

# مقاوم سازی اتصال ستون های بتن مسلح دایره ای به پی به کمک میلگردهای GFRP و ورق های CFRP

سیده مهدیه میراعلمی (دانش آموخته دکتری)

محمدرضا اصفهانی\* (استاد)

محمدرضا نوکلی زاده (استادیار)

دانشکده ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۹)  
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۱/۲، ص. ۸۳-۷۵

در نوشتار حاضر، اتصال ستون های بتن مسلح دایره ای به پی با استفاده از پلیمرهای مسلح الیافی مقاوم سازی و رفتار آن ها به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی بررسی شده است. تعداد ۴ نمونه اتصال ستون بتن مسلح دایره ای به پی با استفاده از میلگردهای GFRP و ورق های CFRP مقاوم سازی شدند. یکی از نمونه ها فاقد تقویت، دو نمونه ی دیگر با میلگردهای GFRP با قطرهای متفاوت تقویت شدند. نمونه ی چهارم نیز با میلگردهای GFRP و ورق های CFRP تقویت شد. این نمونه ها تحت اثر همزمان بار محوری فشاری ثابت و جابه جایی جانبی چرخه ای قرار گرفتند. به منظور بررسی توانایی نرم افزار آباکوس، نمونه های آزمایشگاهی در نرم افزار مذکور شبیه سازی شدند. پارامترهای سختی اولیه، ظرفیت اتلاف انرژی، ظرفیت باربری جانبی و شکل پذیری نیز در نمونه های مذکور بررسی شد. نتایج نشان داد که تقویت خمشی اتصال موردنظر با میلگردهای GFRP موجب افزایش قابل توجه پارامترهای ذکر شده خواهد شد. افزایش قطر میلگردهای GFRP نیز نقش مؤثری در افزایش پارامترهای مذکور داشت. بیشترین مقدار افزایش در پارامترهای مذکور مربوط به نمونه ی چهارم بوده است. همچنین نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه ها تطابق قابل قبولی داشتند.

**واژگان کلیدی:** مقاوم سازی، اتصال ستون بتن مسلح دایره ای به پی، سختی اولیه، ظرفیت اتلاف انرژی.

seyedemahdieh.miralami@mail.um.ac.ir  
esfahani@um.ac.ir  
drt@um.ac.ir

## ۱. مقدمه

مقاوم سازی اتصال ستون های بتن مسلح به پی، اهمیت بسزایی در مقاوم سازی سازه ها دارد. در دهه های اخیر، مقاوم سازی ستون ها به کمک میلگردها و ورق های پلیمری مسلح الیافی به طور چشمگیری افزایش یافته است. از جمله مزایای میلگردهای GFRP در مقایسه با میلگردهای فولادی در تسلیح ستون های بتنی، نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام و مقاومت بالا در برابر خوردگی به خصوص در مناطق ساحلی است. بنابراین استفاده از میلگردهای مذکور در ستون های بتن مسلح پل که در معرض شرایط نامساعد محیطی قرار دارند، راهکاری جهت بهبود رفتار سازه های مذکور است.<sup>[۱]</sup>

توسلی و همکاران (۲۰۱۵)،<sup>[۱]</sup> در پژوهشی اثر بار محوری و جابه جایی جانبی در ستون های بتنی دایره ای مسلح شده با میلگردها و تنگ های دایره ای فولادی و

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۳/۷، اصلاحیه ۱۳۹۷/۷/۲۸، پذیرش ۱۳۹۷/۸/۵.

DOI:10.24200/J30.2018.51001.2360

GFRP را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش سطح بار محوری موجب کمایش میلگردهای فولادی و GFRP می شود و شکل پذیری را کاهش می دهد. همچنین دریافتند که کاهش فاصله ی تنگ ها در ستون موجب افزایش ظرفیت خمشی، افزایش جذب انرژی و افزایش شکل پذیری می شود.

هادی و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۲]</sup> اثر بار محوری با و بدون برون محوری در ستون های بتنی دایره ای مسلح شده با میلگردهای فولادی و GFRP را مطالعه کردند. نمونه ها تحت اثر همزمان بار محوری فشاری ثابت و جابه جایی جانبی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که ظرفیت باربری محوری و ظرفیت لنگر خمشی نمونه های تسلیح شده با میلگردهای GFRP کمتر از نمونه های با میلگردهای فولادی بوده است. همچنین آنها دریافتند که نادیده گرفتن مشارکت میلگردهای GFRP در فشار موجب اختلاف در نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی خواهد شد. حسن و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۳]</sup> در پژوهشی اثر بار محوری با و بدون برون محوری در ستون های بتنی دایره ای مسلح شده با میلگردهای فولادی و GFRP را بررسی کردند. قبل از بارگذاری، دو انتهای نمونه

در طول ۱۰۰ میلی‌متر توسط ورق‌های CFRP دو لایه دورپیچ شد تا بتین حاصل شود که گسیختگی در دو انتهای نمونه رخ نخواهد داد. نتایج نشان داد که جایگزینی میلگردهای فولادی با میلگردهای GFRP تحت بار محوری فاقد خروج از مرکزیت، موجب کاهش شکل‌پذیری ستون بتنی خواهد شد.

هدهود و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۴]</sup> نیز اثر بار محوری با و بدون برون‌محوری در ستون‌های بتنی دایره‌ای مسلح شده با میلگردهای GFRP را بررسی کردند و دریافتند که استفاده از تنگ دایره‌ای GFRP، محصورشدگی بتن را افزایش می‌دهد. همچنین نادیده گرفتن مشارکت میلگردهای GFRP در فشار موجب کم‌رأورد کردن نیروی محوری و ظرفیت لنگر خمشی ستون‌های بتنی خواهد شد. در راستای مقاوم‌سازی ستون‌های دایره‌ای و مربعی محصور شده با ورق‌های FRP، می‌توان به پژوهش اصفهانی و کیانوش (۲۰۰۴)،<sup>[۵]</sup> اشاره کرد. ایشان با آزمایش بر روی سه نمونه ستون بتنی دایره‌ای و سه نمونه ستون بتنی مربعی دریافتند که محصورشدگی ستون‌های دایره‌ای به وسیله پوشش FRP، اثر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری داشته است. مقاومت فشاری نمونه‌های ستون مربعی محصور شده افزایش چندانی نداشته است که دلیل آن، تمرکز تنش زیاد در گوشه‌های ستون‌های مربعی تقویت شده تحت فشار جانبی است. همچنین آنها دریافتند که ظرفیت باربری جانبی ستون‌های دایره‌ای محصور شده به طور قابل ملاحظه‌ای از ستون‌های مربعی بیشتر است.

تقی و بیکر (۲۰۱۳)،<sup>[۶]</sup> در پژوهشی به مطالعه‌ی تحلیلی رفتار ستون‌های دایره‌ای کوتاه بتن مسلح محصور شده با ورق‌های CFRP تحت بار محوری خالص با استفاده از نرم‌افزار آباکوس،<sup>[۷]</sup> پرداختند. نتایج پژوهش اخیر با نمونه‌ی آزمایشگاهی مقایسه و تطابق قابل قبولی حاصل شد. پارامترهای قطر مقطع و ارتفاع ستون و تعداد لایه‌های ورق CFRP مطالعه شد و نتایج نشان دهنده‌ی افزایش شکل‌پذیری و مقاومت نهایی نمونه‌های دورپیچ شده با ورق‌های CFRP بوده است. همچنین افزایش لایه‌های CFRP موجب افزایش تنش و کرنش نهایی و شکل‌پذیری ستون شد. افزایش اندازه‌ی ستون بتنی اثر محصورشدگی را کاهش داد.

