

## ظرفیت محوری ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با کامپوزیت CFRP طولی

داوود مستوفی نژاد

استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

نیلوفر مشیری\*

کارشناسی ارشد مهندسی سازه

### چکیده

از جمله روش‌های پرکاربرد استفاده از کامپوزیت‌های FRP (Fiber Reinforced Polymer) در مقاوم سازی ستون‌ها، محصورسازی ستون‌های بتن آرمه با استفاده از کامپوزیت با الیاف حلقوی می‌باشد. با این وجود، در تحقیق حاضر، تأثیر استفاده از کامپوزیت با الیاف در راستای طولی ستون مورد مطالعه قرار گرفته است. در این حالت، وقوع کمناش کلی در کامپوزیت و در نتیجه جدا شدگی آن از سطح بتن، ممکن است باعث عملکرد نامناسب FRP گردد.

در تحقیق حاضر، روش شیارزنی در نصب کامپوزیت CFRP (Carbon-FRP) با الیاف قائم به کار گرفته شد و تأثیر آن در به تأخیر انداختن کمناش CFRP بررسی گردید. بدین منظور ۱۲ ستون بتن آرمه دایروی به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری خالص قرار گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به کارگیری روش شیارزنی موجب افزایش قابل ملاحظه ظرفیت باربری ستون تقویت شده با کامپوزیت طولی می‌گردد. این در حالی است که نصب کامپوزیت به روش متداول نصب سطحی، تأثیر چشمگیری در افزایش بار حداکثر ستون نداشت.

**واژه‌های کلیدی:** ستون بتن آرمه دایروی، ظرفیت باربری، کامپوزیت CFRP تحت فشار، کمناش، شیارزنی.

\*نویسنده مسؤول: n.moshiri@cv.iut.ac.ir

## ۱- مقدمه

کامپوزیت‌ها با الیاف کربن، شیشه و آرامید به ترتیب برابر با ۸۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد مدول الاستیسیته کششی آن‌ها می‌باشد [۵]. هم‌چنین میزان تغییرات مقاومت فشاری این دسته از مواد بسیار متغیر است؛ بدین مفهوم که دو سری کامپوزیت ساخته شده از یک نوع الیاف و رزین ولی با تولیدکنندگان مختلف، مقاومت فشاری متفاوتی خواهند داشت [۷].

کامپوزیت‌ها نیز ممکن است مانند ورق‌های تحت فشار معمولی دچار کماتش کلی شوند. با این وجود، چنان‌چه کامپوزیت با الیاف طولی که در تقویت ستون به کار رفته است، به طور مؤثری مهار شود و تکیه‌گاه جانبی کافی داشته باشد، می‌تواند باعث افزایش ظرفیت فشاری، خمشی (بارهای خارج از محور) و شکل‌پذیری ستون گردد. هم‌چنین تقویت ستون با کامپوزیت FRP با الیاف محوری، باعث می‌شود که شکست ستون در لحظه نهایی، نرم و غیر انفجاری صورت گیرد [۸]. عیسی و هم‌کاران نیز با آزمایش ستون‌های نیم‌مقیاس تقویت‌شده با کامپوزیت CFRP<sup>۲</sup> نشان دادند که اگر کامپوزیت FRP طولی کاملاً به وسیله دورپیچ FRP مهار شود، باعث افزایش ظرفیت فشاری ستون می‌گردد و تقریباً معادل نصف یک لایه عرضی FRP کارایی دارد؛ در غیر این صورت، تأثیر ناچیزی در رفتار ستون دارد و قابل صرف‌نظر کردن است [۹]. لی و هم‌کاران با بررسی جهت الیاف کامپوزیت در استوانه‌های بتنی تقویت شده با FRP نشان دادند که استفاده از دو لایه الیاف افقی ۸/۳٪ افزایش و استفاده از دو لایه الیاف طولی ۴/۴٪ افزایش در مقاومت فشاری نمونه را موجب می‌شود [۱۰].

## ۳- بیان موضوع تحقیق

هنگامی که کامپوزیت با الیاف محوری در مقاوم‌سازی ستون به کار می‌رود، این کامپوزیت با تحمل قسمتی از تنش فشاری وارد بر ستون، موجب افزایش ظرفیت باربری ستون می‌گردد. در نتیجه کامپوزیت ممکن است با افزایش بارهای وارد بر ستون دچار کماتش کلی شده و ظرفیت باربری خود را از دست بدهد. در این حالت، بروز کماتش در کامپوزیت، و لذا جدا شدن آن از

در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP<sup>۱</sup> به عنوان روشی مؤثر در تعمیر و مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه معرفی شده است. برای تقویت ستون می‌توان از پوشش‌های کامپوزیتی FRP به دور ستون استفاده کرد. بیش‌ترین کاربرد این پوشش‌ها به صورتی است که الیاف کامپوزیت کاملاً یا به صورت عمده در جهت عمود بر محور طولی ستون یا جهت حلقوی (جهت محیطی) قرار گیرند. در این صورت، در اثر اتساع جانبی ستون، در کامپوزیت تنش‌های کششی حلقوی ایجاد می‌شود. استفاده از کامپوزیت FRP با الیاف حلقوی در تقویت ستون به طور گسترده‌ای توسط محققان مختلف بررسی شده و تأثیر پارامترهای گوناگون از جمله شکل و ابعاد مقطع ستون، مقاومت بتن و نوع و ضخامت کامپوزیت مطالعه گردیده است [۱، ۲]. با این حال می‌توان از کامپوزیت FRP با الیاف در راستای طولی و یا مورب نسبت به محور ستون و هم‌چنین از کامپوزیت با الیاف چند جهته نیز استفاده کرد [۳]؛ که علاوه بر افزایش مقاومت ستون، ظرفیت تغییر شکل آن را نیز افزایش می‌دهند. در صورتی که در تقویت ستون، از کامپوزیت با الیاف محوری استفاده گردد، این کامپوزیت با تحمل قسمتی از تنش فشاری وارد بر ستون، موجب افزایش ظرفیت ستون می‌گردد [۴].

