

بررسی اثر دورپیچ GFRP به صورت نوارهای مجزا در رفتار ستون- های بتن آرمه

بیژن اجتماعی^۱، محمدرضا توکلی زاده^{۲*}، امیرصمد قدس^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات خراسان رضوی، گروه عمران، نیشابور، ایران

۲- دانشگاه فردوسی، گروه عمران، مشهد، ایران

۳- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد، گروه عمران، مشهد، ایران

drt@um.ac.ir

b_ejtemaei@yahoo.com

چکیده:

یکی از موثرترین روش‌ها در بهبود عملکرد سازه‌های بتن آرمه، مقاوم‌سازی ستون‌ها با روش محصور کردن به وسیله پلیمرهای مسلح شده با الیاف FRP می‌باشد. علیرغم مزایای خوب FRP در مقاوم‌سازی ستون‌ها، خلاهای ایجاد شده و جدایشی بوجود آمده بین FRP و بتن، به خاطر ضعف مهارتی در نصب، باعث کاهش کارایی سازه‌های آنها، برخلاف انتظار خواهد شد. به منظور کاهش این جدایشی و سهولت نصب، نوارهای FRP بصورت مجزا پیشنهاد شده است. با توجه به کمبود مطالعات عددی در زمینه تاثیر ورق‌های مجزای FRP بر منحنی تنش-کرنش ستون‌های با ابعاد واقعی، در این جا سعی بر جبران خلاهای موجود شده است. در این مقاله ۲۱ عدد ستون بتن آرمه استوانه‌ای و دورپیچ شده با نوارهای GFRP، تحت بارگذاری مستقیم فشاری در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus مدل شده است. ستون‌ها با متغیرهایی شامل عرض، فاصله و تعداد لایه ورق‌های GFRP، طراحی و مدل شدند و تاثیر این متغیرها، بر روی منحنی تنش-کرنش ستون بررسی شد. پس از تحلیل مدل‌ها و ترسیم منحنی‌های ظرفیت و تفسیر هر کدام از آنها، بر اساس نتایج، محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ GFRP، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری است. پیکربندی دورپیچ تأثیری قابل ملاحظه روی اثربخشی دورپیچ GFRP دارد، طوری که در مدل‌هایی که تمام ارتفاع ستون با کامپوزیت محصور شده است، ظرفیت باربری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما در مورد اعضای با دورپیچ مجزا در قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کمی حاصل شده است، در نتیجه افزایش مقاومت و ظرفیت باربری با در نظر گیری ملاحظات اقتصادی، در این گونه ستون‌ها، جهت مقایسه با ستون‌های با دورپیچ کامل، رابطه مستقیم با چیدمان منطقی الیاف و تعداد لایه‌های الیاف خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ستون بتن آرمه، دورپیچ مجزای GFRP، محصور شدگی، مدل سازی اجزای محدود، شکل‌پذیری

۱. مقدمه

بسیاری از سازه‌های بتن‌آرمه در ایران و سایر نقاط دنیا، عمری بیش از چند دهه دارند و به خاطر حوادث طبیعی از قبیل زلزله و باد یا بر اثر خستگی مصالح و یا عوامل خوردنده، آسیب دیده‌اند. از آن‌جا که این سازه‌ها عموماً اهمیت زیادی داشته و تعداد آن‌ها نیز فراوان است، جایگزین کردن آن‌ها با سازه‌های جدید، اکثراً فاقد توجیه اقتصادی بوده و از نظر اجرایی غیرعملی می‌باشد؛ در حالی که تعمیر و تقویت آن‌ها در بیشتر موارد امری ضروری و مقرون به صرفه می‌باشد.

امروزه نگهداری از سازه‌ها به دلیل هزینه ساخت و تعمیر بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مطالعه سازه‌های بتنی نشان می‌دهد، با توجه به عوامل متعددی مانند: برخی از بارهای استثنایی (از قبیل ضربه، انفجار، یا بارهای لرزه‌ای)، افزایش بار و تغییر در تقاضای ظرفیت بار به دلیل خطای طراحی یا ساخت، افزایش کاربری یا یک تغییر کاربری سازه‌ای، تغییر در آیین‌نامه‌های طراحی، و نارسایی‌های ناشی از فرسایش سازه (خوردگی میلگرد و واکنش قلیایی سنگدانه)، نیاز به تقویت و تعمیر اعضای آن‌ها، احساس می‌شود.

ستون‌ها، در ساختمان‌های بتن مسلح، اهمیت بسزایی دارند، زیرا که مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی این اعضا در عملکرد سازه بسیار مهم هستند [۱]. پارامترهای بسیاری از قبیل: کلاس مقاومتی بتن، میزان فولاد طولی و عرضی، حالات مختلف پیکربندی میلگردهای عرضی و فاصله آن‌ها در خصوصیات رفتاری ستون‌ها موثرند؛ با این وجود پدیده محصورشدگی تأثیر بسزایی در افزایش ظرفیت باربری و شکل‌پذیری ستون‌ها، ممانعت از کمانش موضعی میلگردهای طولی، خرابی زودرس پوشش بتن و همچنین بالا بردن ظرفیت برشی ستون، دارا می‌باشد [۲]. با تأمین فشار محصورکنندگی جانبی، بتن در معرض یک وضعیت سه محوره تنش قرار می‌گیرد، بنابراین مقاومت فشاری و شکل‌پذیری افزایش می‌یابد. در ستون‌های بتن‌آرمه، عمل محصورشدگی جانبی توسط تنگ‌های بسته و خاموت، نتیجه می‌شود.

