

رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ

علیرضا سلجوقیان^{۱*}، داود مستوفی نژاد^۲

۱- استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲- استاد، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- a.saljoughian@iut.ac.ir

۲- dmostofi@iut.ac.ir

چکیده:

مقاوم سازی ستون‌ها به عنوان یکی از اعضای اصلی سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف این تحقیق بررسی رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش جدید نوار گوشه-دورپیچ تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف می‌باشد. برای این منظور، ده ستون تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر قرار گرفتند. از این نمونه‌ها، دو ستون با استفاده از دورپیچ و چهار ستون با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ محصور شده و بقیه به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش در محیط مقطع شده و به دنبال آن عملکرد تقویت در افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون بهبود می‌یابد. به عنوان مثال، در نمونه‌ی تقویت شده با روش نوار گوشه-دورپیچ تحت بار محوری خالص، ظرفیت باربری و شکل پذیری به ترتیب به میزان ۱۵٪ و ۷۷٪ نسبت به نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی:

ستون بتن آرمه، مقاوم سازی، کامپوزیت‌های FRP، بار محوری با خروج از مرکزیت، روش نوار گوشه-دورپیچ.

* نویسنده مسئول مقاله، ایمیل: a.saljoughian@iut.ac.ir

Axial and flexural behavior of reinforced concrete columns retrofitted with FRP composites through corner strip-wrap technique

Alireza Saljoughian^{1*}, Davood Mostofinejad²

¹- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

²- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.

Abstract:

Column strengthening is critically important as one of the fundamental elements in structures. The objective of this study is to investigate the behavior of reinforced concrete (RC) columns strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) composites using the novel corner strip-wrap technique when subjected to axial loading with varying levels of eccentricity. In order to compare the proposed method with the wrapping technique, ten square reinforced concrete (RC) columns, each with cross-sectional dimensions of 133×133 mm and a height of 400 mm, were subjected to zero, 30, 60, and 90 mm load eccentricities. Among these specimens, two columns were confined using the wrapping method, and four columns were confined using the corner strip-wrap technique, while the remaining columns were designated as control specimens. In other words, the test parameters consisted of the technique used for column confinement, and the applied load eccentricity. The experimental results revealed that, in comparison to both unconfined and wrapped RC columns, improved performance in terms of increased ductility and load carrying capacity under eccentric loading was demonstrated by square RC columns when confined through the corner strip-wrap technique. Moreover, it is evident that eccentric loads, in contrast of concentric ones, significantly reduce the load carrying capacity and ductility of confined RC columns. However, in this experiment, confined columns exhibited a higher load carrying capacity and greater ductility in comparison to their unconfined counterparts, both in concentric and eccentric testing conditions. For instance, the load carrying capacities of columns confined using the corner strip-wrap technique increased by 15% and 13% when compared to those confined through the conventional wrapping technique when subjected to eccentricities of zero and 90 mm, respectively. Additionally, columns confined with the corner strip-wrap technique demonstrated ductility enhancements of 60.7% and 33.0% in comparison to the unconfined columns when subjected to zero and 60 mm eccentricities, respectively. Finally, axial loading-bending moment (P-M) interaction diagrams were created for both the unconfined and confined columns. A comparison of the experimental results with the values derived from the expressions recommended in various codes showed that the code-based estimates were conservative in relation to the experimental measurements.

Keywords: Reinforced concrete column; strengthening; FRP composites; eccentric loading; corner strip-wrap technique.

یا به عبارتی در جهت عرضی قرار گیرند. در این صورت، با اتساع جانبی ستون در اثر فشار وارده، الیاف موجود در FRP تحت تنش‌های کششی حلقوی قرار گرفته و با اعمال فشار جانبی محصور کننده، باعث افزایش مقاومت و شکل پذیری ستون شده، از جدا شدن آرماتورها در محل وصله جلوگیری کرده و مانع از کمانش آرماتورهای طولی می‌شود [۵].

بر اساس تحقیقات گذشته، در نمونه‌های محصور شده با استفاده از دورپیچ FRP، کرنش پارگی حلقوی FRP کم‌تر از کرنش نهایی به دست آمده از آزمایش کششی نمونه‌های کوپن FRP می‌باشد؛ بنابر این در لحظه‌ی شکست، تنش در FRP به تنش نهایی نرسیده و از تمام ظرفیت کششی آن استفاده نمی‌شود [۶]. محققین دلایل مختلفی را برای توجیه کم‌تر بودن کرنش پارگی نوارهای FRP نصب شده روی ستون نسبت به کرنش نمونه‌های کوپن ارائه نمودند. از جمله‌ی این دلایل وجود تنش‌های محصور کننده روی سطح داخلی FRP و هم‌چنین تنش‌های محوری که از بتن به FRP منتقل می‌شود، می‌باشد؛ به عبارت دیگر وضعیت تنش در FRP نصب شده روی ستون بر خلاف نمونه‌های کوپن، کششی نبوده و کامپوزیت در وضعیت تنش‌های چند محوره گسیخته می‌شود. از طرف دیگر ترک خوردگی و خرد شدگی بتن در زیر پوشش کامپوزیتی سبب ایجاد تمرکز تنش موضعی در کامپوزیت FRP می‌شود. به علاوه، انحنای نوارهای FRP پیچیده شده به دور بتن نیز می‌تواند علت کاهش ظرفیت آن باشد [۶ و ۷].

پارامترهای مختلفی از جمله شکل مقطع ستون، مقاومت اولیه ستون، مشخصات مکانیکی الیاف و زاویه‌ی دورپیچی بر محصور شدگی با استفاده کامپوزیت‌های FRP تأثیر گذارند [۸]. شکل مقطع ستون شامل مقاطع دایروی و چهار گوش بوده و یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیر گذار بر عملکرد FRP در محصور سازی ستون‌های بتن آرمه می‌باشد. در ستون‌های چهار گوش محصور شده تحت بار محوری، به دلیل هندسه‌ی غیر یکنواخت، فشار محصور کننده به صورت غیر یکنواخت روی محیط مقطع ستون اعمال شده و به دنبال آن تنش غیر یکنواخت در کامپوزیت‌های FRP ایجاد می‌شود، در نتیجه اثر محصور شدگی کمتری نسبت به ستون‌های دایره‌ای مشاهده می‌شود [۹]. علاوه بر این، تمرکز تنش

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی مهندسی زلزله و طراحی سازه‌های بتن آرمه انجام گرفته است، که منجر به پیشرفت‌های زیادی شده است؛ به گونه‌ای که امروزه با اطمینان بیش‌تری می‌توان سازه‌های بتن آرمه‌ی مقاوم در برابر زلزله را طراحی نمود. با این وجود در برخی از سازه‌های بتن آرمه، به دلایل مختلف ممکن است، سازه معیارهای ایمنی را از دست بدهد و از لحاظ مهندسی غیر قابل استفاده تلقی گردد. از جمله‌ی این موارد می‌توان به ضعف آیین‌نامه‌های قدیمی، فرسوده شدن ساختمان، افزایش بارهای بهره برداری، ضعف در اجرای بتن، تغییر در کاربری سازه، خطاهای محاسباتی و تأثیر عوامل مخرب محیطی اشاره کرد [۱ و ۲]. لذا استفاده از راه کارهای عملی و مؤثر برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتن آرمه اجتناب ناپذیر است. در این سازه‌ها، ستون‌های بتن آرمه به عنوان اعضای قائم سازه، که تحت اثر نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی به صورت همزمان قرار می‌گیرند، از جمله آسیب پذیرترین اعضا محسوب می‌شوند. استفاده از ژاکت‌های بتنی و فولادی از جمله رایج‌ترین روش‌ها جهت تقویت ستون‌های بتن آرمه محسوب می‌شود. از جمله معایب استفاده از ژاکت‌های بتنی مشکلات اجرایی، افزایش بعد ستون و عدم هماهنگی با معماری سازه می‌باشد. در ستون‌های تقویت شده با ژاکت‌های فولادی نیز ضمن وجود مشکلات اجرایی در نصب ورق‌های فولادی، این ورق‌ها به مرور زمان دچار خوردگی شده و اتصال آن‌ها با بتن از بین می‌رود. در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP^۱ جهت تقویت سازه‌های بتن آرمه به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها به طور چشم‌گیری مورد توجه قرار گرفته و جایگزین روش‌های قبلی شده است [۳ و ۴].

