Sharif Civil Engineering Journal (2025), 41, 1, pp.3-14

Sharif University of Technology

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Article

Axial and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Composites Through the Corner Strip-Wrap Technique

Alireza Saljoughian* and Davood Mostofinejad

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran.
* corresponding author: (a.saljoughian@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:19 November 2023

Revised:18 April 2024

Accepted:19 May 2024

Keywords:

Reinforced concrete column,
Strengthening,
FRP composites,
eccentric loading,
corner strip-wrap technique.

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 500 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-batten technique. Moreover, it is evident that eccentric loads, in contrast to 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 607% and 330% 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 compared to the experimental measurements.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

To Cite this article:
Saljoughian, A.R. and Mostofinejad, D. 2025. Axial and Flexural Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofitted with FRP Composites Through the Corner Strip-Wrap Technique, Sharif Civil Engineering Journal, 41, 1, pp.3-14. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63475.3275

E-ISSN: 2676-4776 © 2025 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Publish by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ

علیرضا سلجوقیان* و داود مستوفی‌نژاد

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

*نویسنده مسئول (a.saljoughian@iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۲/۰۸/۱۸

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۲/۳۰

واژگان کلیدی:

ستون بتن‌آرمه،

مقاوم‌سازی،

کامپوزیت‌های FRP،

بار محوری با خروج از مرکزیت،

روش نوار گوشه-دورپیچ.

چکیده

مقاوم‌سازی ستون‌ها به‌عنوان یکی از اعضاء اصلی سازه، اهمیت بسیاری دارد. هدف پژوهش حاضر، بررسی رفتار ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش جدید نوار گوشه- دورپیچ تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف است. برای این منظور، ۱۰ ستون تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند؛ که ۲ ستون با استفاده از دورپیچ و ۴ ستون با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ محصورشده و بقیه به عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده‌اند. نتایج نشان داده است که استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش در محیط مقطع شده و به‌دنبال آن، عملکرد تقویت در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون بهبود یافته است. به‌عنوان مثال، در نمونه‌ی تقویت‌شده با روش نوار گوشه- دورپیچ تحت بار محوری خالص، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری به ترتیب به میزان ۱۵ و ۷۷ درصد نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ افزایش یافته است.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی مهندسی زلزله و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه انجام شده است، که منجر به پیشرفت‌های زیادی شده است؛ به گونه‌ای که امروزه با اطمینان بیشتری می‌توان سازه‌های بتن‌آرمه‌ی مقاوم در برابر زلزله را طراحی کرد. با وجود این، در برخی از سازه‌های بتن‌آرمه، به دلایل مختلف ممکن است سازه معیارهای ایمنی را از دست بدهد و از لحاظ مهندسی غیرقابل استفاده تلقی شود. از جمله‌ی این موارد می‌توان به ضعف آیین‌نامه‌های قدیمی، فرسوده‌شدن ساختمان، افزایش بارهای بهره‌برداری، ضعف در اجرای بتن، تغییر در کاربری سازه، خطاهای محاسباتی، و تأثیر عوامل مخرب محیطی اشاره کرد.[۱ و ۲] لذا استفاده از راهکارهای عملی و مؤثر برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتن‌آرمه اجتناب‌ناپذیر است. در سازه‌های مذکور، ستون‌های بتن‌آرمه به‌عنوان اعضاء قائم سازه، که تحت اثر نیروهای محوری و برشی، و لنگر خمشی به صورت هم‌زمان قرار می‌گیرند، از جمله آسیب‌پذیرترین اعضا محسوب می‌شوند. استفاده از ژاکت‌های بتنی و فولادی از جمله رایج‌ترین روش‌ها جهت تقویت ستون‌های بتن‌آرمه محسوب می‌شود. از جمله معایب استفاده از ژاکت‌های بتنی: مشکلات اجرایی، افزایش بُعد ستون، و ناهماهنگی با معماری سازه است. در ستون‌های تقویت‌شده با ژاکت‌های فولادی نیز ضمن وجود مشکلات اجرایی در نصب ورق‌های فولادی، ورق‌های فولادی به مرور زمان دچار خوردگی می‌شوند و اتصال آن‌ها با بتن از بین می‌رود. در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP[1] جهت تقویت سازه‌های بتن‌آرمه به‌دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها، به‌طور چشم‌گیری مورد توجه قرار گرفته و جایگزین روش‌های قبلی شده است.[۳ و ۴]

در یک ستون بتن‌آرمه، در صورتی که آرماتورهای عرضی به‌طورکافی فراهم نشده باشد، سه مود شکست شامل: گسیختگی‌های: برشی، خمشی مفصل خمیری، و وصله‌ی اتصال مشاهده می‌شود. جهت جلوگیری از وقوع شکست‌های اخیر، می‌توان از روش محصورشدگی استفاده کرد. محصورکردن ستون با کامپوزیت‌های FRP، عمدتاً به نحوی انجام می‌شود که الیاف موجود در ورق FRP، در جهت عمود بر محور طولی ستون و یا به‌عبارتی 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 می‌گیرند و با اعمال فشار جانبی محصورکننده، باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون می‌شوند؛ لذا، از جداشدن آرماتورها در محل وصله جلوگیری می‌کند و مانع از کمانش آرماتورهای طولی می‌شود.[۵]

[1] Fiber Reinforced Polymer

استناد به این مقاله:

سلجوقیان ، علیرضا و مستوفی نژاد، داود، ۱۴۰۴. رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده با کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۱)، صص. ۳-۱۴. https://doi.org/10.24200/j30.2024.63475.3275

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

براساس مطالعات پیشین، در نمونه‌های محصورشده با استفاده از دورپیچ FRP، کرنش پارگی حلقوی FRP کمتر از کرنش نهایی به‌دست‌آمده از آزمایش کششی نمونه‌های کوپن FRP است؛ بنابراین، در لحظه‌ی شکست، تنش در FRP به تنش نهایی نمی‌رسد و از تمام ظرفیت کششی آن استفاده نمی‌شود.[۶] برخی پژوهشگران، دلایل مختلفی را برای توجیه کمتربودن کرنش پارگی نوارهای FRP نصب‌شده روی ستون نسبت به کرنش نمونه‌های کوپن ارائه کرده‌اند؛ که از جمله‌ی آن‌ها، وجود تنش‌های محصورکننده روی سطح داخلی FRP و همچنین تنش‌های محوری است که از بتن به FRP منتقل می‌شود. به‌عبارت دیگر، وضعیت تنش در FRP نصب‌شده روی ستون برخلاف نمونه‌های کوپن، کششی نیست و کامپوزیت در وضعیت تنش‌های چندمحوره گسیخته می‌شود. از طرف دیگر، ترک‌خوردگی و خردشدگی بتن در زیر پوشش کامپوزیتی سبب ایجاد تمرکز تنش موضعی در کامپوزیت FRP می‌شود. به‌علاوه، انحنای نوارهای FRP پیچیده‌شده به دور بتن نیز می‌تواند علت کاهش ظرفیت آن باشد.[۶ و ۷]

پارامترهای مختلفی، از جمله: شکل مقطع ستون، مقاومت اولیه‌ی ستون، مشخصات مکانیکی الیاف، و زاویه‌ی دورپیچی در محصورشدگی با استفاده کامپوزیت‌های FRP تأثیرگذارند.[۸] شکل مقطع ستون، شامل مقاطع دایروی و چهارگوش است و یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در عملکرد FRP در محصورسازی ستون‌های بتن‌آرمه است. در ستون‌های چهارگوش محصورشده تحت بار محوری، به‌دلیل هندسه‌ی غیریکنواخت، فشار محصورکننده به‌صورت غیریکنواخت روی محیط مقطع ستون اعمال و به دنبال آن تنش غیریکنواخت در کامپوزیت‌های FRP ایجاد می‌شود؛ در نتیجه، اثر محصورشدگی کمتری نسبت به ستون‌های دایره‌ای مشاهده می‌شود.[۹] علاوه‌بر این، تمرکز تنش در گوشه‌های تیز مقاطع چهارگوش باعث شکست زودرس FRP در کرنش بسیار کوچک‌تر از ظرفیت کششی آن خواهد شد.[۱۰]

