

## بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های بتن آرمه مربعی تقویت شده با مصالح CFRP تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت

رسول مهدی نیا<sup>۱</sup>، محمدرضا توکلی زاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد  
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

\*رایانامه نویسنده رابط: [drt@um.ac.ir](mailto:drt@um.ac.ir)

### چکیده

در سه دهه اخیر بنا بر دلایل مختلفی همچون افزایش نیاز به مقاوم‌سازی سازه‌های فرسوده و گسترش روز افزون استفاده از مصالح تقویتی نوین، دانش طراحی و استفاده از این مصالح جهت مقاوم‌سازی انواع اجزای سازه‌ای از جمله ستون‌ها با پیشرفت‌های شگرف همراه بوده است. پژوهش‌های انجام شده در این زمینه بیانگر است که مقاوم‌سازی ستون‌ها با پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) سبب افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری آن‌ها می‌شود. شکل مقطع و خروج از مرکزیت بارگذاری مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر محصورشدگی در ستون‌های دورپیچ شده با مصالح مرکب FRP به شمار می‌رود. بنا بر آن چه گفته شد، انجام مطالعات بیشتر با هدف بررسی رفتار ستون‌های بتن آرمه با مقطع مربع و تقویت شده با مصالح FRP تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت از اهمیت فراوانی برخوردار است. برای دستیابی به این هدف دو نمونه ستون کوتاه با مقطع مربع به بعد ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت ۲۵ میلی‌متر آزمایش شدند. علاوه بر این پس از تعیین ویژگی‌های مکانیکی مصالح مرکب، ظرفیت باربری نمونه‌ها بر پایه روابط پیشنهادی انجمن بتن آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که ظرفیت باربری و کرنش محوری نهایی نمونه دورپیچ شده با مصالح مرکب به مراتب بیشتر از مقادیر بدست آمده براساس مدل‌ها و روابط ارائه شده در آیین‌نامه ذکر شده می‌باشد. علاوه بر این ضریب تاثیر کرنش برای نمونه دورپیچ شده در این آزمایش برابر با ۰/۷۳ حاصل گردیده است. این امر درحالی است که مقدار این ضریب در آیین‌نامه برای ستون‌های مربعی برابر ۰/۵۵ در نظر گرفته شده است.

**کلمات کلیدی:** ستون بتن آرمه، مقطع مربع، FRP، محصورشدگی، بارگذاری با خروج از مرکزیت

### ۱. مقدمه

سابقه استفاده از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) در مهندسی عمران به عنوان نوع جدیدی از مصالح تقویتی به اوایل دهه ۸۰ میلادی در اروپا و ژاپن باز می‌گردد. در اوایل سال ۱۹۷۸ در آلمان از مصالح FRP به منظور تقویت و بهسازی سازه‌های بتن آرمه بهره‌جویی شد. در ادامه در سال ۱۹۸۷ برای نخستین بار در ژاپن از مصالح FRP جهت تامین محصورشدگی اضافی و تقویت ستون‌های بتن آرمه استفاده شد [۱]. در سال‌های اخیر استفاده از مصالح نوین FRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها به دلیل برخورداری از مزایایی همچون دوام مناسب در شرایط محیطی مختلف، سهولت اجرا، نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر خستگی نسبت به روش‌های سنتی مانند ژاکت بتنی و غلاف فولادی رشد قابل توجهی یافته است. اما باید توجه داشت که با وجود پیشرفت‌های

حاصل شده در سال‌های اخیر، بخش عمده پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده پیرامون مقاوم‌سازی ستون‌ها با مصالح مرکب FRP معطوف به ستون‌هایی با نسبت طول به بعد کمتر از ۳، استوانه‌ای، کوچک مقیاس، غیر مسلح و تحت بارگذاری محوری بوده است [۲].

## ۲. سابقه پژوهشی

نتایج تحقیقات انجام شده توسط توهاری و همکاران در سال ۲۰۲۱ نشان داد که استفاده از مصالح مرکب CFRP سبب افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌های بتن آرمه مربعی تقویت شده با این مصالح می‌گردد [۳].

در سال ۲۰۰۳ لام و تنگ برای نخستین بار مدلی ساده به منظور محاسبه مقاومت فشاری و کرنش نهایی بتن در ستون‌های غیردایره‌ای محصور شده با دورپیچ FRP ارائه کردند [۴].