از روش‌های مقاوم‌سازی خمشی ستون‌های بتن مسلح، استفاده از روش نصب در نزدیک سطح (NSM)<sup>۱</sup> است. در روش مذکور میلگردها در داخل شیارهای از قبل ایجاد شده در پوشش عضو بتنی قرار می‌گیرند. سپس تقویت‌کننده‌های اشاره شده به وسیله‌ی چسب در بتن محکم می‌شوند.<sup>[۸]</sup> پرو و همکاران (۲۰۰۹)،<sup>[۹]</sup> اثر تقویت خمشی و محوری نمونه‌های آزمایشگاهی اتصال ستون بتن مسلح مربعی به پی با استفاده از روش نصب در نزدیک سطح را بررسی کردند. نمونه‌ها تحت اثر همزمان بار فشاری ثابت و جابه‌جایی جانبی قرار گرفتند و نتایج نشان داد که افزایش مقاومت فشاری بتن و نسبت میلگردهای CFRP موجب افزایش ظرفیت باربری جانبی و ظرفیت اتلاف انرژی می‌شود.

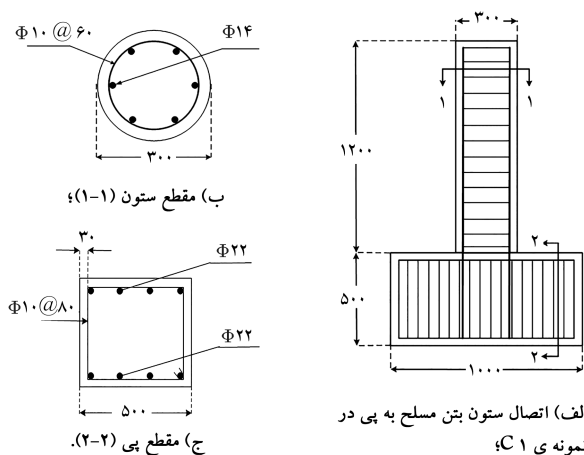
سرافراز و دانش (۲۰۱۰)،<sup>[۱۰]</sup> نیز به مطالعه‌ی آزمایشگاهی مقاوم‌سازی اتصال ستون‌های بتن مسلح مربعی به پی به روش نصب در نزدیک سطح با استفاده از میلگردهای FRP و ورق‌های CFRP پرداختند و نتایج نشان‌دهنده‌ی افزایش قابل توجه در ظرفیت باربری جانبی بوده است. اما روش مذکور اثر قابل توجهی بر شکل‌پذیری نمونه‌ها نداشته است. عواملی مانند کم‌اندامش میلگردهای تقویت‌کننده‌ی خمشی، لغزش تقویت‌کننده‌ها در شیار پوشش عضو بتنی و آسیب آن‌ها در مجاورت محیط موجب کاهش کارایی روش مقاوم‌سازی نصب در نزدیک سطح خواهد شد. همچنین با توجه به مشکلات اجرای شیار در پوشش ستون بتنی دایره‌ای شایسته است راهکاری جهت بهبود مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی دایره‌ای ارائه شود.

پل‌ها از اصلی‌ترین سازه‌ها در توسعه‌ی راه‌ها هستند که نقش مهمی در تسریع

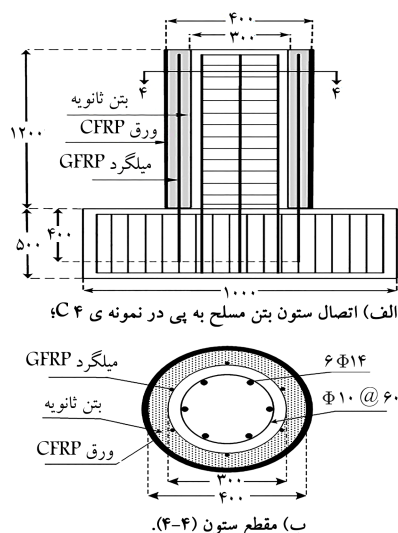
خدمت‌رسانی در مواقع عادی و اضطراری ایفا می‌کنند. هرگونه اختلال در بازگشایی پل‌ها، مسیر را از سرویس‌دهی باز می‌دارد و بر عبور و مرور سریع و روان تأثیر می‌گذارد. ستون‌های بتن مسلح پل‌ها غالباً دایره‌ای بوده و در محیط‌های نامساعدی مانند مناطق ساحلی و دریایی قرار گرفته‌اند. بنابراین مسئله‌ی خوردگی میلگردهای مسلح‌کننده در مناطق ساحلی و دریایی، از جمله دلایل غیرلرزه‌ای آسیب در سازه‌های مذکور است و آنها مستعد زوال زودرس هستند. همچنین ستون‌های بتن مسلح پل که براساس ضوابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های پیشین طراحی شده‌اند، بنا به دلایل مختلفی مانند کاهش نسبت مسلح‌کننده‌های عرضی و خمشی، کاهش پیوستگی در ناحیه‌ی وصله‌ها و گسیختگی بتن، مقاومت کافی در برابر بارهای لرزه‌ای ندارد و نیاز به تقویت دارند. بنابراین به کارگیری روش‌های مقاوم‌سازی کارآمد و مقرون به صرفه در جهت افزایش سرویس‌پذیری سازه‌های مذکور در شرایط بحرانی امری ضروری است. در پژوهش حاضر، ۴ نمونه اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ای به پی با استفاده از میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP مقاوم‌سازی شده و تحت اثر همزمان بار محوری فشاری ثابت و جابه‌جایی جانبی چرخه‌ای قرار گرفت. سپس نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس،<sup>[۷]</sup> تحلیل شدند. پارامترهای سختی اولیه، ظرفیت اتلاف انرژی، ظرفیت باربری جانبی و شکل‌پذیری در نمونه‌های آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شد.

## ۲. مشخصات نمونه‌های آزمایشی

شکل ۱، جزئیات نمونه‌ی شاهد اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ای به پی را نشان می‌دهد. نمونه‌ی مذکور با علامت C۱ نشان داده شده است. ابعاد ستون از نمونه‌ی واقعی یک پل تعمیر شده با ورق‌های CFRP در مقیاس تقریبی ۱:۴ انتخاب شده است.<sup>[۱۱]</sup> شکل ۱الف، جزئیات اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ای به پی در نمونه‌ی مذکور را نشان می‌دهد. در نمونه‌ی C۱، ستون بتن مسلح دایره‌ای به قطر ۳۰۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (شکل ۱ب) به پی بتن مسلح مربعی به ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر و طول ۱۲۰۰ میلی‌متر (شکل ۱ج) متصل شد. در ستون نمونه‌ی مذکور از ۶ میلگرد آجدار فولادی به قطر ۱۴ میلی‌متر به عنوان میلگردهای طولی و از تنگ فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر با فاصله‌ی ۶۰ میلی‌متر به عنوان مسلح‌کننده‌های عرضی و در پی آن از ۴ میلگرد آجدار فولادی به قطر ۲۲ میلی‌متر هم در سفره‌ی بالا و هم در سفره‌ی پایین به عنوان میلگردهای طولی و از تنگ



شکل ۱. جزئیات و اندازه‌های نمونه‌ی شاهد C۱ (بر حسب mm).