## ۲- مروری بر مطالعات پیشین

برخلاف استفاده گسترده از کامپوزیت‌های FRP در صنایع عمرانی، تا به حال تنها باربری کششی آن‌ها مد نظر قرار گرفته است؛ در حالی که بر اساس منابع مختلف این نوع مواد قابلیت باربری فشاری نیز دارند. کامپوزیت‌های FRP قادر به تحمل فشار هستند؛ ولی حداکثر تنش‌های فشاری که این دسته از مواد می‌توانند تحمل کنند، کم‌تر از مقاومت کششی آن‌ها می‌باشد [۵]. [۶]. براساس تحقیقات وو در سال ۱۹۹۰، مقاومت فشاری کامپوزیت‌ها با الیاف شیشه، کربن و آرامید به ترتیب ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آن‌ها است [۵]. هم‌چنین براساس تحقیقات احسانی در سال ۱۹۹۳، مدول الاستیسیته فشاری

<sup>2</sup> Carbon FRP

<sup>1</sup> Fiber Reinforced Polymer

بتنی به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی متر در هر گروه تعیین شد.

الیاف کامپوزیتی مورد استفاده در این تحقیق از نوع الیاف کربن با مقاومت کششی نهایی ۴۳۰۰ مگا پاسکال، مدول الاستیسیته کششی ۲۳۸ گیگا پاسکال، کرنش نهایی ۱/۸ درصد و ضخامت ۰/۱۳۱ میلی متر می‌باشد. هم‌چنین رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی با مقاومت کششی ۳۰ مگا پاسکال، مدول الاستیسیته کششی ۴۵۰۰ مگا پاسکال و کرنش نهایی ۰/۹ درصد می‌باشد.

#### ۴-۲- آماده‌سازی و تقویت نمونه‌ها

کامپوزیت طولی با استفاده از چهار روش مختلف به سطح بتن متصل شد. در ادامه به توضیح این چهار روش پرداخته می‌شود.

۱- نصب FRP به روش اتصال سطحی (EBR<sup>۱</sup>): در این روش، ابتدا سطح نمونه توسط دستگاه فرز ساییده می‌شود تا لایه نازکی از سطح بتن که عموماً شیره بتن و لایه ضعیفی است برداشته شود. سپس، ۸ عدد پارچه کربنی به عرض ۶۰ میلی متر (در جهت محیط ستون) و طول ۳۹۰ میلی متر (در راستای ارتفاع ستون) بر روی سطح نمونه و در جهت محور طولی ستون چسبانده شد (شکل ۱-الف) با توجه به ابعاد انتخابی برای کامپوزیت، واضح است که در این روش، تمام محیط نمونه توسط کامپوزیت پوشش داده می‌شود؛ به گونه‌ای که این پارچه‌های کربنی تقریباً به صورت بر تا بر یکدیگر قرار می‌گیرند.

۲- نصب FRP با استفاده از روش نصب سطحی بر روی شیار (EBROG<sup>۲</sup>): ابتدا ۸ عدد شیار به عمق ۱۰ میلی متر، عرض ۱۰ میلی متر و ارتفاع ۴۶۰ میلی متر بر روی سطح نمونه ایجاد شد. این شیارها در محیط نمونه به طور یکنواخت پراکنده شده‌اند و فاصله آزاد بین آن‌ها مساوی و تقریباً برابر با ۵۰ میلی متر است. پس از ایجاد شیارها و پاک نمودن گرد و غبار و آلودگی از سطح بتن با استفاده از هوای فشرده، شیارها توسط رزین کاملاً پر شد و با آغشته سازی سطح ستون، پارچه کربنی به سطح مورد نظر

سطح بتن، مود گسیختگی می‌باشد. با توجه به مطالعات انجام شده، کاربرد روش شیارزنی در تقویت خمشی تیرهای بتنی سبب شده تا با انتقال تنش سطحی بین بتن و FRP، به عمق بتن و لایه‌های مقاوم‌تر آن، جدا شدگی کامپوزیت به تعویق افتد و در نتیجه، افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت باربری تیر تقویت شده مشاهده گردد [۱۱].

مطالعاتی که تاکنون بر روی روش شیارزنی صورت گرفته، عملکرد آن را در تنش‌های کششی بررسی کرده‌اند [۱۱-۱۳]. اما در تحقیق حاضر، کارایی روش شیارزنی تحت اثر نیروهای فشاری مطالعه شده است. هدف از تحقیق حاضر، تقویت ستون بتن آرمه با کامپوزیت FRP با الیاف محوری و مطالعه تأثیر روش شیارزنی در ظرفیت باربری ستون تقویت شده است. علاوه بر این، تأثیر روش شیارزنی در جلوگیری از کماتش کامپوزیت طولی و جدا شدگی آن از سطح بررسی شده و بهبود عملکرد کامپوزیت ساخته شده به روش مرطوب (wet layup) تحت تنش‌های فشاری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

#### ۴- برنامه آزمایشگاهی

##### ۴-۱- مشخصات نمونه‌ها و مصالح

در این تحقیق، ۱۲ عدد ستون بتن آرمه دایروی به قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی متر ساخته شد. در تمام این نمونه‌ها از ۶ عدد میلگرد طولی به قطر ۱۰ میلی متر و ۶ عدد خاموت به قطر ۸ میلی متر که در فواصل مساوی ۸۵ میلی متر در ارتفاع نمونه قرار می‌گیرند، استفاده شده است. تنش تسلیم و تنش نهایی برای میلگرد با قطر ۸ میلی متر به ترتیب برابر با ۵۵۰ و ۷۷۴ مگا پاسکال، و برای میلگرد با قطر ۱۰ میلی متر به ترتیب برابر با ۴۰۶ و ۵۳۸ مگا پاسکال می‌باشد. هم‌چنین، پوشش خالص بتن برابر با ۲۰ میلی متر در نظر گرفته شد.

سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱، ماسه ۵-۰ میلی متر و شن با حداکثر اندازه ۱۰ میلی متر برای ساخت بتن با مقاومت مشخصه طرح برابر با ۳۰ مگا پاسکال به کار گرفته شد. مقاومت فشاری واقعی بتن در زمان انجام آزمایش‌ها به وسیله ۳ استوانه استاندارد

<sup>1</sup> Externally Bonded Reinforcement

<sup>2</sup> Externally Bonded Reinforcement On Grooves

۴- نصب FRP با استفاده از روش نصب در نزدیک سطح (NSM<sup>۲</sup>): در این تحقیق به منظور اجرای روش NSM، بر خلاف معمول، به جای استفاده از تسمه‌ها یا میلگردهای FRP، از الیاف کربن و روش ساخت درجا یا همان روش مرطوب (wet lay-up) برای تشکیل FRP استفاده شد [۱۴]. در این روش، پس از ایجاد همان ۸ عدد شیار و آغشته‌سازی سطح شیارها توسط لایه نازکی از رزین، نوارهای باریکی از پارچه کربنی به عرض تقریبی ۷/۵ میلی‌متر و طول ۳۹۰ میلی‌متر به ترتیب داخل شیارها قرار گرفته و به وسیله رزین اندود شدند. در انتها نیز شیار کاملاً با رزین پر شد. در واقع در این روش، هر یک از پارچه‌های کربنی به ابعاد ۶۰×۳۹۰ میلی‌متر که در روش‌های قبلی به کار می‌رفت، در راستای طولی به ۸ قسمت مساوی تقسیم شده و در هر شیار، ۸ عدد از این نوارهای باریک قرار گرفت (شکل ۱د).

جدول ۱ اسامی نمونه‌ها و مشخصات آن‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود نمونه‌ها در ۳ گروه طبقه‌بندی شده‌اند. در نام‌گذاری نمونه‌ها، ابتدا شماره گروه هر کدام و سپس روش مورد استفاده در نصب کامپوزیت طولی، به عنوان کد نمونه مشخص شده است. نمونه‌هایی که با کد MFG (Matrix-Filled Groove) مشخص شده‌اند، به منظور بررسی اثر رزین اپوکسی مورد استفاده برای پر کردن شیارها، بر ظرفیت فشاری ستون‌ها ساخته شده‌اند. در این ۲ نمونه، ۸ شیار با ابعاد مشابه به کار رفته در سایر ستون‌ها ایجاد شده و تمامی حجم شیار با رزین پر شده است. توجه شود که الیاف کربن بر سطح این دو نمونه چسبانده نشده‌اند. اعداد درون پرانتز، نشان دهنده تکرار ستونی با نحوه تقویت مشابه است.

در گروه سوم، تقویت در نمونه‌ای با نام EBROG-T-3 با استفاده از روش EBROG به نحوی صورت گرفته است که هر یک از ۸ نوار FRP به عرض ۶۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۹۰ میلی‌متر به دو نوار باریک‌تر با عرض ۳۰ میلی‌متر (و همان ارتفاع ۳۹۰ میلی‌متر) بریده شده و بر روی شیار به کار رفته‌اند. حرف T

چسبانده شد (شکل ۱-ب) [۱۱]. الیاف کربنی مورد استفاده در این روش نیز شامل ۸ نوار به ابعاد ۶۰×۳۹۰ میلی‌متر بوده و از آن‌جا که روی سطح شیارها چسبانده می‌شود و در داخل شیار فرو نمی‌رود، تمام محیط نمونه را پوشش می‌دهد. برای جلوگیری از تمرکز تنش در ماتریس درون شیار و یا کامپوزیت FRP، شیارهای ایجاد شده بر روی نمونه، در تمام ارتفاع آن یعنی ۵۰۰ میلی‌متر ادامه داده نشدند. هم‌چنین در صورتی که شیارها با ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر به کار روند، احتمال خرد شدن موضعی بتن اطراف شیار در ناحیه انتهایی ستون، در اثر تمرکز تنش وجود دارد. لذا ارتفاع شیارها اندکی کم‌تر از ارتفاع کل نمونه انتخاب شده است. علاوه بر این، ۳۵ میلی‌متر انتهایی هر شیار، در اثر ایجاد آن‌ها توسط دستگاه سنگ فرز، دارای عمق متغیر از صفر تا ۱۰ میلی‌متر است. به همین دلیل، طول کامپوزیت در راستای محور ستون برابر با ۳۹۰ میلی‌متر انتخاب شده است تا بر روی ناحیه دارای عمق متغیر قرار نگیرد. هم‌چنین به منظور یکسان‌سازی شرایط و میزان FRP به کار رفته، در سایر روش‌ها نیز از مقدار یکسانی الیاف کربن استفاده شده است.

۳- نصب FRP با استفاده از روش نصب سطحی داخل شیار (EBRIG<sup>۱</sup>): در این روش نیز مشابه روش EBROG، ابتدا ۸ عدد شیار با ابعاد مشابه در روش EBROG، بر روی سطح نمونه و با فواصل مساوی ایجاد شد. پس از آغشته کردن سطح ستون و شیارها، ۸ عدد پارچه کربنی با ابعاد مساوی با روش‌های قبلی به سطح ستون چسبانده شدند؛ به طوری که در محل شیارها الیاف کربن مستقیماً به وجه شیارها چسبانده شدند [۱۲] (شکل ۱-ج). در نهایت، شیارها توسط رزین کاملاً پر شدند. با توجه به این که میزان پارچه کربنی در این روش، مشابه روش‌های قبلی است؛ و از طرفی پارچه کربنی در داخل شیار فرو می‌رود، لذا نمی‌تواند تمام محیط نمونه را پوشش می‌دهد و بین پارچه‌های کربنی به عرض ۶۰ میلی‌متر، فاصله آزادی تقریباً برابر با ۳۰ میلی‌متر وجود دارد.