کامپوزیت‌های FRP سختی کششی درون‌صفحه‌ای زیادی دارند؛ در مقابل، به دلیل اینکه بسیار نازک هستند، سختی خمشی خارج از صفحه‌ی کمی دارند. فشار جانبی در گوشه‌های مقاطع چهارگوش ناشی از سختی محوری کامپوزیت FRP، و در میانه‌ی اضلاع ناشی از سختی خمشی آن‌هاست. به همین دلیل توزیع فشار محصورکننده روی محیط مقاطع چهارگوش غیریکنواخت و در گوشه‌ها بیشتر است؛ در حالی که در مقاطع دایره‌ای توزیع فشار محصورکننده روی محیط مقطع کاملاً یکنواخت است.[۱۰] در سال‌های اخیر، پژوهشگران برای بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصورشدگی در ستون‌های چهارگوش، روش‌های متفاوتی ارائه کرده‌اند. یکی از رایج‌ترین روش‌های موجود، گردکردن گوشه‌های مقطع ستون است؛ که علاوه‌بر افزایش سطح مقطع محصورشده، روشی مؤثر در کاهش اثر بُرندگی گوشه‌ها در کامپوزیت‌های FRP است.[۱۱ و ۱۲] روش دیگر، استفاده از کامپوزیت‌های FRP با شیوه‌ی نوار گوشه- بست است؛ که. در آن، با ایده‌گرفتن از روش محصورسازی با استفاده از ژاکت‌های فولادی و همچنین به‌منظور جلوگیری از ایجاد انحنا در کامپوزیت‌های FRP از بست‌های افقی FRP جهت محصورسازی ستون استفاده می‌شود. به‌عبارت دیگر، بست‌های کاملاً تخت و بدون انحنا در هر یک از وجوه ستون بتنی به‌کار می‌رود و با اتصال به نوارهای گوشه در دو انتها، بتن را محصور می‌کنند. نتایج نشان داده‌اند که روش مذکور می‌تواند سبب افزایش کرنش مؤثر در کامپوزیت FRP در لحظه‌ی گسیختگی ستون شود.[۹ و ۱۳] راه‌حل دیگر، استفاده از روش جدید نوار گوشه- دورپیچ است؛ که در آن، ضخامت FRP در محل تمرکز تنش در کامپوزیت‌های FRP افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، با توجه به تمرکز تنش محصورشدگی در گوشه‌های مقطع چهارگوش، استفاده از FRP اضافه در ناحیه‌ی مذکور (نوار گوشه)، باعث کاهش تمرکز تنش و بهبود عملکرد کامپوزیت‌های FRP در محصورشدگی ستون می‌شود.[۷ و ۱۴]

برخی از پژوهشگران، اثر محصورشدن غیرپیوسته‌ی ستون با استفاده از کامپوزیت‌های FRP را بررسی کرده و دریافته‌اند که محصورسازی غیرپیوسته‌ی ستون، روش مناسبی برای نصب آسان‌تر و دقیق‌تر دورپیچ‌های FRP روی سطح بتن است. علاوه‌بر این، براساس نتایج استفاده از نوارهایی با عرض کمتر در فواصل نزدیک‌تر، عملکرد کامپوزیت FRP در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون را بهبود می‌بخشد.[۱۵ و ۱۶] یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در محصورشدگی ستون‌ها با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، خروج از مرکز بار اعمال‌شده است. پژوهش‌های محدود انجام‌شده بر روی ستون‌های محصورشده 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 ذکرشده، مشاهده می‌شود که بیشتر مطالعات انجام‌شده در این زمینه، بر روی ستون‌های تحت بار محوری خالص (بدون خروج از مرکزیت) بوده‌اند.[۲۰-۲۵] این در حالی است که عملاً، اغلب ستون‌ها عملکرد تیر- ستونی دارند و علاوه‌بر بار محوری، تحت لنگر خمشی (ناشی از خروج از مرکزیت تصادفی بار یا لنگر خمشی انتهایی اعمال‌شده به ستون) نیز قرار دارند. از طرف دیگر، مطالعات انجام‌شده در رابطه با ستون‌های بتن‌آرمه‌ی تقویت‌شده 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 بتن‌آرمه‌ی محصورشده بررسی شده است. علاوه‌بر این، در هیچ پژوهشی تأثیر 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 غیریکنواخت تنش محصورکننده در کامپوزیت‌های FRP در ستون‌های چهارگوش و گسیختگی موضعی آن‌ها، لازم است از روش‌هایی برای تقویت ستون‌های چهارگوش استفاده شود، که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش محصورکننده روی محیط مقطع شود و بازدهی کامپوزیت FRP را افزایش دهد. بنابراین، مطالعه‌ی حاضر برای اولین بار، به‌منظور ارزیابی تأثیر محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی مربعی با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با روش جدید نوار گوشه- دورپیچ تحت اثر اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی انجام شده است. برای این منظور، ۱۰ ستون بتن‌آرمه، تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های مختلف قرار گرفته و نتایج مربوط به نمونه‌های تقویت‌شده با روش جدید نوار گوشه- دورپیچ با نمونه‌های شاهد و نمونه‌های تقویت‌شده با دورپیچ مقایسه شده‌اند. در پایان نیز نمودار اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصورشده و محصورنشده ترسیم و نتایج تجربی با نتایج به‌دست‌آمده از آیین‌نامه‌ها مقایسه شده‌اند.

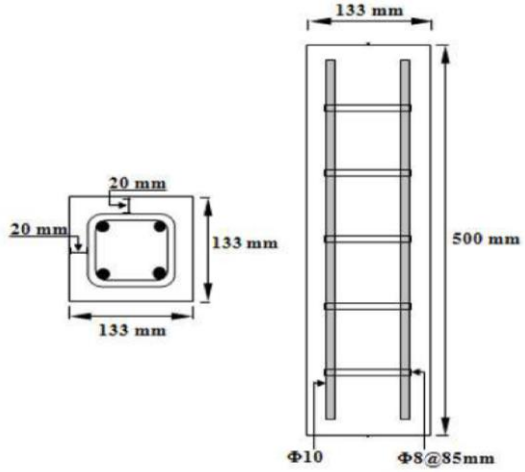
۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مشخصات نمونه‌ها

در پژوهش حاضر، ۱۰ ستون بتن‌آرمه‌ی مربعی به ابعاد مقطع ۱۳۳×۱۳۳ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر بررسی شده‌اند؛ که در آن‌ها از ۴ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر به‌عنوان میلگرد طولی استفاده شده است. به این ترتیب، نسبت میلگرد طولی به‌کاررفته تقریباً برابر ۱/۸٪ سطح مقطع ناخالص نمونه

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

Ultimate tensile strain(%)	Modulis of Elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)	Thickness (mm)	Name	Materials
1.5	230	3900	0.17	SikaWrap-300C	Fibers
1.5	4.5	30	-	Sikadur-330	Resin



شکل ۱. جزئیات میلگردگذاری نمونه‌های ستون بتن‌آرمه.

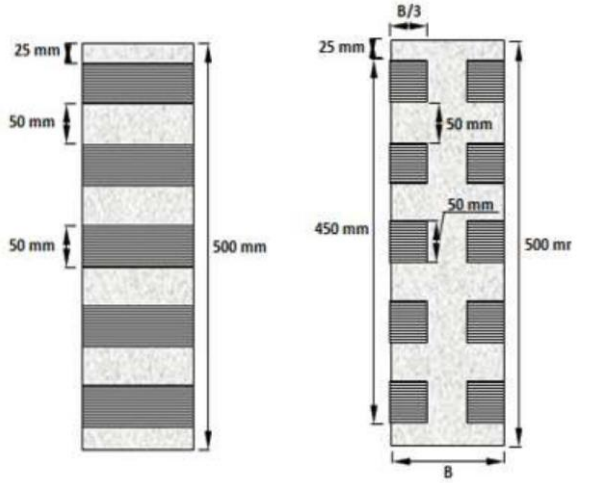
خواهد بود. علاوه‌بر این، از ۶ خاموت به قطر ۸ میلی‌متر در فواصل ۸۵ میلی‌متر به‌عنوان میلگرد عرضی استفاده شده است. فاصله‌ی خاموت‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که تأثیر محصورشدگی آن‌ها به میزان کمینه‌ی ممکن برسد. پوشش بتن در تمام قسمت‌ها برابر با ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده و ابعاد میلگردهای طولی و خاموت‌ها با توجه به پوشش بتن قابل محاسبه است. جزئیات مربوط به میلگردگذاری نمونه‌های ستون بتن‌آرمه در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

۲.۲. مشخصات مصالح

در پژوهش حاضر، طرح اختلاط بتن برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی ۳۰ مگاپاسکال، مطابق با آیین‌نامه‌ی ACI ۲۱۱[۲۶] تعیین شده است. بیشینه‌ی بُعد دانه‌ی مصرفی با توجه به ابعاد قالب و فاصله‌ی میلگردها برابر با ۱۰ میلی‌متر انتخاب شده است. با توجه به مقاومت فشاری موردنظر و نیز به‌منظور تأمین کارایی کافی با هدف رسیدن به اسلامپ ۷۵ میلی‌متر، نسبت‌های وزنی سیمان، شن، ماسه، و آب در ۱ مترمکعب بتن به ترتیب برابر با ۱، ۱/۷۴، ۲/۱۱، و ۰/۵۴ بوده است. همچنین، تنش تسلیم میلگردهای با قطرهای ۸ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۵۵۰ و ۴۰۶ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. علاوه‌بر این، از الیاف کربن یک‌طرفه با ضخامت خالص ۰/۱۷ میلی‌متر (SikaWrap-۳۰۰C) و نیز رزین اپوکسی Sikadur-۳۳۰ استفاده شده است. این تذکر لازم است که به‌منظور ساخت و نصب کامپوزیت‌های FRP از روش wet layup استفاده شده است. مشخصات مکانیکی الیاف و رزین استفاده‌شده در پژوهش حاضر، براساس کاتالوگ تولیدکننده، در جدول ۱ ارائه شده است.[۲۷]

۳.۲. آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت تقویت نمونه‌ها، ابتدا باید محل‌های موردنظر برای چسباندن الیاف FRP توسط خط‌کشی مشخص شود. در پژوهش حاضر، با توجه به نتایج آزمایش‌های



شکل ۲. نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون.