تقویت خارجی ستون‌های بتن‌آرمه جهت افزایش پدیده محصورشدگی، در گذشته با قرار دادن ژاکت فولادی و غلاف بتنی در اطراف ستون انجام می‌گرفت، که در دهه‌های اخیر جای خود را به دورپیچ‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف در محیط رزین پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف (FRP) Fiber Reinforced Polymers داده است [۳].

سیستم FRP بدین صورت تعریف می‌شود که الیاف و رزین‌ها برای ساخت چند لایه مرکب مورد استفاده قرار می‌گیرند، به نحوی که رزین‌های مصرفی به منظور چسباندن چند لایه مرکب به سطح بتن زیرین و پوشش‌ها به منظور محافظت مصالح ترکیب شده، استفاده می‌شوند [۴].

استفاده از دورپیچ FRP در تقویت ستون نه تنها به دلیل سهولت نصب، زیبایی و انعطاف پذیری، بلکه به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا و مقاومت در برابر خوردگی بسیار مورد توجه واقع شد. این سیستم‌ها همچنین می‌توانند در سطوحی با دسترسی‌های محدود یا جاهایی که اجرای شیوه‌های متعارف با مشکلاتی مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرند.

طراحی ایمن و اقتصادی فقط در صورت درک صحیح و مدل‌سازی دقیق بتن محصور در FRP امکان دارد [۴]. جهت ایجاد محصورشدگی در ستون‌های بتن‌آرمه، بیشتر مطالعات و کارهای اجرایی مقاوم‌سازی به دورپیچ کامل ستون‌ها توجه داشته و پرداخته‌اند، و به دورپیچ با نوارهای فاصله‌دار یا مجزای FRP توجه کمی شده‌است، علیرغم آن‌که ممکن است این روش یک روش طراحی کارآمد و اقتصادی باشد، با ملاحظه این‌که یک نسبت حجمی مکانیکی برای میلگردهای عرضی موجود، در ستون‌ها وجود دارد [۵]. از طرفی نیز در ایجاد شرایط محصورشدگی در ستون، شرایط چسبندگی بین FRP و بتن خیلی مهم است، طوری که اساساً به مهارت نصب بستگی دارد. شرایط چسباندن ناقص، مخصوصاً وجود فضاها و حباب‌های هوای بزرگ، می‌تواند بی‌عیبی و امنیت سازه را کاهش دهد، علیرغم آن‌چه و برخلاف آن‌چه که از مقاوم‌سازی موردنیاز است.

در این بررسی علمی، به منظور ایجاد حداقل حباب‌های هوا، نصب آسان و همچنین با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی، مولف کارگیری نوارهای مجزای FRP، شبیه به خاموت‌های عرضی را پیشنهاد می‌دهد. این روش پیشنهادی، آزادسازی همه هواهای به دام‌افتاده را آسان کرده و اطمینان می‌دهد که نوارهای FRP، به صورت کامل به بتن چسبیده‌اند.

این پژوهش اساساً روی کارهای تحلیلی و آزمایشگاهی وابسته به ستون‌های بزرگ‌مقیاس بارگذاری شده به صورت محوری، و محصورشده با دورپیچ‌های تقویتی خارجی FRP تمرکز می‌کند. طراحی سازه‌های بتنی از جهت بهینه‌سازی و دقیق نمودن محاسبات، به روش‌هایی توانمند نیاز دارد. بهترین روش برای توصیف رفتار، مطمئناً انجام آزمایش بر روی سازه‌های حقیقی می‌باشد، اما متأسفانه اغلب آزمایش‌ها هزینه‌بر و بعضاً غیرقابل اجرا می‌باشند. روش دیگر در این بررسی، روش اجزای محدود Finite Element Method: FEM است. با توجه به اهداف تحقیق، در این مطالعه علمی برای مدل‌سازی رفتار ستون‌های بتنی تقویت شده، از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود Abaqus استفاده شده و در پایان، دقت روابط پیشنهادی محققین، برای پیش‌بینی مقاومت نهایی بتن محصور در FRP را با نتایج مدل‌سازی مقایسه می‌کند. در این بررسی، مدل پلاستیسیته آسیب بتن برای مدل نمودن ستون‌های بتن‌آرمه مورد استفاده قرار گرفته است؛ در این راستا مدل اجزای محدود ستون موردنظر با نتایج آزمایشگاهی کالیبره گردید. پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی، با تغییر در پارامترهای موردنظر از قبیل تأثیر ضخامت، پهنا و فاصله نوارهای FRP،

برای هر نمونه منحنی تنش-کرنش استخراج گردیده و به بررسی مشخصات FRP استفاده شده بر شکل پذیری ستون بتن آرمه پرداخته شد.

۲. گذری بر پژوهش‌های پیشین

ماتیس و همکاران [۶]، اقدام به بررسی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی ستون‌های بزرگ مقیاس با ارتفاع ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر، مقدار میلگرد طولی ۰/۹٪ و خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر، محصورشده با دورپیچ FRP تحت بار مستقیم فشاری نمودند. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقاومت نهایی بتن محصور شده با FRP بازبینی شد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ FRP، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل پذیری است؛ با این وجود پیکربندی دورپیچ، تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی اثربخشی دورپیچ FRP دارد. در مورد اعضای با دورپیچ مجزا قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کمی (افزایش ۱۰ درصدی) نمایش داده بود. به خاطر چندین عامل تأثیرگذار، از جمله گسیختگی نزدیک تمرکز تنش‌های موضعی، یک کرنش متوسط گسیختگی FRP کاهش یافته، برای نمونه‌های دورپیچ شده، یافته و پی برده شد. برای مدل‌سازی این وضعیت یک ضریب کاهش با عنوان ضریب کرنش موثر FRP معرفی شده بود، که برابر ۰/۶ است.