<sup>2</sup> Near Surface Mounted

<sup>1</sup> Externally Bonded Reinforcement In Grooves

بار- کرنش برای هر نمونه قابل ترسیم است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

## ۶- نتایج آزمایش‌ها

### ۶-۱- منحنی نیرو-کرنش

در شکل ۳، نمودارهای نیرو-کرنش برای نمونه‌های گروه‌های مختلف رسم شده است. در ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت طولی، رفتاری بسیار نرم و غیر انفجاری و مشابه با ستون بتن آرمه بدون تقویت مشاهده شد؛ به گونه‌ای که نقطه شکست نهایی برای این نمونه‌ها وجود نداشت و منحنی بار-کرنش آن‌ها بعد از رسیدن به نقطه نظیر بار حداکثر، به صورت تدریجی با کاهش بار وارد بر نمونه، روندی نزولی را طی کرد. بنابراین، در این ستون‌ها نقطه مشخصی برای پایان آزمایش وجود ندارد و آزمایش تا جایی که تجهیزات آزمایشگاهی و ادوات اندازه‌گیری تغییر مکان محدودیتی ایجاد نکنند، ادامه پیدا کرده است. با این حال، برای مقایسه کرنش محوری نهایی نمونه‌های تقویت شده ( $\epsilon_u$ )، به صورت انتخابی، از نقطه معادل ۸۵٪ بار حداکثر نمونه شاهد هر گروه، در شاخه نزولی نمودار بار-کرنش هر ستون، استفاده گردیده است.

مقادیر اندازه‌گیری شده، نمودارهای بار-تغییر مکان و بار-کرنش برای هر نمونه قابل ترسیم است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

با دقت در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد که شیب تمامی منحنی‌ها در ناحیه ابتدایی نمودار، تقریباً مساوی است؛ که بیان‌گر سختی یکسان نمونه‌ها در مراحل اولیه بارگذاری می‌باشد. هم‌چنین شیب منحنی‌ها در شاخه نزولی نیز تقریباً با یکدیگر مساوی است که نشان دهنده عملکرد مشابه نمونه شاهد و نمونه‌های تقویت شده با کامپوزیت طولی است.

### ۶-۲- نتایج گروه اول

با دقت در نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که در نمونه‌های تقویت شده به EBR و NSM، با افزایش حدود ۳ درصد در ظرفیت باربری، کامپوزیت طولی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود رفتار ستون نداشته است. به کارگیری روش شیارزنی با هر دو

(اولین حرف کلمه Thick) نشان دهنده ضخامت بیش‌تر FRP بر روی شیار است. تقویت در نمونه‌ای با نام 3-EBROG-SE با استفاده از روش EBROG صورت گرفت؛ با این تفاوت که برای پر کردن شیار از مخلوط رزین اپوکسی و ماسه سیلیسی به عنوان جزء سخت و مقاوم آن، به نسبت ۲ به ۱ استفاده گردید. تقویت این نمونه، با هدف بررسی امکان جایگزینی بخشی از رزین با یک ماده سخت انجام گرفته است. در نام‌گذاری این نمونه از عبارت SE که بیانگر مخلوط اپوکسی و ماسه است (Sand and Epoxy) استفاده شده است. ماسه سیلیسی مورد استفاده در این تحقیق دارای محدوده ابعادی ۱-۱۱۵ میلی‌متر می‌باشد. نمونه چهارم این گروه با نام 3-EBROG-T-SE، ترکیبی از دو نمونه قبل است. به طوری که از ۲ نوار FRP به عرض ۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۹۰ میلی‌متر در تقویت به روش EBROG بر روی هر شیار (مجموعاً ۱۶ نوار به عرض ۳۰ میلی‌متر) استفاده شده است. هم‌چنین مخلوط اپوکسی و ماسه سیلیسی به نسبت ۲ به ۱ برای پر کردن شیار به کار رفته است.

برای جلوگیری از شکست زودرس نمونه در ۵۵ میلی‌متر انتهایی آن که به وسیله کامپوزیت طولی تقویت نشده است، از یک لایه FRP حلقوی در تمامی نمونه‌ها استفاده شده تا مقاومت فشاری بتن در این نواحی افزایش یافته و شکست ستون در این نواحی اتفاق نیفتد.

## ۵- نحوه انجام آزمایش‌ها

در این تحقیق، تمامی نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری آزمایش شدند. برای این منظور از یک دستگاه جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن استفاده شد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. برای اندازه‌گیری تغییر مکان محوری در هر نمونه از ۲ عدد جابه‌جایی سنج قائم و برای اندازه‌گیری تغییر مکان عرضی از یک عدد جابه‌جایی سنج افقی استفاده شد (شکل ۲). دقت این جابه‌جایی سنج‌ها برابر با ۰/۰۰۵ میلی‌متر و حداکثر تغییر مکان قابل اندازه‌گیری توسط آن‌ها ۲۰ میلی‌متر می‌باشد. با استفاده از با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، نمودارهای بار-تغییر مکان و

و (2-MFG) به صورت متوسط، ظرفیت باربری به میزان ۲/۶ درصد از نمونه شاهد بیش تر است. با توجه به این نتایج می توان نتیجه گرفت که ایجاد شیار و پر کردن آن با رزین، بدون استفاده از الیاف کربن، تأثیر چندانی در تحمل بار نمونه نداشته است. بلکه در نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی، افزایش ظرفیت ستون ناشی از باربری کامپوزیت موجود بر روی شیار یا داخل شیار بوده است و رزین موجود در شیار تنها به عنوان تکیه‌گاه جانبی، از کمانش و جدا شدگی FRP جلوگیری کرده و سبب شده کامپوزیت طولی عملکرد بهتری در تحمل بار وارد بر نمونه داشته باشد.