در سال ۲۰۱۹ عربشاهی و همکاران رابطه ای جدید جهت محاسبه مقاومت فشاری ستون‌های دورپیچ شده با مصالح مرکب FRP ارائه کردند. نتایج ارزیابی‌های انجام شده در این پژوهش نشان داد که رابطه ارائه شده توسط این محققان از خطای کمتری نسبت به رابطه موجود در آیین‌نامه مقاوم‌سازی ACI-440-2r-17 برخوردار است. در بررسی‌های انجام شده توسط این پژوهشگران مشخص شد رابطه ارائه شده به منظور محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده با مصالح FRP در آیین‌نامه ACI-440-2r-02 از خطای بالایی برخوردار است [۵].

نتایج تحقیقات انجام شده توسط فیتزویلیام و همکاران در سال ۲۰۱۰ حاکی از آن است که کرنش محوری نهایی ستون‌های دایره‌ای دورپیچ شده با مصالح مرکب FRP تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت به مراتب بیشتر از کرنش محوری نهایی در این ستون‌ها تحت بارگذاری فشاری خالص است [۲].

در سال ۲۰۱۹ دیگو و همکاران پژوهشی را به منظور بررسی کرنش نهایی مصالح مرکب FRP در ستون‌های مربعی دورپیچ شده با این مصالح انجام دادند. این محققان با اصلاح رابطه ارائه شده در آیین‌نامه TR55، رابطه‌ای جدید را به منظور محاسبه کرنش حلقوی نهایی دورپیچ FRP پیشنهاد کردند. همچنین این پژوهشگران نشان دادند کرنش حلقوی نهایی دورپیچ FRP با افزایش شعاع گوشه‌های ستون افزایش می‌یابد [۶].

در سال ۲۰۲۰ عربشاهی و همکاران نشان دادند که استفاده از کرنش حلقوی نهایی دورپیچ FRP به عنوان یک متغیر در مدل ارائه شده به منظور محاسبه کرنش محوری نهایی ستون‌های تقویت شده با مصالح FRP سبب افزایش دقت مدل می‌گردد [۷].

## ۳. مشخصات نمونه آزمون‌های

در این پژوهش دو نمونه ستون مربعی بتن آرمه به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفتند. این نمونه‌ها توسط چهار آرماتور طولی به قطر ۱۰ میلی‌متر مسلح شدند. همچنین به منظور جلوگیری از کماتش آرماتورهای طولی از تنگ‌های فولادی به قطر ۴ میلی‌متر با فاصله ۷۵ میلی‌متر به عنوان آرماتور عرضی استفاده شده است. در ستون‌های مورد مطالعه فاصله مرکز به مرکز آرماتورهای طولی برابر با ۱۶۸ درصد بعد ستون در نظر گرفته شده است. بر این پایه پوشش بتن بر روی آرماتورهای عرضی برابر با ۱۵ میلی‌متر خواهد بود. همچنین پوشش بتن در ابتدا و انتهای نمونه‌ها برابر با ۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

نام گذاری هر یک از نمونه‌ها از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول شامل حرف C و S بوده که به ترتیب بیانگر نمونه شاهد و نمونه تقویت شده می‌باشد. بخش‌های دوم و سوم نیز به ترتیب نشان دهنده ارتفاع نمونه‌ها و تعداد لایه دورپیچ CFRP هستند. در جدول ۱ جزئیات نام‌گذاری نمونه‌ها دیده می‌شود.

جدول ۱- جزئیات نام‌گذاری نمونه‌ها

نام نمونه	نوع نمونه	ارتفاع (mm)	تعداد لایه
C-500	تقویت نشده	۵۰۰	دورپیچ CFRP
S-500-1	تقویت شده	۵۰۰	۱

## ۴. مشخصات مصالح مصرفی

مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر در روز آزمایش برابر با ۲۶/۶۱ مگاپاسکال ارزیابی شد. همچنین تنش تسلیم آرماتورهای طولی و عرضی مورد استفاده در نمونه‌ها به ترتیب برابر با ۴۳۱/۸۱ و ۲۶۰/۲۲ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. جهت تعیین ویژگی‌ها مصالح CFRP چهار نمونه براساس استاندارد ASTM D3039 تهیه و مطابق شکل ۱ تحت آزمایش کشش قرار گرفتند [۸]. خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده در جدول ۲ ذکر گردیده است.