در یک ستون بتن آرمه در صورتی که آرماتورهای عرضی به طور کافی فراهم نشده باشد، سه مود شکست شامل گسیختگی برشی، گسیختگی خمشی مفصل پلاستیک و گسیختگی وصله‌ی اتصال مشاهده می‌شود. جهت جلوگیری از وقوع شکست‌های فوق، می‌توان از تکنیک محصور شدگی استفاده نمود. محصور نمودن ستون با کامپوزیت‌های FRP، عمدتاً به نحوی انجام می‌شود که الیاف موجود در ورق FRP، در جهت عمود بر محور طولی ستون و

^۱ Fiber Reinforced Polymer

در گوشه‌های تیز مقاطع چهار گوش باعث شکست زودرس FRP در کرنش بسیار کوچک‌تر از ظرفیت کششی آن خواهد شد [۱۰]. کامپوزیت‌های FRP سختی کششی درون صفحه‌ای زیادی دارند؛ در مقابل به دلیل این که بسیار نازک هستند سختی خمشی خارج از صفحه‌ی کمی دارند. فشار جانبی در گوشه‌های مقاطع چهار گوش ناشی از سختی محوری کامپوزیت FRP، و در میانه‌ی اضلاع ناشی از سختی خمشی آن‌هاست. به همین دلیل توزیع فشار محصور کننده روی محیط مقاطع چهار گوش غیر یکنواخت بوده و مقدار آن در گوشه‌ها بیش‌تر است؛ در حالی که در مقاطع دایره‌ای توزیع فشار محصور کننده روی محیط مقطع کاملاً یکنواخت است [۱۰]. در سال‌های اخیر پژوهش‌گران برای بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصور شدگی در ستون‌های چهار گوش روش‌های متفاوتی را ارائه نموده‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌های موجود، گرد کردن گوشه‌های مقطع ستون است؛ که علاوه بر افزایش سطح مقطع محصور شده، روشی مؤثر در کاهش اثر برندگی گوشه‌ها بر کامپوزیت‌های FRP است [۱۱ و ۱۲]. روش دیگر استفاده از کامپوزیت‌های FRP با تکنیک نوار گوشه-بست می‌باشد. در این روش، با ایده گرفتن از روش محصور سازی با استفاده از ژاکت‌های فولادی و همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد انحنای در کامپوزیت‌های FRP از بست‌های افقی FRP جهت محصور سازی ستون استفاده می‌شود. به عبارت دیگر بست‌های کاملاً تخت و بدون انحنای در هر یک از وجوه ستون بتنی به کار رفته و با اتصال به نوارهای گوشه در دو انتها بتن را محصور می‌کنند. نتایج نشان داده که این روش می‌تواند سبب افزایش کرنش مؤثر در کامپوزیت FRP در لحظه‌ی گسیختگی ستون شود [۹ و ۱۳]. راه حل دیگر استفاده از روش جدید نوار گوشه-دورپیچ می‌باشد. در این روش، ضخامت FRP در محل تمرکز تنش در کامپوزیت‌های FRP افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با توجه به تمرکز تنش محصور شدگی در گوشه‌های مقطع چهار گوش، استفاده از FRP اضافه در این ناحیه (نوار گوشه) باعث کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصور شدگی ستون می‌شود. [۷ و ۱۴].

برخی از محققین اثر محصور شدن غیرپیوسته‌ی ستون با استفاده از کامپوزیت‌های FRP را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعات نشان داده است که محصور سازی غیرپیوسته‌ی ستون،

روش مناسبی برای نصب آسان‌تر و دقیق‌تر دورپیچ‌های FRP روی سطح بتن می‌باشد. علاوه بر این، بر اساس نتایج استفاده از نوارهایی با عرض کم‌تر در فواصل نزدیک‌تر، عملکرد کامپوزیت FRP در افزایش ظرفیت باربری و شکل پذیری ستون را بهبود می‌بخشد [۱۵ و ۱۶]. یکی دیگر از عوامل تاثیر گذار بر محصور شدگی ستون‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، خروج از مرکز بار اعمال شده است. تحقیقات محدود انجام شده بر روی ستون‌های محصور شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، نشان داده‌اند که بهبود عملکرد ستون در مقاومت و شکل‌پذیری با افزایش خروج از مرکزیت بار کاهش می‌یابد [۱۷-۱۹].

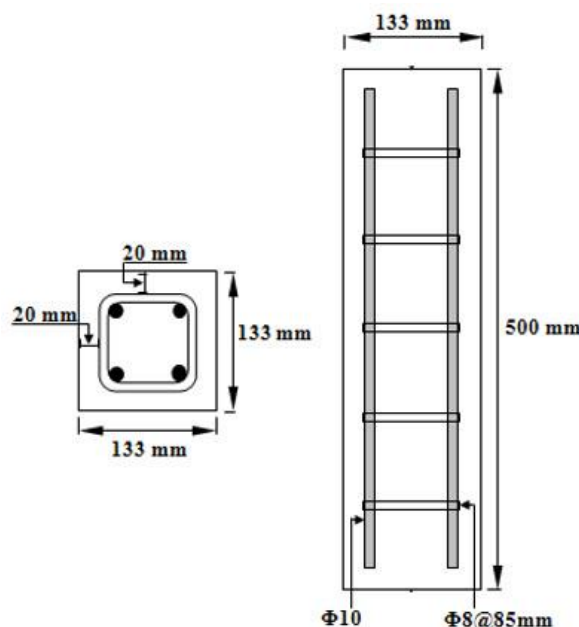
با توجه به مطالب فوق، مشاهده می‌شود که بیش‌تر مطالعات انجام شده در این زمینه، بر روی ستون‌های تحت بار محوری خالص (بدون خروج از مرکزیت) می‌باشد [۲۰-۲۵]؛ این در حالی است که در عمل، اغلب ستون‌ها عملکرد تیر-ستونی دارند و علاوه بر بار محوری، تحت لنگر خمشی (ناشی از خروج از مرکزیت تصادفی بار یا لنگر خمشی انتهایی اعمال شده به ستون) نیز قرار دارند. از طرف دیگر، مطالعات انجام شده در رابطه با ستون‌های بتن آرمه تقویت شده با استفاده از دورپیچ‌های FRP تحت بار محوری و لنگر خمشی محدود بوده و در بعضی از آن‌ها اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی در ستون‌های بتن آرمه‌ی محصور شده بررسی شده است. علاوه بر این، در هیچ پژوهشی تاثیر تقویت ستون با استفاده از روش جدید نوار گوشه-دورپیچ تحت اثر بار محوری و لنگر خمشی بررسی نشده است. از طرف دیگر، با توجه به توزیع غیر یکنواخت تنش محصور کننده در کامپوزیت‌های FRP در ستون‌های چهار گوش و گسیختگی موضعی آن‌ها، لازم است از روش‌هایی برای تقویت ستون‌های چهار گوش استفاده شود که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش محصور کننده روی محیط مقطع شده و بازدهی کامپوزیت FRP را افزایش دهد. بنابراین، مطالعه حاضر برای اولین بار، به منظور ارزیابی تاثیر محصور شدگی ستون‌های بتن آرمه‌ی مربعی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با روش جدید نوار گوشه-دورپیچ تحت اثر اندر کنش بار محوری و لنگر خمشی انجام شده است. برای این منظور، ۱۰ ستون بتن آرمه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف قرار گرفتند و نتایج مربوط به نمونه‌های تقویت شده با روش جدید نوار گوشه-دورپیچ با نمونه‌های شاهد و

نمونه‌های تقویت شده با دورپیچ مقایسه شدند. در پایان نیز نمودار اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصور شده و محصور نشده ترسیم شده و نتایج تجربی با نتایج به دست آمده از آیین‌نامه‌ها مقایسه شده است.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات نمونه‌ها

در این تحقیق ۱۰ عدد ستون بتن آرمه‌ی مربعی به ابعاد مقطع ۱۳۳×۱۳۳ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در این نمونه‌ها، از ۴ عدد میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان میلگرد طولی استفاده گردید؛ به این ترتیب، نسبت میلگرد طولی به کار رفته تقریباً برابر ۱/۱۸٪ سطح مقطع ناخالص نمونه خواهد بود. علاوه بر این، از ۶ عدد خاموت به قطر ۸ میلی‌متر در فواصل ۸۵ میلی‌متر به عنوان میلگرد عرضی استفاده شده است. فاصله‌ی خاموت‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که تأثیر محصور شدگی آن‌ها به حداقل ممکن برسد. پوشش بتن در تمام قسمت‌ها برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و ابعاد میلگردهای طولی و خاموت‌ها با توجه به پوشش بتن قابل محاسبه می‌باشد. جزئیات مربوط به میلگرد گذاری نمونه‌های ستون بتن آرمه در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱: جزئیات میلگرد گذاری نمونه‌های ستون بتن آرمه

۲-۲- مشخصات مصالح

در این پژوهش، طرح اختلاط بتن برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۳۰ مگا پاسکال، مطابق با آیین‌نامه‌ی ۲۱۱ ACI [۲۶]، تعیین گردید. حداکثر بعد دانه‌ی مصرفی با توجه به ابعاد قالب و فاصله‌ی میلگردها برابر با ۱۰ میلی‌متر انتخاب شد. با توجه به مقاومت فشاری مورد نظر و نیز به منظور تأمین کارایی کافی با هدف رسیدن به اسلامپ ۷۵ میلی‌متر، نسبت‌های وزنی سیمن، شن، ماسه و آب در یک متر مکعب بتن به ترتیب برابر با ۱، ۱/۷۴، ۱/۱۱ و ۰/۵۴ می‌باشد.