اولیه و مطالعات پیشین سلجوقیان و مستوفی‌نژاد (۲۰۱۶ و ۲۰۲۰)،[۷ و ۱۸] نمونه‌های ستون بتن‌آرمه به‌صورت غیرپیوسته و متقارن نسبت به مرکز ستون و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصورسازی شده‌اند. در ادامه، سطح بتن در محل‌های مشخص‌شده به لایه‌ی نازکی از چسب آغشته شده و الیاف روی آن قرار گرفته‌اند. در مرحله‌ی بعد، روی سطح الیاف نیز با لایه‌ای از چسب آغشته و آنقدر با کاردک روی سطح آن کشیده شده است، تا از اشباع کامل الیاف با چسب اطمینان حاصل شود.

در پژوهش حاضر، ۴ نمونه‌ی محصورنشده به‌عنوان نمونه‌های شاهد، ۲ نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ غیرپیوسته (W)[۱]، و ۴ نمونه‌ی محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ غیرپیوسته (CSW)[۲] تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در روش W، هر نمونه با استفاده از ۵ دورپیچ FRP به طول ۶۰۰ میلی‌متر، عرض ۵۰ میلی‌متر، و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصور شده‌اند. در روش CSW، هر نمونه با ۲۰ نوار گوشه به ابعاد ۹۰×۵۰ میلی‌متر در گوشه‌ها و همچنین ۵ دورپیچ به ابعاد ۶۰۰×۵۰ میلی‌متر به‌صورت غیرپیوسته و با فاصله‌ی مرکز تا مرکز ۱۰۰ میلی‌متر محصور شده است. به‌عبارت دیگر، هر دورپیچ روی چهار نوار گوشه نصب شده است. این تذکر لازم است که با توجه به برخی مطالعات پیشین،[۷ و ۱۴] طول بهینه برای نوار گوشه در روش نوار گوشه- دورپیچ برابر با یک سوم بُعد مقطع است. بنابراین اندازه‌ی نوارهای گوشه‌ی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر به صورتی در نظر گرفته شده است که طول آن روی هر ضلع برابر با یک سوم بُعد مقطع باشد. علاوه‌بر این، به‌منظور جلوگیری از شکست زودرس ناشی از تمرکز تنش، نمونه‌ها با استفاده از یک لایه‌ی دورپیچ اضافی به ابعاد ۶۰۰×۵۰ میلی‌متر در دو انتها محصور شده‌اند. نحوه‌ی آرایش کامپوزیت‌های FRP در ارتفاع ستون در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

[1] Wrap

[2] Corner Strip-Wrap

جدول ۲. جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی.

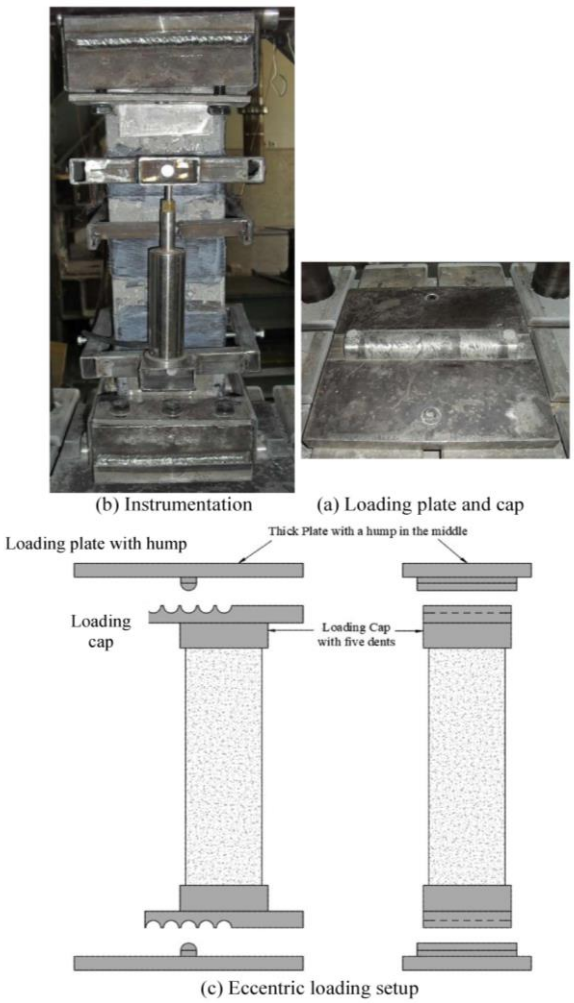
Group	Specimen	Confinement method	Eccentricity (mm)
1	R-0	-	0
	W-0	Wrap	0
	CSW-0	Corner strip-wrap	0
2	R-30	-	30
	CSW-30	Corner strip-wrap	30
3	R-60	-	60
	CSW-60	Corner strip-wrap	60
4	R-90	-	90
	W-90	Wrap	90
	CSW-90	Corner strip-wrap	90

نمونه‌های ستون بتن‌آرمه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر در ۴ گروه طبقه‌بندی شده‌اند، که به‌صورت خلاصه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. نام‌گذاری نمونه‌ها در گروه‌های مختلف، شامل دو بخش اصلی است: در بخش اول، R نشانگری نمونه‌ی محصورنشده (نمونه‌ی شاهد)، W نشانگر نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ غیرپیوسته، و CSW نشانگری نمونه‌ی محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ غیرپیوسته است. بخش دوم، نیز با توجه به مقدار خروج از مرکزیت بار نام‌گذاری شده است و می‌تواند یکی از مقادیر صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی متر باشد.

۴.۲. شرح آزمایش و ابزارگذاری

در پژوهش حاضر، برای اعمال بار محوری با خروج از مرکزیت روی ستون‌های بتن‌آرمه از جک هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن، صفحه، و کلاهک مخصوص بارگذاری با خروج از مرکزیت و نیروسنج استفاده شده است (شکل ۳). بارگذاری نمونه‌ها به‌صورت کنترل تغییرمکان و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه تا لحظه‌ی نهایی شکست انجام شده است. بار اعمال‌شده از طریق فشار روغن و همچنین نیروسنج، اندازه‌گیری و به وسیله‌ی یک دیتالاگر ثبت شده است. علاوه‌بر این، به‌منظور اعمال بار محوری به‌صورت خارج از مرکز، دو عدد صفحه برای فک‌های بالا و پایین و همچنین دو عدد کلاهک برای دو انتهای ستون ساخته شده است (شکل ۳- الف). ورق‌های فولادی مذکور برای تبدیل بار گسترده به بار نواری (به‌وسیله‌ی نیم‌استوانه‌ای که بر روی آن‌ها قرار دارد) و کلاهک‌ها برای انتقال هم‌زمان بار محوری و لنگر خمشی به ستون استفاده می‌شوند. زیر هر کلاهک ۴ شیار وجود دارد، که مربوط به خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر است، که بر روی نیم‌استوانه‌ی وسط ورق‌های فولادی قرار می‌گیرد.

تغییرشکل محوری ستون توسط دو عدد جابجایی‌سنج (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 و برای نصب جابجایی‌سنج‌ها بر روی نمونه از دو عدد قاب فولادی استفاده شده است. با توجه به ابعاد جابجایی‌سنج‌ها و قاب‌های مخصوص نصب آن‌ها، تغییرمکان اندازه‌گیری‌شده، مربوط به یک سوم میانی نمونه است (شکل ۳- ب). در شکل



شکل ۳. نحوه‌ی قرارگیری نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت.