#### ۶-۴- نتایج گروه سوم

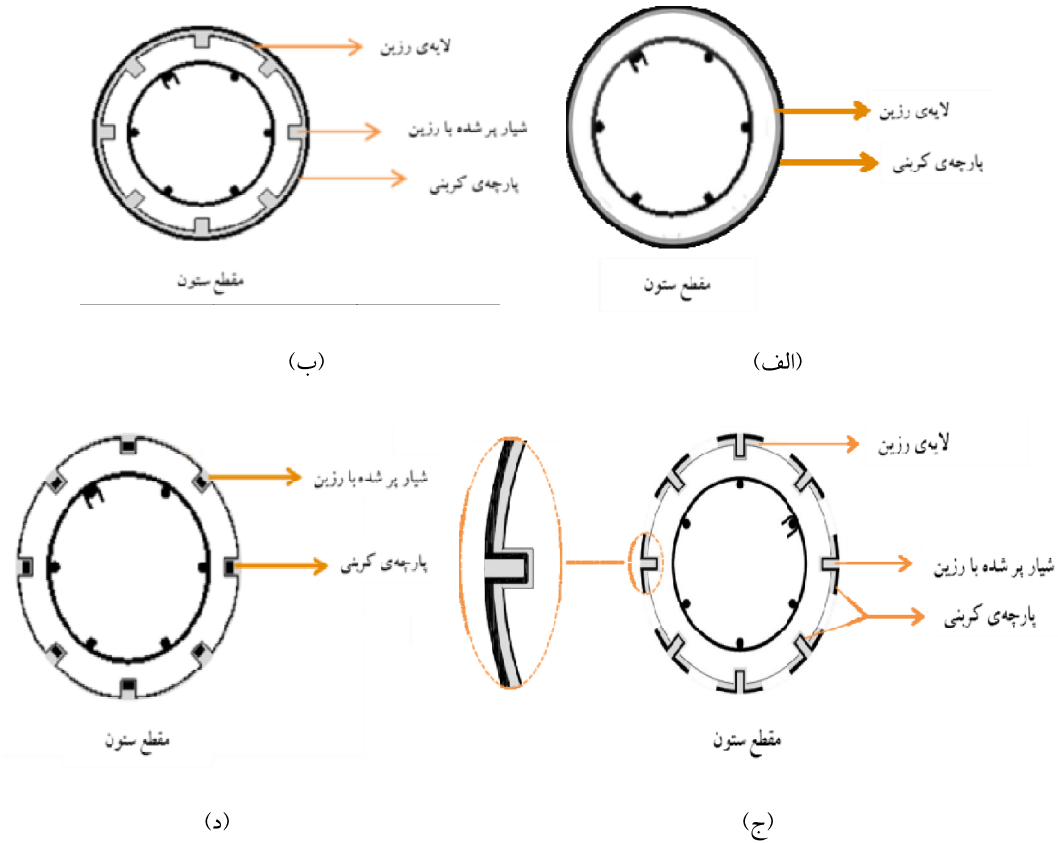
با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می شود که در نمونه EBROG-T-۳، ظرفیت باربری به میزان ۱۴/۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. از طرفی تقویت به روش EBROG توانسته است ظرفیت باربری را تا میزان ۱۴/۱٪ افزایش دهد (نمونه EBROG-1 در گروه اول). بنابراین ملاحظه می گردد که متمرکز کردن الیاف FRP بر روی شیار به میزان دو برابر (استفاده از میزان یکسان پارچه کربنی و دولا کردن آن) در نمونه EBROG-T-3، تأثیر مشابهی با روش EBROG داشته است.

همچنین در این گروه، نمونه EBROG-SE-3 با ثبت ۶۱۴/۴۴ کیلو نیوتن به عنوان حداکثر بار، افزایش ۱۰/۸٪ در ظرفیت را نسبت به نمونه شاهد نشان می دهد. دلایلی از قبیل عدم دانه بندی مناسب ماسه به کار رفته، اشباع سازی نامناسب الیاف یا زخمی شدن الیاف در حین اشباع سازی سبب شده کارایی روش EBROG به طور کامل فراهم نشود. علاوه بر این، در نمونه EBROG-T-SE-3 با تحمل باری معادل ۵۷۴/۶۴ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری به میزان ۳/۴٪ بیش تر از نمونه شاهد مشاهده می شود.

روش EBROG و EBROG، ظرفیت باربری ستون‌های تقویت شده را به صورت چشمگیری افزایش داده است. با توجه به این که کامپوزیت طولی، تمام ارتفاع نمونه را پوشش نمی دهد، با وارد شدن نیروی فشاری به نمونه، کامپوزیت به صورت مستقیم تحت فشار قرار نمی گیرد؛ اما به دلیل اتصال کامپوزیت و سطح بتن و انتقال تنش‌های برشی بین رزین و بتن، در کامپوزیت تنش‌های فشاری به وجود می آید. استفاده از روش شیارزنی باعث می شود سطح تماس FRP و بتن بیش تر شود و از طرف دیگر، تنش‌های برشی به لایه‌های مقاوم تر بتن نفوذ کند [۱۲، ۱۳، ۱۵]؛ در نتیجه جدا شدگی FRP از سطح و کمانش آن به تأخیر افتاده و با تحمل تنش‌های فشاری موجب افزایش ظرفیت باربری ستون می شود. علاوه بر این، کامپوزیت نصب شده با استفاده از روش EBROG، به دلیل این که کاملاً به جداده‌های شیار می چسبد، دارای سطح تماس بیش تری با شیار بوده و هم چنین ممان اینرسی مقطع FRP در این حالت بیش تر است؛ لذا این روش عملکرد بهتری نشان داده و توانایی بیش تری در افزایش ظرفیت باربری ستون دارد. لازم به ذکر است که در NSM به کار گرفته در این تحقیق، از روش ساخت درجا (یا روش مرطوب wet lay-up) استفاده شده و لذا نسبت حجمی الیاف بسیار پایین تر از روش NSM متعارف و استفاده از تسمه‌ها یا میلگردهای FRP است. ضمن آن که اصولاً کیفیت ساخت تسمه‌ها یا میلگردهای FRP که در روش معمول NSM به کار می رود، نسبت به روش درجا بهتر می باشد. هم چنین تمامی الیاف طولی کربن در این روش در عرض ۱۰ میلی متر متمرکز شده است؛ و لذا وجود ناهمواری‌های احتمالی در سطح شیار که می تواند موجب اعوجاج اولیه الیاف شود، بر تمامی کامپوزیت موجود در یک شیار تأثیر گذار است. بنابراین وجود شیار با ابعاد خاص این تحقیق نتوانسته است کمانش کامپوزیت طولی را به تعویق اندازد و موجب شده کارایی این روش نسبت به روش شیارزنی بسیار کم تر باشد.

