

# ارزیابی تجربی مشخصات مکانیکی پروفیل‌های کامپوزیتی و بررسی عملکرد اتصال‌های تیر به ستون

علیرضا رهایی (استاد)

مهدی رفیع‌زاده (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

محمد قاجار\* (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (۱۰-۳-۲)  
دوری ۲- ۳۵، شماره ۴/۲، ص. ۱۰-۳

در پژوهش حاضر، با انجام ۳ آزمایش اتصال تیر به ستون، عملکرد اتصال‌های مصالح کامپوزیتی FRP بررسی شده است. اتصال‌هایی که در پژوهش حاضر استفاده شده‌اند، از نوع: پیچی، پیچی تقویت شده و چسبی بوده‌اند. اتصال پیچی تقویت شده با استفاده از اعضای تیر و ستون ساخته و به عنوان ایده‌ی نو مطرح و مطالعه شدند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که اتصال چسبی از نظر ظرفیت باربری و سختی اولیه‌ی اتصال، عملکرد بسیار بهتری نسبت به اتصال پیچی دارد، به طوری که ظرفیت باربری و سختی اولیه‌ی اتصال چسبی به ترتیب ۲ و ۵ برابر اتصال پیچی بوده است. اتصال پیچی، به تنهایی عملکرد مناسبی ندارد و برای بالابردن عملکرد مکانیکی آن باید از برخی تقویت‌کننده‌ها استفاده شود. اتصال پیچی تقویت شده، ظرفیت باربری و سختی اولیه‌ی برابر با اتصال چسبی و تقریباً نصف اتصال چسبی، سختی دورانی دارد. تغییر مکان کم در اتصال چسبی، شکستگی ترد در اتصال ایجاد می‌کند.

واژگان کلیدی: پروفیل‌های کامپوزیتی FRP، لیاف، رزین، اتصال‌های پیچی، اتصال‌های چسبی.

## ۱. مقدمه

مصالح کامپوزیتی از دو قسمت تشکیل شده‌اند: لیاف که وظیفه‌ی تحمل بار را دارند و رزین پلیمری که بیشتر نقش توزیع بار و نگه‌داری لیاف در کنار یکدیگر را بر عهده دارد. خواص کامپوزیت FRP بستگی زیادی به جهت لیاف آن‌ها دارند. لیاف‌های مورد استفاده معمولاً از جنس: شیشه، کربن، آرامید و بازالت هستند،<sup>[۱]</sup> و به طور عمده ۳ نوع رزین: پلی‌استر<sup>۱</sup> وینیل‌استر<sup>۲</sup> و اپوکسی<sup>۳</sup> در مصالح کامپوزیتی FRP به کار می‌رود. رزین اپوکسی بیشترین مقاومت کششی را به خود اختصاص داده است و پس از آن وینیل‌استر در مرحله‌ی دوم از نظر مقاومت کششی قرار دارد.<sup>[۲]</sup>

## ۲. تاریخچه‌ی اتصال‌های مصالح کامپوزیتی

بنک<sup>۴</sup> و همکارانش در سال‌های ۱۹۹۰-۱۹۹۶، اولین آزمایش خود را بر روی اتصال پیچی تیر به ستون متشکل از پروفیل‌های کامپوزیتی انجام دادند تا پاسخ ممان -

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۱۵، پذیرش ۱۳۹۷/۳/۹

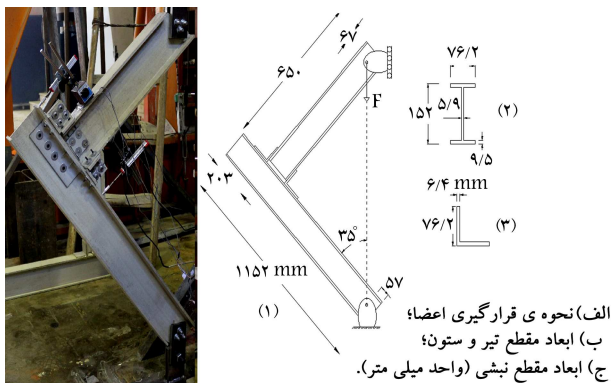
DOI:10.24200/J30.2018.5481.2255

rahai@aut.ac.ir  
mehdi@aut.ac.ir  
mghpioneer@aut.ac.ir

دوران‌های  $(M - \varphi)$  مختلف را به دست آوردند و عملکرد اتصال را از نظر صلبیت بررسی کردند. مترم و زنگ<sup>۵</sup> نیز در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۹، آزمایش‌های دیگری برای اتصال پیچی تیر به ستون انجام دادند و مشاهده کردند که عضو ضعیف، نبشی فوقانی است و لذا پیشنهاد دادند که یک قطعه‌ی تقویتی L شکل در نبشی فوقانی قرار دهند تا ضعف ایجاد شده برطرف شود. در آزمایش‌های دیگر مترم مشاهده شده است که افزایش پیچ‌ها، تأثیری در میزان صلبیت اتصال ایجاد نمی‌کنند؛ اما اگر علاوه بر پیچ، از چسب نیز استفاده شود، صلبیت اتصال به میزان زیادی افزایش می‌یابد. در زمینه‌ی اتصال‌های پیچی، مهم‌ترین کار را تروی و کوپر<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۶ و تروی در سال ۲۰۰۰ انجام داده‌اند. در اولین سری آزمایش‌ها، سختی اولیه‌ی اتصال‌ها را تعیین کردند و به این نتیجه رسیدند اتصال‌هایی که نبشی ضخیم‌تری دارند، سختی اولیه‌شان بیشتر است. در دومین سری آزمایش‌ها، از نبشی فلزی ضدزنگ استفاده شد که در اطراف سوراخ پیچ‌ها، هیچ نشانه‌ی از تسلیم‌شدگی مشاهده نکردند، اما در خمیدگی پایین نبشی، تسلیم شدن را مشاهده کردند. مسلم<sup>۷</sup> در سال ۲۰۱۱، آزمایش‌هایی روی اتصال تیر به ستون ارائه داد که شامل استخراج منحنی ممان - دوران  $(M - \varphi)$  اتصال، نمایش روند شکست و ویژگی‌های مودهای شکست بوده