فریرا و باروس [۷]، برای دستیابی به میزان تاثیر دورپیچ مجزای FRP، ۱۰۸ نمونه ستون بتن آرمه استوانه‌ای با ارتفاع ۶۰۰ و قطر ۲۰۰ میلی‌متر را با آرایش‌های متفاوت CFRP محصور کرده و تحت بار محوری آزمایش کردند. متغیرها عبارت بود از: سختی ورق CFRP، فاصله بین نوارهای مجزای CFRP، عرض و تعداد لایه‌های CFRP، مقاومت بتن و میزان تسلیح داخلی. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، بین افزایش نسبت حجمی الیاف و مقاومت، یک روند خطی مشاهده گردید. برای ستون‌های دورپیچ شده با الیاف مجزا، همراه با افزایش نسبت حجمی الیاف، میزان کرنش محوری نهایی بتن بصورت خطی افزایش یافت. عموماً برای نمونه‌های دارای حجم الیاف معادل، ظرفیت تحمل بار برای نمونه‌های با دورپیچ مجزا کمی کمتر از نمونه‌های با دورپیچ کامل است؛ هرچند که کاربرد الیاف در نمونه‌های با دورپیچ مجزا، سریع‌تر و راحت‌تر است. با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بدست آمده، مدل محصورشدگی پیشنهاد شده توسط لم و تنگ در سال ۲۰۰۳، برای ستون‌های با دورپیچ مجزای FRP، کاربردی و مفید ارزیابی و پیشنهاد گردید.

آچیلو پولو و همکاران [۸]، سعی در معرفی عملکرد مدل‌های تنش کرنش موجود که برای محصورشدگی ستون‌های بتن آرمه با دورپیچ مجزای GFRP تحت بار یکنواخت فشاری بکار رفته‌اند، دارند. چهار مدل تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی حاصله از یک تحقیق مربوط به ۱۶ عدد ستون بتن آرمه مربعی با ارتفاع ۷۵۰ و بعد ۱۵۰ میلی‌متر که با الیاف شیشه بصورت مجزا محصور شده‌اند، مقایسه شده‌اند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، محصورشدگی بصورت مجزا توسط GFRP می‌تواند بصورت قابل ملاحظه-ای مقاومت و شکل پذیری ستون‌های بتن آرمه را افزایش دهد. تاثیر دورپیچ مجزا در مورد ستون‌ها با تسلیح داخلی بیشتر است. از بین چهار مدل بررسی شده جهت پیش‌بینی رفتار تنش-کرنش، مدل باروس و فریرا ۲۰۰۸ پیش‌بینی نسبتاً خوبی از رفتار تنش کرنش ستون‌های بتن آرمه محصور در FRP بصورت مجزا فراهم می‌کند.

پارک و همکاران [۹]، با یک تحقیق آزمایشگاهی سعی در بررسی تاثیر اعمال نوارهای مجزا مارپیچی CFRP داشتند. ۶۰ استوانه بتنی (با ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر) با فواصل مختلف نوارهای مجزا از هم، عرض‌ها، تعداد لایه‌ها و سطوح مقطع متفاوت ورقه‌های CFRP، تحت بار فشاری تست شدند. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، استفاده از نوارهای مجزای CFRP برای محصورکردن بتن، روشی موثر برای بهبود مقاومت و شکل پذیری است.

تاثیر محصورشدگی روی افزایش مقاومت فشاری با تعداد لایه‌های CFRP رابطه خطی نداشته و حتی اگر تعداد لایه‌ها دو برابر شود، مقاومت نهایتاً ۱/۵۴ افزایش می‌یابد.

چارالامبیدی و همکاران [۵]، روی پروژه‌های تحلیلی و با تمرکز بر روی مدل‌سازی اجزای محدود ۱۲ عدد ستون بتن آرمه مربعی کم مقاومت (با ارتفاع ۷۵۰ و بعد ۱۵۰ میلی‌متر) محصور شده با GFRP مجزا کار کردند. از مدل خرابی دراکر پراگر برای بتن در نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus استفاده گردید. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد، تنش پارگی FRP در میانه وجه ستون و ارتفاع آن واقع شده است. وجود میلگردهای طولی و عرضی باعث استفاده بیشتری از ظرفیت تنش کششی FRP می‌شود.

سعادت‌منش و همکاران [۱۰]، تکنیکی جدید برای مقاوم‌سازی لرزه‌ای ستون‌های بتن آرمه معرفی کردند. این تکنیک از نوارهای کامپوزیتی مقاومت بالا به صورت دورپیچ مجزا در اطراف ستون، برای بهبود محصورشدگی و در نتیجه شکل پذیری و مقاومت استفاده کرده است و مدل‌های تحلیلی در این خصوص معرفی شده‌اند. یک مطالعه پارامتریک برای امتحان تاثیرات پارامترهای متغیر طراحی از قبیل مقاومت فشاری بتن، ضخامت و فاصله نوارهای FRP و نوع نوارها انجام شد. نتایج نشان داد که اگرچه GFRP در محل پارگی، تغییر طول بیشتری نسبت به CFRP دارد، الیاف کربن ظرفیت بیشتری در خصوص جذب انرژی دارند.

با افزایش مقاومت فشاری بتن، نرخ افزایش بار محوری نهایی، شکل‌پذیری و ماژریمم ظرفیت خمشی کاهش می‌یابد. فاکتور شکل‌پذیری بصورت خطی با افزایش ضخامت نوارها، زیاد و با افزایش فاصله نوارها کم می‌شود.