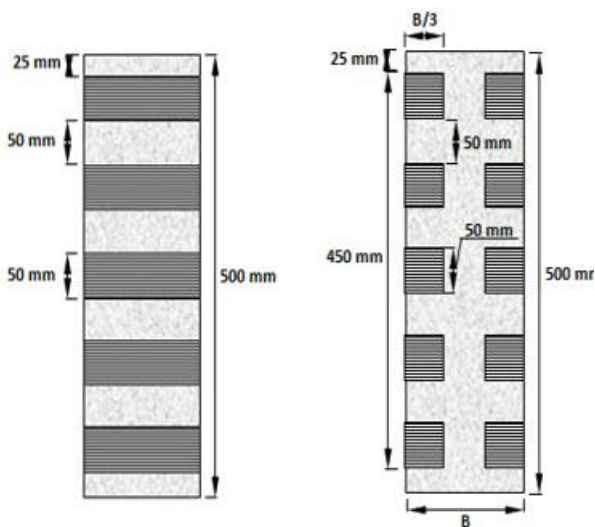
در این تحقیق، تنش تسلیم میلگردهای با قطر ۸ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۵۵۰ و ۴۰۶ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، از الیاف کربن یک طرفه با ضخامت خالص ۰/۱۷ میلی‌متر (SikaWrap-۳۰۰C) و هم‌چنین رزین اپوکسی SikaDur-۳۳۰ استفاده شد. لازم به ذکر است که به منظور ساخت و نصب کامپوزیت-های FRP از روش wet layup استفاده شده است. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین مورد استفاده در این تحقیق، بر اساس کاتالوگ تولید کننده، در جدول ۱ ارائه شده است [۲۷].

جدول ۱: مشخصات مکانیکی الیاف و رزین مصرفی [۲۷]

مصالح	نام تجاری	ضخامت (mm)	کشش نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کشش نهایی (%)
الیاف	SikaWrap-۳۰۰□	۰/۱۷	۳۹۰۰	۲۳۰	۱/۵
رزین	SikaDur-۳۳۰	-	۳۰	۴/۵	۱/۵

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

جهت تقویت نمونه‌ها، ابتدا باید محل‌های مورد نظر برای چسباندن الیاف FRP توسط خط کشی مشخص شود. در این پژوهش، با توجه به نتایج آزمایش‌های اولیه و تحقیقات قبلی نویسندگان [۷ و ۱۸]، نمونه‌های ستون بتن آرمه به صورت غیرپیوسته و متقارن نسبت به مرکز ستون و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصور سازی شدند. در ادامه سطح بتن در محل‌های مشخص شده به لایه‌ی نازکی



شکل ۲: نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون
 (الف) آرایش نوار گوشه؛ (ب) آرایش دورپیچ‌های محصور کننده؛

جدول ۲: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی

گروه	نمونه	روش محصور شدگی	خروج از مرکزیت بار (mm)
۱	R-۰	-	صفر
	W-۰	دورپیچ	صفر
۲	CSW-۰	نوار گوشه-دورپیچ	صفر
	R-۳۰	-	۳۰
۳	CSW-۳۰	نوار گوشه-دورپیچ	۳۰
	R-۶۰	-	۶۰
۴	CSW-۶۰	نوار گوشه-دورپیچ	۶۰
	R-۹۰	-	۹۰
	W-۹۰	دورپیچ	۹۰
	CSW-۹۰	نوار گوشه-دورپیچ	۹۰

۲-۴- شرح آزمایش و ابزار گذاری

در پژوهش حاضر، برای اعمال بار محوری با خروج از مرکزیت روی ستون‌های بتن آرمه از جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن، صفحه و کلاهک مخصوص بارگذاری با خروج از مرکزیت و نیرو سنج استفاده شد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت یک میلی متر بر دقیقه تا لحظه‌ی نهایی شکست انجام شد. بار اعمال شده از طریق فشار روغن و هم‌چنین نیرو سنج اندازه گیری

از چسب آغشته شده و الیاف روی آن قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعد، روی سطح الیاف را نیز با لایه‌ای از چسب آغشته نموده و آن قدر با کاردک روی سطح آن کشیده می‌شود تا از اشباع کامل الیاف با چسب اطمینان حاصل شود.

در این تحقیق، چهار نمونه‌ی محصور نشده به عنوان نمونه‌های شاهد، دو نمونه‌ی محصور شده با استفاده از دورپیچ غیر پیوسته (W^۱) و چهار نمونه‌ی محصور شده با روش نوار گوشه-دورپیچ غیر پیوسته (CSW^۲) تحت آزمایش قرار گرفتند. در روش W، هر نمونه با استفاده از ۵ دورپیچ FRP به طول ۶۰۰ میلی متر، عرض ۵۰ میلی متر و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی متر محصور گردید. در روش CSW، هر نمونه با ۲۰ نوار گوشه به ابعاد ۵۰×۹۰ میلی متر در گوشه‌ها و هم‌چنین ۵ دورپیچ به ابعاد ۵۰×۶۰ میلی متر به صورت غیر پیوسته و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی متر محصور شد. به عبارت دیگر هر دورپیچ روی چهار نوار گوشه نصب گردید. لازم به ذکر است که با توجه به تحقیقات قبلی [۷ و ۱۴]، طول بهینه برای نوار گوشه در روش نوار گوشه-دورپیچ برابر با یک سوم بعد مقطع می‌باشد. بنابراین اندازه‌ی نوارهای گوشه‌ی مورد استفاده در این مطالعه به صورتی در نظر گرفته شد که طول آن روی هر ضلع برابر با یک سوم بعد مقطع باشد. علاوه بر این، به منظور جلوگیری از شکست زودرس ناشی از تمرکز تنش، نمونه‌ها با استفاده از یک لایه دورپیچ اضافی به ابعاد ۵۰×۶۰ میلی متر در دو انتها محصور شدند. نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

نمونه‌های ستون بتن آرمه مورد بررسی در این پژوهش در چهار گروه طبقه بندی شدند که به صورت خلاصه در جدول ۲ آورده شده است. نام گذاری نمونه‌ها در گروه‌های مختلف شامل دو بخش اصلی می‌باشد. در بخش اول، R نشان دهنده‌ی نمونه‌ی محصور نشده (نمونه‌ی شاهد)، W نشان دهنده‌ی نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ غیر پیوسته و CSW نشان دهنده‌ی نمونه‌ی محصور شده با روش نوار گوشه-دورپیچ غیر پیوسته می‌باشد. بخش دوم نیز با توجه به مقدار خروج از مرکزیت بار نام گذاری می‌شود و می‌تواند یکی از مقادیر صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر باشد.

^۲ Corner Strip-Wrap

^۱ Wrap

و به وسیله‌ی یک دیپتالاگر ثبت شد. علاوه بر این، به منظور اعمال بار محوری به صورت خارج از مرکز، دو عدد صفحه برای فک‌های بالا و پایین و همچنین دو عدد کلاهک برای دو انتهای ستون ساخته شد (شکل ۳-الف). این ورق‌های فولادی برای تبدیل بار گسترده به بار نواری (به وسیله‌ی نیم استوانه‌ای که بر روی این ورق‌ها قرار دارد) و کلاهک‌ها برای انتقال هم‌زمان بار محوری و لنگر خمشی به ستون استفاده می‌شود. زیر هر کلاهک چهار شیار وجود دارد که مربوط به خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی‌متر می‌باشد که بر روی نیم استوانه‌ی وسط ورق‌های فولادی قرار می‌گیرد.

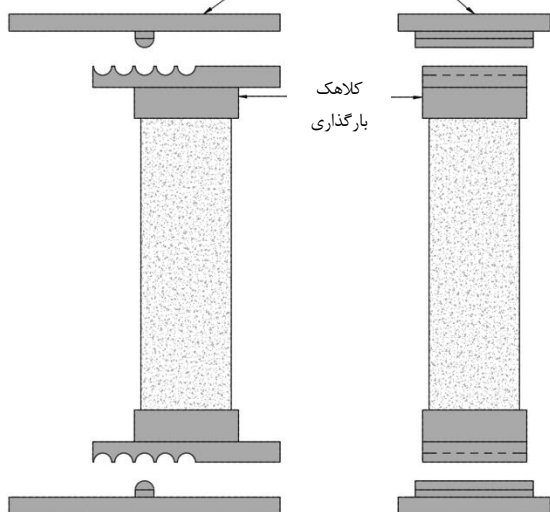
تغییر شکل محوری ستون توسط دو عدد جابه‌جایی سنج (LVDT) با طول ۲۰ میلی‌متر و دقت ۰/۰۵ میلی‌متر که در دو طرف نمونه و روبروی هم قرار گرفته‌اند (یکی در وجه کششی و دیگری در وجه فشاری ستون)، تعیین می‌شود. برای نصب جابه‌جایی سنج‌ها بر روی نمونه از دو عدد قاب فولادی استفاده می‌شود. با توجه به ابعاد جابه‌جایی سنج‌ها و قاب‌های مخصوص نصب آن‌ها، تغییر مکان اندازه‌گیری شده، مربوط به یک سوم میانی نمونه می‌باشد. در شکل ۳-ب تصویری از ستون بتن آرمه تحت بارگذاری و ابزار گذاری آن قابل مشاهده می‌باشد.



