذیری اتصالات تقویت شده با GFRP مربوط می‌شود. این موضوع در یافته‌های پیشین پژوهشگران [۱،۵،۶،۱۸] نیز گزارش شده است.

### نتیجه‌گیری

در مجموع ۳۲ نمونه تقویت شده ساخته شد که در همه آنها از یک لایه تقویتی کامپوزیت (الیاف شیشه) استفاده شد. در ۱۶ نمونه افزون بر لایه کامپوزیت، یک لایه چوبی تزئینی نیز پوشش داده شد. میانگین مقدار بار در هر ۳۲ نمونه تقویت شده افزایش یافت که این مقدار

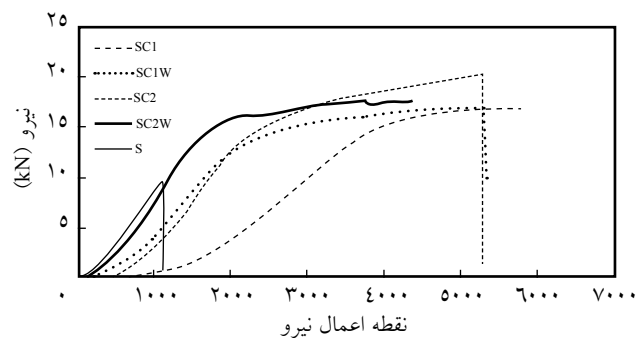


شکل ۷- روند تغییرات نیروی اعمال شده در اتصالات تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد در گونه صنوبر.

افزایش در تحمل بار را نسبت به نمونه‌های شاهد داشتند. در حالت کلی، شاید بتوان عدم افزایش معنی‌داری مقادیر مقاومتی نمونه‌های تقویت شده را به کم بودن تعداد نمونه‌های آماری، عدم جور بودن دقیق نمونه‌های آزمونی اولیه، عدم اتصال دقیق بین چسب و کم بودن تعداد لایه‌های کامپوزیتی مرتبط دانست.

### شکل شکست

بررسی شکل‌های شکست اتصالات نشان می‌دهد، اگرچه در حالت کلی تقویت اتصالات اثر معنی‌دار آماری نداشته است، ولی روی شکل شکست اتصال کاملاً اثرگذار بوده است. نمونه‌های تقویت شده هنگام بارگذاری شکسته نمی‌شوند و توقف نیروی بارگذاری دستگاه به علت شکسته شدن یا ایجاد ترک در اتصال نیست و تنها کمی لهیدگی در محل پیچ ایجاد می‌شود. شکل ۵ یک نمونه تقویت شده را نشان می‌دهد که پس از اعمال نیرو شکل اصلی اتصال تغییر نکرده است. به طور متوسط در ۷۲٪ نمونه‌ها، پیچ فقط ۱-۳ cm در راستای نیرو تغییر مکان داد که این امر باعث لهیدگی در محل اتصال شد. در



شکل ۶- روند تغییرات نیروی اعمال شده در اتصالات تقویت شده در مقایسه با نمونه‌های شاهد در گونه کاج.

شده با الیاف شیشه با وزن (گرم) بیشتر (نسبت الیاف شیشه به ماده زمینه) می‌تواند مؤثرتر باشد.

استفاده از الیاف شیشه برای تقویت یک اتصال چوبی در شکل شکست اتصال مؤثر است. شکست به شکل ترک‌های عمیق و ناگهانی اتفاق نمی‌افتد. پیچ تنها در محل خود به اندازه قطر پیچ یا کمی بیشتر جا به جا می‌شود و عضو چوبی نیز دچار لهیدگی می‌شود. این موضوع به رفع بزرگ‌ترین مشکل سازه‌های چوبی در ارتباط با افزایش تحمل بار و نیز افزایش ایمنی کمک شایانی می‌کند.

برای کاج ۲۴٪ و برای صنوبر ۳۴٪ نسبت به نمونه شاهد بوده است. میانگین مقدار تنش نیز افزایش یافت که برای اتصالات تقویت شده کاج ۱۰/۷٪ و صنوبر ۲۰/۵٪ نسبت به شاهد بوده است.

تحلیل واریانس نتایج نشان داد، تنها تغییر نوع کامپوزیت پلیمری اثر معنی‌داری بر افزایش مقاومت داشته است. به طوری که کامپوزیت نوع ۲، که کیفیت بیشتری نسبت به کامپوزیت نوع ۱ دارد (جدول ۲)، در عمل نیز خواص استحکامی بیشتری را در ترکیب اتصال هنگام آزمون نشان داد. در نتیجه استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت

## مراجع

- Soltis A.L., Ross R.J., and Windorski D.F., Fiberglass-Reinforced Bolted Wood Connection, *Forest Product. J.*, **48**, 63-67, 1998.
- Alam P., Ansell M.P., and Smedley D., Mechanical Repair of Timber Beams Fractured in Flexure Using Bonded-in Reinforcements, *Composites, Part B: Eng.* **40**, 95-106, 2009.
- Varasteh-Poor H., Application of Advanced Composites in Constructions, Ministry of Energy, Iran, 87, 2008.
- Rowlands R.E., Van Deweghe R.P., Laufenberg T.L., and Krueger G.P., Fiber-Reinforced Wood Composites, *Wood Fiber Sci.*, **18**, 39-57, 1986.
- Hernandez R., Davalos J.F., Sonti S.S., Kim Y., and Moody R.C., Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams, Research Paper, FPL-RP-554, Forest Products Laboratory, 28, 1997.
- Lopez-Anido R. and Xu H., Structural Characterization of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Glulam Panels for Bridge Decks, *J. Compos. Construct.*, **6**, 194-203, 2002.
- Humphreys M.F. and Francey K.L., An Investigation into the Rehabilitation of Timber Structures with Fibre Composite Materials, Conference Paper, Developments in Mechanics of Structure and Materials, Queensland University of Technology, Australia, 2004.
- Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Barreto A.M.J.P., Moraes J.J.L., and Domingues J.J.M.S., Experimental and Numerical Evaluation of Composite Repairs on Wood Beams Damaged by Cross-graining, *Construct. Build. Mater.* **24**, 531-537, 2010.
- Corradi M. and Borri A., Fir and Chestnut Timber Beams Reinforced with GFRP Pultruded Elements, *Composites, Part B: Eng.*, **38**, 172-181, 2007.
- Corradi M., Speranzini E., Borri A., and Vignoli A., In-Plane Shear Reinforcement of Wood Beam Floors with FRP, *Composites, Part B: Eng.*, **37**, 310-319, 2006.
- Qiao P., Davalos J.F., and Zipfel M.G., Modeling and Optimal Design of Composite-Reinforced Wood Railroad Crosstie, *Compos. Struct.*, **41**, 87-96, 1998.
- Lopresti J., Fiberglass Wrapped Tie Performance Evaluation Report., Technical Report, Office and Research and Development, Transportation Technology Center Federal Railroad Administration, Washington, DC, 2005.
- Akbiyik A., Lamanna A.J., and Hale W.M., Feasibility Investigation of the Shear Repair of Timber Stringers with Horizontal Splits, *Construct. Buil. Mater.*, **21**, 991-1000, 2007.
- Heiduschke A., Radial Reinforcement of Curved Glue Laminated Wood Beams with Composite Materials, *Forest Product. J.*, **54**, 74-79, 2004.
- Madhoushi M. and Ansell M.P., Experimental Study of Static and Fatigue Strengths of Pultruded GFRP Rods Bonded into LVL and Glulam, *Int. J. Adh. Adh.*, **24**, 319-325, 2004.
- Madhoushi M. and Ansell M.P., Behaviour of Timber Connections Using Glued-in GFRP Rods under Fatigue Loading, Part I: In-line Beam to Beam Connections, *Composites, Part B: Eng.*, **39**, 243-248, 2008.
- Madhoushi M. and Ansell M.P., Behaviour of Timber Connections Using Glued-in GFRP Rods under Fatigue Loading, Part II: Moment-Resisting Connections, *Composites, Part B: Eng.*, **39**, 249-257, 2008.
- Chen C.J., Lee T.L., and Jeng D.S., Finite Element Modeling for



- the Mechanical Behavior of Dowel-Type Timber Joints, *Comput. Struct.*, **81**, 2731-2738, 2003.
19. Haller P., Birk T., Offermann P., and Cebulla H., Fully Fashioned Biaxial Weft Knitted and Stitch Bonded Textile Reinforcements for Wood Connection, *Composites, Part B: Eng.*, **37**, 278-285, 2006.
20. Beheshty M.H. and Rezaoust A.M., *Reinforced Plastic Composites*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, 447, 2005.
21. Raftery G.M., Harte A.M., and Rodd P.D., Bonding of FRP Materials to Wood Using Thin Epoxy Gluelines, *Int. J. Adh. Adh.*, **29**, 580-588, 2009.
22. Raftery G.M. and Harte A.M., Low-grade Glued Laminated Timber Reinforced with FRP Plate, *Composites, Part B: Eng.*, **42**, 724-735, 2011.
23. Kaw A.K., *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis, Florida, 457, 2009.
24. Lijuan L., Guo Y., and Liu F., Test Analysis for FRC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Sheets, *Construct. Build. Mater.*, **22**, 315-323, 2008.
25. Custodio J., Broughton J., and Cruz H., A Review of Factors Influencing the Durability of Structural Bonded Timber Joints, *Int. J. Adh. Adh.*, **29**, 173-185, 2009.
26. Standard Test Method for Bolted Connection in Wood and Wood-Based Products, Annual Book of ASTM Standard, **04**, D5652-95, 2007.