۳. مدل‌سازی اجزای محدود

در این پژوهش، رفتار فشاری بتن محصورشده با FRP و تاثیر تغییر عرض، فاصله، تعداد لایه‌ها، سطح مقطع ورق‌های FRP، بر روی آن بررسی می‌شود. در اینجا برای رسیدن به نتایج واقعی و معتبر، بر خلاف بسیاری از مقالات که از استوانه‌های بتنی غیر مسلح کوچک مقیاس استاندارد با قطر ۱۵۲ و ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر استفاده کرده‌اند، از ستون‌های بتن‌آرمه بزرگ‌مقیاس با ارتفاع ۲ متر و قطر ۴۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. این استوانه‌ها، به صورت کامل و مجزا با مصالح FRP دورپیچ و محصور شده‌اند. بتن و FRP به صورت ماده‌ای که قابلیت تغییر شکل پیدا کردن دارد، تعریف می‌شوند. همچنین دوسر ابتدا و انتها، جهت اعمال بارگذاری به صورت یکنواخت، بصورت کاملاً صلب تعریف شدند. با توجه به هندسه مدل، دستگاه مختصات استوانه‌ای تعریف و به بتن و دورپیچ FRP اختصاص داده شد. در محل تکیه‌گاه استوانه بتنی و نیز در وجه بالایی آن، شرایط مرزی به صورت گیردار کامل تعریف شده و بنابراین، کلیه درجات آزادی دورانی و انتقالی در پایین و بالای استوانه بسته خواهند بود، به جز درجه آزادی انتقالی در راستای محور طولی در بالای استوانه، که از آن جهت اعمال بار به صورت یک تغییر مکان یکنواخت استفاده می‌شود. برای مش‌بندی بتن، از المان C3D8R استفاده می‌شود. در مش‌بندی دورپیچ FRP، المان S4R به کار می‌رود و از گونه پوسته‌ای می‌باشد. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن ستون، ابعاد مش‌بندی نیز پس از انجام تحلیل حساسیت، برای بتن ۵۰ میلی‌متر و برای دورپیچ FRP، ۲۵ میلی‌متر برای ستون‌های با دورپیچ مجزا و برای بتن ۵۰ میلی‌متر و برای دورپیچ FRP، ۵۰ میلی‌متر برای ستون‌های با دورپیچ کامل انتخاب شده است. جهت استخراج تنش محوری، واکنش تکیه‌گاهی محوری بر مساحت استوانه بتنی تقسیم می‌شود. کرنش محوری، از تقسیم جابجایی محوری دو نقطه اختیاری بر روی سطح خارجی استوانه بتنی، بر فاصله آنها به دست می‌آید. کرنش جانبی نیز از تقسیم جابجایی شعاعی یک نقطه در میان ارتفاع و روی سطح خارجی دورپیچ FRP، بر شعاع آن حاصل می‌گردد. که در اینجا با توجه به استوانه‌ای بودن مختصات، جابجایی در جهت ۱ متفاوت از جابجایی آن نقطه در جهت ۲ می‌باشد؛ لذا لازم است جابجایی‌های بدست‌آمده در امتداد ۱ و ۲ در این نقطه، به توان ۲ رسیده، و در زیر رادیکال به قوه ۲ با هم جمع گردد و عدد حاصله تقسیم بر شعاع که همان ۰/۲ متر است، گردد تا کرنش پیرامونی یا جانبی نیز بدست آید.

دورپیچ FRP با استفاده از ثابت‌های مهندسی آن و به صورت یک ماده ارتوتروپ که دارای مشخصات متفاوت در سه راستای عمود بر هم مشترک است، مدل‌سازی شد. باید دانست، در شرایط تنش صفحه‌ای، مانند شرایط حاکم در یک المان پوسته‌ای، تنها مقدارهای E1, E2, v12, G12, G13, G23 برای تعریف رفتار یک ماده ارتوتروپ مانند FRP مورد نیاز هستند. همچنین، گسیختگی استوانه‌های بتنی محصورشده با FRP، با پارگی FRP کنترل می‌شود. به سخن دیگر، از معیار گسیختگی کرنش محیطی (حلقوی) بیشینه FRP استفاده می‌گردد. در هنگام مدل‌سازی به منظور صحت‌سنجی اعتبار آن، مقدار این کرنش بیشینه از نتایج آزمایشگاهی موجود که برای صحت‌سنجی استفاده می‌شوند، به دست می‌آید.

برای تعریف رفتار غیرخطی بتن محصورشده با FRP، از مدل رفتاری ترکیبی پلاستیک - خسارت بتن Concrete Damage Plasticity، که پیچیده‌ترین و پرکاربردترین مدل رفتاری می‌باشد، استفاده شد. به منظور مدل‌سازی بر اساس مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن در Abaqus، پنج پارامتر اصلی زاویه اتساع، خروج از مرکزیت، نسبت مقاومت فشاری دو محوره به یک محوره، نسبت مقاومت برشی بین دو حالت فشار دو محوره به سه محوره، ویسکوزیته مورد نیاز هستند. همچنین، منحنی تنش-کرنش کششی و منحنی تنش-کرنش فشاری به منظور تعریف سخت‌شدگی مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن، باید محاسبه و در نرم‌افزار وارد شوند. بسته به نوع مساله، طریقه یافتن این پارامترها متفاوت خواهد بود. در این پژوهش، نسبت پواسن بتن برابر

$$0.15 \text{ و مدول الاستیسیته آن، } E_c \text{ نیز برابر } \sqrt{f'_{c0}} \text{ فرض گردید.}$$

در محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت مدل‌سازی رفتار پلاستیک بتن، به مقدار کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصورشده، ϵ'_c ، نیاز می‌باشد. چنانچه مقدار این پارامتر موجود نباشد، بر اساس رابطه $0.000937^4 \sqrt{f'_c}$ محاسبه می‌شود [۱۱].