(ب) ابزار گذاری نمونه؛

(الف) صفحه و کلاهک بارگذاری؛

صفحه بارگذاری همراه با نیم استوانه



(ج) نحوه‌ی بارگذاری نمونه‌های ستون؛

۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

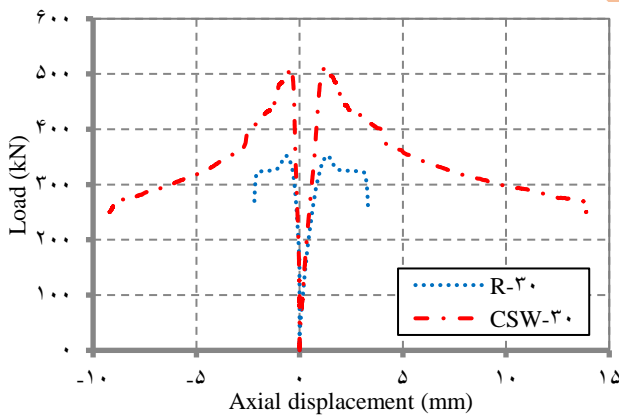
۳-۱- رفتار ستون‌های بتن آرمه

رفتار ستون‌های تحت بارگذاری در خروج از مرکزیت‌های مختلف را می‌توان با منحنی‌های بار-تغییر مکان محوری آن‌ها که در شکل ۴ ارائه شده است، مقایسه کرد. لازم به ذکر است که در این شکل‌ها، مقادیر مثبت تغییر مکان مربوط به تغییر مکان محوری در وجه فشاری نمونه و مقادیر منفی مربوط به تغییر مکان محوری در وجه کششی نمونه می‌باشد. در منحنی‌های ارائه شده در شکل ۴ شیب منحنی‌های هر گروه در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و تا رسیدن به بار حداکثر نمونه‌ی شاهد متناظر تقریباً یکسان است که نشان از سختی برابر نمونه‌های هر گروه در مراحل ابتدایی بارگذاری دارد. با نزدیک شدن به نقطه‌ی مربوط به بار حداکثر نمونه‌ی شاهد و فعال شدن محصور شدگی در نمونه‌های تقویت شده، با توجه به میزان سختی که هر روش تقویت می‌تواند برای نمونه ایجاد کند، شیب منحنی‌ها نیز تا رسیدن به نقطه‌ی حداکثر خود تغییر می‌کند.

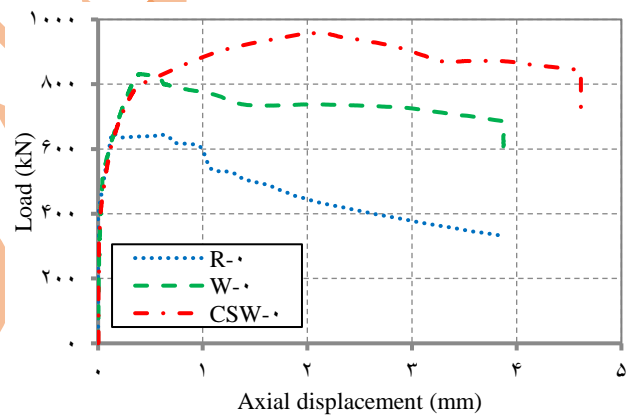
شکل ۳: نحوه‌ی قرار گیری نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت مطابق با شکل ۴، شاخه‌ی دوم منحنی بار-تغییر مکان در نمونه-های تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ (به جز نمونه‌ی CSW-۳۰) به صورت تقریباً افقی جلو رفته که بیان‌گر رفتار پلاستیک کامل و نیز محصور شدگی مؤثر و کافی برای این نمونه‌ها می‌باشد. استفاده از نوارهای گوشه در این نمونه‌ها، باعث می‌شود تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع که منجر به توزیع غیر یکنواخت فشار محصور کننده روی محیط و پارگی زود هنگام کامپوزیت در

تنش در گوشه‌های مقطع باشد که باعث می‌شود فشار محصور شدگی به صورت غیر یکنواخت روی محیط نمونه توزیع شده و نوارهای محصور کننده نتوانند به صورت مؤثر عمل کنند. استدلال مزبور با توجه به مود گسیختگی نمونه‌ها تایید می‌شود. بر اساس مقایسه‌ی انجام گرفته روی نمونه‌های تقویت شده می‌توان نتیجه گرفت که هر چه کامپوزیت بتواند از ظرفیت خود به صورت بیشتر و مؤثرتر برای محصور سازی استفاده نماید، در این صورت نمونه به میزان کافی محصور شده و رفتار آن نیز به سمت سخت شدگی کرنشی خواهد رفت. علاوه بر این، منحنی بار-تغییر مکان مربوط به نمونه‌های شاهد نیز پس از نقطه‌ی اوج به صورت کاملاً نزولی و با شیب تند امتداد پیدا کرده و رفتار نرم شدگی کرنش به صورت کامل برای آن‌ها مشاهده می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که محصور شدگی ناشی از فولادهای عرضی داخلی نیز مؤثر نبوده است.

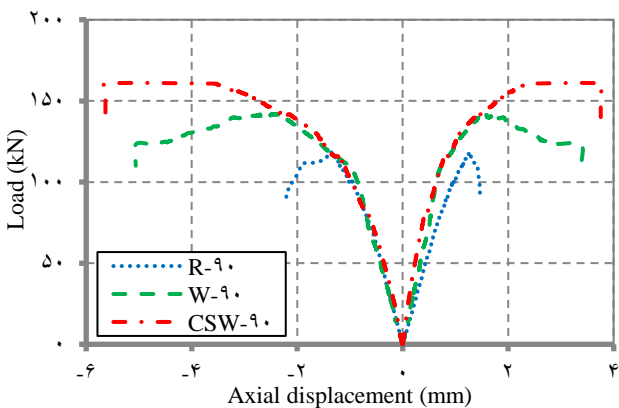
گوشه‌ها می‌شود، کنترل شده و میزان کارایی کامپوزیت در محصور سازی افزایش یابد. این در حالی است که رفتار نمونه‌ی CSW-۳۰ بعد از باربری حداکثر به صورت نرم شدگی کرنش می‌باشد. لازم به است که اگر چه رفتار نمونه‌ی مذکور به صورت نرم شدگی کرنش می‌باشد، ولی با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری، تغییر مکان محوری و سطح زیر منحنی در این نمونه به صورت قابل توجهی بیشتر از نمونه‌ی R-۳۰ می‌باشد که این مطلب نشان دهنده‌ی عملکرد مناسب روش نوار گوشه-دورپیچ می‌باشد. از طرف دیگر، در دو نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از دورپیچ، شاخه‌ی دوم منحنی بار-تغییر مکان به صورت نزولی (شیب منفی) بوده که نشان می‌دهد رفتار این نمونه به صورت نرم شدگی کرنش می‌باشد و به نظر می‌رسد محصور شدگی به میزان مؤثر در این نمونه تأمین نشده است. دلیل این پدیده در نمونه‌های مذکور می‌تواند وجود تمرکز



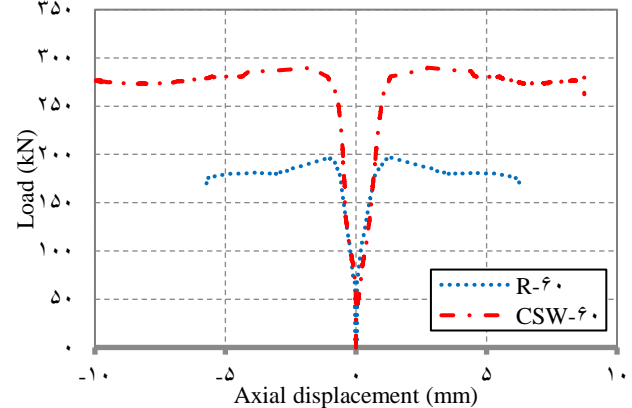
ب) گروه دوم؛



الف) گروه اول؛



د) گروه چهارم؛



ج) گروه سوم؛

شکل ۴: منحنی‌های بار-تغییر مکان نمونه‌های مختلف

۲-۳- مود گسیختگی

جهت بررسی و مقایسه‌ی نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مختلف، تصاویر مربوط به شکست نمونه‌ها در شکل ۵ نمایش داده شده است. بر اساس این شکل، شکست تمامی نمونه‌های تقویت شده با پارگی FRP همراه می‌باشد و صرف نظر از نحوه‌ی تقویت، پارگی کامپوزیت در نواحی یک سوم میانی ارتفاع ستون رخ می‌دهد.