جدول ۱. نتایج آزمایش مشخصات مکانیکی مصالح FRP.

مصالح FRP	$E_1 (GPa)$	$E_2 (GPa)$	$G_{12} (GPa)$	$\nu_{12}$
GFRP	۱۸,۷۵	۶,۱۹	۵,۲۲	۰,۲۸۶



شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری اعضاء تیر، ستون، تکیه‌گاه‌ها.

ASTM<sup>۱۱</sup> استفاده شده است. از آزمایش مذکور می‌توان برای یافتن مدول کشسانی در جهت الیاف ( $E_1$ ) و عمود بر جهت الیاف ( $E_2$ )، مدول برشی ( $G_{12}$ )، ضریب پواسون ( $\nu$ ) و مقاومت کششی اجسام نیز استفاده کرد. در پروفیل‌های کامپوزیتی FRP به علت غیرهمسانگرد بودن، باید برای سه جهت طولی، عرضی و ارتفاعی مشخصات مکانیکی تعیین شوند. در نوشتار حاضر، مصالح کامپوزیتی استفاده شده از ترکیب الیاف شیشه و رزین پلی‌استر است. آزمایش‌های مشخصات مکانیکی کامپوزیت براساس استانداردهای ASTM D638<sup>[۷]</sup> (برای کششی) و ASTM-D3518<sup>[۸]</sup> (برای برش) انجام شده‌اند. شکل نمونه‌ها، دمبلی بوده و برای بریدن نمونه‌های دمبلی‌شکل از دستگاه برش و اترجت<sup>۱۲</sup> استفاده شده است. سپس هر سه نمونه، تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. از شیب قسمت خطی منحنی‌های تنش - کرنش، مقادیر مدول کشسانی  $E$  و مدول برشی  $G$  به دست آمده و همچنین برای تعیین ضریب پواسون از دو کرنش‌سنج در جهت طولی و عرضی استفاده شده است. مقدار ضریب پواسون از تقسیم کرنش عرضی بر کرنش طولی به دست آمده است (جدول ۱).

## ۵. اتصال تیر به ستون در مصالح کامپوزیتی

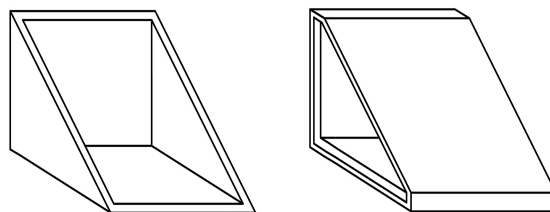
در برنامه‌ی پژوهشی، اتصال تیر به ستون در دو حالت پیچی و چسبی بررسی شده است. علاوه بر این، یک اتصال تقویت شده نیز بررسی شده است.

### ۱.۵. مشخصات هندسی آزمایش

نحوه‌ی قرارگیری اعضاء تیر، ستون، تکیه‌گاه‌ها و ... مطابق شکل ۳ و امتداد بار به صورت قطری بوده است. ابعاد هندسی و نحوه‌ی قرارگیری اعضا در شکل مذکور ارائه شده است.

### ۲.۵. مشخصات اتصال

در برنامه‌ی پژوهشی، سه نوع اتصال برای انجام آزمایش مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است که دو اتصال پیچی (معمولی و تقویت شده) و یک اتصال چسبی هستند.



شکل ۱. نبشی‌های تقویت شده توسط بنک و مسلّم.<sup>[۶]</sup>



شکل ۲. نبشی‌های تقویت شده‌ی مورد بررسی.

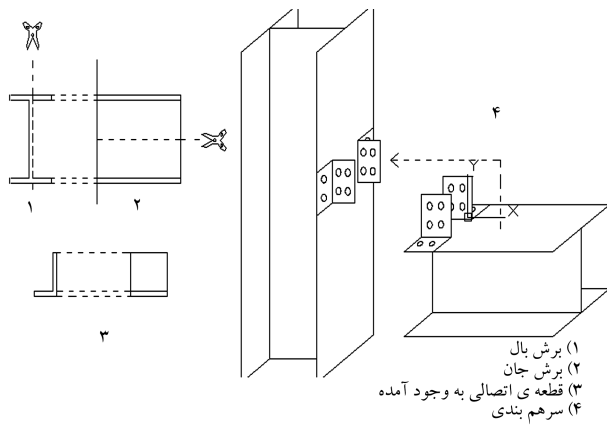
است. کورشی<sup>۸</sup> و مترم نیز در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، نشان دادند که افزایش ظرفیت جابه‌جایی می‌تواند موجب سر خوردن در فضای خالی سوراخ پیچ شود.<sup>[۳]</sup> همچنین در مورد اتصال‌های چسبی، آسشیون<sup>۹</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۶، با انجام آزمایش‌هایی روی اتصال تیر به ستون با چسب نشان دادند که اتصال‌های چسبی نیز مقاومتی یکسان با اتصال‌های متناظر پیچی دارند و استفاده از آن‌ها در طراحی‌ها باید گسترش یابد.<sup>[۴]</sup> در سال ۲۰۱۷، نیز دیوید مارتینز<sup>۱۰</sup> و همکاران، آزمایشی را بر روی اتصال پیچی تیر به ستون با مقطع قوطی‌شکل انجام داده‌اند که در آن قطعه‌ی اتصالی، قطعه‌ی فازی مستطیل‌شکل بوده است و نشان دادند که تعداد ردیف‌های پیچ در سختی اتصال و فاصله‌ی پیچ تا لبه‌ی قطعه در مقاومت اتصال اثرگذار است.<sup>[۵]</sup>