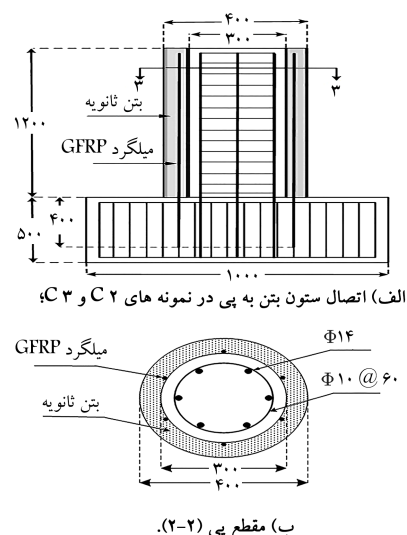
شکل ۳. جزئیات و اندازه‌های نمونه‌های تقویت شده‌ی C۴ (بر حسب mm).



شکل ۴. جزئیات مقاوم‌سازی نمونه‌ی C۴ با ورق CFRP.

عمل‌آوری بتن پرمقاومت، از ورق‌های CFRP برای دورپیچ ستون بتنی استفاده شده است. به منظور دورپیچ کردن نمونه‌ی C۴، ابتدا سطح بتن صاف و به چسب آغشته شد. سپس ورق CFRP با اعمال فشار دست بر سطح بتن چسبانده شد. همچنین امتداد ورق CFRP عمود بر امتداد ستون قرار گرفت. به منظور جلوگیری از لغزش لپه‌های ورق مذکور در خلال بارگذاری، طول همپوشانی بین لایه‌ها ۱۰۰ میلی‌متر منظور شد. شکل ۴، جزئیات مقاوم‌سازی نمونه‌ی C۴ با ورق‌های CFRP را نشان می‌دهد. در پژوهش حاضر از بتن معمولی به منظور ساخت نمونه‌ی اولیه و از بتن پرمقاومت به منظور ساخت بتن ثانویه اطراف میلگردهای GFRP در تقویت خمشی استفاده شده است.

جدول ۱، مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی اولیه و پرمقاومت ثانویه در سن ۲۸ روز را نشان می‌دهد. جدول ۲، مشخصات میلگردهای فولادی مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۵، میلگردهای GFRP با استفاده از استاندارد ۳R-۴۴۰-۱۲<sup>[۱۲]</sup> آماده‌سازی و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. جدول ۳، مشخصات میلگردهای GFRP مورد استفاده در پژوهش را نشان می‌دهد. ورق‌های CFRP مورد استفاده در پژوهش حاضر، از محصولات شرکت کوانتوم است که در رول‌هایی به پهنای ۵۰۰ میلی‌متر بسته‌بندی شده‌اند و متناسب با اندازه‌های موردنیاز قابل برش هستند. چسب مورد استفاده برای ورق‌های CFRP نیز Sikadur-۳۳۰ بوده است. جدول ۴، مشخصات ورق‌های CFRP را نشان می‌دهد.



شکل ۲. جزئیات و اندازه‌های نمونه‌های تقویت شده‌ی C۲ و C۳ (بر حسب mm).

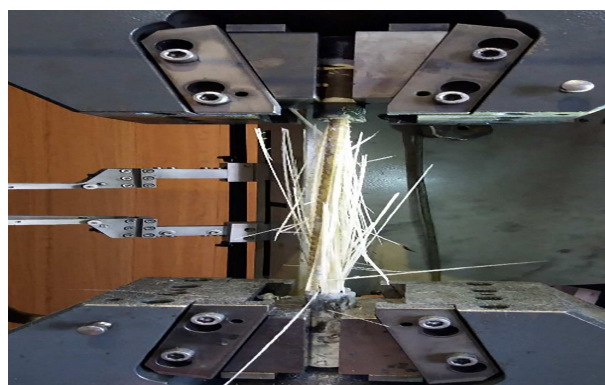
فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر با فاصله‌ی ۸۰ میلی‌متر به عنوان مسلح‌کننده‌های عرضی بهره‌جویی شد. یک قالب استوانه‌یی پلی‌اتیلن جهت بتن‌ریزی ستون بر سطح فوقانی میلگردهای پی قرار گرفت و بتن‌ریزی اتصال موردنظر به صورت یکپارچه انجام شد. نمونه‌ی C۱ فاقد تقویت خمشی در محل اتصال ستون به پی است. جزئیات ذکر شده برای مقطع پی بتنی برای تمام نمونه‌های آزمایشگاهی یکسان است. شکل ۲الف، جزئیات اتصال ستون بتن مسلح دایره‌یی به پی برای نمونه‌های C۲ و C۳ که به ترتیب با ۶ میلگرد GFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر در محل اتصال ستون بتن مسلح به پی به صورت خمشی تقویت شده است، نشان می‌دهد. شکل ۲ب، نیز جزئیات مقطع ستون نمونه‌های C۲ و C۳ را نشان می‌دهد. در نمونه‌های C۲ و C۳ از ۶ میلگرد فولادی به قطر ۱۴ میلی‌متر به عنوان میلگردهای طولی و تنگ فولادی به قطر ۱۰ میلی‌متر با فاصله‌ی ۶۰ میلی‌متر به عنوان مسلح‌کننده‌های عرضی استفاده شده است. سپس قالب استوانه‌یی ستون اولیه به قطر ۳۰۰ میلی‌متر اطراف میلگردهای فولادی قرار داده شد و بتن‌ریزی اولیه‌ی اتصال ستون بتن مسلح به قطر ۳۰۰ میلی‌متر به پی به صورت یکپارچه انجام شد. پس از برداشتن قالب پلی‌اتیلن استوانه‌یی و عمل‌آوری بتن اولیه، تعداد ۶ شیار به قطر ۱۵ میلی‌متر<sup>[۸]</sup> در نمونه‌ی C۲ و ۲۰ میلی‌متر در نمونه‌ی C۳ و عمق ۴۰۰ میلی‌متر در محل اتصال ستون بتنی به پی و درون پی ایجاد شد و داخل شیارها با جت آب و جت هوا (پمپ باد) از هرگونه آلودگی و گرد و غبار پاک شد. برای چسباندن میلگردهای GFRP، ابتدا شیارهای ایجاد شده تا نیمه با چسب پر شد. سپس درون شیار ضربه زده شد تا حفره‌های داخل آن کاملاً اشباع شوند. پس از آن میلگردهای GFRP در درون شیار مدفون شدند و شیار کاملاً با چسب پر شد. چسب مورد استفاده از ترکیب رزین و ماده‌ی سخت‌کننده به نسبت اختلاط جرمی ۳ به ۱ به دست آمد. به منظور بتن‌ریزی ثانویه، قالب فولادی به قطر ۴۰۰ میلی‌متر اطراف میلگردهای GFRP بر پی بتنی قرار گرفت و بتن پرمقاومت حاوی میکروسیلیس و روان‌کننده برای پوشش میلگردهای GFRP ریخته شد. شکل ۳الف، جزئیات نمونه‌ی C۴ که با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر به صورت خمشی تقویت و با ورق‌های CFRP محصور شده است، نشان می‌دهد. شکل ۳ب، جزئیات مقطع ستون نمونه‌ی مذکور را نشان می‌دهد. مراحل ساخت نمونه‌ی مذکور همانند نمونه‌ی C۲ است، با این تفاوت که پس از

جدول ۱. مقاومت فشاری نمونه های بتنی استوانه ای در روز آزمایش.