با توجه به شکل ۵، شکست نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در میانه-ی ارتفاع ستون اتفاق افتاده است. در حین بارگذاری این نمونه، ابتدا ترک‌هایی به موازات بار محوری فشاری ایجاد شده و پس از آن با ریختن پوسته‌ی بتن و سپس کمانش آرماتورهای طولی، بعد از رسیدن به نقطه‌ی باربری حداکثر، نمونه با رفتاری کاملاً نرم دچار شکست می‌شود. در نمونه‌ی تقویت شده با روش دورپیچ، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع و وجود اثر برندگی گوشه‌ها روی FRP منجر به پارگی زود هنگام کامپوزیت در ناحیه‌ی گوشه شده و این موضوع باعث می‌شود که تمام ظرفیت کششی کامپوزیت مصرفی در محصور سازی نمونه استحصال نشود. این در حالی است که در نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ، پارگی کامپوزیت محصور کننده در ناحیه‌ی میانی یکی از اضلاع اتفاق افتاده است. این مشاهده نشان می‌دهد که تقویت موضعی در گوشه‌های مقطع با استفاده از نوارهای گوشه پیش از دورپیچی با نوارهای محصور کننده‌ی افقی، تمرکز تنش در گوشه‌ها را روی لایه‌ی محصور کننده کاهش داده و از پارگی زود هنگام کامپوزیت در نواحی گوشه‌ی مقطع جلوگیری می‌کند. این امر باعث می‌شود که بازدهی کامپوزیت در محصور سازی ستون افزایش یابد.

گسیختگی نهایی نمونه‌های تحت بار با خروج از مرکزیت نیز در یک سوم میانی ارتفاع ستون رخ داده است. در نمونه‌های شاهد، شکست نمونه به صورت ایجاد ترک‌های افقی در وجه کششی و خرد شدن و ریختن پوسته‌ی بتن و کمانش آرماتورهای طولی در وجه فشاری می‌باشد. در نمونه‌های تقویت شده با استفاده از روش‌های دورپیچ و نوار گوشه-دورپیچ، گسیختگی نمونه به صورت ایجاد ترک-های خمشی در وجه کششی و خرد شدن بتن و پارگی FRP محصور کننده در وجه فشاری می‌باشد.



(ب) R-۳۰؛



(الف) R-۰؛



(د) CSW-۰؛



(ج) W-۰؛



(و) CSW-۶۰؛



(ه) CSW-۳۰؛

شکل ۵: نحوه‌ی گسیختگی بعضی از نمونه‌های آزمایشگاهی

۳-۳- ظرفیت باربری

نتایج آزمایشگاهی شامل ظرفیت باربری، بار نهایی، تغییر مکان محوری نهایی در وجه کششی و فشاری و لنگر خمشی حداکثر در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی نمونه‌های گروه اول تحت بارگذاری محوری خالص قرار گرفته و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس اطلاعات موجود در این جدول، برای نمونه‌ی شاهد بدون تقویت (R-۰) میزان بار حداکثر و نهایی به ترتیب برابر ۶۴۹ و ۵۵۲ کیلو نیوتن ثبت شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های

شاهد به علت وجود آرماتورهای داخلی و عدم تقویت خارجی، دارای شکست کاملاً نرم بوده و بر خلاف نمونه‌های تقویت شده، از نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی در لحظه‌ی نهایی برخوردار نمی‌باشند. به همین جهت و با توجه به مطالعاتی که در گذشته انجام شده، برای گزارش مشخصات باربری نهایی این نمونه‌ها از نقطه‌ی معادل ۸۵ درصد بار حداکثر، در شاخه‌ی نزولی نمودار بار-تغییر مکان استفاده شده است [۲۸]. بر این اساس تغییر مکان محوری ثبت شده برای نمونه‌ی شاهد در این نقطه برابر با ۱/۰۵ میلی متر می‌باشد. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی محصور شده با استفاده از دورپیچ (W-۰)، بار حداکثر و نهایی به ترتیب برابر ۸۳۲ و ۶۸۳ کیلو نیوتن می‌باشد که نشان دهنده‌ی افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۸/۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد است. همچنین تغییر مکان محوری در نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برای این نمونه برابر با ۳/۸۷ میلی متر ثبت شده است. در نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ (CSW-۰) نیز بار حداکثر و نهایی به ترتیب برابر ۹۵۸ و ۸۴۴ کیلو نیوتن مشاهده شده است. به عبارت دیگر، ظرفیت باربری این نمونه نسبت به نمونه‌های R-۰ و W-۰ به ترتیب به میزان ۴۷/۶٪ و ۱۵/۱٪ افزایش یافته است. هم-چنین مقدار تغییر مکان محوری این نمونه در لحظه‌ی نهایی به ۴/۶۱ میلی متر رسیده است.

نمونه‌های گروه دوم تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۳۰ میلی متر قرار گرفته‌اند. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بار حداکثر و نهایی نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در این گروه (R-۳۰) به ترتیب برابر با ۳۵۲ و ۳۱۲ کیلو نیوتن می‌باشد. با ضرب کردن مقدار بار حداکثر در میزان خروج از مرکزیت که ۳۰ میلی‌متر می‌باشد، مقدار لنگر حداکثر که برابر با ۱۰/۵۶ کیلو نیوتن متر است، به دست می‌آید. لازم به توضیح است که در این نمونه نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی مشاهده شد و بار مربوط به شکست آزمایشگاهی به عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. میزان تغییر مکان محوری در وجه فشاری و کششی برای این نمونه در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۲۰ و ۲/۱۱ میلی متر ثبت شده است. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ (CSW-۳۰)، میزان باربری حداکثر و نهایی به ترتیب برابر ۵۱۰ و ۳۹۰ کیلو نیوتن، و مقدار لنگر خمشی حداکثر برابر ۱۵/۳۰ کیلو نیوتن متر می‌باشد. با توجه به مقادیر فوق،

ظرفیت باربری این نمونه به میزان ۴۴/۹٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. همچنین مقدار تغییر مکان محوری نهایی در وجه فشاری و کششی نمونه‌ی مذکور به ترتیب برابر با ۴/۴۴ و ۲/۷۵ اندازه گیری شده است.

در نمونه‌های گروه سوم که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۶۰ میلی متر قرار گرفته‌اند، ظرفیت باربری و بار نهایی نمونه‌ی شاهد (R-۶۰) به ترتیب برابر با ۱۹۷ و ۱۷۰ کیلو نیوتن می‌باشد. با ضرب کردن مقدار بار حداکثر در میزان خروج از مرکزیت که ۶۰ میلی‌متر می‌باشد، مقدار لنگر حداکثر برابر با ۱۱/۸۲ کیلو نیوتن متر به دست می‌آید. لازم به توضیح است که در این نمونه نیز نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی به عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان تغییر مکان محوری در وجه فشاری و کششی برای این نمونه در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۶/۲۶ و ۵/۷۳ میلی متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصور شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ (CSW-۶۰)، مقدار بار حداکثر و نهایی نمونه به ترتیب برابر ۲۹۰ و ۲۶۲ کیلو نیوتن و مقدار لنگر خمشی حداکثر برابر ۱۷/۴۰ کیلو نیوتن متر بوده و تغییر مکان‌های محوری نهایی در وجه فشاری و کششی نمونه به ترتیب برابر با ۸/۷۵ و ۱۰/۱۴ میلی متر می‌باشد. با توجه به نتایج مزبور، ظرفیت باربری نمونه‌ی CSW-۶۰ به میزان ۴۷/۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است.

از طرف دیگر، بار حداکثر و بار نهایی (نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی) نمونه‌ی شاهد در گروه چهارم (R-۹۰) به ترتیب برابر با ۱۱۹ و ۹۸ کیلو نیوتن می‌باشد. با ضرب کردن مقدار بار حداکثر در خروج از مرکزیت ۹۰ میلی متر، مقدار لنگر خمشی حداکثر برابر با ۱۰/۷۱ کیلو نیوتن متر به دست می‌آید. میزان تغییر مکان محوری در وجه فشاری و کششی برای این نمونه در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۱/۴۷ و ۲/۱۴ میلی متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصور شده با استفاده از دورپیچ غیر پیوسته (W-۹۰)، مقدار بار حداکثر و نهایی نمونه به ترتیب برابر با ۱۴۲ و ۱۲۳ کیلو نیوتن و مقدار لنگر خمشی حداکثر برابر با ۱۲/۷۸ کیلو نیوتن متر بوده و تغییر مکان‌های محوری نهایی در وجه فشاری و کششی نمونه به ترتیب برابر با ۳/۳۹ و ۵/۰۶ میلی متر می‌باشد. با توجه به این نتایج، مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ

به میزان ۱۹/۳٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است. برای نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ (CSW-۹۰)، میزان بار حداکثر و بار نهایی یکسان و برابر با ۱۶۱ کیلو نیوتن و مقدار لنگر خمشی حداکثر برابر با ۱۴/۴۹ کیلو نیوتن متر می‌باشد. هم‌چنین مقدار تغییر مکان محوری در وجه فشاری و

کششی در لحظه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۷۶ و ۵/۶۴ میلی متر ثبت شده است. به عبارت دیگر، ظرفیت باربری این نمونه نسبت به نمونه‌های R-۹۰ و W-۹۰ به ترتیب به میزان ۳۵/۲٪ و ۱۳/۴٪ افزایش داشته است.