## ۳. برنامه‌ی مطالعات آزمایشگاهی

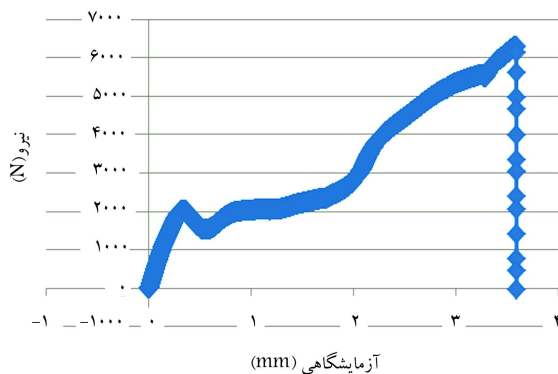
نبشی اتصال در سیستم‌های سازه‌ی، نقش مهمی در سختی اتصال تیر به ستون ایفا می‌کند. برای افزایش سختی اتصال، بنک و مسلّم و ... از نبشی‌های تقویت شده‌ی مطابق شکل ۱ استفاده کرده‌اند که تولید آن‌ها دشوار و با محدودیت روبرو بوده است. بر همین اساس در پژوهش حاضر، از روش ساده‌تری برای ایجاد اتصال تقویت شده استفاده شده است. در این ارتباط می‌توان از نبشی یا از پروفیل‌های I شکل تیر و ستون استفاده کرد. در پژوهش حاضر، از پروفیل‌های I شکل تیر و ستون استفاده شده است، به طوری که با ایجاد چند برش در پروفیل I شکل، پروفیلی همانند نبشی تولید شود و در نهایت، پروفیل‌های مذکور به گونه‌ی کنار یکدیگر قرار گرفتند تا اتصالی تقویت شده به وجود آید (شکل ۲).

## ۴. مشخصات مکانیکی مصالح کامپوزیتی

برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح از آزمایش کشش، مطابق آیین‌نامه‌ی



شکل ۶. مراحل ایجاد اتصال تقویتی.



شکل ۷. منحنی بار جابه‌جایی اتصالات چسبی با استفاده از سشوار.

و بخاری برقی استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش کششی اتصالات چسبی قطعات کامپوزیتی که با سشوار عمل‌آوری شده‌اند، در شکل ۷ مشاهده می‌شود. در حالت عمل‌آوری در دمای معمولی، بیشینه‌ی تنش برشی چسب اپوکسی مورد بررسی برابر  $12 \text{ MPa}$  بوده و در حالت عمل‌آوری با سشوار، مقدار بیشینه‌ی تنش برشی به  $25 \text{ MPa}$  رسیده است.

### ۳.۵. ابزار اندازه‌گیری آزمایش

در آزمایش‌های انجام شده، سختی قاب، سختی دورانی اتصال و بیشینه‌ی ظرفیت باربری قاب بررسی شده است. برای اندازه‌گیری سختی قاب، شیب بار وارده‌ی  $F$  به جابه‌جایی ایجاد شده ( $\Delta$ ) محاسبه شده است (رابطه‌ی ۱). برای یافتن جابه‌جایی ایجاد شده می‌توان از جابه‌جایی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه سروست<sup>۱۳</sup> و یا از یک LVDT<sup>۱۴</sup> زیر محل وارد شدن بار استفاده کرد (شکل ۸).

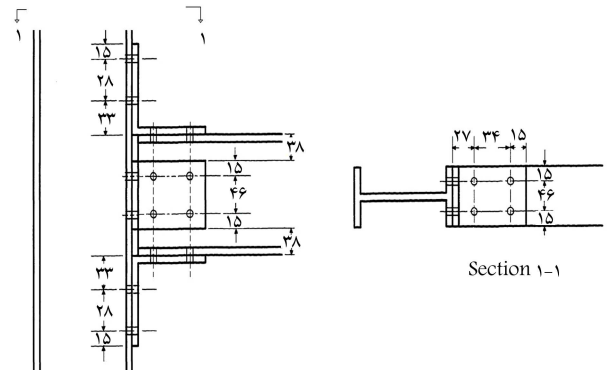
$$K_{Frame} = \frac{F}{\Delta} \quad (1)$$

سختی دورانی اتصال و میزان دوران آن، از طریق ۲ عدد LVDT (شکل ۹ الف) دوران تیر از طریق ۶ عدد کرنش‌سنج مخصوص کامپوزیت الیاف شیشه‌ی ۳ عدد روی بال بالایی و (۳ عدد در بال پایینی تیر)، اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۹ ب). میزان دوران و سختی دورانی اتصال با توجه به شکل ۱۰، از روابط ۲ الی ۴ تعیین شده است:

$$\theta = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{d} \quad (2)$$



شکل ۴. انواع اتصال.