نمونه	مقاومت فشاری بتن (MPa)	
	اولیه	ثانویه
C۱	۲۱	-
C۲	۲۱	۵۲
C۳	۲۰	۵۱
C۴	۲۰	۴۹

جدول ۲. مشخصات میلگردهای فولادی آجدار.

نوع میلگرد	Φ۱۰	Φ۱۴	Φ۲۲
قطر اسمی (mm)	۱۰	۱۴	۲۲
تنش تسلیم (MPa)	۵۰۶	۵۵۷	۳۷۶
تنش نهایی (MPa)	۷۷۲	۷۳۲	۵۶۸
مدول کشسانی (GPa)	۲۰۹	۲۱۰	۲۰۴



شکل ۵. میلگرد GFRP تحت آزمون کشش مستقیم.

جدول ۳. مشخصات میلگردهای GFRP.

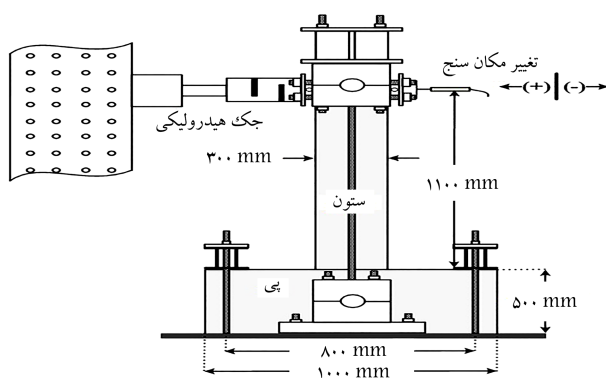
نوع میلگرد	GFRP۱۰	GFRP۱۲
قطر اسمی (mm)	۱۰	۱۲
تنش نهایی (MPa)	۶۱۵	۷۹۸
مدول کشسانی (GPa)	۵۰	۵۱
کرنش نهایی (درصد)	۱٫۲	۱٫۶

جدول ۴. مشخصات ورق های CFRP.

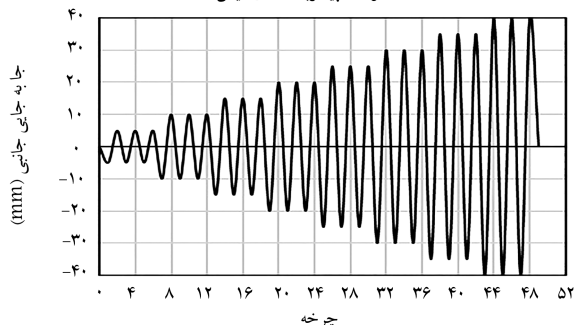
نام محصول	QUANTOM WRAP۲۴۰ C
مقاومت کششی الیاف (MPa)	۴۲۵۰
مدول کشسانی (GPa)	۲۳۰
کرنش نهایی (درصد)	۲٫۲
ضخامت ورق (mm)	۰٫۱

### ۳. پیکربندی آزمایش و نحوه ی بارگذاری

شکل ۶ الف، جزئیات بارگذاری نمونه ی اتصال ستون بتن مسلح دایره ای به پی را نشان می دهد. بارگذاری رفت و برگشتی توسط یک جک هیدرولیکی خودکار به نمونه وارد شد. همانطور که در شکل مذکور مشاهده می شود، جهت مثبت اعمال جابه جایی جانبی مربوط به حالتی است که ستون به سمت جک هیدرولیکی کشیده می شود. بنابراین وجه سمت راست ستون به کشش می افتد. از دو میله برای اعمال بار فشاری ثابت به سطح بالای ستون دایره ای استفاده شد که سبب آزادی چرخش درون صفحه ی نمونه ها می شوند و نوعی اتصال مفصلی در دو انتها ایجاد می کند. ونوقی (۲۰۱۰)،<sup>[۱۱]</sup> برای یک پژوهش آزمایشگاهی، سربار معادل ستون های پل را ۵٪ تا ۱۰٪ ظرفیت فشاری بتن آن پیش بینی کرد. از آنجایی که ستون پژوهش حاضر، ستون یک پل است و پل ها، سربار قابل توجهی در مقایسه با ستون های ساختمانی ندارند، سربار وارد شده معادل ۱۰٪ ظرفیت فشاری بتن ستون شاهد در نظر گرفته شده و مقدار آن ۱۵۰ کیلو نیوتن است. به منظور حفظ تعادل نمونه و جلوگیری از حرکت جانبی، از دو مهار فلزی در دو انتهای پی که به کف صلب متصل شده اند، استفاده شده است. از یک تغییر مکان سنج (LVDT)<sup>۲</sup> در ارتفاع ۱۱۰۰ میلی متری پای ستون به منظور اندازه گیری جابه جایی افقی استفاده شده است که توسط یک کابل به دستگاه ثبت داده ها متصل شده است. نتایج آزمایش شامل بار اعمالی فشاری و جابه جایی افقی بالای ستون به وسیله ی دستگاه پردازنده ثبت شده است. شکل ۶ ب، نیز الگوی بارگذاری جانبی رفت و برگشتی نمونه ها را نشان می دهد. ۲۴ چرخه ی تغییر مکان جانبی تا ۴۰ میلی متر به صورت رفت و برگشت به نمونه ها وارد شد. همچنین از سه چرخه ی جانبی با تغییر مکان یکسان به منظور بررسی زوال مقاومت و سختی استفاده شده است.



الف) نحوه ی پیکربندی آزمایش؛



ب) الگوی بارگذاری رفت و برگشتی.

شکل ۶. جزئیات بارگذاری نمونه ی اتصال ستون بتن مسلح دایره ای به پی.