شکل ۱- آزمایش کشش مصالح مرکب CFRP

جدول ۲- ویژگی‌ها مکانیکی مصالح مرکب CFRP

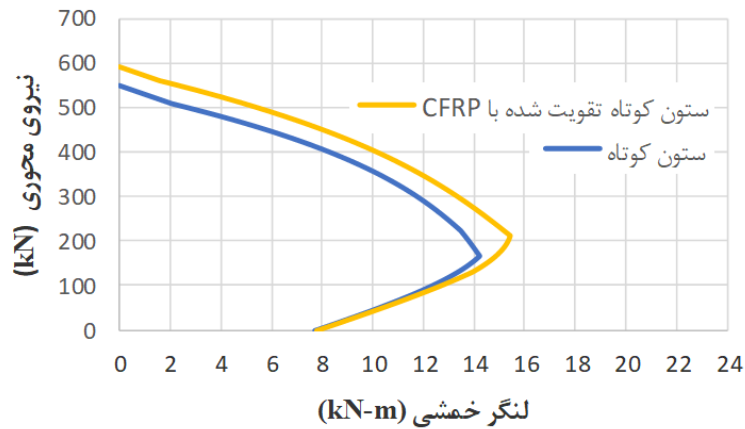
مقاومت کششی واحد عرض (kN/mm)	مقاومت کششی (MPa)	مدول ارتجاعی (GPa)	کرنش نهایی (%)	بار نهایی (kN)	میانگین نتایج	مصالح CFRP الیاف
۰/۲۲	۴۹۰/۸۵	۵۵/۸۲	۰/۸۸	۷/۱۴		مصالح CFRP الیاف
	۱۹۵۵/۳۹	۲۲۳/۵۹				
۰/۰۱	۵۴/۴۷	۳/۲۶	۰/۰۸	۰/۲۲		مصالح CFRP الیاف
	۵۹/۶۶	۱۶/۸۶				

##### ۵. محاسبه ظرفیت باربری

ظرفیت باربری نمونه شاهد تحت بار محوری متمرکز با خروج از مرکزیت یکسان ۲۵ میلی‌متر در دو انتها، براساس آیین‌نامه ACI-318-19 محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده است [۹]. همچنین پس از تعیین ویژگی‌ها مکانیکی مصالح CFRP از طریق آزمایش کشش مستقیم، ظرفیت باربری ستون‌های کوتاه تقویت شده با این مصالح براساس آیین‌نامه ACI-440-2r-17 محاسبه و در جدول ۳ گزارش شده است [۱]. به منظور کمک به مقایسه بهتر، نمودار اندرکنش نیروی محوری- لنگر خمشی نیز در شکل ۲ ترسیم گردیده است.

جدول ۳- ظرفیت باربری ستون‌ها براساس آیین‌نامه ACI

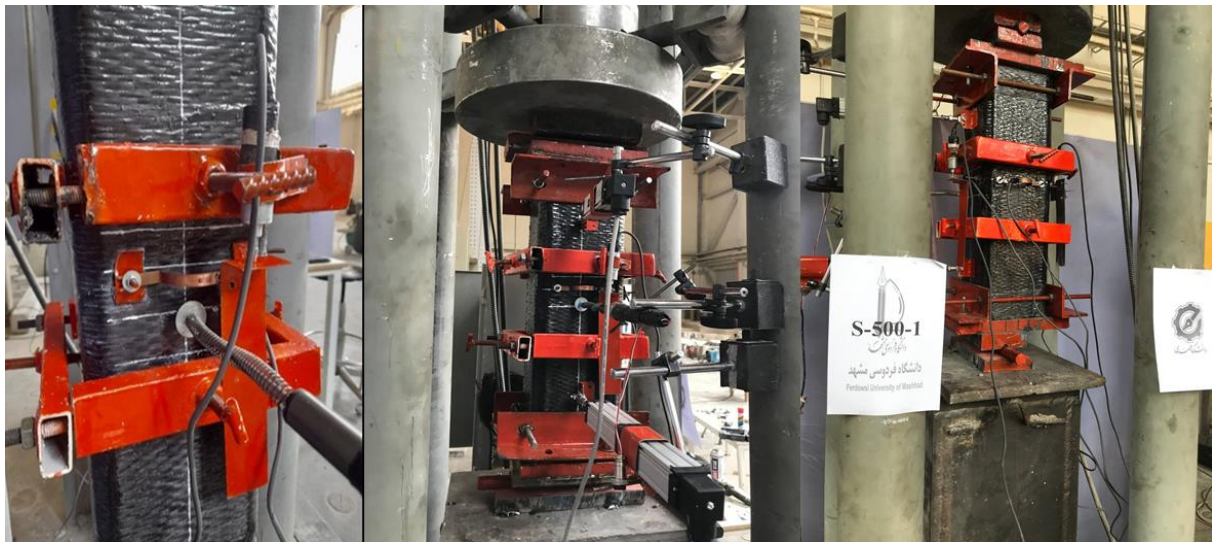
ظرفیت محوری (kN)	نمونه
۳۷۳/۳۹	ستون کوتاه
۴۰۳/۹۱	ستون کوتاه تقویت شده با مصالح CFRP