شکل ۵. فواصل بین پیچ‌ها (واحد میلی‌متر).

یکی از مشکلات موجود در ناحیه‌ی اتصال، جدشدگی بال ستون از جان ستون در محل وارد شدن بار کششی (نبشی فوقانی) است. در آزمایش‌های انجام شده، یک نبشی در محل تقاطع بال و جان ستون در نزدیک نبشی فوقانی قرار گرفته است. در اتصالات پیچی در مصالح کامپوزیتی FRP، محل قرارگیری پیچ‌ها، اهمیت بالایی دارد. در شکل ۵، محل قرارگیری پیچ‌ها مشاهده می‌شود.

### ۱.۲.۵. اتصال پیچی نبشی معمولی

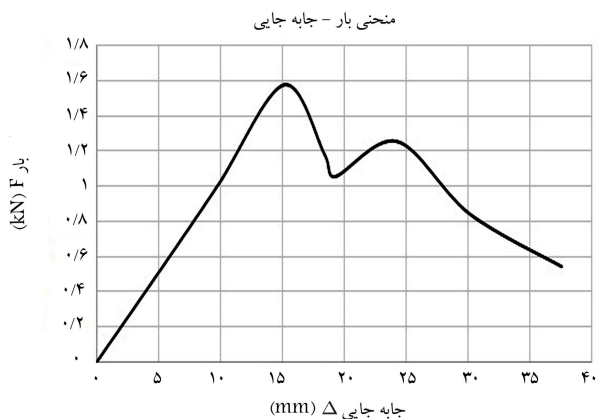
اتصال پیچی نبشی معمولی، از ساده‌ترین نوع اتصال تیر به ستون به حساب می‌آید، که در آن از نبشی پالترونی برای اتصال تیر به ستون استفاده شده است. پیچ‌های به کار رفته در اتصال‌ها از نوع پیچ‌های پرمقاوم خشک هستند. واشرهای استفاده شده در اتصالات پیچی، بزرگ انتخاب شده‌اند تا در اثر سفت کردن پیچ‌ها، آسیبی به کامپوزیت وارد نشود و سطح درگیری بیشتری در محل اتصال ایجاد شود.

### ۲.۲.۵. اتصال پیچی تقویت شده

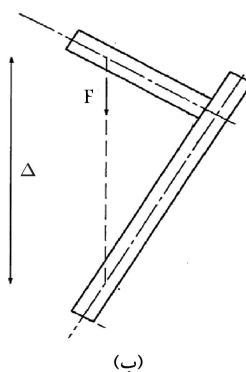
در شکل ۶، نحوه‌ی ایجاد اتصال پیچی تقویت شده مشاهده می‌شود که در آن دو قطعه‌ی L شکل به تیر و دو قطعه به ستون متصل شده‌اند و پس از سرهم‌بندی، ۴ قطعه‌ی L شکل به یکدیگر متصل و همانند یک لچکی باعث تقویت اتصال شده‌اند.

### ۳.۲.۵. اتصال نبشی با چسب

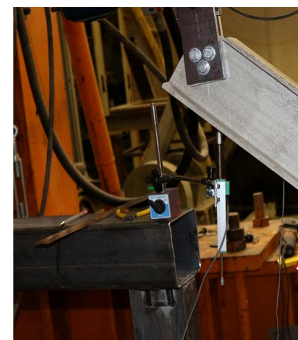
تعیین نوع چسب در اتصال چسبی پروفیل‌های کامپوزیتی FRP، اهمیت بالایی دارد. پس از بررسی و آزمایش بر روی رزین‌های پلی‌استر و اپوکسی مشاهده شد که چسب اپوکسی، مشخصات مقاومتی بالاتری نسبت به رزین پلی‌استر دارد و بنابراین برای اتصال چسبی، از رزین اپوکسی استفاده شده است. براساس ویژگی‌های رزین اپوکسی، با افزایش دمای چسب در هنگام عمل‌آوری، مقاومت برشی آن فزونی می‌یابد. به همین منظور برای افزایش دمای چسب هنگام عمل‌آوری از سشوار صنعتی



شکل ۱۱. منحنی بار جابه جایی اتصال پیچی.



(ب)



(الف)

شکل ۸. الف) قرارگیری LVDT زیر بار و ب) موقعیت بار و جابه جایی.

#### ۱.۴.۵. اتصال نبشی با پیچ

در اتصال نبشی با پیچ، با اعمال بارگذاری استاتیکی و ایجاد جابه جایی در تیر، اولین ترک در نبشی فوقانی ایجاد شده است. با افزایش جابه جایی، ترک در نبشی فوقانی گسترش یافته و با ادامه روند افزایش جابه جایی، نبشی فوقانی و نبشی جان از محل اولیه خود بلند شده و نبشی فوقانی از محلی که به ستون پیچ شده است، ترک خورده است. در نهایت، با افزایش جابه جایی تیر، ترکها افزایش یافته اند؛ به طوری که در نبشی فوقانی، کاملاً گسیختگی کششی اتفاق افتاده و نبشی جان نیز در حالت گسیختگی کششی قرار گرفته است. پس از گسیختگی در نبشی فوقانی و نبشی جان، آزمایش متوقف شده است. علت شکست در نبشیها، عمود بودن راستای بار بر راستای الیاف است، زیرا کامپوزیتها در جهت الیاف، بیشترین ظرفیت تحمل بار و در جهت عمود بر الیاف، ظرفیت بار محدودی دارند. در ادامه، میزان ظرفیت باربری و دورانی اتصال بررسی شده است.