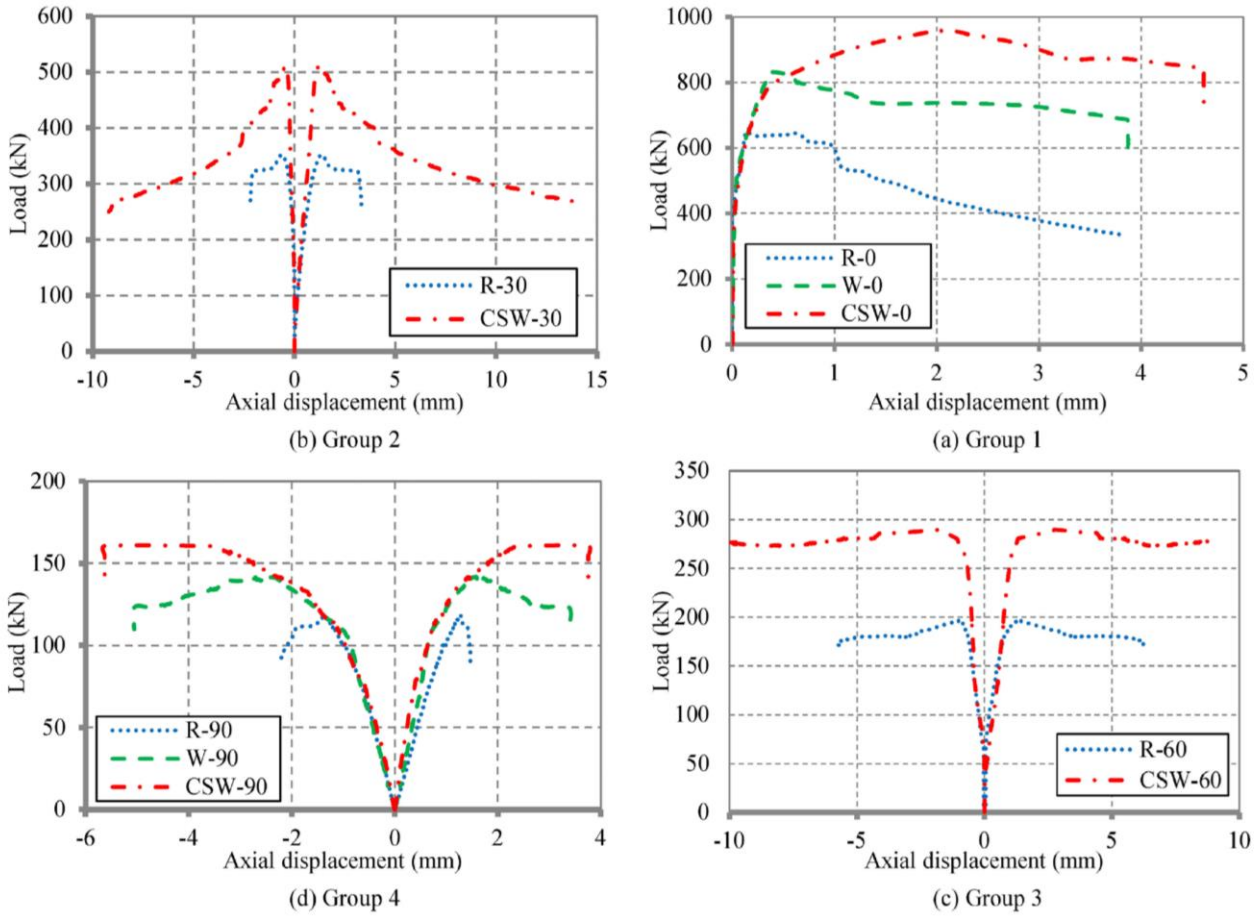
۳- ج، تصویری از ستون بتن‌آرمه تحت بارگذاری و ابزارگذاری آن مشاهده می‌شود.

۳. نتایج آزمایشگاهی و بحث

۱.۳. رفتار ستون‌های بتن‌آرمه

مقایسه‌ی رفتار ستون‌های تحت بارگذاری در خروج از مرکزیت‌های مختلف را می‌توان با منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری آن‌ها در شکل ۴ (الف - د) مشاهده کرد. این تذکر لازم است که در شکل‌های مذکور، مقادیر مثبت تغییرمکان مربوط به تغییرمکان محوری در وجه فشاری نمونه و مقادیر منفی مربوط به تغییرمکان محوری در وجه کششی نمونه هستند. در منحنی‌های ارائه‌شده در شکل ۴، شیب منحنی‌های هر گروه در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و تا رسیدن به بار بیشینه‌ی نمونه‌ی شاهد متناظر تقریباً یکسان بوده است، که نشان از سختی برابر نمونه‌های هر گروه در مراحل ابتدایی بارگذاری دارد. با نزدیک‌شدن به نقطه‌ی مربوط به بار بیشینه‌ی نمونه‌ی شاهد و فعال‌شدن محصورشدگی در نمونه‌های تقویت‌شده، با توجه به میزان سختی که هر روش تقویت می‌تواند برای نمونه ایجاد کند، شیب منحنی‌ها نیز تا رسیدن به نقطه‌ی بیشینه‌ی خود تغییر کرده است.

مطابق با شکل ۴، شاخه‌ی دوم منحنی بار- تغییرمکان در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (به جز نمونه‌ی CSW-۳۰) به‌صورت تقریباً افقی جلو رفته است، که بیانگر رفتار خمیری کامل و نیز محصورشدگی



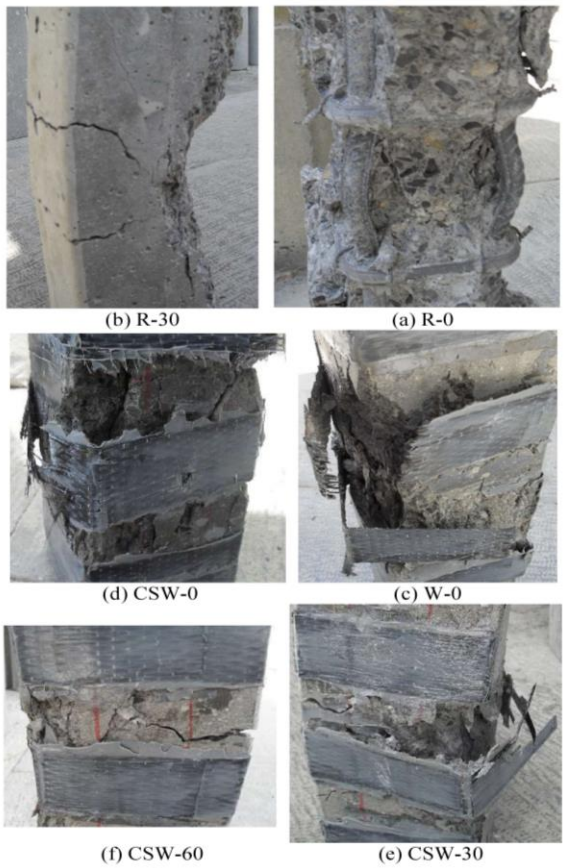
شکل ۴. منحنی‌های بار- تغییرمکان نمونه‌های مختلف.

مؤثر و کافی برای نمونه‌های مذکور است. استفاده از نوارهای گوشه در آن‌ها باعث شده است که تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع که منجر به توزیع غیریکنواخت فشار محصورکننده روی محیط و پارگی زودهنگام کامپوزیت در گوشه‌ها می‌شود، کنترل شود و میزان کارایی کامپوزیت در محصورسازی افزایش یابد. این در حالی است که رفتار نمونه‌ی CSW-۳۰ بعد از باربری بیشینه به‌صورت نرم‌شدگی کرنش بوده است. این تذکر لازم است که اگرچه رفتار نمونه‌ی CSW-۳۰ به صورت نرم‌شدگی کرنش است، ولی با توجه به شکل ۴-ب مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری، تغییرمکان محوری، و سطح زیر منحنی در آن به صورت قابل‌توجهی بیشتر از نمونه‌ی R-۳۰ بوده است، که این مطلب نشانگر عملکرد مناسب روش نوار گوشه- دورپیچ است. از طرف دیگر، در ۲ نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از دورپیچ، شاخه‌ی دوم منحنی بار- تغییرمکان به‌صورت نزولی (شیب منفی) بوده است، که نشان می‌دهد رفتار آن به‌صورت نرم‌شدگی کرنش بوده و به نظر می‌رسد محصورشدگی به میزان مؤثر در نمونه‌ی مذکور تأمین نشده است؛ که دلیل آن می‌تواند وجود تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع باشد، که باعث می‌شود فشار محصورشدگی به‌صورت غیریکنواخت روی محیط نمونه توزیع شود و نوارهای محصورکننده نتوانند به‌صورت مؤثر عمل کنند. استدلال ذکرشده با توجه به مود گسیختگی نمونه‌ها تأیید شده است. براساس مقایسه‌ی انجام‌گرفته روی نمونه‌های تقویت‌شده می‌توان نتیجه گرفت که هر چه کامپوزیت بتواند از ظرفیت خود به صورت بیشتر و مؤثرتر برای محصورسازی استفاده کند، در این صورت نمونه به میزان کافی محصور می‌شود و رفتار آن نیز به سمت سخت‌شدگی کرنشی پیش خواهد رفت. علاوه‌بر این، منحنی بار- تغییرمکان مربوط به نمونه‌های شاهد نیز پس از نقطه‌ی اوج به‌صورت کاملاً نزولی و با شیب تند امتداد پیدا می‌کند و رفتار نرم‌شدگی کرنش برای آن‌ها کاملاً مشاهده می‌شود. این رفتار نشان می‌دهد که محصورشدگی ناشی از فولادهای عرضی داخلی نیز مؤثر نبوده است.