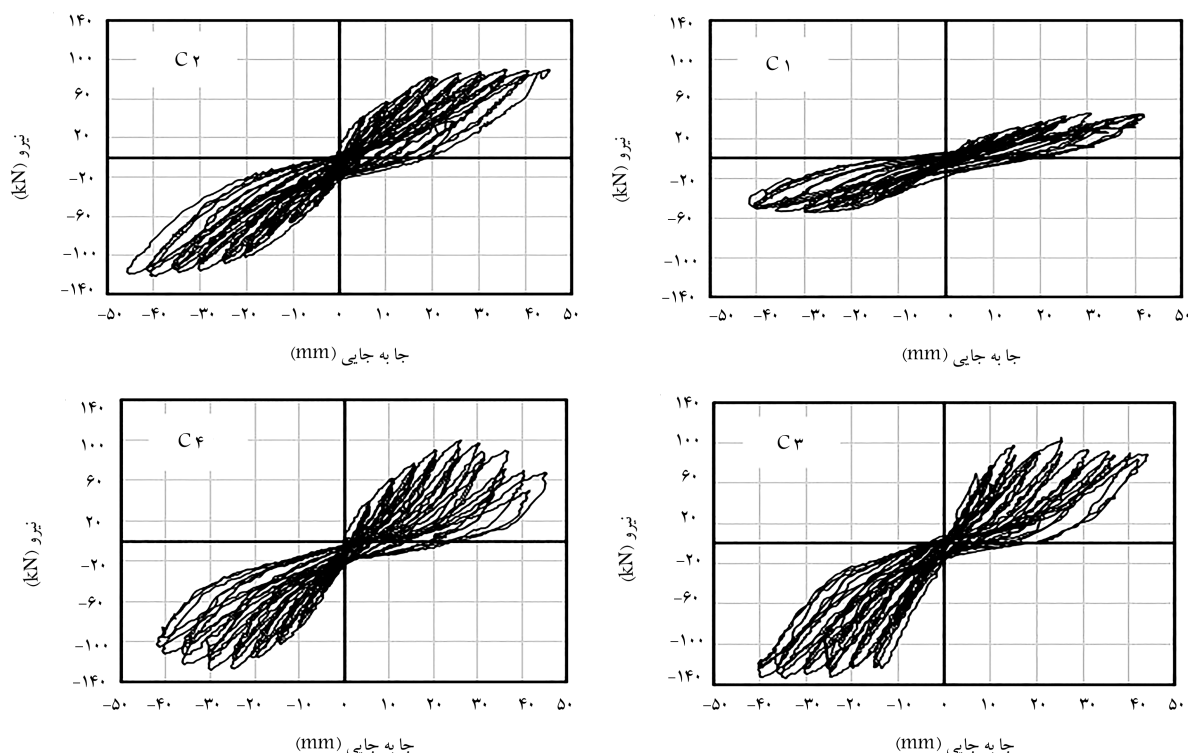
## ۴. تحلیل نتایج آزمایشگاهی

### ۱.۴. رفتار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌ها

اثر باریک‌شدگی کاهش و ظرفیت باربری جانبی به طور قابل توجهی افزایش یافت. اثر باریک‌شدگی در نمونه‌های تقویت شده‌ی C۳ با میلگردهای GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر و C۴ با میلگردهای GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر و پوشش با یک لایه‌ی ورق CFRP نیز مشاهده شد. ستون‌های مذکور نیز ظرفیت باربری جانبی قابل توجهی دارند.

جدول ۵، نتایج آزمایش نمونه‌های اتصال ستون بتن مسلح به پی را نشان می‌دهد. پاسخ نیرو و جابه‌جایی نمونه‌ها تحت جابه‌جایی جانبی مثبت و منفی در جدول مذکور ارائه شده است. جهت مثبت و منفی اعمال جابه‌جایی جانبی در شکل ۶ الف نشان داده شده است. بیشینه‌ی مقادیر نیروی‌های مذکور تحت جابه‌جایی جانبی، ظرفیت باربری نمونه‌هاست. همچنین شکل ۸، نحوه‌ی محاسبه‌ی پارامترهای سختی اولیه و شکل‌پذیری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. نقطه‌ی ۸۰٪ نیروی بیشینه ( $0.8P_{MAX}$ )،

با استفاده از نتایج ثبت شده توسط تغییر مکان‌سنج و نیروی ثبت شده توسط نیروسنج، نمودارهای رفت و برگشتی ۴ نمونه‌ی مورد آزمایش در شکل ۷ مشاهده می‌شود که مطابق آن، پاسخ نمونه‌ها در دو جهت بارگذاری کاملاً متقارن نبوده است. این عدم تقارن به دلایل مختلفی مانند عدم قطعیت در سطح مقطع آرماتورها، ترک‌خوردگی بتن، ناهمگنی بتن و الگوی بارگذاری است. در نمونه‌ی شاهد C۱، اثر باریک‌شدگی<sup>۲</sup> در نمودار مشاهده می‌شود. بنابراین، ستون مذکور ظرفیت اتلاف انرژی زیادی ندارد. در نمونه‌ی C۲ با تقویت با میلگردهای GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر،



شکل ۷. نمودارهای بار - جابه‌جایی نمونه‌های آزمایش شده.

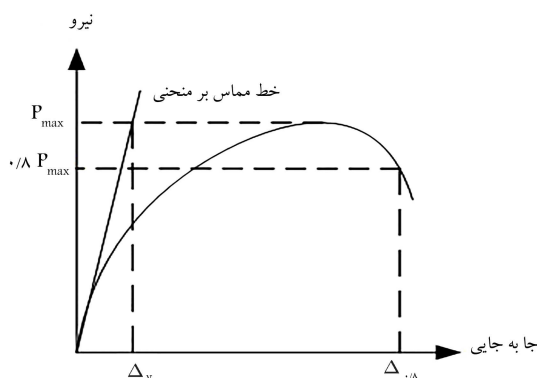
جدول ۵. نتایج نمونه‌های آزمایشی.

شماره‌ی نمونه	C۴	C۳	C۲	C۱
بیشینه‌ی نیروی جانبی در جهت مثبت (kN)	۱۰۰/۰	۸۹/۱	۸۸/۳	۴۶/۲
بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی در جهت مثبت (mm)	۲۶/۱	۲۵/۳	۳۶/۰	۳۰/۵
بیشینه‌ی نیروی جانبی در جهت منفی (kN)	۱۲۷/۱	۱۲۳/۱	۱۲۱/۵	۵۵/۰
بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی در جهت منفی (mm)	۲۹/۶	۳۴/۲	۴۰/۰	۲۸/۱
میانگین افزایش نیروی جانبی نسبت به نمونه‌ی C۱ (درصد)	۱۲۳/۸	۱۰۸/۳	۱۰۶/۰	-
سختی اولیه (kN/mm)	۹/۹	۹/۸	۹/۶	۳/۹
شاخص شکل‌پذیری (رابطه‌ی ۱)	۴/۴	۳/۹	۳/۷	۱/۴
ظرفیت اتلاف انرژی (kN.m)	۱۱۷/۷	۱۱۳/۹	۱۱۲/۲	۵۲/۵

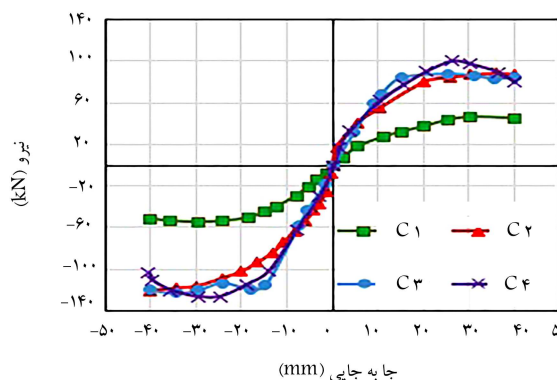
جابه‌جایی متناظر آن ( $\Delta_{0.8}$ ) و جابه‌جایی تسلیم ( $\Delta_y$ )، روی منحنی مشخص شده است. سختی اولیه به صورت نسبت  $\frac{P}{\Delta}$  نیروی پیشینه بر جابه‌جایی تسلیم تعریف شده است.<sup>[۱۰]</sup> ظرفیت اتلاف انرژی نیز براساس مجموع سطح محصور به نمودار چرخه‌یی تعریف شد. برای محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری از رابطه‌ی ۱ استفاده شد. با توجه به رابطه‌ی مذکور، شاخص شکل‌پذیری برابر با نسبت جابه‌جایی متناظر  $\frac{\Delta_{0.8}}{\Delta_y}$  نیروی پیشینه ( $\Delta_{0.8}$ )، بر جابه‌جایی تسلیم ( $\Delta_y$ ) است.