#### ۶-۳- نتایج گروه دوم

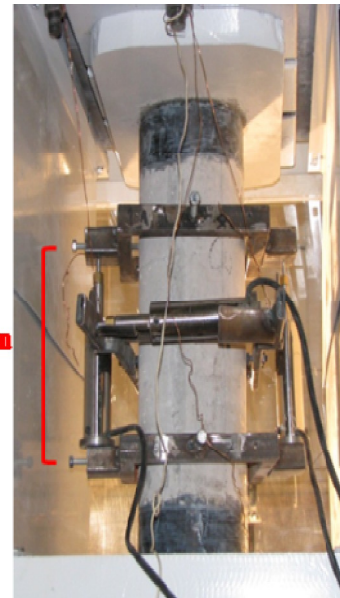
با توجه به جدول ۱ ملاحظه می شود که در نمونه‌های 2-MFG



شکل ۱- روش‌های نصب الیاف کامپوزیتی؛ (الف) روش EBR، (ب) روش EBROG، (ج) روش EBRIG، (د) روش NSM

### ۶-۵- مود شکست

در شکل ۴ نحوه شکست تعدادی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود. مود گسیختگی ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت طولی، شامل جدا شدگی کامپوزیت از بتن و کماتش آن به سمت بیرون بود. جدا شدگی کامپوزیت از سطح نمونه، قبل از رسیدن ستون به بار حداکثر شروع شده و با ادامه روند بارگذاری، در پیرامون نمونه به وقوع پیوسته و مقدار آن افزایش یافت. تمامی روند فوق به صورت نرم و تدریجی صورت گرفت. با توجه به این نحوه شکست، میزان جابه‌جایی که توسط جابه‌جایی سنج افقی اندازه‌گیری شده است، در واقع میزان بیرون زدگی لایه FRP است.



شکل ۲- نحوه نصب LVDT ها بر روی ستون به منظور اندازه

گیری تغییر مکان افقی و قائم

### ۶-۴- نتایج گروه سوم

با توجه به نتایج جدول ۱ مشاهده می‌شود که در نمونه EBROG-T-3، ظرفیت باربری به میزان ۱۴/۷٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. از طرفی تقویت به

روش EBROG توانسته است ظرفیت باربری را تا میزان ۱۴/۱٪ افزایش دهد (نمونه 1-EBROG در گروه اول). بنابراین ملاحظه می‌گردد که متمرکز کردن الیاف FRP بر روی شیار به میزان دو برابر (استفاده از میزان یکسان پارچه کربنی و دولا کردن آن) در نمونه 3-EBROG-T، تأثیر مشابهی با روش EBROG داشته است.

هم‌چنین در این گروه، نمونه 3-EBROG-SE با ثبت ۶۱۴/۴۴ کیلو نیوتن به عنوان حداکثر بار، افزایش ۱۰/۸٪ در ظرفیت را نسبت به نمونه شاهد نشان می‌دهد. دلایلی از قبیل عدم دانه‌بندی مناسب ماسه به کار رفته، اشباع‌سازی نامناسب الیاف یا زخمی شدن الیاف در حین اشباع‌سازی سبب شده کارایی روش EBROG به طور کامل فراهم نشود. علاوه بر این، در نمونه‌ی 3-EBROG-T-SE با تحمل باری معادل

۵۷۴/۶۴ کیلو نیوتن، ظرفیت باربری به میزان ۳/۴٪ بیش‌تر از نمونه شاهد مشاهده می‌شود.