جدول ۳: نتایج به دست آمده از آزمایش ستون‌های بتن آرمه

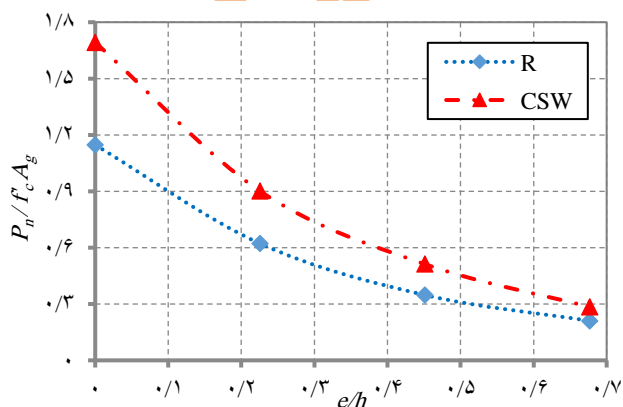
نمونه	e^* (mm)	بار حداکثر (kN)	بار نهایی (kN)	تغییر مکان نهایی محوری در وجه فشاری (mm)	تغییر مکان نهایی محوری در وجه کششی (mm)	لنگر خمشی حداکثر (kN.m)	λ_δ	λ_E	افزایش بار حداکثر نسبت به نمونه شاهد (%)	افزایش شکل پذیری نسبت به نمونه شاهد (%)
R-۰	۰	۶۴۹	۵۵۲	۱/۰۵	-	۰	۱/۷۰	۱/۶۸	-	-
W-۰	۰	۸۳۲	۶۸۳	۳/۸۷	-	۰	۶/۶۸	۶/۸۵	۲۸/۲	۳۰/۱
CSW-۰	۰	۹۵۸	۸۴۴	۴/۶۱	-	۰	۱۰/۲۴	۱۳/۶۴	۴۷/۶	۶۰/۷
R-۳۰	۳۰	۳۵۲	۳۱۲	۳/۲۰	۲/۱۱	۱۰/۵۶	۲/۶۹	۳/۰۹	-	-
CSW-۳۰	۳۰	۵۱۰	۳۹۰	۴/۴۴	۲/۷۵	۱۵/۳۰	۴/۴۱	۵/۶۷	۴۴/۹	۷۴
R-۶۰	۶۰	۱۹۷	۱۷۰	۶/۲۶	۵/۷۳	۱۱/۸۲	۲/۳۲	۲/۴۰	-	-
CSW-۶۰	۶۰	۲۹۰	۲۶۲	۸/۷۵	۱۰/۱۴	۱۷/۴۰	۸/۰۷	۱۲/۲۴	۴۷/۲	۳۳/۰
R-۹۰	۹۰	۱۱۹	۹۸	۱/۴۷	۲/۱۴	۱۰/۷۱	۱/۳۷	۱/۶۱	-	-
W-۹۰	۹۰	۱۴۲	۱۲۳	۳/۳۹	۵/۰۶	۱۲/۷۸	۱/۴۱	۲/۵۱	۱۹/۳	۳۲
CSW-۹۰	۹۰	۱۶۱	۱۶۱	۳/۷۶	۵/۶۴	۱۴/۴۹	۳/۱۹	۴/۹۵	۳۵/۲	۱۷۳

* خروج از مرکزیت بار

ظرفیت باربری ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP در مقایسه با نمونه‌های شاهد متناظر افزایش یافته است. با این حال با افزایش خروج از مرکزیت بار، نرخ رشد ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد (اختلاف دو منحنی موجود در شکل ۶) کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری در نمونه‌هایی که با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ محصور شده‌اند، بسیار بالاتر از ظرفیت باربری نمونه‌های محصور شده با دورپیچ می‌باشد. به عبارت دیگر، هنگامی که برای محصور شدگی ستون‌های بتن آرمه، از نوارهای گوشه در زیر دورپیچ‌های FRP استفاده می‌شود، به دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های محصور شدگی در محیط ستون، عملکرد کامپوزیت‌های FRP در افزایش ظرفیت باربری ستون بهبود پیدا می‌کند.

منحنی تغییرات ظرفیت باربری با توجه به تغییرات خروج از مرکزیت بار (به صورت بدون بعد) در شکل ۶ ارائه شده است. در این منحنی به منظور بدون بعد کردن محور قائم، ظرفیت باربری (P_n) بر مقاومت فشاری بتن (f'_c) و سطح مقطع ناخالص ستون (A_g) تقسیم می‌شود؛ و برای بدون بعد کردن محور افقی، خروج از مرکزیت بار (e) بر بعد مقطع ستون (h) تقسیم می‌گردد. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که در خروج از مرکزیت‌های مختلف



شکل ۶: تاثیر خروج از مرکزیت بار بر ظرفیت باربری ستون (به صورت بی بعد)

۴-۳- شکل پذیری

جهت مقایسه‌ی شکل پذیری نمونه‌های مختلف این تحقیق، از دو شاخص شکل پذیری تغییر مکان و شاخص شکل پذیری انرژی استفاده می‌شود.

$$\lambda_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

$$\lambda_E = \frac{A_u}{A_y} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۱)، λ_{δ} شاخص شکل پذیری تغییر مکان، δ_u تغییر مکان محوری در نقطه‌ی نهایی و δ_y تغییر مکان محوری در نقطه‌ی تسلیم می‌باشد. در شاخص شکل پذیری انرژی، از سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان محوری که بیان‌گر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد، استفاده شده است. در این روش، شکل پذیری با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌گردد. در این رابطه، λ_E شاخص شکل پذیری انرژی، A_u سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان محوری تا نقطه‌ی نهایی و A_y سطح زیر منحنی بار-تغییر مکان محوری تا نقطه‌ی تسلیم می‌باشد [۲۹].

تعیین تغییر مکان تسلیم در سازه‌های بتن آرمه به دلیل نبود نقطه‌ی تسلیم مشخص در منحنی بار-تغییر مکان همواره با پیچیدگی‌های زیادی روبرو بوده که عمدتاً به دلیل رفتار غیر خطی مواد و یا وقوع تسلیم در نواحی مختلف سازه و در سطوح متفاوت بار می‌باشد. در این تحقیق تغییر مکان تسلیم با دو خطی سازی منحنی پوش نمونه‌ها بر اساس شیوه‌ی سختی کاهش یافته انجام می‌شود. در این روش، تغییر مکان متناظر با کوچک‌ترین دو مقدار تسلیم آرماتور و یا ۷۵ درصد بار حداکثر بر روی منحنی رفتاری سازه تعیین شده و شیب ناحیه‌ی الاستیک منحنی دو خطی به صورت سختی سکانت این نقطه تعیین می‌شود. تغییر مکان متناظر با ۱۵ درصد افت مقاومت نیز به عنوان تغییر مکان نهایی در نظر گرفته شده است [۲۸ و ۲۹]. در جدول ۳ مقادیر به دست آمده برای شاخص‌های شکل پذیری تغییر مکان و انرژی نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، شکل پذیری در ستون‌های محصور شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ در

خروج از مرکزهای صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر به ترتیب به میزان ۶۰٪، ۷۴٪، ۳۳٪، ۱۷۳٪ نسبت به نمونه‌ی محصور نشده‌ی متناظر افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، افزایش خروج از مرکزیت بار منجر به کاهش شکل پذیری در ستون‌های تقویت شده در مقایسه با ستون تحت بار محوری خالص می‌شود. با این حال، ستون‌های تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP شکل پذیری بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد از خود نشان می‌دهند. لازم به ذکر است افزایش‌های گزارش شده برای شکل پذیری، میانگین افزایش شاخص شکل پذیری تغییر مکان و شاخص شکل پذیری انرژی می‌باشد.

از طرف دیگر، در ستون‌های تحت بار محوری خالص، افزایش شکل پذیری در نمونه‌های محصور شده با استفاده از روش دورپیچ و نوار گوشه-دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۳۰٪ و ۶۰٪ درصد می‌باشد. علاوه بر این، در ستون‌های تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۹۰ میلی متر، شکل پذیری در ستون‌های محصور شده با دورپیچ و نوار گوشه-دورپیچ به ترتیب به میزان ۳۲٪ و ۱۷۳٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از تکنیک نوار گوشه-دورپیچ با بهبود عملکرد کامپوزیت در محصور سازی، موجب افزایش قابل توجه شکل پذیری ستون نسبت به نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ غیر پیوسته می‌گردد.