#### • منحنی بار - جابه جایی و ممان - دوران

منحنیهای بارزش شدهی بار - جابه جایی و ممان - دوران برای اتصال نبشی با پیچ، در شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شوند. مطابق منحنیهای ارائه شده، اتصال در بار ۱/۶ کیلونیوتن به بیشینهی مقاومت خود رسیده و سپس نبشی فوقانی، مقاومت خود را از دست داده و پس از اندکی جابه جایی، نبشی جان و نبشی نشیمن از خود مقاومت نشان داده و در محدودهی بار ۱/۲ کیلونیوتن، نبشی جان نیز گسیخته شده و مقاومت اتصال به تدریج کاهش یافته است.

در اتصال نبشی با پیچ، سختی اولیهی قاب مطابق رابطهی ۵ تعیین می شود:

$$K_{frame} \frac{F}{\Delta} = 103 (KN/m) \quad (5)$$

و همچنین سختی دورانی اولیهی اتصال مطابق رابطهی ۶ تعیین می شود:

$$K_{\theta} = \frac{M}{\theta} = 17.5 (KN.m/rad) \quad (6)$$

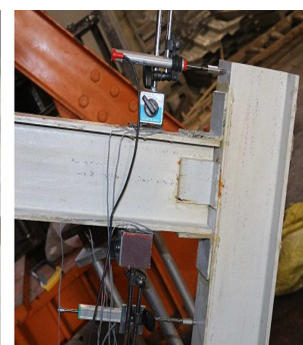
در شکل ۱۳، تصویری از شکست در اتصال پیچی بدون تقویت نشان داده شده است.

#### ۲.۴.۵. اتصال تقویت شدهی پیچی

در اتصال تقویت شدهی پیچی با اعمال بارگذاری استاتیکی، اولین ترک خوردگی در اتصال فوقانی ایجاد شده و با افزایش جابه جایی تیر، ترکها گسترش پیدا کرده و

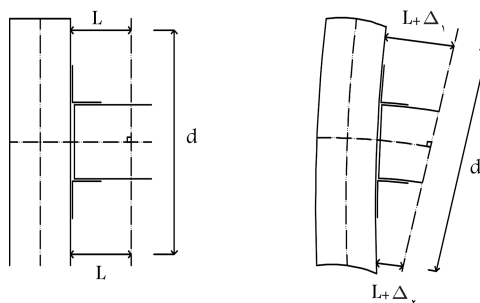


(ب)



(الف)

شکل ۹. الف) قرارگیری LVDT برای تعیین سختی دوران و ب) قرارگیری کرنش سنج در بال بالایی تیر.



شکل ۱۰. محاسبهی دوران در محل اتصال. [۹]

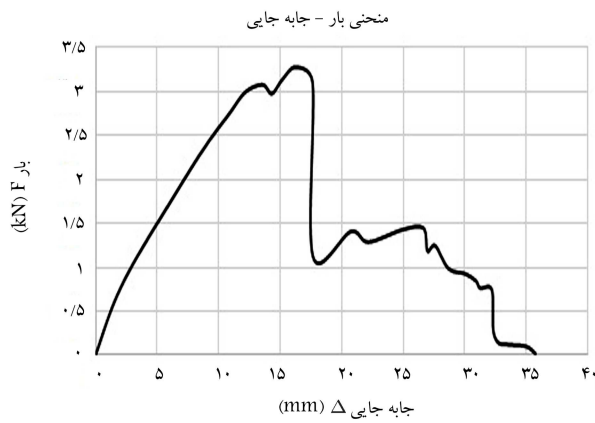
$$k_{\theta} = \frac{M}{\theta} (kN.m/rad) \quad (3)$$

$$M = F \times h (KN.m) \quad (4)$$

که در آنها،  $\Delta_1$  و  $\Delta_2$  تغییرمکان در بالا و پایین تیر،  $d$  فاصلهی بین دوسر LVDT یا کرنش سنجها،  $M$  ممان خمشی در ناحیهی اتصال و  $h$  فاصلهی افقی از نیروی واردهی  $F$  تا محل اتصال هستند.

#### ۴.۵. ارزیابی نتایج

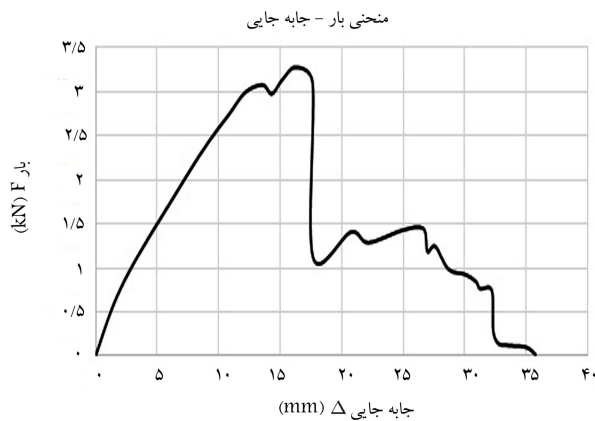
پس از نصب تمامی اعضا، با استفاده از دستگاه سروتست بارگذاری استاتیکی با سرعت  $2.78 \text{ mm/min}$  اعمال شد. شرایط آزمایش برای هر ۳ اتصال، یکسان و نتایج آزمایش به طور مجزا برای هر اتصال به این شرح بوده است:



شکل ۱۴. منحنی بار- جابه‌جایی اتصال تقویت شده پیچی.