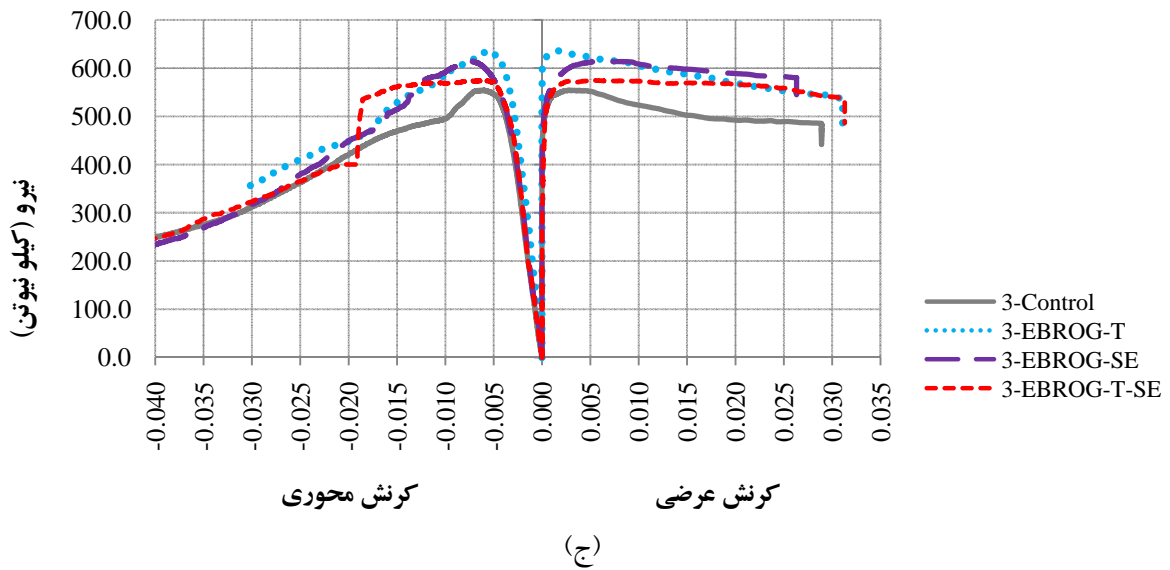
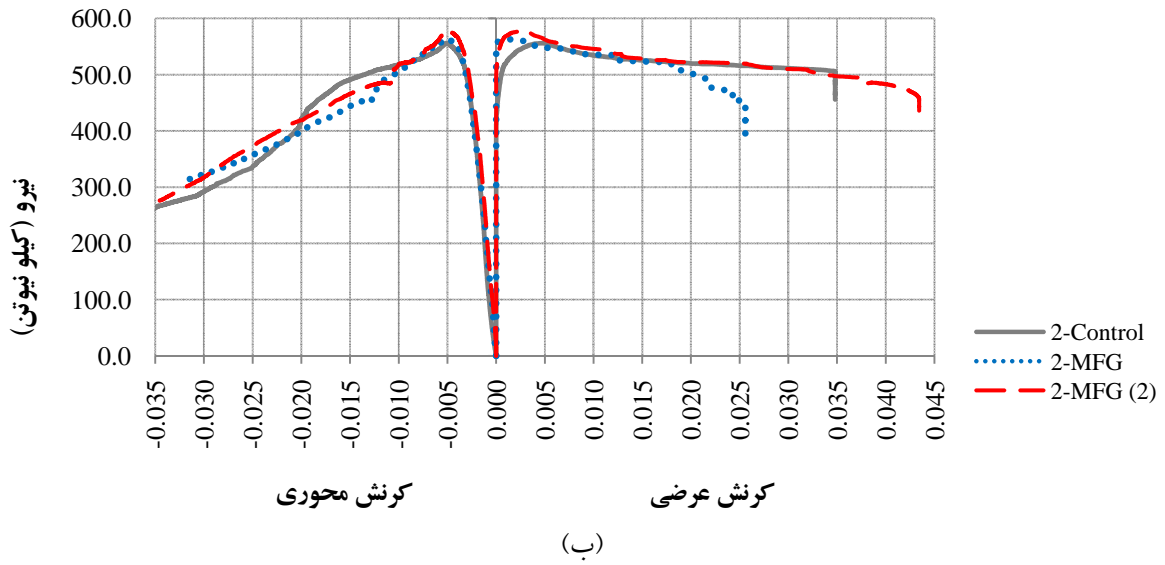
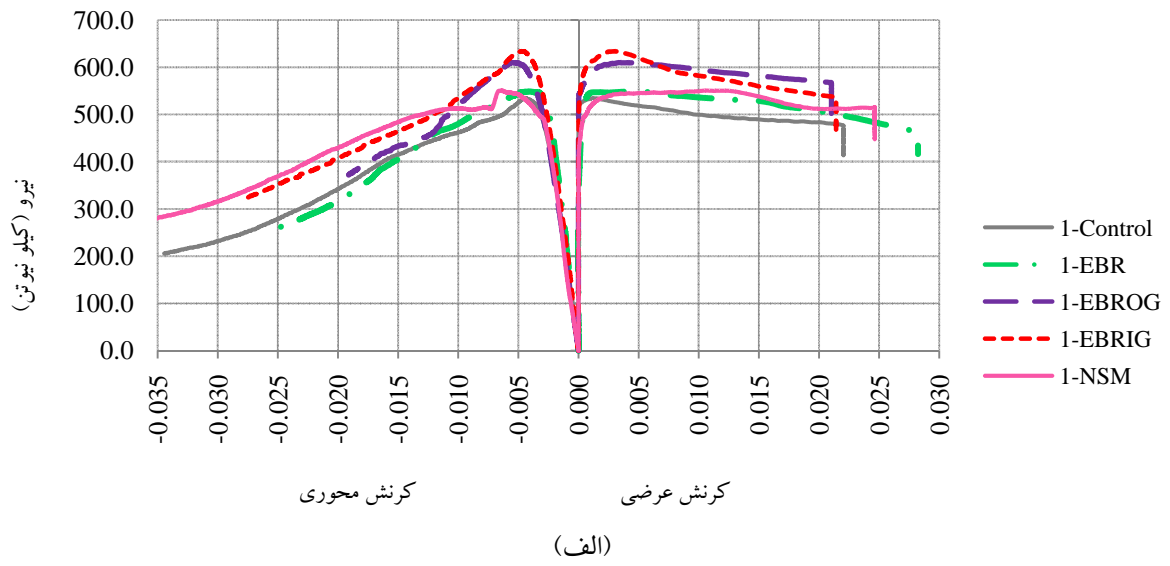
**۶-۵- مود شکست**

در شکل ۴ نحوه شکست تعدادی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود. مود گسیختگی ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت طولی، شامل جدا شدگی کامپوزیت از بتن و کمانش آن به سمت بیرون بود. جدا شدگی کامپوزیت از سطح نمونه، قبل از رسیدن ستون به بار حداکثر شروع شده و با ادامه روند بارگذاری، در پیرامون نمونه به وقوع پیوسته و مقدار آن افزایش یافت. تمامی روند فوق به صورت نرم و تدریجی صورت گرفت. با توجه به این نحوه شکست، میزان جابه‌جایی که توسط جابه‌جایی سنج افقی اندازه‌گیری شده است، در واقع میزان بیرون زدگی لایه FRP است.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌ها و نتایج آزمایش‌ها

شماره گروه	نام نمونه	تعداد لایه‌های FRP طولی	باربری حداکثر نمونه (kN)	افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه شاهد (%)	کرش محوری نمونه در بار حداکثر (%)
۱	1-Control	۰	۵۳۴/۷۰	-	۰/۱۱۰۳۹
	1-EBR	۱	۵۴۸/۶۹	۲/۶	۰/۱۲۲۶۸
	1-EBROG	۱	۶۱۰/۱۱	۱۴/۱	۰/۱۲۵۶۱
	1-EBRIG	۱	۶۳۳/۷۶	۱۸/۵	۰/۱۵۹۶۶
	1-NSM	۱	۵۵۰/۶۶	۳/۰	۰/۱۷۸۸۱
۲	2-Control	۰	۵۵۵/۹۴	-	۰/۱۶۹۰۰
	2-MFG	۰	۵۶۳/۰۳	۱/۳	۰/۱۲۴۷۴
	2-MFG(2)	۰	۵۷۷/۹۸	۴/۰	۰/۱۴۱۸۴
۳	3-Control	۰	۵۵۴/۵۰	-	۰/۱۴۷۱۴
	3-EBROG-T	۱	۶۳۵/۸۱	۱۴/۷	۰/۱۷۶۵۷
	3-EBROG-SE	۱	۶۱۴/۴۴	۱۰/۸	۰/۱۷۴۷۴
	3-EBROG-T-SE	۱	۵۷۴/۶۴	۳/۴	۰/۱۸۵۷۵





شکل ۳- نمودار نیرو-کرنش نمونه‌های گروه‌های مختلف

است و لذا سبب شده است ظرفیت باربری نمونه تقویت شده افزایش یابد.