شکل ۲- نمودار اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی نمونه‌ها براساس آیین‌نامه ACI

#### ۶. تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

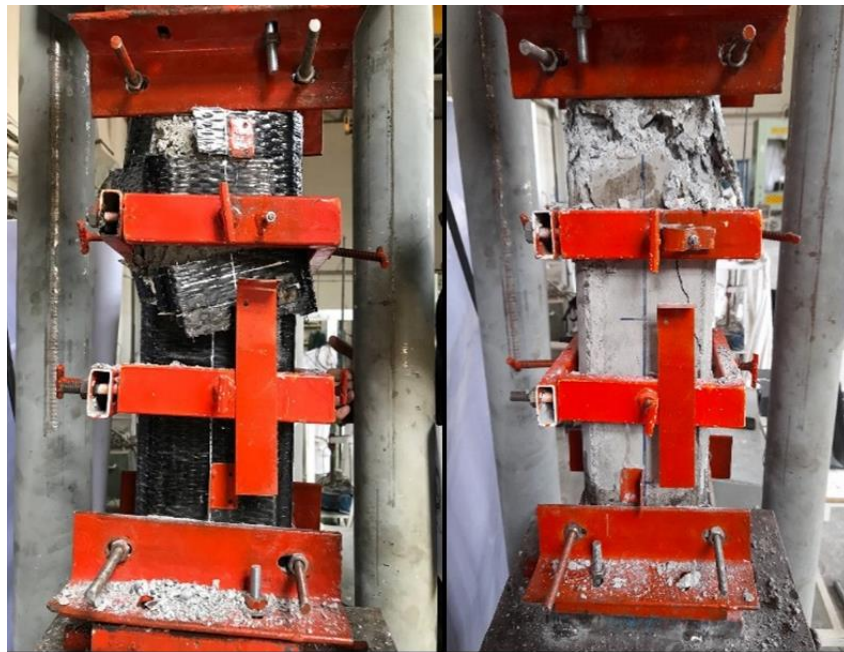
در این پژوهش جهت اعمال بارگذاری محوری از جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بهره‌جویی شده است. بارگذاری در حالت کنترل نیرو و با سرعت ۱۰۰۰ نیوتن بر ثانیه انجام شده است. تغییر شکل محوری نمونه‌ها به وسیله دو کرنش سنج با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. طول سنجش اندازه‌گیری کرنش محوری برابر با ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. جهت اندازه‌گیری کرنش حلقوی در مصالح CFRP از یک کرنش استفاده شده است. در شکل ۳ تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

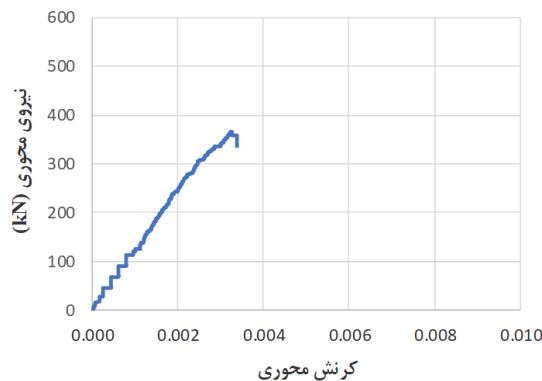
#### ۷. مشاهده‌های آزمایشگاهی

در شکل ۴ گونه گسیختگی نمونه‌ها نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است در نمونه‌ی شاهد با خرد شدن پوشش بتن وجه فشاری، نمونه دچار شکست گردیده است. همچنین کماتش آرماتورهای طولی در ناحیه شکست نمونه شاهد نیز مشاهده می‌شود. شکست نمونه‌ی تقویت شده با گسیختگی مصالح CFRP در ۱۵۰ میلی‌متر میانی وجه فشاری ستون همراه است.