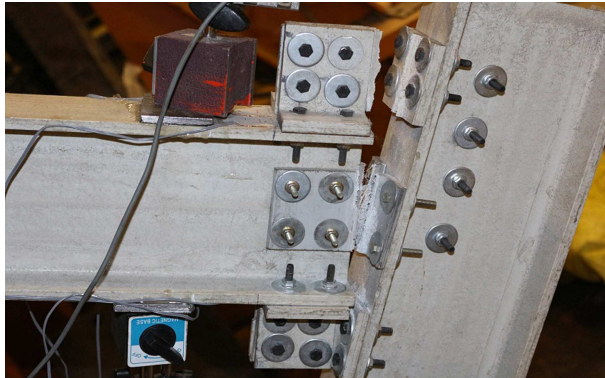
شکل ۱۲. منحنی ممان - دوران اتصال پیچی.



شکل ۱۵. منحنی ممان - دوران اتصال تقویت شده پیچی.



شکل ۱۳. لحظه‌ی شکست اتصال پیچی.



شکل ۱۶. لحظه‌ی شکست در اتصال پیچی تقویت شده.

در نهایت، در نبشی فوقانی گسیختگی کششی رخ داده است. پس از گسیختگی ایجاد شده، نبشی جان نقش تحمل دوران را بر عهده گرفته است که پس از افزایش جابه‌جایی تیر، در نبشی جان نیز گسیختگی کششی رخ داده است. این روند ادامه یافته و در نهایت نبشی نشیمن تحت بارهای وارده گسیختگی شده است. علت شکست در آزمایش اخیر، هم‌راستا نبودن جهت بار و جهت الیاف در نبشی اتصال بوده است.

• منحنی بار- جابه‌جایی و ممان - دوران

منحنی‌های بارزش شده‌ی بار جابه‌جایی و ممان - دوران اتصال پیچی تقویت شده مطابق شکل‌های ۱۴ و ۱۵ است.

مطابق منحنی‌های اخیر، اتصال در بار ۳٫۳ کیلونیوتن به بیشینه‌ی مقاومت خود رسیده و سپس نبشی فوقانی، مقاومت خود را از دست داده و پس از اندکی جابه‌جایی، نبشی جان و نبشی نشیمن از خود مقاومت نشان داده و در محدوده‌ی بار ۱٫۵ کیلونیوتن نبشی جان نیز گسیخته شده و مقاومت اتصال به تدریج کاهش یافته است. در اتصال تقویت شده‌ی پیچی ذکر شده، سختی قاب و سختی دوران اولیه‌ی اتصال به ترتیب مطابق روابط ۷ و ۸ تعیین شده است:

$$K_{frame} = \frac{F}{\Delta} = 502 (KN/m) \quad (7)$$

$$K_{\theta} = \frac{M}{\theta} = 11,45 (KN.m/rad) \quad (8)$$

در شکل ۱۶، تصویری از لحظه‌ی شکست در اتصال تقویت شده‌ی پیچی مشاهده می‌شود.

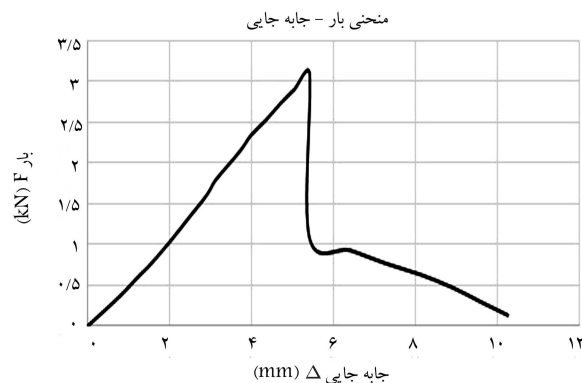
۳.۴.۵. اتصال نبشی با چسب

در اتصال نبشی با چسب، با اعمال بارگذاری استاتیکی، چسب اتصال در نبشی فوقانی، لایه‌یی از ستون را جدا کرده و از همان قسمت جدایی آغاز شده است. با افزایش جابه‌جایی تیر، جدایی چسب افزایش یافته و چسب اتصالی در نبشی جان نیز به تدریج شروع به جدا شدن از ستون کرده است. با ادامه‌ی روند افزایش جابه‌جایی، نبشی فوقانی و جان از ستون جدا شده‌اند. در اتصال نبشی با چسب، به علت درگیر شدن کل سطح نبشی و تماس کامل نبشی با تیر و ستون، به نبشی آسیب جدی وارد نشده است. به علت ضعیف بودن رزین به‌کار رفته در بین لایه‌های مصالح ستون، لایه‌یی از سطح ستون همراه با چسب اتصال از بدنه‌ی ستون جدا