پارامترهای لازم برای تعریف رفتار بتن در این مدل به شرح زیر می‌باشد:

زاویه اتساع برای قسمت پوشش بتن ۳۵ درجه انتخاب شد. میزان زاویه اتساع برای بتن‌های محصور در میلگرد عرضی، کمتر از بتن‌های غیرمحصور می‌باشد. در این تحقیق مقدار مربوطه برابر ۲۱ درجه در نظر گرفته می‌شود. خروج از مرکزیت برابر ۰/۱، نسبت مقاومت فشاری دو محوری به یک محوره برابر ۱/۱۶، نسبت مقاومت برشی بین دو حالت فشار دو محوره به سه محوره مساوی ۰/۶۶ و ویسکوزیته برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته می‌شود [۱۲].

در ادامه برای تعریف منحنی رفتار تک محوره بتن غیر محصور می‌توان از نتایج آزمایشگاهی استفاده نمود یا اینکه از مدل‌های رفتاری موجود در این زمینه مانند مدل هاگنستاد بهره برد [۱۳]. در این پژوهش از یکی از مشهورترین مدل‌های رفتاری بتن غیر محصور یعنی مدل کنت و پارک استفاده می‌گردد. رابطه این مدل بصورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_c = f'_{co} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در این رابطه σ_c و ϵ_c به ترتیب تنش و کرنش فشاری، f'_{co} و ϵ'_c به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیر محصور و کرنش متناظر با آن می‌باشد. مدل کنت و پارک اساساً برای بتن‌های محصور شده توسط میلگرد عرضی می‌باشد، اما چون این مدل افزایش مقاومتی را برای بتن ناشی از محصورشدگی در نظر نمی‌گیرد، استفاده از آن برای مدل سازی بتن‌های محصور در میلگرد عرضی، به میزان قابل ملاحظه‌ای محافظه‌کارانه خواهد بود. در این‌جا، از این مدل برای تعریف رفتار بتن پوشش که محصور در میلگرد عرضی نیست، استفاده شد.

میرمیران و شهاوی در سال ۱۹۹۶، اسپولترا و مونتی در سال ۱۹۹۹، فام و ریز کالا در سال ۲۰۰۱ و چان و پارک در سال ۲۰۰۲، در مطالعات خود، مدل ارائه شده توسط ماندر [۱۴] در سال ۱۹۸۸ را برای بتن محصور در میلگرد عرضی به‌عنوان مدل بتن تحت فشار محصورشدگی فعال پذیرفتند. طبق روابط ۲ و ۳، با فرض رفتار الاستوپلاستیک برای فولاد بعد از تسلیم شدن، رفتار بتن محصور در آن، تقریباً همانند رفتار بتن تحت فشار محصورشدگی فعال در نظر گرفته می‌شود. این محققان معادله تنش-کرنش محوری که برای اولین بار توسط پوپویچ در سال ۱۹۷۳، ارائه و توسط ماندر برای بتن محصور در میلگرد عرضی پذیرفته شد را استفاده کردند.

$$\frac{\sigma_c}{f'_{cc}} = \frac{r(\epsilon_c/\epsilon_{cc})}{r-1+(\epsilon_c/\epsilon_{cc})r} \quad (2)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - (f'_{cc}/\epsilon_{cc})} \quad (3)$$

در این معادلات، f'_{cc} مقاومت فشاری بتن محصور شده و ϵ_{cc} ، کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور شده و E_c مدول الاستیسیته بتن غیر محصور هستند.

همچنین برای به‌دست‌آوردن مقاومت فشاری بتن محصور از رابطه ۴، پیشنهاد شده توسط ماندر استفاده کردند.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_l}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_l}{f'_{co}} \right) \quad (4)$$

کرنش محوری حداکثر در تنش محوری حداکثر نیز از رابطه ۵، پیشنهاد شده توسط ریچارت در سال ۱۹۲۹، به‌دست می‌آید.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (5)$$

رفتار تنش کرنش بتن محصور شده با FRP بر اساس مدل تحلیلی تنگ و همکاران [۱۵] در نظر گرفته می‌شود. در این مدل، فشار محصورکنندگی تامین شده توسط FRP به صورت رابطه ۶ داده می‌شود:

$$\sigma_l = \frac{E_{frp} t_{frp} \epsilon_h}{R} \quad (6)$$

که در آن E_{frp} مدول الاستیسیته FRP در راستای محیطی، t_{frp} ضخامت دورپیچ FRP، R شعاع هسته بتنی محصور شده و ϵ_h برابر با $-\epsilon_l$ ، که ϵ_l کرنش جانبی بتن است. معادله کرنش پیشنهادی این مدل به قرار زیر است:

$$\phi \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) = \frac{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}}}{1 + 8 \frac{\sigma_l}{f'_{co}}} = 0.85 \left\{ \left[1 + 0.75 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) \right]^{0.7} - \exp \left[-7 \left(\frac{-\epsilon_l}{\epsilon_{co}} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