شکل ۴- گونه گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش الف- نمونه C500 ب- نمونه S-500-1

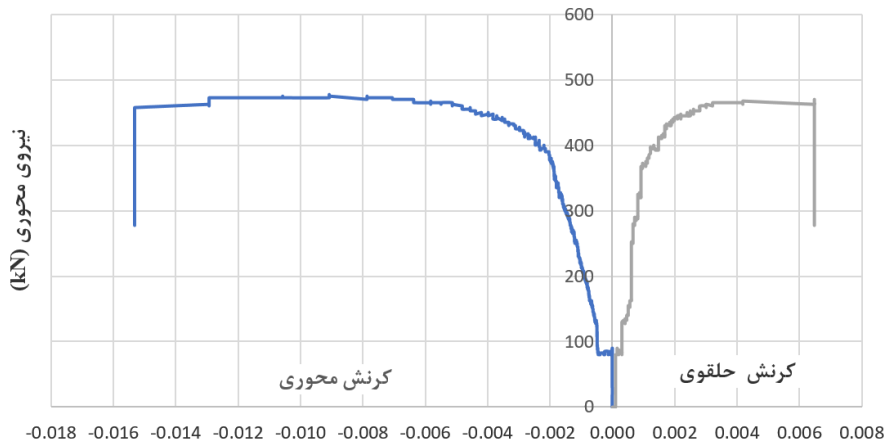
در شکل ۵ نمودار بار- کرنش محوری نمونه شاهد C-500 قابل مشاهده است. کرنش محوری نهایی نمونه در لحظه گسیختگی برابر با ۰/۰۰۳۳ ثبت شده است.



شکل ۵- نمودار بار-کرنش محوری نمونه C-500

در شکل ۶ نمودارهای بار-کرنش محوری و بار-کرنش حلقوی نمونه S-500-1 نشان داده شده است. در نمودار بار-کرنش محوری، نمونه تا کرنش محوری برابر با ۰/۰۰۲ دارای رفتار خطی می‌باشد. این مقدار کرنش تقریباً برابر با کرنش محوری نظیر مقاومت فشاری بتن محصور نشده ( $\epsilon_{co}$ ) است. در ستون‌های دایره‌ای محصور شده با مصالح FRP تحت بار فشاری خالص، گسترش ترک‌های مویی ایجاد شده در بتن محصور شده پس از رسیدن کرنش محوری به مقدار  $\epsilon_{co}$  سبب فعال شدن دورپیچ FRP می‌شود [۱۰]. این موضوع در نمونه مورد مطالعه در این پژوهش نیز قابل مشاهده است. همانطور که در نمودار بار-کرنش محوری نمونه تقویت شده S-500-1 دیده می‌شود پس از رسیدن کرنش محوری به مقدار ۰/۰۰۲ در بار ۳۷۷/۵ کیلو نیوتن دورپیچ CFRP فعال و نمودار به صورت غیر خطی ادامه می‌یابد. فعال شدن دورپیچ از طریق نمودار بار-کرنش حلقوی نیز قابل ارزیابی است. در این نمودار در بار ۳۷۷/۵ کیلو نیوتن دورپیچ فعال و کرنش حلقوی مصالح مرکب CFRP به صورت غیر خطی افزایش یافته است. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که ظرفیت باربری نمونه شاهد C-500 برابر با ۳۶۵/۱۵ کیلو نیوتن می‌باشد.