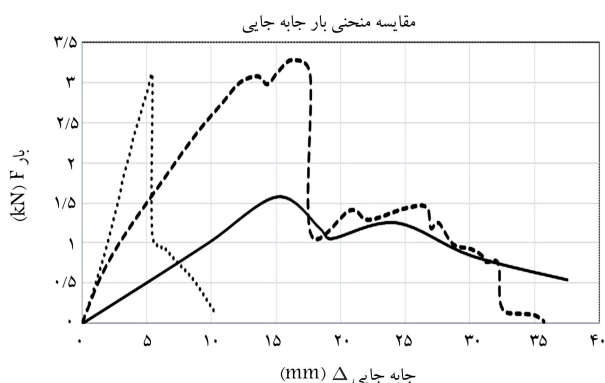




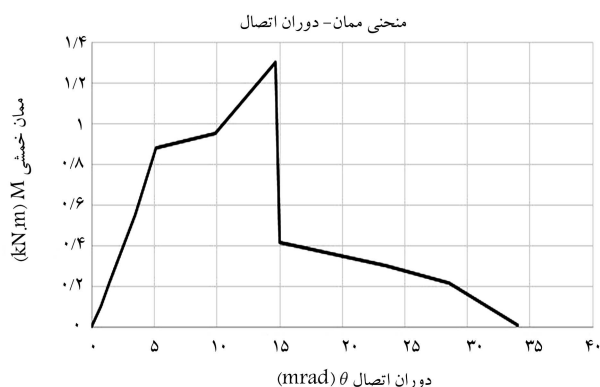
شکل ۱۹. لحظه‌ی شکست در اتصال چسبی.



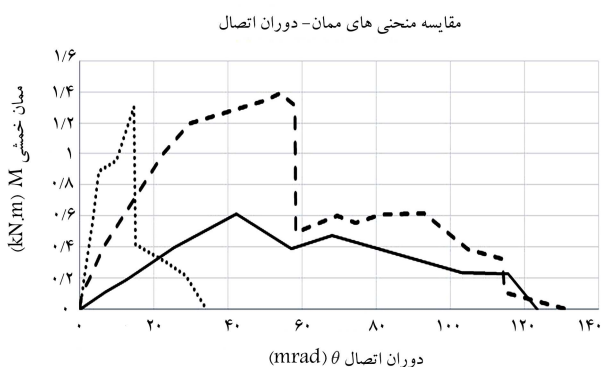
شکل ۱۷. منحنی بار جابه‌جایی اتصال چسبی.



شکل ۲۰. مقایسه‌ی منحنی‌های بار جابه‌جایی. اتصال نشی چسبی ..... اتصال تقویت شده پیچی --- آزمایش نشی پیچی —



شکل ۱۸. منحنی ممان - دوران اتصال چسبی.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی منحنی‌های ممان - دوران اتصال. اتصال نشی چسبی ..... اتصال تقویت شده پیچی --- اتصال نشی پیچی —

شده است. بنابراین اگر رزینی قوی‌تر از رزین پلی‌استر در بین لایه‌های الیاف ستون استفاده شده بود، چسبندگی بین لایه‌ها در ستون افزایش یافته و اتصال تحت بارهای بیشتری گسیخته شده بود.

#### • منحنی بار - جابه‌جایی و ممان - دوران

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸، منحنی‌های بار - جابه‌جایی و ممان - دوران اتصال چسبی مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها تحت بار  $3.1 \text{ KN}$ ، نبشی فوقانی و نبشی جان گسیخته شده و ظرفیت باربری به شدت کاهش یافته، سپس نبشی نشیمن مقاومت کرده و با افزایش جابه‌جایی تیر، نبشی نشیمن نیز گسیخته شده است. در این حالت سختی قاب و سختی دوران اولیه‌ی اتصال به ترتیب مطابق روابط ۹ و ۱۰ است:

$$K_{frame} = \frac{F}{\Delta} = 526 \text{ (KN/m)} \quad (9)$$

$$K_{\theta} = \frac{M}{\theta} = 142.4 \text{ (KN.m/rad)} \quad (10)$$

در شکل ۱۹، تصویری از لحظه‌ی شکست در اتصال چسبی مشاهده می‌شود.

#### ۵.۵. مقایسه‌ی عملکرد اتصال‌ها

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، منحنی‌های بار - جابه‌جایی و ممان - دوران اتصال با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جدول ۲، به‌طور خلاصه عملکرد اتصال‌های انجام شده ارائه شده است.

#### ۶. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، ابتدا با انجام آزمایش کششی، مشخصات مکانیکی مصالح کامپوزیتی FRP استخراج شده و با انجام آزمایش روی سه نوع اتصال پروفیل‌های کامپوزیتی با پیچ و چسب، این نتایج به‌دست آمده است:

۱. از نظر پارامترهای مقاومتی، ظرفیت باربری اتصال تقویت شده‌ی پیچی و اتصال نبشی چسب (با چسب مورد بررسی) تقریباً برابر بوده است و به میزان ۲ برابر اتصال نبشی پیچی، بار تحمل می‌کنند.

جدول ۲. مقایسه‌ی ظرفیت اتصالات‌های پیچی و چسبی.