در این معادله، f'_{co} مقاومت فشاری بتن محصور نشده و ϵ_{co} ، کرنش محوری متناظر با مقاومت فشاری بتن محصور نشده هستند. منحنی تنش-کرنش نیز بر اساس رابطه‌های زیر تولید می‌شود:

$$\frac{\sigma_c}{f'_{cc}^*} = \frac{\left(\frac{\epsilon_l}{\epsilon_{cc}^*} \right) r}{r-1+\left(\frac{\epsilon_l}{\epsilon_{cc}^*} \right) r} \quad (8)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - f'_{cc}^*/\epsilon_{cc}^*} \quad (9)$$

$$\frac{f'_{cc}^*}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \frac{\sigma_l}{f'_{co}} \quad (10)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}^*}{\varepsilon_{co}^*} = 1 + 17.5 \frac{\sigma_L}{f_{co}^*} \quad (11)$$

۴. نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی

ستون‌ها طول ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر، مقدار میلگرد طولی ۱٪ و خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر دارند [۶]. جداول ۱ و ۲، به ترتیب مشخصه‌های مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش و پارامترهای آزمایشگاهی ستون‌های دورپیچ شده را نشان می‌دهند [۶].

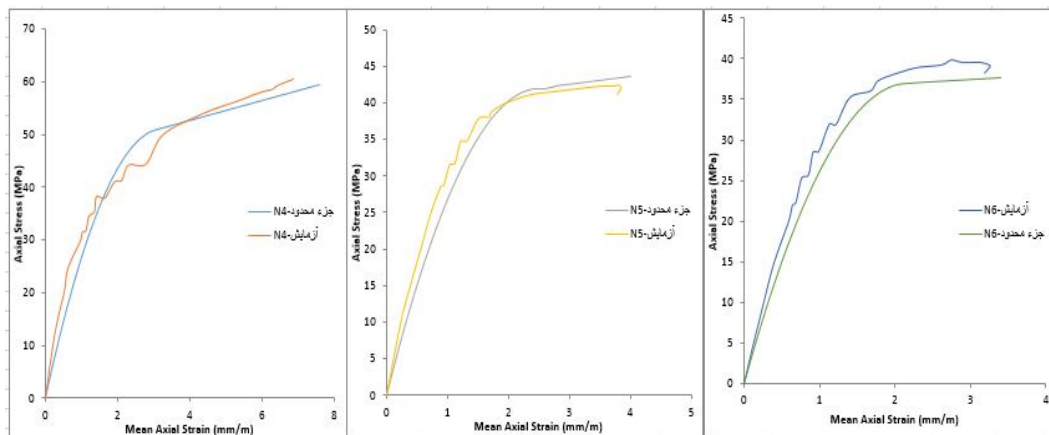
جدول ۱- مشخصه‌های مکانیکی به دست آمده از آزمایش کشش [۶]

نوع	ابعاد اسمی (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی، %	مدول الاستیسیته (MPa)
میلگرد شماره ۸	۸	۵۶۰	۶۱۰	۲.۷۷	۲۰۰۰۰۰
میلگرد شماره ۱۲	۱۲	۶۲۰	۷۲۰	۸.۷۳	۲۰۰۰۰۰
GFRP	200 x 0.300	-----	۷۸۰	۱.۳	۶۰۰۰۰

جدول ۲- پارامترهای آزمایشگاهی ستون‌های دورپیچ شده [۶]

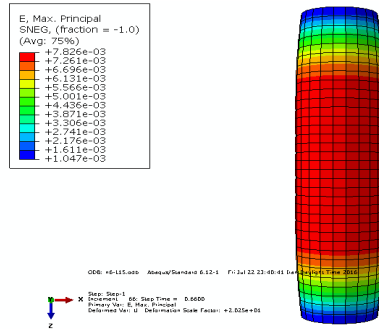
نوع دورپیچ	فاصله خالص بین الیاف (mm)	عرض الیاف (mm)	تعداد لایه‌ها	نوع FRP	مقاومت مشخصه بتن (MPa)	قطر ستون (mm)	نمونه‌ها
کامل	۰	۲۰۰	۶	GFRP	۳۹.۳	۴۰۰	N4
کامل	۰	۲۰۰	۲	GFRP	۳۹.۳	۴۰۰	N5
مجزا	۲۰۰	۲۰۰	۴	GFRP	۳۵.۸	۴۰۰	N6

نمودارهای تنش-کرنش محوری حاصل از نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی ذکر شده، در شکل ۱ دیده می‌شوند. بنابراین، مدل‌سازی اجزای محدود بر اساس مدل پلاستیسیته آسیب بتن از دقت قابل قبولی برخوردار بوده و می‌تواند برای مطالعات پارامتریک به کار رود.



شکل ۱- نتایج صحت‌سنجی مدل‌سازی با نمونه‌های آزمایشگاهی موجود در مرجع [۶]

شکل ۲. توزیع کرنش‌های جانبی در GFRP نشان می‌دهد، که بیشترین کرنش جانبی در میانه ارتفاع لایه GFRP اتفاق می‌افتد، بنابراین شکست ستون با پارگی GFRP در ارتفاع میانی همراه است.



شکل ۲- توزیع کرنش جانبی در ارتفاع FRP

۵. مطالعه پارامتری

در این پژوهش، تاثیر فاصله الیاف مجزا بر رفتار فشاری بتن محصور شده با GFRP بررسی شد. به منظور بررسی تاثیر این عامل، نمونه ستون بتن مسلح با مقاومت‌های فشاری اولیه ۲۵ مگاپاسکال، طول ۲ متر، قطر ۴۰۰ میلی‌متر، مقدار میلگرد طولی ۱٪، خاموت‌های ۸ میلی‌متر و فاصله ۱۴۰ میلی‌متر و بر اساس توضیحات بخش ۳. در نرم‌افزار مدل‌سازی شد. مشخصات مهندسی دورپیچ GFRP به کار رفته به ضخامت ۰/۳ میلیمتر که از دو تا ۴ لایه استفاده شده‌اند، در جدول ۳ آورده شده‌اند. در این جدول، ϵ_{frp} کرنش کششی نهایی اسمی الیاف است.