پس از فعال شدن دورپیچ و افزایش شکل پذیری نمونه، آرما توره‌های فشاری تسلیم و سختی محوری نمونه کاهش می‌یابد. در ادامه نمودار با شیب اندک تا لحظه نهایی و گسیختگی ناگهانی پوشش CFRP در وجه فشاری ستون ادامه می‌یابد. با توجه به آنچه بیان شد به وضوح قابل مشاهده است که در این نمونه فعال شدن دورپیچ CFRP منجر به افزایش ظرفیت باربری ستون گردیده است. این امر در حالی است که فشار محصور شدگی بدست آمده بر مبنای مدل ارائه شده در آیین نامه ACI-440-2r-17 کمتر از حداقل فشار محصورشدگی لازم (۸ درصد مقاومت فشاری بتن) جهت فعال شدن دورپیچ CFRP می‌باشد. فشار محصورشدگی محاسبه شده بر مبنای ویژگی‌ها مکانیکی مصالح مرکب CFRP برابر با ۵/۴ درصد مقاومت فشاری بتن می‌باشد. در نمونه مورد مطالعه کرنش حلقوی نهایی در لحظه گسیختگی مصالح مرکب CFRP برابر ۰/۰۰۶۲ ثبت گردیده است. این امر در حالی است که کرنش نهایی مصالح مرکب CFRP حاصل از آزمایش کشش مستقیم برابر با ۰/۰۰۸۸ می‌باشد. بنابراین ضریب تاثیر کرنش در این نمونه برابر با ۰/۷۳ گزارش می‌گردد. ضریب تاثیر کرنش برابر با نسبت کرنش حلقوی نهایی دورپیچ به کرنش نهایی مصالح مرکب CFRP می‌باشد. همچنین کرنش محوری نهایی نمونه برابر با ۱/۵۳ درصد ثبت گردیده است. کرنش نهایی موجود ۳/۷۳ برابر کرنش محوری ۰/۴ درصدی حاصل از آیین نامه ACI-440-2r-17 است. خاطر نشان می‌سازد از طرفی مدل موجود در آیین نامه ACI بر پایه مدل ارائه شده لام و تنگ برای ستون‌های دایره‌ای تحت بار محوری خالص می‌باشد. این امر در حالی است که در ستون‌های تحت بارگذاری برون محور، گرادیان کرنش سبب اتساع جانبی غیر یکنواخت و در نهایت توزیع غیر یکنواخت فشار محصورشدگی در سطح مقطع ستون می‌شود. از طرفی دیگر ضریب تاثیر کرنش در آیین نامه ACI برابر با ۰/۵۵ در نظر گرفته شده است. در حالی که ضریب تاثیر کرنش بدست آمده در این آزمایش برابر با ۰/۷۳ می‌باشد.



شکل ۶- نمودار بار-کرنش محوری و بار-کرنش حلقوی نمونه S-500-1

خلاصه نتایج گردآوری شده از نمودارهای فوق در جدول ۴ بیان گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود ظرفیت باربری و کرنش محوری نهایی نمونه تقویت شده نسبت به نمونه شاهد به ترتیب ۲۵/۳ و ۳۵۴/۵ درصد افزایش یافته است.

جدول ۴- خلاصه نتایج حاصل از آزمایش‌ها

نمونه	ظرفیت باربری (kN)	کرنش محوری نهایی	کرنش حلقوی نهایی	ضریب تاثیر کرنش
C-500	$P_{max}$	$\epsilon_{cu}$	$\epsilon_h$	$k_e = \frac{\epsilon_h}{\epsilon_f}$
S-500-1	۴۵۷/۵	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶۴	۰/۷۳
C-500	۳۶۵/۱۵	۰/۰۰۳۳	-	-

#### ۸. نتیجه‌گیری

- نتایج تجربی بدست آمده از مطالعه انجام شده به شرح زیر است:
- ۱- ظرفیت باربری ستون مربعی تقویت شده با مصالح CFRP تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت به مراتب بیشتر از ظرفیت باربری بدست آمده براساس آیین‌نامه کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا است.
  - ۲- کرنش محوری نهایی در نمونه مربعی تقویت شده با مصالح مرکب CFRP تحت بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت به مراتب بیشتر از کرنش محوری نهایی حاصل از مدل ارائه شده در آیین‌نامه کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا می‌باشد.
  - ۳- ضریب تاثیر کرنش بدست آمده برای ستون مربعی مورد مطالعه در این پژوهش بیشتر از ضریب در نظر گرفته شده در آیین‌نامه کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا است.
  - ۴- فعال شدن دورپیچ CFRP منجر به افزایش ظرفیت باربری نمونه گردیده است. این امر درحالی است که فشار محصورشدگی حاصل از آیین‌نامه کمیته ۴۴۰ انجمن بتن آمریکا برای نمونه تقویت شده در این پژوهش کمتر از حداقل فشار محصورشدگی لازم به منظور فعال شدن دورپیچ می‌باشد.
  - ۵- بدیهی است که برای رسیدن به نتایج کاربردی تر نیاز به انجام آزمایش‌های بیشتر و مطالعه پارامتری عددی وجود دارد.