دوران بیشینه $\theta_{max} (mrad)$	ممان خمشی بیشینه $M_{max} (KN.m/rad)$	ظرفیت باربری جابه‌جایی بیشینه $\Delta_{max} (mm)$	ظرفیت باربری $F_{max} (KN)$	سختی		
				قاب $K_{frame} (KN/m)$	دوران $K_{\theta} (KN.m/rad)$	
۱۲۳	۰٫۶	۴۰	۱٫۷۲	۱۷٫۵	۱۰۳	اتصال نبشی پیچی
۱۳۱٫۴	۱٫۳۸	۳۲	۳٫۴	۸۱٫۴۵	۵۰۳	اتصال تقویتی پیچی
۳۴	۱٫۳	۱۱	۳٫۱	۱۴۲٫۶	۵۲۶	اتصال چسبی

۲. سختی اولیه‌ی قاب اتصالات‌های تقویت شده‌ی پیچی و چسبی تقریباً برابر و به میزان ۵ برابر اتصال نبشی پیچی بوده است.
۳. اتصال چسبی مورد بررسی در پژوهش حاضر، بیشترین سختی دورانی را دارد، که به میزان ۱٫۷۵ برابر اتصال تقویت شده‌ی پیچی و ۸ برابر اتصال پیچی است.
۴. علت بالاتر بودن ظرفیت باربری و سختی اولیه در اتصال تقویت شده‌ی پیچی و اتصال چسبی نسبت به اتصال نبشی پیچی می‌تواند وجود صفحه‌ی تقویتی در اتصال تقویت شده و درگیر شدن کامل سطح نبشی اتصال توسط چسب در اتصال چسبی باشد.
۵. اتصال چسبی از لحاظ سختی اولیه و دورانی، عملکرد بسیار بهتری نسبت به اتصال پیچی هم‌شکل دارد، اما با تغییر مکان بسیار کمی نسبت به اتصال پیچی گسیخته می‌شود (شکست ترد)، البته اگر رزین استفاده شده بین الیاف‌های جسم متصل شونده قوی باشد، چسبندگی بین لایه‌ها قوی می‌شود و می‌تواند باعث بهبود عملکرد در اتصال چسبی شود.
۶. علت شکست در اتصال پیچی و پیچی تقویت شده، هم‌راستا نبودن جهت بار با جهت الیاف در نبشی اتصال بوده است. علت شکست در اتصال چسبی، ضعیف بودن چسبندگی بین لایه‌ی الیاف‌ها در پروفیل کامپوزیتی تیر و ستون بوده است.
۷. در اتصال پیچی، باید از تقویت کننده‌هایی برای بالا بردن عملکرد مکانیکی استفاده شود و در اتصال چسبی مورد بررسی در پژوهش حاضر، باید چسبندگی بین الیاف‌های جسم متصل شونده افزایش یابد.
۸. هدف در پژوهش حاضر، استفاده از مصالح کامپوزیتی در کل سازه بوده و با توجه به اینکه مشخصات مقاومتی مصالح کامپوزیتی الیاف شیشه پایین‌تر از پیچ پُر مقاوم است، بدیهی است شکست در نبشی کامپوزیتی رخ دهد. به نوعی پژوهش حاضر، به دنبال شکل و حالتی از نبشی کامپوزیتی است که در عین سادگی و اقتصادی بودن، بتواند مقاومت بیشتری از خود نشان دهد.
۹. از لحاظ زمان و سرعت اتصال، اتصال پیچی سریع‌تر آماده می‌شود و نیاز به زمان عمل‌آوری اتصال چسب ندارد. در اتصال پیچی می‌توان اعضا را در کارخانه سوراخ و در محل استفاده کرد، اما اتصال چسبی باید در محل انجام شود.
۱۰. در اتصال پیچی، قابلیت باز شدن پیچ و تعویض اعضا وجود دارد، اما در اتصال چسبی اعضا به راحتی از هم جدا نمی‌شوند.
۱۱. از لحاظ آلودگی زیست‌محیطی، اتصال پیچی، گرد الیاف را در محیط پخش و اتصال چسبی، مواد و بوی شیمیایی نامناسبی تولید می‌کند.

## پانویس‌ها

## منابع (References)

1. Polyester
2. Vinylester
3. Epoxy
4. Bank
5. Mottram and Zheng
6. Turvey and Cooper
7. Mosallam
8. Qureshi
9. Ascione
10. David Martins
11. American society for testing and materials (ASTM)
12. Waterjet
13. Servotest
14. linear variable differential transformer (LVDT)
1. Afzir Advanced Solutions, "Retrofitting with FRP. web", (In Presian) (19 Apr., 2017).
2. Bank, L.C. "Composites for construction structural design With FRP materials", John Wiley & Sons, Inc. (2006).
3. Coelho, A.M.G. and Mottram, J.T. "A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers", *Materials & Design*, **74**, pp. 86-107 (2015).
4. Ascione, F., Lamberti, M., Razaqpur, A.G. and et al. "Strength and stiffness of adhesively bonded GFRP beam-column moment resisting connections", *Composite Structures*, **160**, pp. 1248-1257 (2017).

5. Martins, D., Proenca, M., Correia, J.R and et al. "Development of a novel beam-to-column connection system for pultruded GFRP tubular profiles", *Composite Structures*, **171**, pp. 263-276 (2017).
6. Smith, S.J., Parsons, I.D. and Hjelmstad, K.D. "Experimental comparisons of connections for GFRP pultruded frames", *Journal of Composites for Construction*, **3**(1), pp. 20-26 (1999).
7. ASTM D 638-02a Standard Test Method, ASTM D 638-02a Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics (2002).
8. ASTM D3518/D3518M-13 Standard Test Method, ASTM D3518 /D3518M-13 Standard Test Method for In Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate, ASTM International (2007).
9. Smith, S.J., Parsons, I.D. and Hjelmstad, K.D. "An experimental study of the behavior of connections for pultruded GFRP I-beams and rectangular tubes", *Composite Structures*, **42**(3), pp. 281-290 (1998).