$$\mu = \frac{\Delta_{0.8}}{\Delta_y} \quad (۱)$$

شکل ۹، منحنی پوش بار - جابه‌جایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور و نتایج جدول ۵، ظرفیت باربری نمونه‌ی C۲ با تقویت به وسیله‌ی ۶ عدد میلگرد GFRP با قطر ۱۰ میلی‌متر نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۰۶٪ افزایش یافت. همچنین افزایش مقدار تقویت‌کننده‌ی GFRP (۶ عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر) در نمونه‌ی C۳، موجب افزایش ۱۰۸٪ ظرفیت باربری جانبی شد. استفاده‌ی همزمان میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP در نمونه‌ی C۴ موجب افزایش ۱۲۳٪ ظرفیت باربری جانبی شد. بنابراین ترکیب میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP راهکار مؤثری جهت افزایش ظرفیت باربری جانبی ستون است. سختی اولیه‌ی نمونه‌های C۲ و C۳ نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۴۶٪ و ۱۵۱٪ افزایش یافته است. بیشترین سختی اولیه مربوط به نمونه‌ی C۴ است. به طوری که سختی نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۵۳٪ افزایش یافته است. با توجه به جدول ۵، شکل‌پذیری نمونه‌ی C۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۶۴٪ افزایش یافته است. افزایش مقدار تقویت‌کننده‌ی GFRP (۶ عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر) در نمونه‌ی C۳، موجب افزایش شاخص شکل‌پذیری نسبت به نمونه‌ی



شکل ۸. محاسبه‌ی سختی اولیه و شکل‌پذیری تغییرمکانی.<sup>[۱۰]</sup>

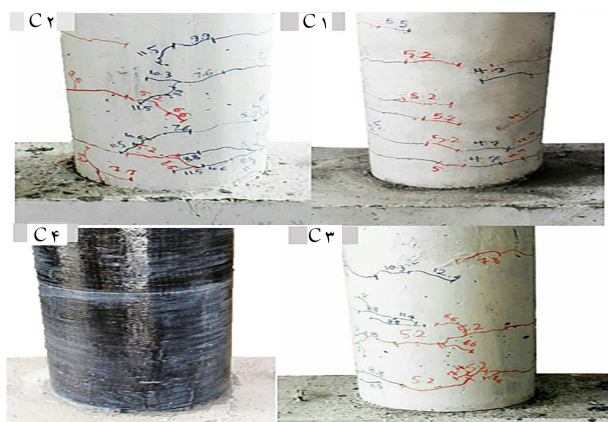


شکل ۹. نمودار پوش بار - جابه‌جایی نمونه‌های آزمایش شده.

C۲ شده است. شکل‌پذیری نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد ۱۷۸٪ افزایش یافته است. ترکیب میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP در نمونه‌ی C۴ نیز موجب افزایش قابل توجه شکل‌پذیری شده است. به طوری که شکل‌پذیری نمونه‌ی C۴ نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۲۱۴٪ افزایش یافته است. ظرفیت اتلاف انرژی در نمونه‌ی C۲ نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲٫۱ برابر شده است، بنابراین تقویت نمونه‌ی شاهد با میلگردهای GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر اثر قابل توجهی در مقاوم‌سازی ستون داشته است. ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ی C۳ با افزایش مقدار تقویت‌کننده‌ی GFRP (۶ عدد میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر) نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲٫۲ برابر و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی نمونه‌ی C۴ نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۲٫۳ برابر شده است.

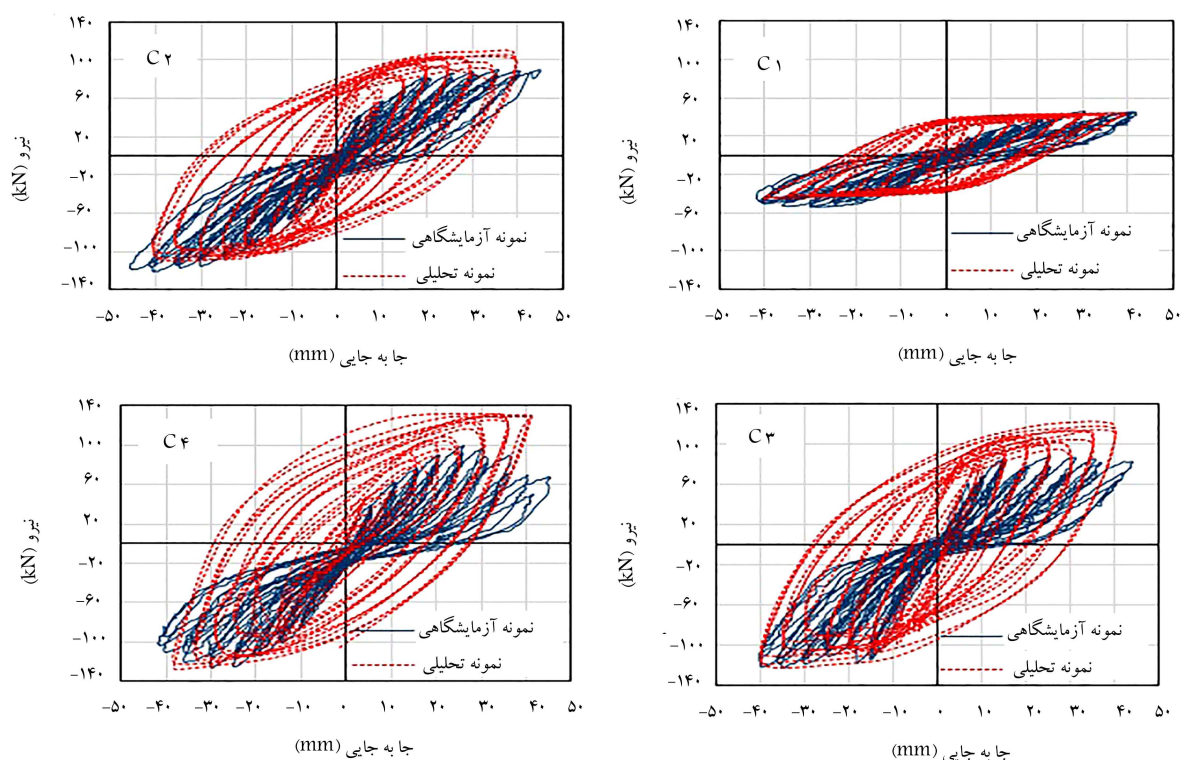
## ۲.۴. حالت‌های شکست و الگوهای ترک نمونه‌ها