۴- منحنی اندرکنش بار محوری-لنگر خمشی

۴-۱- ستون‌های محصور نشده

به منظور ترسیم منحنی اندرکنش بار محوری-لنگر خمشی آزمایشگاهی (P-M)، از مقادیر حدکثر بار محوری و لنگر خمشی که در طول آزمایش به دست آمده است، استفاده می‌شود. علاوه بر این، حداکثر مقادیر تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر را می‌توان از طریق معادلات تعادل نیرو و معادلات همسازی کرنش محاسبه نمود [۳۰]. لازم به ذکر است که در محاسبه‌ی مقادیر تئوری، ضریب کاهش مقاومت برابر با یک در نظر گرفته شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری به دست آمده برای بار محوری و لنگر خمشی حداکثر در ستون‌های محصور نشده در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد. به

۴-۲- ستون‌های محصور شده با روش نوار گوشه-دورپیچ در این پژوهش، به منظور محاسبه‌ی نقاط مختلف منحنی اندرکنش بار محوری-لنگر خمشی نمونه‌های محصور شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ به صورت تئوری، از آیین‌نامه‌ی ACI ۴۴۰ [۱] استفاده می‌شود. در آیین‌نامه‌ی ACI ۴۴۰ [۱] از مدل تنش- کرنش لام و تنگ برای پیش‌بینی رفتار بتن محصور شده تحت اثر نیروی محوری فشاری استفاده می‌شود. بر اساس مدل لام و تنگ، حداکثر تنش محصور کننده (f_l)، مقاومت فشاری بتن محصور شده (f'_{cc}) و کرنش نهایی بتن محصور شده (ϵ_{ccu}) با استفاده از روابط (۳) تا (۵) محاسبه می‌شود.

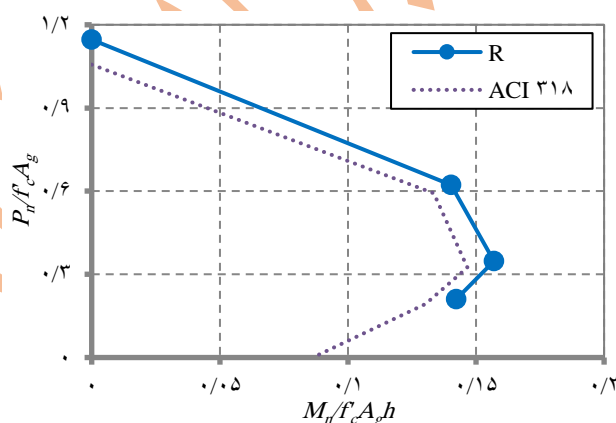
$$f_l = \frac{2nE_f t_f \epsilon_{fe}}{\sqrt{b^2 + h^2}} \quad (3)$$

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3\kappa_a f_l \quad (4)$$

$$\epsilon_{ccu} = 0.002 \left[1.5 + 12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\epsilon_{fe}}{0.002} \right)^{0.45} \right] \quad (5)$$

در روابط فوق، n تعداد لایه‌های FRP، E_f مدول الاستیسیته-ی کششی کامپوزیت FRP، t_f ضخامت اسمی لایه‌ی FRP مورد استفاده، ϵ_{fe} کرنش موثر FRP در لحظه‌ی گسیختگی و b بعد کوچک‌تر مقطع ستون می‌باشد. همچنین ضرایب شکل κ_b و κ_a با استفاده از روابط (۶) تا (۸) محاسبه می‌شود.

منظور بررسی اختلاف مقادیر آزمایشگاهی و تئوری، در ستون آخر جدول ۴، نسبت ظرفیت باربری تئوری به آزمایشگاهی ارائه شده است. شکل ۷ منحنی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌های محصور نشده را به صورت بدون بعد نشان می‌دهد. به منظور بدون بعد کردن منحنی مذکور، بار محوری (P_n) بر $f'_c A_g$ و لنگر خمشی (M_n) بر $f'_c A_g h$ تقسیم می‌شود. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه از مقادیر به دست آمده با استفاده از روابط تئوری بیشتر می‌باشد؛ که نشان‌دهنده‌ی درجهت اطمینان بودن روابط ارائه شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸ [۳۰] می‌باشد.



شکل ۷: منحنی اندرکنش بار محوری-لنگر خمشی برای نمونه‌های شاهد

جدول ۴: مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تئوری ستون‌های بتن آرمه‌ی مورد بررسی در این پژوهش

نمونه	e/h	مقادیر آزمایشگاهی		مقادیر تئوری		نسبت مقادیر تئوری به مقادیر آزمایشگاهی
		بار محوری (kN)	لنگر خمشی (kN.m)	بار محوری (kN)	لنگر خمشی (kN.m)	
R-۰	۰	۶۴۹	۰	۵۹۸	۰	۰/۹۲
R-۳۰	۰/۲۳	۳۵۲	۱۰/۵۶	۳۳۵	۱۰/۰۵	۰/۹۵
R-۶۰	۰/۴۵	۱۹۷	۱۱/۸۲	۱۸۴	۱۱/۰۴	۰/۹۳
R-۹۰	۰/۶۸	۱۱۹	۱۰/۷۱	۱۰۹	۹/۸۱	۰/۹۲
R-PB	بی نهایت	-	-	۰	۶/۱۰	-
CSW-۰	۰	۹۵۸	۰	۶۸۱	۰	۰/۷۱
CSW-۳۰	۰/۲۳	۵۱۰	۱۵/۳۰	۴۲۶	۱۲/۷۸	۰/۸۴
CSW-۶۰	۰/۴۵	۲۹۰	۱۷/۴۰	۲۳۷	۱۴/۲۲	۰/۸۲
CSW-۹۰	۰/۶۸	۱۶۱	۱۴/۴۹	۱۲۲	۱۰/۹۸	۰/۷۶
CSW-PB	بی نهایت	-	-	۰	۶/۶۰	-

همان طور که در جدول ۴ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، معادلات تئوری منجر به تخمین‌های محافظه کارانه می‌شود. این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که مقادیر تئوری به دست آمده برای بار محوری و لنگر خمشی اساساً به یک کرنش محوری فرضی در دورترین تار فشاری بتن وابسته می‌باشد؛ این در حالی است که در نمونه‌های محصور شده با کامپوزیت‌های FRP تحت اثر بار محوری با خروج از مرکزیت، ممکن است کرنش در دورترین تار فشاری بتن از مقادیر در نظر گرفته شده در آیین نامه فراتر رود.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور بررسی رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن آرمه‌ی محصور شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ، تعداد ۱۰ نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر آزمایش شد. از این تعداد، ۴ نمونه بدون تقویت خارجی و به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شدند؛ ۲ نمونه با استفاده از روش دورپیچ و ۴ نمونه‌ی دیگر نیز با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ محصور شدند. در ادامه برخی از نتایج این تحقیق ارائه شده است.

۱- شکست نمونه‌های محصور شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰ و ۶۰ میلی متر قرار گرفتند، با پارگی کامپوزیت در وجه فشاری ستون همراه بود. محل گسیختگی همه‌ی نمونه‌ها در ارتفاع، در یک سوم میانی ارتفاع ستون مشاهده شد.

۲- استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ در محصور سازی ستون، توانسته است که با ایجاد توزیع یکنواختی از فشار محصور کننده روی محیط و حذف اثرات منفی ناشی از تمرکز تنش در گوشه‌ها، محل پارگی FRP را از نواحی گوشه به وسط ضلع که بیشترین تنش‌ها و کرنش‌های کششی در آن اتفاق می‌افتد، منتقل می‌کند. به عبارت دیگر در روش نوار گوشه-دورپیچ نسبت به روش متداول دورپیچ، ظرفیت بیشتری از کامپوزیت FRP استحصال می‌شود.

۳- استفاده از نوارهای گوشه به منظور مقاوم سازی موضعی گوشه‌های مقطع پیش از دورپیچی با نوارهای محصور کننده در روش نوار گوشه-دورپیچ، موجب افزایش مقاومت و شکل پذیری نمونه به مقدار قابل توجه می‌شود. برای مثال، در خروج از مرکزیت صفر میلی

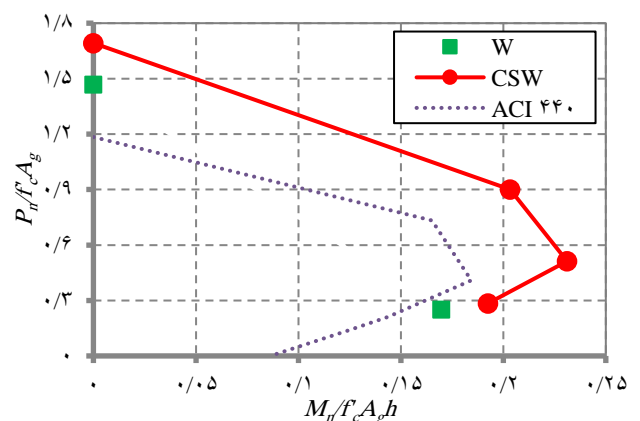
$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (6)$$

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \left[\left(\frac{b}{h} \right) (h - 2r_c)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b - 2r_c)^2 \right] - \rho_g}{3A_g - \rho_g} \quad (8)$$

در روابط فوق، A_e سطح مقطع بتن محصور شده به صورت موثر، A_c سطح مقطع بتن، r_c شعاع گوشه‌ی مقطع، A_g سطح مقطع ناخالص ستون و ρ_g نسبت سطح مقطع میلگردهای طولی به سطح مقطع ناخالص ستون می‌باشد.