۲.۳. مود گسیختگی

جهت بررسی و مقایسه‌ی نحوه‌ی گسیختگی نمونه‌های مختلف، تصاویر مربوط به شکست نمونه‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، شکست تمامی نمونه‌های تقویت‌شده با پارگی FRP همراه بوده و صرف‌نظر از نحوه‌ی تقویت، پارگی کامپوزیت در نواحی یک سوم میانی ارتفاع ستون رخ داده است.

با توجه به شکل ۵، شکست نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در میانه‌ی ارتفاع ستون اتفاق افتاده است. در حین بارگذاری نمونه‌ی شاهد، 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 بیشینه، نمونه‌ی مذکور با رفتاری کاملاً نرم دچار شکست شده است. در نمونه‌ی تقویت‌شده با روش دورپیچ، تمرکز تنش در گوشه‌های مقطع و وجود اثر بُرندگی گوشه‌ها روی FRP منجر به پارگی زودهنگام کامپوزیت در ناحیه‌ی گوشه شده است؛ که باعث می‌شود تمام ظرفیت کششی کامپوزیت مصرفی در محصورسازی نمونه استحصال نشود. این در حالی است که در نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ، پارگی کامپوزیت محصورکننده در ناحیه‌ی میانی یکی از اضلاع اتفاق افتاده است؛ که نشان می‌دهد تقویت موضعی در گوشه‌های مقطع با استفاده از نوارهای گوشه پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده‌ی افقی، تمرکز تنش در گوشه‌ها را روی لایه‌ی محصورکننده کاهش می‌دهد و از پارگی



شکل ۵. نحوه‌ی گسیختگی برخی از نمونه‌های آزمایشگاهی.

زودهنگام کامپوزیت در نواحی گوشه‌ی مقطع جلوگیری می‌کند. این امر باعث می‌شود که بازدهی کامپوزیت در محصورسازی 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 به‌صورت ایجاد ترک‌های افقی در وجه کششی و خردشدن و ریختن پوسته‌ی بتن و کمانش آرماتورهای طولی در وجه فشاری است. در نمونه‌های تقویت‌شده با استفاده از روش‌های دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ، گسیختگی نمونه به‌صورت ایجاد ترک‌های خمشی در وجه کششی و خردشدن بتن و پارگی FRP محصورکننده در وجه فشاری بوده است.

۳.۳. ظرفیت باربری

نتایج آزمایشگاهی، شامل: ظرفیت بابری، بار نهایی، تغییرمکان محوری نهایی در وجه‌های کششی و فشاری، و لنگر خمشی بیشینه در جدول ۳ ارائه شده است. تمامی نمونه‌های گروه اول تحت بارگذاری محوری خالص قرار گرفته و نتایج مربوط به آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. براساس اطلاعات موجود در جدول مذکور، برای نمونه‌ی شاهد بدون تقویت (R-۰)، میزان بار بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۶۴۹ و ۵۵۲ کیلونیوتن ثبت شده است. این تذکر لازم است که نمونه‌های شاهد به‌علت وجود آرماتورهای داخلی و عدم تقویت خارجی، شکست کاملاً نرمی داشته و برخلاف نمونه‌های تقویت‌شده، نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی در لحظه‌ی نهایی نداشته‌اند. به همین جهت و با توجه به برخی مطالعات پیشین، برای گزارش مشخصات باربری نهایی نمونه‌های مذکور از نقطه‌ی معادل ۸۵٪ بار بیشینه، در شاخه‌ی نزولی نمودار بار- تغییرمکان استفاده شده است.[۲۸] بر این اساس، تغییرمکان محوری ثبت‌شده برای نمونه‌ی شاهد در نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برابر با ۱/۰۵ میلی‌متر بوده است. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ (W-۰)، بارهای بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۸۳۲ و ۶۸۳ کیلونیوتن بوده‌اند، که نشانگر افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲۸/۲٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد است. همچنین تغییرمکان محوری در نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برای نمونه‌ی (W-۰)، برابر با ۳/۸۷ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۰) نیز بارهای بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۹۵۸ و ۸۴۴ کیلونیوتن مشاهده شده‌اند. به‌عبارت دیگر، ظرفیت باربری نمونه‌ی (CSW-۰) نسبت به نمونه‌های R-۰ و W-۰ به‌ترتیب به میزان ۴۷/۶ و ۱۵/۱ درصد افزایش یافته است. همچنین مقدار تغییرمکان محوری نمونه‌ی (CSW-۰) در لحظه‌ی نهایی به ۴/۶۱ میلی‌متر رسیده است.

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش ستون‌های بتن‌آرمه.

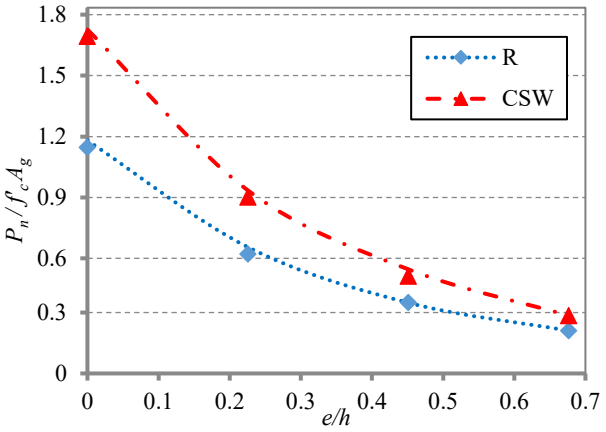
Increase in ductility compared to R-0 (%)	Increase in peak load compared to R-0 (%)	λ_E	λ_δ	Maximum bending moment (kN.m)	Tension axial displacement at ultimate (mm)	Compression axial displacement at ultimate (mm)	Ultimate load (kN)	Peak load (kN)	e* (mm)	Specimen
-	-	1.68	1.70	0	-	1.05	552	649	0	R-0
301	28.2	6.85	6.68	0	-	3.87	683	832	0	W-0
607	47.6	13.64	10.24	0	-	4.61	844	958	0	CSW-0
-	-	3.09	2.69	10.56	2.11	3.20	312	352	30	R-30
74	44.9	5.67	4.41	15.30	2.75	4.44	390	510	30	CSW-30
-	-	2.40	2.32	11.82	5.73	6.26	170	197	60	R-60
330	47.2	12.24	8.07	17.40	10.14	8.75	262	290	60	CSW-60
-	-	1.61	1.37	10.71	2.14	1.47	98	119	90	R-90
32	19.3	2.51	1.41	12.87	5.06	3.39	123	142	90	W-90
173	35.2	4.95	3.19	14.49	5.64	3.76	161	161	90	CSW-90

* خروج از مرکزیت بار.

نمونه‌های گروه دوم تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۳۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، بارهای بیشینه و نهایی نمونه‌ی شاهد بدون تقویت در گروه دوم (R-۳۰) به ترتیب برابر با ۳۵۲ و ۳۱۲ کیلونیوتن بوده‌اند. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در میزان خروج از مرکزیت که ۳۰ میلی‌متر است، مقدار لنگر بیشینه، که برابر با ۱۰/۵۶ کیلونیوتن. متر است، به‌دست می‌آید. لازم به توضیح است که در نمونه‌ی (R-۳۰)، نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی مشاهده و بار مربوط به شکست آزمایشگاهی به‌عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای نمونه‌ی (R-۳۰)، در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۲۰ و ۲/۱۱ میلی‌متر ثبت شده است. از طرف دیگر، برای نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۳۰)، میزان باربری بیشینه و نهایی به ترتیب برابر ۵۱۰ و ۳۹۰ کیلونیوتن، و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر ۱۵/۳۰ کیلونیوتن. متر بوده است. با توجه به مقادیر اخیر، ظرفیت باربری نمونه‌ی (CSW-۳۰)، به میزان ٪۴۴/۹ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. همچنین مقدار تغییرمکان محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی (CSW-۳۰)، به ترتیب برابر با ۴/۴۴ و ۲/۷۵ اندازه‌گیری شده است.