شکل ۱۰، وضعیت نمونه‌های آزمایشی در انتهای بارگذاری (جابه‌جایی جانبی ۴۰ میلی‌متر) را نشان می‌دهد. حالت شکست همه‌ی نمونه‌ها، حالت شکست خمشی بوده است. در نمونه‌ی C۱، اولین ریزترک‌های خمشی در بار ۲٫۵ تن در فاصله‌ی حدود ۸۰ میلی‌متری از پای ستون ایجاد شده و با افزایش بار در چرخه‌های بعدی، تعداد و عرض ترک‌ها افزایش یافته است. در بار حدود ۴٫۴ تن، خردشدن وجه فشاری بتن آغاز شد. در نمونه‌ی C۲ که با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر تقویت شده است، اولین ریزترک‌های کششی در بار ۴٫۴ تن مشاهده شد. در میزان بار حدوداً ۶٫۵ تن نیز وجه فشاری بتن خرد شد که این مقدار بار به طور میانگین نسبت به نمونه‌ی شاهد ۶۱٪ افزایش داشته است. در نمونه‌ی C۳ که با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۲ میلی‌متر تقویت شده است، اولین ریزترک‌های کششی در بار ۴٫۶ تن مشاهده شد. در میزان بار حدوداً ۶٫۸ تن نیز وجه فشاری بتن خرد شد، که این مقدار بار نسبت به نمونه‌ی شاهد ۶۹٪ افزایش داشته است. تقویت ستون‌های C۲ و C۳ با میلگردهای GFRP، از کماتش و جداسازی میلگردهای مذکور تحت جابه‌جایی جانبی و بار محوری جلوگیری به عمل آورده است، لذا اتصال مقاوم‌سازی شده، عملکرد مناسبی خواهد داشت. تعداد ترک‌های نمونه‌ی C۳ نسبت به نمونه‌ی C۲ کمتر و پهنای ترک‌های آن بیشتر بوده است. در نمونه‌ی C۴ که با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر تقویت و با یک لایه ورق CFRP دور پیچ شده است، نمی‌توان ترک‌های کششی را مشخص کرد. نمونه‌ی مذکور در محل اتصال ستون به پی بتنی دچار گسیختگی شد. همچنین در چرخه‌ی دوم در بار نزدیک به ۳٫۱ تن، صداهای ناشی از ترک‌خوردگی در چسب شنیده می‌شد.



شکل ۱۰. الگوهای ترک‌خوردگی نمونه‌ها در انتهای آزمایش.





شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه‌ها.

جدول ۶. نتایج نمونه‌های شبیه‌سازی شده.

شماره نمونه	ظرفیت باربری جانبی (kN)	سختی اولیه (kN/mm)	شکل پذیری	ظرفیت اتلاف انرژی (kN.m)
C۱	۴۶٫۸	۴٫۵	۱٫۶	۶۰٫۱
C۲	۱۱۴٫۹	۹٫۸	۳٫۸	۱۲۳٫۰
C۳	۱۲۳٫۰	۱۰٫۱	۴٫۱	۱۲۳٫۸
C۴	۱۳۱٫۶	۱۰٫۶	۴٫۶	۱۲۴٫۰

## ۵. مدل‌سازی و تحلیل نمونه‌های آزمایشگاهی

غیرخطی تعریف شده است. اندرکنش میلگردهای طولی، تنگ‌های برشی فولادی و میلگردهای تقویتی GFRP با بتن به صورت مدفون<sup>۵</sup> و همچنین اندرکنش ورق CFRP با سطح بتن به صورت گیردار<sup>۶</sup> تعریف شده است. بار محوری فشاری و جابه‌جایی جانبی به وسیله یک صفحه‌ی فولادی که بر سطح فوقانی ستون قرار دارد، وارد شده است. سپس نمونه‌ها تحت آنالیز استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند. در شکل ۱۱، نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که مطابق آن نتایج تحلیلی تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد. همچنین در جدول ۶، نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های تحلیلی ارائه شده است. از جمله دلایل احتمالی باریک‌شدگی در نمودارهای رفت و برگشتی آزمایشگاهی، لغزش میلگردها در بتن نمونه‌های اتصال ستون بتن مسلح به پی است، در حالی که با تعریف اندرکنش میلگردهای طولی، تنگ‌های عرضی فولادی و میلگردهای تقویتی GFRP به صورت مدفون در بتن در نرم‌افزار آباکوس<sup>[۷]</sup> اثر لغزش آن‌ها در بتن نادیده گرفته شد. همچنین با توجه به پژوهش گراسل و جیرسک (۲۰۰۶)<sup>[۱۳]</sup> و پژوهش علی و همکاران (۲۰۱۳)<sup>[۱۴]</sup>، استفاده از مدل بتن آسیب‌دیده خمیری و

به منظور مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>[۷]</sup> استفاده شده است. از المان‌های ۸ گرهه‌ی مکعبی سه بعدی C3D۸R جهت مدل‌سازی بتن، از المان‌های دو گرهه‌ی T3D۲ جهت مدل‌سازی آرماتورهای طولی، تنگ‌های فولادی و میلگردهای تقویتی GFRP و از المان‌های ۴ گرهه‌ی S4R جهت مدل‌سازی ورق‌های CFRP استفاده شده است. در پژوهش حاضر، از مدل بتن آسیب‌دیده خمیری<sup>۴</sup> جهت مدل‌سازی بتن معمولی و پرمقاومت استفاده شده است. در مدل مذکور، دو حالت گسیختگی ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری برای بتن منظور شده است. همچنین رفتار بتن بعد از شکست با آسیب‌های کششی و فشاری تعریف شده است. رفتار میلگردهای تقویتی GFRP تا نقطه‌ی گسیختگی به صورت خطی در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه خواص مکانیکی ورق CFRP در جهت‌های مختلف متفاوت است، رفتار آن به صورت خطی و نوع آن Lamina تعریف شد. از معیار Hashin جهت مدل‌سازی آسیب ورق CFRP استفاده شده است. رفتار مصالح فولادی نیز با تعریف مشخصات خطی و

المان‌های ۸ گره‌ی مکعبی سه بعدی C3D8R جهت مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار آباکوس قادر به شبیه‌سازی اثر باریک‌شدگی در نمودارهای رفت و برگشتی نیست. بنابراین نرم‌افزار مذکور قادر به شبیه‌سازی اثر باریک‌شدگی در نتایج نمودارهای رفت و برگشتی اعضای بتن مسلح نیست. در این زمینه، نتایج مشابهی در پژوهش ون و همکاران (۲۰۰۱)<sup>[۱۵]</sup> در شبیه‌سازی اتصال ستون‌های بتن مسلح پل به پی و پژوهش موسوی و همکاران (۲۰۱۴)<sup>[۱۶]</sup> در زمینه‌ی دیوارهای برشی بتن مسلح با نرم‌افزار مذکور مشاهده شد. ایده‌آل‌سازی‌های مدل‌سازی نیز از جمله دلایل اختلاف نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی نمونه‌ها در شکل ۱۱ و جدول ۶ است. به منظور ساده‌سازی تحلیل، از مدل‌سازی چسب اتصال ورق CFRP به بتن صرف‌نظر شد و اتصال ورق مذکور به سطح بتن‌گیردار در نظر گرفته شد.

## ۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، رفتار اتصال مقاوم‌سازی شده‌ی ستون‌های بتن مسلح دایره‌ی به پی با استفاده از میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP ارزیابی شده است. این ارزیابی از طریق انجام آزمایش با اعمال بار محوری فشاری ثابت و جابه‌جایی جانبی رفت و برگشتی بر ۴ نمونه‌ی اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ی به پی انجام شد. اثر مقدار میلگرد GFRP در تقویت خمشی اتصال و ورق‌های CFRP در محصورشدگی ستون مطالعه شد. سپس نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>[۷]</sup> تحلیل شدند. با توجه به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه‌ی تقویت خمشی و محوری اتصال ستون‌های بتن مسلح دایره‌ی به پی با میلگردهای GFRP و ورق‌های CFRP، این نتایج قابل استناد است:

۱. مقاوم‌سازی اتصال ستون‌های دایره‌ی بتن مسلح به پی با استفاده از میلگردهای GFRP مدفون شده در پوشش بتنی با مقاومت بالا از کماتش و جداشدگی میلگردهای مذکور تحت جابه‌جایی جانبی و بار محوری جلوگیری به عمل می‌آورد و اتصال مقاوم‌سازی شده عملکرد مناسبی خواهد داشت.

۲. تقویت خمشی اتصال ستون بتن مسلح دایره‌ی به پی با ۶ میلگرد GFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر به ترتیب موجب افزایش ۱۰۶٪ و ۱۰۸٪/۳ ظرفیت باربری جانبی شده است. همچنین ترکیب میلگردهای GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر و ورق CFRP، مؤثرترین روش افزایش ظرفیت باربری جانبی بوده است، به طوری که ظرفیت باربری جانبی نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۲۸٪/۳ افزایش یافته است.

۳. سختی اولیه‌ی نمونه‌های تقویت شده با ۶ میلگرد GFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب ۱۴۶٪/۲ و ۱۵۱٪/۳ افزایش یافته است. سختی اولیه‌ی نمونه‌ی تقویت شده با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر و محصور شده با یک لایه ورق CFRP نسبت به نمونه‌ی شاهد، ۱۵۳٪/۹ افزایش یافته است.

۴. بیشترین ظرفیت اتلاف انرژی مربوط به نمونه‌ی تقویت شده با ۶ میلگرد GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر و محصور شده با یک لایه ورق CFRP است. جذب انرژی نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲/۳ برابر شد. همچنین جذب انرژی نمونه‌های تقویت شده با ۶ میلگرد GFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب ۲/۱ و ۲/۲ برابر شده است.

۵. شکل‌پذیری نمونه‌ی تقویت شده با ۶ میلگرد GFRP به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب ۱۶۴٪/۳ و ۱۷۸٪/۶ افزایش یافته است. بنابراین افزایش مقدار تقویت‌کننده‌ی GFRP موجب افزایش شاخص شکل‌پذیری شده است.

۶. ترکیب میلگردهای GFRP به قطر ۱۰ میلی‌متر و ورق CFRP موجب افزایش قابل‌توجه پارامتر شکل‌پذیری شده است. شکل‌پذیری نمونه‌ی مذکور نسبت به نمونه‌ی شاهد ۲۱۴٪/۳ درصد افزایش یافته است.

۷. نمونه‌های آزمایشگاهی با تطابق قابل قبولی در نرم‌افزار آباکوس<sup>[۷]</sup> شبیه‌سازی شدند. تفاوت عمده‌ی نتایج نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در شبیه‌سازی اثر باریک‌شدگی نمودارهای آزمایشگاهی بوده است.

## پانوشته‌ها

1. near surface mounted method (NSM)
2. linear variable displacement transducers (LVDT)
3. pinching
4. concrete damaged plasticity
5. embedded
6. tie

## منابع (References)

1. Tavassoli, A., Liu, J. and Sheikh S. "Glass fiber-reinforced polymer reinforced circular columns under simulated seismic loads", *J. of A.C.I. Struct.*, **112**(1), p. 103-114(2015).

2. Hadi, M.N., Karim, H. and Sheikh, M.N. "Experimental investigations on circular concrete columns reinforced with GFRP bars and helices under different loading conditions", *J. of Compos. Constr.*, **20**(4), 52 p.1-12 (2016).
3. Hasan, H.A., Sheikh, M.N. and Hadi, M.N. "Performance evaluation of high strength concrete and steel fibre high strength concrete columns reinforced with GFRP bars and helices", *J. of Constr. Build. Mater.*, **134**, pp. 297-310 (2017).
4. Hadhood, A., Mohamed, H.M., Ghrib, F. and et al. "Efficiency of glass-fiber reinforced-polymer (GFRP) discrete hoops and bars in concrete columns under combined axial and flexural loads", *J. of Compos. Part-B. Eng.*, **114**, pp. 223-236 (2017).
5. Esfahani, M.R. and Kianoush, M.R. "Axial compressive strength of reinforced concrete columns wrapped with



- fiber reinforced polymers (FRP)", *Int. J. of Eng.*, **18**(1), pp. 73-83 (2004).
6. Taghia, P. and Bakar, S.A. "Mechanical behaviour of confined reinforced concrete-CFRP short column-based on finite element analysis", *J. of World. Appl. Sci.*, **24**(7), pp. 960-970 (2013).
7. Standard ABAQUS, Version 6.14-2, SIMULIA, Inc., Providence, RI (2015).
8. Sena-Cruz, J., Barros, J., Bianco, V. NSM systems in design procedures for the use of composites in strengthening of reinforced concrete structures", Springer, Dordrecht, pp. 303-348 (2016).
9. Perrone, M., Barros, J.A., Aprile, A. CFRP-based strengthening technique to increase the flexural and energy dissipation capacities of RC columns", *J. of Compos. Constr.*, **13**(5), pp. 372-383 (2009).
10. Sarafraz, M. and Danesh, N. "Experimental study on flexural strengthening of RC columns with near surface mounted FRP bars", *JSEE.*, **12**(1-2), pp.39-50 (2010).
11. Vosooghi, A. "Post-earthquake evaluation and emergency repair of damaged RC bridge columns using CFRP materials", University of Nevada, Reno. (2010).
12. ACI A. 440.3R-04. Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structure, ACI, Farmington Hills, Michigan. (2004).
13. Grassl, P., and Jirasek, M. "Damage-plastic model for concrete failure", *Int. J. of Solids Struct.*, **43**(22-23), pp. 7166-7196 (2006).
14. Ali, A., Kim, D. and Cho, S.G. "Modeling of nonlinear cyclic load behavior of I-shaped composite steel-concrete shear walls of nuclear power plants", *J. of NET.*, **45**(1), pp. 89-98 (2013).
15. Wan, S., Loh, C.H. and Peng, S.Y. "Experimental and theoretical study on softening and pinching effects of bridge column", *J. of Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, **21**(1), pp. 75-81 (2001).
16. Mousavi, S.A., Zahrai, S.M. and Bahrami-Rad, A. "Quasi-static cyclic tests on super-lightweight EPS concrete shear walls", *J. of Eng. Struct.*, **65**, pp. 62-75 (2014).