#### ۸. مراجع

- [1] ACI Committee 440, ACI 440.2R-17, (2017). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures". Farmington Hills, MI, USA.
- [2] Fitzwilliam, J. and Bisby, L.A. (2010). "Slenderness effects on circular CFRP confined reinforced concrete columns". Journal of Composites for Construction, Vol. 14(3), pp. 280-288.
- [3] Touhari, M., Mitiche-Kettab, R. and Bali, A. (2021). "Behavior and new strength model of FRP square columns based on the FRP effective circumferential failure and the effective lateral confining pressure". Advanced Composite Materials, Vol. 20(3), pp. 222-242.
- [4] Lam, L. and Teng J. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete in rectangular columns". Journal of reinforced plastics and composites, Vol. 22(13), pp. 1149-1186.
- [5] Arabshahi, A., Gharaei-Moghaddam, N. and Tavakkolizadeh M. "Proposition of new applicable strength models for concrete columns confined with fiber reinforced polymers". SN Applied Sciences, Vol. 1(12), pp. 1-28.
- [6] de Diego, A., Arteaga, Á., and Fernández, J. (2019). "Strengthening of square concrete columns with composite materials. Investigation on the FRP jacket ultimate strain". Composites Part B: Engineering, Vol. 162, pp. 454-460.
- [7] Arabshahi, A., Gharaei-Moghaddam, N. and Tavakkolizadeh, M. "Development of applicable design models for concrete columns confined with aramid fiber reinforced polymer using Multi-Expression Programming". in Structures. Vol. 23, pp. 225-244.
- [8] ASTM, (2000), "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials". in D3039.
- [9] ACI Committee 318, ACI 318-19, (2019). "Building Code Requirements for Structural Concrete". Farmington Hills, MI, USA.
- [10] Lam, L. and Teng, J.G. (2003). "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete. Construction and building materials". Vol. 17(6-7), pp. 471-489.

## Experimental investigation on the behavior of square reinforced concrete columns strengthened with CFRP materials under eccentric loading

Rasool Mahdinia<sup>1</sup> and Mohammadreza Tavakkolizadeh<sup>2\*</sup>

1-Graduate Student, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

2-Assistant Professor, Civil Engineering Department, Ferdowsi University of Mashhad

\*Corresponding author: drt@um.ac.ir

### Abstract

In three decades, due to various reasons, such as the need to retrofit old structures and the increasing use of Fibre-Reinforced Polymer (FRP) material, the knowledge of designing and using these materials in strengthening various reinforced concrete elements, like columns, has been accompanied by tremendous progress. The researches were conducted indicate that strengthening the columns with FRP materials increases their bearing capacity and ductility. Section shape and eccentricity of loading are the most important factors affecting confinement in columns wrapped with FRP materials. Most columns used in the field had non-circular sections and loading with eccentricity in real structures.

Therefore, further studies on the behavior of reinforced concrete columns with non circular section and wrapped with FRP materials will be of great importance. To achieve this goal, two short columns with a square cross-section of 150 mm and a height of 500 mm were tested under axial loading with 25 mm eccentricity in the structural laboratory. In addition, after determining the mechanical properties of CFRP composite materials by tensile test, the compressive capacity of the CFRP confined column was evaluated based on the ACI specification. The results show that the bearing capacity and ultimate axial strain of the column strengthened with CFRP materials are far higher than the values obtained based on the models and relationships presented in the ACI code. In addition, the strain efficiency factor for the column wrapped in this test was equal to 0.73. This is while the value of this factor in the ACI for square columns is considered equal to 0.55.

**Keywords:** Reinforced concrete column, square cross section, FRP, confinement, eccentric loading