در نمونه‌های گروه سوم، که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۶۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، ظرفیت باربری و بار نهایی نمونه‌ی شاهد (R-۶۰) به ترتیب برابر با ۱۹۷ و ۱۷۰ کیلونیوتن بوده است. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در میزان خروج از مرکزیت، که ۶۰ میلی‌متر است، مقدار لنگر بیشینه برابر با ۱۱/۸۲ کیلونیوتن متر به‌دست آمده است. لازم به توضیح است که در نمونه‌ی (R-۶۰) نیز نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی به‌عنوان بار نهایی در نظر گرفته شده است. همچنین میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای آن در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۶/۲۶ و ۵/۷۳ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۶۰)، مقدار بار بیشینه و نهایی آن به ترتیب برابر ۲۹۰ و ۲۶۲ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر ۱۷/۴۰ کیلونیوتن متر بوده و تغییرمکان‌های محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی نمونه‌ی (CSW-۶۰)، به ترتیب برابر با ۸/۷۵ و ۱۰/۱۴ میلی‌متر بوده است. با توجه به نتایج ذکرشده، ظرفیت باربری نمونه‌ی CSW-۶۰ به میزان ٪۴۷/۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است.

از طرف دیگر، بارهای بیشینه و نهایی (نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی) نمونه‌ی شاهد در گروه چهارم (R-۹۰)، به ترتیب برابر با ۱۱۹ و ۹۸ کیلونیوتن بوده است. با ضرب‌کردن مقدار بار بیشینه در خروج از مرکزیت ۹۰ میلی‌متر، مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۰/۷۱ کیلونیوتن متر به‌دست آمده است. میزان تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی برای نمونه‌ی R-۹۰ در نقطه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۱/۴۷ و ۲/۱۴ میلی‌متر ثبت شده است. در نمونه‌ی محصورشده با استفاده از دورپیچ غیرپیوسته (W-۹۰)، مقدار بارهای بیشینه و نهایی نمونه به ترتیب برابر با ۱۴۲ و ۱۲۳ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۲/۷۸ کیلونیوتن متر بوده و تغییرمکان‌های محوری نهایی در وجه‌های فشاری و کششی آن به ترتیب برابر با ۳/۳۹ و ۵/۰۶ میلی‌متر بوده است. با توجه به نتایج ذکرشده مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ به میزان ٪۱۹/۳ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است. برای نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ (CSW-۹۰)، میزان بارهای بیشینه و نهایی یکسان و برابر با ۱۶۱ کیلونیوتن و مقدار لنگر خمشی بیشینه برابر با ۱۴/۴۹ کیلونیوتن متر بوده است. همچنین



شکل ۶. تأثیر خروج از مرکزیت بار در ظرفیت باربری ستون (به‌صورت بی‌بُعد).

مقدار تغییرمکان محوری در وجه‌های فشاری و کششی در لحظه‌ی نهایی به ترتیب برابر با ۳/۷۶ و ۵/۶۴ میلی‌متر ثبت شده است. به‌عبارت دیگر، ظرفیت باربری نمونه‌ی اخیر نسبت به نمونه‌های R-۹۰ و W-۹۰ به‌ترتیب به میزان ۳۵/۲ و ۱۳/۴ درصد افزایش داشته است.

با توجه به نتایج اخیر مشاهده می‌شود که ظرفیت باربری در نمونه‌هایی که با استفاده از روش نوار گوشه-دورپیچ محصور شده‌اند، بسیار بالاتر از ظرفیت باربری نمونه‌های محصورشده با دورپیچ بوده است. به‌عبارت دیگر، هنگامی که برای محصورشدگی ستون‌های بتن‌آرمه، از نوارهای گوشه در زیر دورپیچ‌های FRP استفاده می‌شود، به‌دلیل توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های محصورشدگی 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 (به‌صورت بدون بُعد) در شکل ۶ مشاهده می‌شود؛ که در آن، به‌منظور بدون بُعدکردن محور قائم، ظرفیت باربری (P_n) بر مقاومت فشاری بتن (f'_c) و سطح مقطع ناخالص ستون (A_g) تقسیم شده است. همچنین، برای بدون بُعدکردن محور افقی، خروج از مرکزیت بار (e) بر بعد مقطع ستون (h) تقسیم شده است. با توجه به شکل ۶ مشاهده می‌شود که در خروج از مرکزیت‌های مختلف، ظرفیت باربری ستون‌های تقویت‌شده 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 تقویت‌شده نسبت به نمونه‌ی شاهد (اختلاف دو منحنی موجود در شکل ۶) کاهش یافته است.

۴.۳. شکل‌پذیری

جهت مقایسه‌ی شکل‌پذیری نمونه‌های مختلف پژوهش حاضر، از دو شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان (رابطه‌ی ۱) و شاخص شکل‌پذیری انرژی (رابطه‌ی ۲) استفاده شده است:

$$\lambda_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (۱)$$

$$\lambda_E = \frac{A_u}{A_y} \quad (۲)$$

که در آن، λ_δ شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان، δ_u تغییرمکان محوری در

نقطه‌ی نهایی، و δ_y تغییرمکان محوری در نقطه‌ی تسلیم هستند. در شاخص شکل‌پذیری انرژی، از سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری، که بیانگر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به‌عبارتی مقدار کار انجام‌شده توسط نیروی خارجی روی سیستم است، استفاده شده است. در این روش، شکل‌پذیری با استفاده از رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود؛ که در آن، λ_E شاخص شکل‌پذیری انرژی، A_u سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری تا نقطه‌ی نهایی، و A_y سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری تا نقطه‌ی تسلیم است.[۲۹]

تعیین تغییرمکان تسلیم در سازه‌های بتن‌آرمه به‌دلیل نبود نقطه‌ی تسلیم مشخص در منحنی بار- تغییرمکان، همواره با پیچیدگی‌های زیادی روبرو است، که عمدتاً به‌دلیل رفتار غیرخطی مواد و یا وقوع تسلیم در نواحی مختلف سازه و در سطوح متفاوت بار است. در پژوهش حاضر، تغییرمکان تسلیم با دو خطی‌سازی منحنی پوش نمونه‌ها براساس شیوه‌ی سختی کاهش‌یافته انجام شده است؛ که در آن، تغییرمکان متناظر با کوچک‌ترین مقدار از دو مقدار تسلیم آرماتور و یا ۷۵٪ بار بیشینه بر روی منحنی رفتاری سازه و شیب ناحیه‌ی کشسان منحنی دوخطی به‌صورت سختی سکانت، نقطه‌ی تسلیم تعیین شده است. تغییرمکان متناظر با ۱۵٪ افت مقاومت نیز به‌عنوان تغییرمکان نهایی در نظر گرفته شده است.[۲۸ و ۲۹] در جدول ۳، مقادیر به‌دست‌آمده برای شاخص‌های شکل‌پذیری تغییرمکان و انرژی نمونه‌های مختلف ارائه شده است.

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، شکل‌پذیری در ستون‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ در خروج از مرکزهای صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۶۰۷، ۷۴، ۳۳۰، و ۱۷۳ درصد نسبت به نمونه‌ی محصورنشده‌ی متناظر افزایش یافته است. براساس نتایج آزمایشگاهی، افزایش خروج از مرکزیت بار منجر به کاهش شکل‌پذیری در ستون‌های تقویت‌شده در مقایسه با ستون تحت بار محوری خالص شده است. با این حال، ستون‌های تقویت‌شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP، شکل‌پذیری بالاتری را در مقایسه با نمونه‌های شاهد از خود نشان داده‌اند. شایان ذکر است که افزایش‌های گزارش‌شده برای شکل‌پذیری، میانگین افزایش شاخص شکل‌پذیری تغییرمکان و شاخص شکل‌پذیری انرژی است.