در جدول ۴. نامگذاری نمونه‌ها بر اساس نوع دورپیچ که می‌تواند، کامل یا مجزا باشد، تعداد لایه‌ها، عرض لایه‌ها و فاصله خالص بین لایه‌های GFRP که مشخص کننده درصد پوشش الیاف روی سطح پیرامونی ستون است، انجام شده است. در این جدول نمونه‌ها دارای یک نام کوتاه و یک نام اصلی هستند که مشخصات آنها را نشان می‌دهد. عدد بعد از N نشان دهنده تعداد لایه FRP، عدد بعد از W معرف عرض الیاف و عدد بعد از P معرف درصد پوششی الیاف هستند.

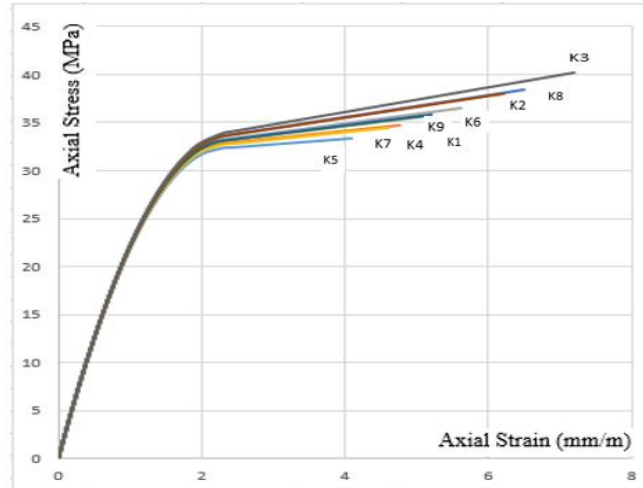
جدول ۳- مشخصات مهندسی مصالح GFRP به کار رفته در مطالعه پارامتری

E1(GPa)	E2(GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	G_{13} (GPa)	G_{23} (GPa)	ϵ_{frp}
60	20	0.25	10	10	3.846	0.013

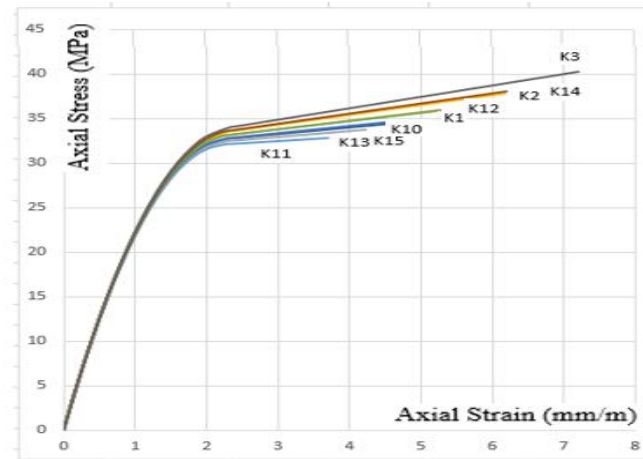
جدول ۴- نامگذاری نمونه‌ها جهت مطالعه پارامتری

نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی	نام کوتاه	نام اصلی
K0	N0W0P0	K4	N2W50P75	K10	N2W100P75	K16	N2W200P75
K1	N2W200P100	K5	N2W50P50	K11	N2W100P50	K17	N2W200P50
K2	N3W200P100	K6	N3W50P75	K12	N3W100P75	K18	N3W200P75
K3	N4W200P100	K7	N3W50P50	K13	N3W100P50	K19	N3W200P50
		K8	N4W50P75	K14	N4W100P75	K20	N4W200P75
		K9	N4W50P50	K15	N4W100P50	K21	N4W200P50

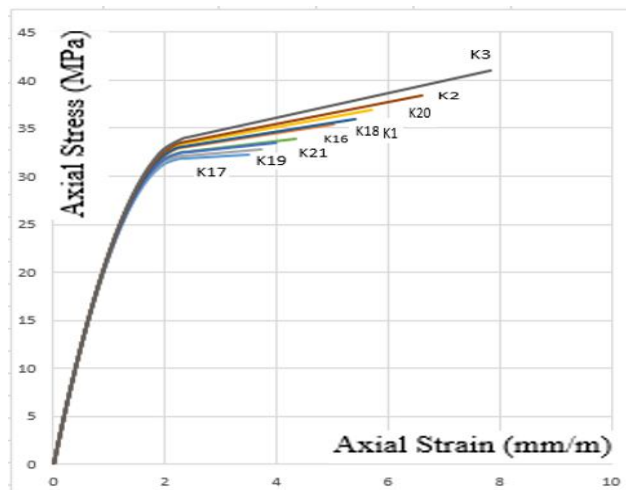
شکل‌های ۳، ۴ و ۵ منحنی‌های تنش محوری-کرنش محوری نمونه‌های مدل‌سازی شده را نشان می‌دهند. نتایج برداشت شده از نمودارهای تنش-کرنش ستون‌ها، شامل مقاومت فشاری نهایی، شکل‌پذیری و فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی GFRP، در جدول ۶ نشان داده شده است. کرنش‌های ذکر شده، برابر مقادیر متوسط اندازه‌گیری‌های کرنش در ارتفاع یک متر و ۲۰۰ میلی‌متری میانه ارتفاع ستون‌ها هستند. در جدول ۵، ϵ_{ccu} ، کرنش فشاری محوری نهایی بتن محصور شده متناظر با نقطه گسیختگی عضو، ϵ'_c ، کرنش ماگزیمم بتن غیر محصور، که در اینجا برابر ۰/۰۰۲ است، ϵ_{fu} ، کرنش گسیختگی طراحی GFRP بر اساس آزمایش کششی مستقیم، ϵ_{fe} ، کرنش موثر GFRP بدست آمده در هنگام گسیختگی، k_ϵ ، فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی GFRP، f'_{co} ، مقاومت فشاری مشخصه بتن غیر محصور، f'_{c1} ، مقاومت فشاری بتن‌آرمه غیر محصور (بتن و میلگرد طولی و عرضی)، f'_{cc} ، مقاومت فشاری بتن‌آرمه محصور شده می‌باشد.