نمودار آزمایشگاهی لندركنش بار محوری و لنگر خمشی با استفاده از مقادیر حداکثر بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌ی محصور شده ترسیم شده است. از طرف دیگر، با استفاده از روابط ارائه شده در این بخش، مقادیر تئوری حداکثر بار محوری و لنگر خمشی برای خمش خالص و خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ میلی متر محاسبه شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصور شده و همچنین نسبت مقادیر تئوری به آزمایشگاهی در جدول ۴ قابل مشاهده می‌باشد. به علاوه، منحنی اندركنش آزمایشگاهی و تئوری برای نمونه‌های محصور شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸: منحنی اندركنش بار محوری-لنگر خمشی برای نمونه‌های محصور شده

pp. ۱۱۳-۱۲۴. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-2688\(2009\)13:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-2688(2009)13:2(113)).

[۴] Realfonzo, R., Napoli, A., ۲۰۰۹. Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices. *Journal of Structural Engineering*, ۱۳۵(۱۰), pp. ۱۱۶۴-۱۱۷۶. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000048).

[۵] Saljoughian, A., Mostofinejad, D., Hosseini, S.M., ۲۰۱۹. CFRP confinement in retrofitted RC columns via CSB technique under reversed lateral cyclic loading. *Materials and Structures*, ۵۲, pp. ۱-۱۴. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1373-6>.

[۶] Zignago, D., Barnato, M., ۲۰۲۳. New analytical analysis-oriented stress-strain model for FRP-and-steel confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, ۱۴۹(۱), p. ۰۴۰۲۲۲۱۲. <https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-11634>.

[۷] Saljoughian, A., Mostofinejad, D., ۲۰۲۰. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, ۲۳۵, p. ۱۱۷۷۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117786>.

[۸] Shayanfar, J., Barros, J.A., Rezazadeh, M., ۲۰۲۲. Unified model for fully and partially FRP confined circular and square concrete columns subjected to axial compression. *Engineering Structures*, ۲۵۱, p. ۱۱۳۳۵۵. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113355>.

[۹] Saljoughian, A., Mostofinejad, D., ۲۰۱۷. Rectangular reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer sheets using corner strip-batten method. *ACI Structural Journal*, ۱۱۴(۳), pp. ۶۵۹-۶۷۱. <https://doi.org/10.14359/51689566>.

[۱۰] Fanaradeli, T., Rousakis, T., Karabinis, A., ۲۰۱۹. Reinforced concrete columns of square and rectangular section, confined with FRP-Prediction of stress and strain at failure. *Composites Part B: Engineering*, ۱۷۴, p. ۱۰۷۰۴۶. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107046>.

[۱۱] Xie, D., Hu, Z., Wang, B., and et al., ۲۰۲۳. Axial behaviour of basalt FRP-confined reinforced concrete columns with square sections of different corner radii. *Engineering Structures*, ۲۷۴, p. ۱۱۵۱۵۳. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115153>.

[۱۲] Fan, L., Jin, L., Du, X., ۲۰۲۳. Modeling of size effect on compressive behaviour of CFRP-confined rectangular RC columns: Influence of corner radius and aspect ratio. *Composite Structures*, ۳۰۴, p. ۱۱۶۴۰۰. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116400>.

[۱۳] Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., ۲۰۱۶. Corner strip-batten technique for FRP-confinement of square RC columns under eccentric loading. *Journal of Composites for*

متر، ظرفیت باربری و شکل پذیری نمونه‌ی تقویت شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ به ترتیب به میزان ۱/۱۵٪ و ۵/۷۶٪ درصد، نسبت به نمونه‌ی محصور شده با دورپیچ افزایش می‌یابد.

۴- به طور کلی، تا خروج از مرکزیت معادل وضعیت متوازن (۶۰ میلی متر)، با افزایش خروج از مرکزیت بار میزان افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌ی شاهد تقریباً ثابت باقی می‌ماند و پس از آن کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، در خروج از مرکزیت‌های صفر، ۶۰ و ۹۰ میلی متر، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های محصور شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر به ترتیب برابر با ۴۷/۶٪، ۴۷/۲٪ و ۳۵/۲٪ می‌باشد.

۵- بر اساس نتایج آزمایشگاهی، با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان افزایش شکل پذیری در نمونه‌های محصور شده با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، شکل پذیری در نمونه‌های محصور شده با روش CSW تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر و ۶۰ میلی متر به ترتیب به میزان ۶۰٪ و ۳۳٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش می‌یابد.

۶- مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده برای بار محوری و لنگر خمشی در ستون‌های تقویت شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP و همچنین ستون‌های بدون تقویت خارجی، بیشتر از مقادیر تئوری و در جهت اطمینان می‌باشد. به نظر می‌رسد که علت این پدیده، تفاوت در مقدار واقعی کرنش ایجاد شده در دورترین تار فشاری بتن نسبت به مقدار محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری باشد.

منابع

[۱] ACI 440.2R, ۲۰۱۷, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. <https://doi.org/10.14359/51700867>.

[۲] Piekarczyk, J., Piekarczyk, W., Blazewicz, S., ۲۰۱۰. "ompression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber *Construction and Building Materials*, ۲۵, pp. ۲۳۶۵-۲۳۶۹. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.035>.

[۳] Eid, R., Roy, N., Paultre, P., ۲۰۰۹. Normal- and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites. *Journal of Composites for Construction*, ۱۳(۲),

Construction and Building Materials, ۲۹۹, p.۱۲۴۲۴۱. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.124241>.

[۲۵] Wang, Y.C., Hsu, K., ۲۰۰۸. Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity. *Composite Structures*, ۸۲(۱), pp.۱۳۲-۱۳۹. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.04.002>.

[۲۶] ACI ۳۱۱.۱., ۲۰۰۹. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (Reapproved ۲۰۰۹). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

[۲۷] <http://www.sika.com/>.

[۲۸] Park, R., ۱۹۸۹. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, ۲۲(۳), pp.۱۵۵-۱۶۶.

[۲۹] Saljoughian, A., Mostofinejad, D., ۲۰۲۰. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, ۲۳۵, p.۱۱۷۷۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117786>.

[۳۰] ACI ۳۱۸., ۲۰۱۹. Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Construction, ۲۰(۳), p.۰۴۰۱۵۰۷۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000644](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000644).

[۱۴] Mostofinejad, D., Ilia, E., ۲۰۱۴. Confining of square RC columns with FRP sheets using corner strip-batten technique. *Construction and Building Materials*, ۷۰, pp.۲۶۹-۲۷۸. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.073>

[۱۵] Wang, W., Sheikh, M.N., Zeng, J.J., and et al., ۲۰۲۲. Ultimate strain prediction of partially FRP confined concrete considering strain localization. *Construction and Building Materials*, ۳۴۶, p.۱۲۸۴۸۶. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128486>.

[۱۶] Djenad, S., Si-Salem, A., Bouzidi, M.A., ۲۰۲۲. Performance and compressive axial behaviour of new design partially confined concrete columns with encased-FRP/Grids strips. *Asian Journal of Civil Engineering*, ۲۳(۶), pp.۸۰۱-۸۱۵. <https://doi.org/10.1007/s42107-022-00450-y>.

[۱۷] Xing, L., Lin, G., Chen, J.F., ۲۰۲۰. Behavior of FRP-confined circular RC columns under eccentric compression. *Journal of Composites for Construction*, ۲۴(۴), p.۰۴۰۲۰۰۳۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001036](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001036).

[۱۸] Saljoughian A., Mostofinejad, D., ۲۰۱۶. Axial-flexural interaction in square RC columns confined by intermittent CFRP wraps. *Composites Part B: Engineering*, ۸۹, pp.۸۵-۹۵. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.047>.

[۱۹] Saljoughian, A., Mostofinejad, D., Raji, A., ۲۰۲۰. Retrofit of concrete columns with fiber strips using grooves and corner battens. *Structures and Buildings*, ۱۷(۳), pp.۲۰۳-۲۱۷. <https://doi.org/10.1061/jstbu.2020.0187>.

[۲۰] Huynh-Xuan, T., Do-Dai, T., Ngo-Thanh, T., and et al., ۲۰۲۱. Effect of sulfate attack on reinforced concrete columns confined with CFRP sheets under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, ۲۵(۶), p.۰۴۰۲۱۰۴۹. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001151](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001151).

[۲۱] Lu, S., Wang, J., Yang, J., and et al., ۲۰۲۲. Numerical analysis of preloaded FRP-strengthened concrete columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, ۳۵۷, p.۱۲۹۲۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129297>.

[۲۲] Pham, T.M., Hadi, M.N., Youssef, J., ۲۰۱۵. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, ۱۹(۶), p.۰۴۰۱۵۰۱۵. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000571).

[۲۳] Eid, R., Paultre, P., ۲۰۱۷. Compressive behaviour of FRP-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, ۱۳۲, pp.۵۱۸-۵۳۰. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.052>.

[۲۴] Wang, Y., Liu, P., Cao, Q., and et al., ۲۰۲۱. Comparison of monotonic axial compressive behaviour of rectangular concrete confined by FRP with different rupture strain.

نشد