از طرف دیگر، در ستون‌های تحت بار محوری خالص، افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۳۰۱ و ۶۰۷ درصد بوده است. علاوه‌بر این، در ستون‌های تحت بار محوری با خروج از مرکزیت ۹۰ میلی‌متر، شکل‌پذیری در ستون‌های محصورشده با دورپیچ و نوار گوشه- دورپیچ به ترتیب به میزان ۳۲ و ۱۷۳ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ با بهبود عملکرد کامپوزیت در محصورسازی، موجب افزایش قابل‌توجه شکل‌پذیری ستون نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ غیرپیوسته می‌شود.

۴. منحنی اندر کنش بار محوری- لنگر خمشی

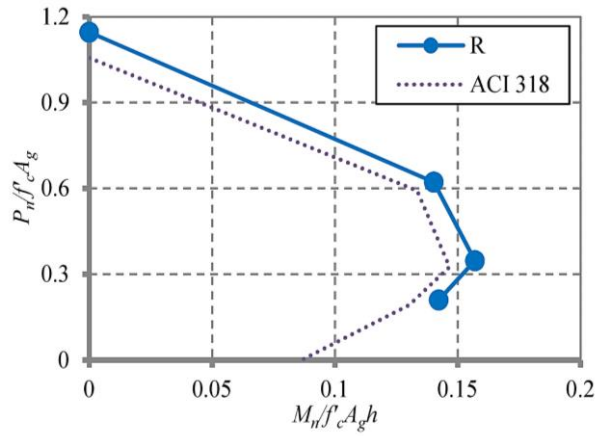
۱.۴. ستون‌های محصورنشده

به‌منظور ترسیم منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی آزمایشگاهی (P-M)، از مقادیر بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی که در طول آزمایش به‌دست آمده است، استفاده می‌شود. علاوه‌بر این، بیشینه‌ی مقادیر تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر را می‌توان از طریق معادله‌های تعادل نیرو و همسازی کرنش محاسبه کرد.[۳۰] این تذکر لازم است که در محاسبه‌ی مقادیر تئوری، ضریب کاهش مقاومت برابر با ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگری خمشی بیشینه در ستون‌های محصورنشده در جدول ۴ ارائه شده است. به‌منظور بررسی اختلاف مقادیر آزمایشگاهی و تئوری، در ستون آخر جدول ۴، نسبت ظرفیت باربری تئوری به آزمایشگاهی ارائه شده است.

در شکل ۷، منحنی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌های محصورنشده به صورت بدون بُعد مشاهده می‌شود. به‌منظور بدون بُعدکردن منحنی مذکور، بار محوری (P_n) بر f'_cA_g و لنگر خمشی (M_n) بر f'_cA_gh تقسیم شده است. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر اندازه‌گیری‌شده در آزمایشگاه از مقادیر به‌دست‌آمده با استفاده از روابط تئوری بیشتر بوده است؛ که نشانگر اعتماد به روابط ارائه‌شده توسط آیین‌نامه‌ی ACI ۳۱۸،[۳۰] است.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تئوری ستون‌های بتن‌آرمه‌ی بررسی‌شده در پژوهش حاضر.

Theoretical-to-experimental ratio	Theoretical predictions		Experimental results		e/h	Specimen
	Bending moment (kN.m)	Axial load (kN)	Bending moment (kN.m)	Axial load (kN)		
0.92	0	598	0	649	0	R-0
0.95	10.05	335	10.56	352	0.23	R-30
0.93	11.04	184	11.83	197	0.45	R-60
0.92	9.81	109	10.71	119	0.68	R-90
-	6.10	۰	-	-	Infinity	R-PB
0.71	0	681	0	958	0	CSW-0
0.84	12.78	426	15.30	510	0.23	CSW-30
0.82	14.22	237	17.40	290	0.45	CSW-60
0.76	10.98	122	14.49	161	0.68	CSW-90
-	6.60	۰	-	-	Infinity	CSW-PB



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

۲.۴. ستون‌های محصورشده با روش نوار گوشه- دورپیچ

در پژوهش حاضر، به‌منظور محاسبه‌ی نقاط مختلف منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ به صورت تئوری، از آیین‌نامه‌ی ACI ۴۴۰،[۱] استفاده شده است. در آیین‌نامه‌ی مذکور از مدل تنش- کرنش لام و تنگ برای پیش‌بینی رفتار بتن محصورشده تحت اثر نیروی محوری فشاری استفاده می‌شود. براساس مدل لام و تنگ، بیشینه‌ی تنش محصورکننده (f_l)، مقاومت فشاری بتن محصورشده (f'_{cc})، و کرنش نهایی بتن محصورشده (ε_{ccu}) با استفاده از روابط ۳ الی ۵ محاسبه می‌شود:

$$f_l = \frac{2nE_f t_f \varepsilon_{fe}}{\sqrt{b^2+h^2}} \quad (۳)$$

$$f'_{cc} = f'_c + 3.3\kappa_a f_l \quad (۴)$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.002\left[1.5+12\kappa_b \frac{f_l}{f'_c}\left(\frac{\varepsilon_{fe}}{0.002}\right)^{0.45}\right] \quad (۵)$$

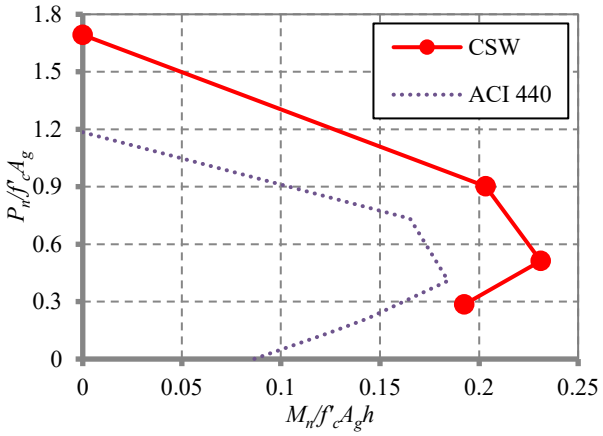
که در آن‌ها، n تعداد لایه‌های FRP، E_f مدول کشسانی کششی کامپوزیت FRP، t_f ضخامت اسمی لایه‌ی FRP استفاده‌شده، ε_{fe} کرنش مؤثر FRP در لحظه‌ی گسیختگی، و b بُعد کوچک‌تر مقطع ستون هستند. همچنین ضرایب شکل κ_a و κ_b با استفاده از روابط ۶ الی ۸ محاسبه می‌شوند:

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c}\left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (۶)$$

$$\kappa_a = \frac{A_e}{A_c}\left(\frac{h}{b}\right)^{0.5} \quad (۷)$$

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1-\frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r_c)^2+\left(\frac{h}{b}\right)(b-2r_c)^2\right]}{3A_g}-\rho_g}{1-\rho_g} \quad (۸)$$

که در آن‌ها، A_e سطح مقطع بتن محصورشده به‌صورت مؤثر، 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 هستند.



شکل ۸. منحنی اندرکنش بار محوری- لنگر خمشی برای نمونه‌های محصورشده.

نمودار آزمایشگاهی اندرکنش بار محوری و لنگر خمشی با استفاده از مقادیر بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی نمونه‌ی محصورشده ترسیم شده است. از طرف دیگر، با استفاده از روابط ارائه‌شده در بخش حاضر، مقادیر تئوری بیشینه‌ی بار محوری و لنگر خمشی برای خمش خالص و خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر محاسبه شده است. مقادیر آزمایشگاهی و تئوری بار محوری و لنگر خمشی برای ستون‌های محصورشده و همچنین نسبت مقادیر تئوری به آزمایشگاهی در جدول ۴ ارائه شده است. به‌علاوه، منحنی اندرکنش آزمایشگاهی و تئوری برای نمونه‌های محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

همان طور که در جدول ۴ و شکل ۸ مشاهده می‌شود، معادله‌های تئوری منجر به تخمین‌های محافظه‌کارانه می‌شود. این را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که مقادیر تئوری به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگر خمشی اساساً به یک کرنش محوری فرضی در دورترین تار فشاری بتن وابسته است؛ این در حالی است که در نمونه‌های محصورشده با کامپوزیت‌های FRP تحت اثر بار محوری با خروج از مرکزیت، ممکن است کرنش در دورترین تار فشاری بتن از مقادیر در نظر گرفته‌شده در آیین‌نامه فراتر رود.

۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه‌ی محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ، ۱۰ نمونه تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر آزمایش شده‌اند؛ که ۴ نمونه بدون تقویت خارجی و به‌عنوان نمونه‌ی شاهد در نظر گرفته شده‌اند. ۲ نمونه با استفاده از روش دورپیچ و ۴ نمونه‌ی دیگر نیز با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ محصور شده‌اند. در ادامه، برخی از نتایج به‌دست‌آمده ارائه شده است:

۱- شکست نمونه‌های محصورشده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP،که تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر، ۳۰، و ۶۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند، با پارگی کامپوزیت در وجه فشاری ستون همراه بوده است. محل گسیختگی همه‌ی نمونه‌ها در ارتفاع، در یک سوم میانی ارتفاع ستون مشاهده شده است.