۴- نحوه گسیختگی ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت طولی، شامل کمناش FRP و جدا شدگی آن از ستون بود که به صورت نرم و تدریجی صورت گرفت.

#### ۸- مراجع

- [1]. Wang Z, Wang D, Smith S, Lu D. "CFRP-Confined Square RC Columns. II: Cyclic Axial Compression Stress-Strain Model". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 16, No. 2, pp. 161-170, 2012.
- [2]. Csuka B, Koll'r LP. "Analysis of FRP confined columns under eccentric loading". *Composite Structures*. Vol. 94, No. 3, pp. 1106-1116, 2012.
- [3]. Piekarczyk J, Piekarczyk W, Blazewicz S. "Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate". *Construction and Building Materials*. Vol. 25, No. 5, pp. 2365-2369, 2011.
- [4]. Tan K. "Strength enhancement of rectangular reinforced concrete columns using fiber-reinforced polymer". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 6, No. 3, pp. 175-183, 2002.
- [5]. ACI Committee 440. *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. ACI 440.2R-08. Farmington Hills, MI, USA 2008.
- [6]. Technical Report No. 55. *Design guidance for strengthening concrete structures using fiber composite materials*. UK: The Concrete Society; 2004.
- [7]. JSCE. *Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous fiber sheets*. Concrete Engineering Series; Vol. 41; 2001.
- [8]. Au C, Buyukozturk O. "Effect of fiber orientation and ply mix on fiber reinforced polymer-confined concrete". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 9, No. 5, pp. 397-407, 2005.
- [9]. Issa M, Alrousan R, Issa M. "Experimental and parametric study of circular short columns confined with CFRP composites". *Journal of Composites for Construction*. Vol. 13, No. 2, pp. 135-147, 2009.
- [10]. Li G, Maricherla D, Singh K, Pang S-S, John M. "Effect of fiber orientation on the structural behavior of FRP wrapped concrete cylinders".



شکل ۴- نحوه شکست نمونه‌ها در تقویت به روش‌های مختلف

#### ۷- نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های FRP در صورت وجود مهار جانبی کافی و جلوگیری از کمناش کلی آن‌ها، قادر به تحمل نیروهای فشاری هستند. در این تحقیق تأثیر روش شیارزنی در به تعویق انداختن کمناش FRP و توانمند کردن FRP ساخته شده به روش مرطوب (wet lay-up) در تحمل بارهای فشاری بررسی شد و با سایر روش‌های متعارف نصب کامپوزیت مقایسه گردید. نتایج حاصل از تحقیق حاضر را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود.

۱- نصب کامپوزیت FRP در جهت طولی با استفاده از روش نصب سطحی (روش EBR) و نیز با استفاده از روش نصب در نزدیک سطحی که در این تحقیق به کار گرفته شد (استفاده از روش NSM در نصب الیاف کربن به صورت درجا)، تأثیری در افزایش ظرفیت ستون‌های تقویت شده نداشت.

۲- به کارگیری روش شیارزنی سبب افزایش ظرفیت باربری گردید؛ این میزان افزایش در صورت استفاده از روش EBROG برابر با ۱/۱۴٪ و در صورت استفاده از روش EBRIG برابر با ۱/۱۸٪، در صورت استفاده از یک لایه FRP، مشاهده شد.

۳- می‌توان گفت شیار همانند تکیه‌گاه جانبی برای جلوگیری از کمناش FRP عمل کرده و جداشدگی آن را به تأخیر انداخته

Composite Structures. Vol. 74, No. 4, pp. 475-483, 2006.

[11]. Mostofinejad D, Mahmoudabadi E. "Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams". Journal of Composites for Construction. Vol. 14, No. 6, pp. 804-811, 2010.

[۱۲]. شاملی س.م. "روش ترکیبی نصب سطحی ورق در داخل شیار (EBRIG) جهت اتصال ورق‌های FRP به تیر بتنی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

[۱۳]. مقدس ا.ر. "بررسی تأثیر روش شیارزنی به جای آماده‌سازی سطحی متعارف در مکانیزم گسیختگی خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با FRP". پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰.

[14]. Mostofinejad D, Shameli SM. "Externally bonded reinforcement in grooves (EBRIG) technique to postpone debonding of FRP sheets in strengthened concrete beams". Construction and Building Materials. Vol. 38, No., pp. 751-758, 2013.

[۱۵]. مستوفی نژاد د، محمودآبادی ا. "شیار طولی به عنوان شیوه جایگزین آماده‌سازی سطحی در نصب کامپوزیت‌های CFRP جهت تقویت خمشی تیرهای بتنی". مجله شریف، دانشگاه صنعتی شریف. صفحه ۳-۸، ۱۳۸۸.

## Compressive Strength of RC Columns Strengthened with Longitudinal CFRP Composites

Davood Mostofinejad

Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Niloufar Moshiri\*

M.Sc. in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

( Received: 2014/2/23 - Accepted: 2014/7/14)

### Abstract

Confining RC columns by FRP composites with fibers oriented in the hoop direction is the most common method of strengthening columns. In the present study, however, the application of CFRP composites with fibers aligned along the column's axis to improve compressive strength of RC columns has been investigated. Global buckling of composite with longitudinal fibers may result in debonding of FRP from column surface, and thus, the compressive load carrying capacity of the strengthened column would not be increased considerably.

To limit the global buckling of composite under compression, a newly introduced strengthening method, named as Grooving Method (GM), was utilized in the present study and its effect on postponing the buckling of CFRP fibers when aligned along the column axis was investigated. For this purpose, 12 circular RC columns with diameter of 150 mm and height of 500 mm were tested under axial compression. Experimental results showed that while the effect of installing CFRP with conventional EBR method was negligible on the columns' load capacity, the grooving method considerably enhanced the columns' maximum loads.

**Keywords:** RC column, CFRP, Buckling, Grooving Method, Compressive Strengthening.

---

\* Corresponding author: n.moshiri@cv.iut.ac.ir