۲- استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ در محصورسازی ستون، توانسته است با ایجاد توزیع یکنواختی از فشار محصورکننده روی محیط و حذف آثار 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 کند. به‌عبارت دیگر، در روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به روش متداول دورپیچ، ظرفیت بیشتری از کامپوزیت FRP استحصال می‌شود.

۳- استفاده از نوارهای گوشه به‌منظور مقاوم‌سازی موضعی گوشه‌های مقطع پیش از دورپیچی با نوارهای محصورکننده در روش نوار گوشه- دورپیچ، موجب افزایش مقاومت و شکل‌پذیری نمونه به مقدار قابل توجه شده است. برای مثال، در خروج از مرکزیت صفر میلی‌متر، ظرفیت باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ی تقویت‌شده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ به ترتیب به میزان ۱۵/۱ و ۷۶/۵ درصد، نسبت به نمونه‌ی محصورشده با دورپیچ افزایش یافته است.

۴- به‌طورکلی، تا خروج از مرکزیت معادل وضعیت متوازن (۶۰ میلی‌متر)، با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌ی شاهد تقریباً ثابت باقی مانده و پس از آن کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، در خروج از مرکزیت‌های صفر، ۶۰، و ۹۰ میلی‌متر، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر به ترتیب برابر با ۴۷/۶، ۴۷/۲، و ۳۵/۲ بوده است.

۵- براساس نتایج آزمایشگاهی، با افزایش خروج از مرکزیت بار، میزان افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با استفاده از روش نوار گوشه- دورپیچ نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یافته است. به‌عنوان مثال، شکل‌پذیری در نمونه‌های محصورشده با روش CSW تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های صفر و ۶۰ میلی‌متر به ترتیب به میزان ۶۰۷ و ۳۳۰ درصد نسبت به نمونه‌ی شاهد متناظر افزایش یافته است.

۶- مقادیر آزمایشگاهی به‌دست‌آمده برای بار محوری و لنگر خمشی در ستون‌های تقویت‌شده با استفاده از کامپوزیت‌های FRP و همچنین ستون‌های بدون تقویت خارجی، بیشتر از مقادیر تئوری و در جهت اطمینان بوده است؛ که به‌نظر می‌رسد علت آن، تفاوت در مقدار واقعی کرنش ایجادشده در دورترین تار فشاری بتن نسبت به مقدار محاسبه‌شده با استفاده از روابط تئوری باشد.

References - منابع

1. ACI 440.2R, 2017. 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.

2. Piekarczyk, J., Piekarczyk, W. and Blazewicz, S., 2010. Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber. *Construction and Building Materials*, *25*, pp.2365-2369. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.035.

3. Eid, R., Roy, N. and Paultre, P., 2009. Normal- and high-strength concrete circular elements wrapped with FRP composites. *Journal of Composites for Construction*, *13*(2), pp.113-124. https://doi.org/10.1061/(ASCE)10900268(2009)13:2(113).

4. Realfonzo, R. and Napoli, A., 2009. Cyclic behavior of RC columns strengthened by FRP and steel devices. *Journal of Structural Engineering*, *135*(10), pp.1164-1176. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000048.

5. Saljoughian, A., Mostofinejad and D. and Hosseini, S.M., 2019. CFRP confinement in retrofitted RC columns via CSB technique under reversed lateral cyclic loading. *Materials and Structures*, *52*, pp.1-14. https://doi.org/10.1617/s11527-019-1373-6.

6. Zignago, D. and Barnato, M., 2023. New analytical analysis-oriented stress-strain model for FRP-and-steel confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, *149*(1), pp.04022212. https://doi.org/10.1061/JSENDH.STENG-11634.

7. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2020. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, *235*, pp.117786. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2019.117786.

8. Shayanfar, J., Barros, J.A. and Rezazadeh, M., 2022. Unified model for fully and partially FRP confined circular and square concrete columns subjected to axial compression. *Engineering Structures*, *251*, pp.113355. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113355.

9. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2017. Rectangular reinforced concrete columns strengthened with carbon fiber-reinforced polymer sheets using corner strip-batten method. *ACI Structural Journal*, *114*(3), pp.659-671. https://doi.org/10.14359/51689566.

10. Fanaradeli, T., Rousakis, T. and Karabinis, A., 2019. Reinforced concrete columns of square and rectangular section, confined with FRP-Prediction of stress and strain at failure. *Composites Part B: Engineering*, *174*, pp.107046. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107046.

11. Xie, D., Hu, Z., Wang, B., Zhao, K. and Shi Y., 2023. Axial behaviour of basalt FRP-confined reinforced concrete columns with square sections of different corner radii. *Engineering Structures*, *274*, pp.115153. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115153.

12. Fan, L., Jin, L. and Du, X., 2023. Modeling of size effect on compressive behaviour of CFRP-confined rectangular RC columns: Influence of corner radius and aspect ratio. *Composite Structures*, *304*, pp.116400. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116400.

13. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2016. Corner strip-batten technique for FRP-confinement of square RC columns under eccentric loading. *Journal of Composites for Construction*, *20*(3), pp.04015077.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000644.

14. Mostofinejad, D. and Ilia, E., 2014. Confining of square RC columns with FRP sheets using corner strip-batten technique. *Construction and Building Materials*, *70*, pp.269-278. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.073.

15. Wang, W., Sheikh, M.N., Zeng, J.J. and Hadi, M.N., 2022. Ultimate strain prediction of partially FRP confined concrete considering strain localization. *Construction and Building Materials*, *346*, pp.128486. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2022.128486.

16. Djenad, S., Si-Salem, A. and Bouzidi, M.A., 2022. Performance and compressive axial behaviour of new design partially confined concrete columns with encased-FRP/Grids strips. *Asian Journal of Civil Engineering*, *23*(6), pp.801-815. https://doi.org/10.1007/s42107-022-00450-y.

17. Xing, L., Lin, G. and Chen, J.F., 2020. Behavior of FRP-confined circular RC columns under eccentric compression. *Journal of Composites for Construction*, *24*(4), pp.04020030. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001036.

18. Saljoughian A. and Mostofinejad, D., 2016. Axial-flexural interaction in square RC columns confined by intermittent CFRP wraps. *Composites Part B: Engineering,* *89*, pp.85-95. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.10.047.

19. Saljoughian, A., Mostofinejad, D. and Raji, A., 2020. Retrofit of concrete columns with fiber strips using grooves and corner battens. *Structures and Buildings*, *176*(3), pp.203-217. https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00187.

20. Huynh-Xuan, T., Do-Dai, T., Ngo-Thanh, T., Pham, T.M. and Nguyen-Minh, L., 2021. Effect of sulfate attack on reinforced concrete columns confined with CFRP sheets under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, *25*(6), pp.04021049. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001151.

21. Lu, S., Wang, J., Yang, J., and Wang, L., 2022. Numerical analysis of preloaded FRP-strengthened concrete columns under axial compression. *Construction and Building Materials*, *357*, pp.129297. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2022.129297.

22. Pham, T.M., Hadi, M.N. and Youssef, J., 2015. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression. *Journal of Composites for Construction*, *19*(6), pp.04015015. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943 -5614.0000571.

23. Eid, R. and Paultre, P., 2017. Compressive behaviour of FRP-confined reinforced concrete columns. *Engineering Structures*, *132*, pp.518-530. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.052.

24. Wang, Y., Liu, P., Cao, Q., Chen, G., Wan, B., Wei, Z. and Bai, Y.L., 2021. Comparison of monotonic axial compressive behaviour of rectangular concrete confined by FRP with different rupture strain. *Construction and Building Materials*, *299*, pp.124241. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124241.

25. Wang, Y.C. and Hsu, K., 2008. Design of FRP-wrapped reinforced concrete columns for enhancing axial load carrying capacity. *Composite Structures*, *82*(1), pp.132-139. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.04 .002.

26. ACI 211.1, 2009. Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete (Reapproved 2009). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI. https://doi.org/10.20935/AcadMatSci6138.

27. http://www.sika.com/.

28. Park, R., 1989. Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, *22*(3), pp.155-166. https://doi.org/10.5459/bnzsee.22.3.155-166.

29. Saljoughian, A. and Mostofinejad, D., 2020. Behavior of RC columns confined with CFRP using CSB method under cyclic axial compression. *Construction and Building Materials*, *235*, pp.117786. https://doi.org/10.1016/j.conbuild mat.2019.117786.

30. ACI 318, 2019. Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.