شکل ۳- نمودارهای تنش- کرنش محوری برای ستون با دورپیچ کامل و نمونه‌های با دورپیچ مجزای ۵۰ میلی‌متری



شکل ۴- نمودارهای تنش- کرنش محوری برای ستون با دورپیچ کامل و نمونه‌های با دورپیچ مجزای ۱۰۰ میلی‌متری



شکل ۵- نمودارهای تنش- کرنش محوری برای ستون با دورپیچ کامل و نمونه‌های با دورپیچ مجزای ۲۰۰ میلی‌متری

جدول ۵- نتایج مقاومت فشاری، شکل پذیری و فاکتور تاثیر کرنش گسیختگی GFRP در نمونه‌ها

نمونه	ε_{ccw} mm/mm	$\varepsilon_{ccu}'/\varepsilon_c'$	ε_{fuw} mm/mm	ε_{fe} mm/mm	$k_\varepsilon = \varepsilon_{fe}'/\varepsilon_{fu}$	f_{co}' MPa	f_{c1}' MPa	f_{cc}' MPa	f_{cc}'/f_{c1}'
K0	0.0032	1.6	-	-	-	25	31	-	1
K1	0.0054	2.7	0.013	0.0088	0.68	25	31	36	1.16
K2	0.0066	3.3	0.013	0.0088	0.68	25	31	38.5	1.24
K3	0.0078	3.9	0.013	0.0088	0.68	25	31	41	1.32
K4	0.0047	2.35	0.013	0.0084	0.65	25	31	34.7	1.12
K5	0.0041	2.05	0.013	0.0078	0.6	25	31	33.3	1.075
K6	0.0056	2.8	0.013	0.0084	0.65	25	31	36.5	1.18
K7	0.0046	2.3	0.013	0.0078	0.6	25	31	34.5	1.11
K8	0.0065	3.25	0.013	0.0084	0.65	25	31	38.4	1.24
K9	0.0051	2.55	0.013	0.0078	0.6	25	31	35.7	1.15
K10	0.0046	2.3	0.013	0.0081	0.62	25	31	34.4	1.11
K11	0.0038	2.9	0.013	0.0069	0.53	25	31	32.8	1.06
K12	0.0054	2.7	0.013	0.0081	0.62	25	31	36.1	1.165
K13	0.0042	2.1	0.013	0.0069	0.53	25	31	33.8	1.09
K14	0.0062	3.1	0.013	0.0081	0.62	25	31	37.8	1.22
K15	0.0046	2.3	0.013	0.0069	0.53	25	31	34.7	1.12
K16	0.0043	2.15	0.013	0.0076	0.58	25	31	34	1.10
K17	0.0035	1.75	0.013	0.0056	0.43	25	31	32.2	1.04
K18	0.005	2.5	0.013	0.0076	0.58	25	31	35.4	1.14
K19	0.0037	1.85	0.013	0.0056	0.43	25	31	32.8	1.06
K20	0.0057	2.85	0.013	0.0077	0.59	25	31	37	1.19
K21	0.004	2	0.013	0.0056	0.43	25	31	33.4	1.08

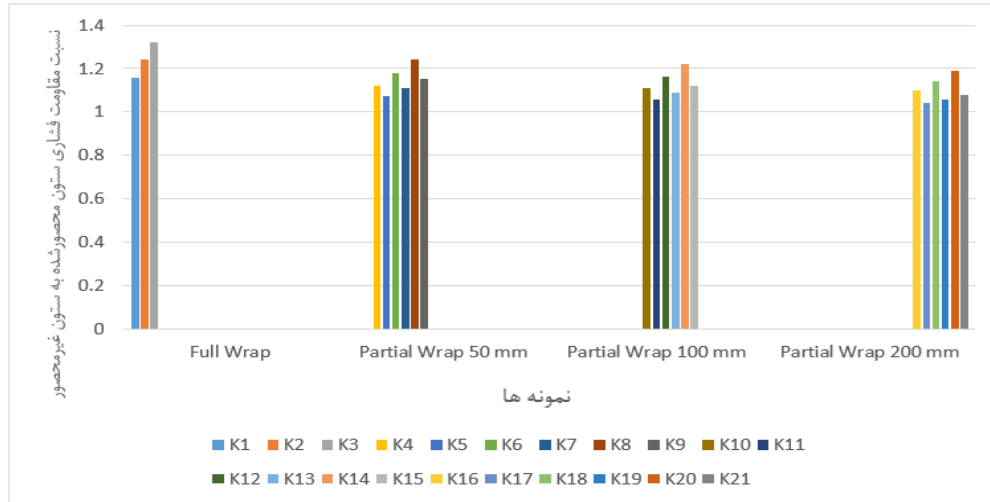
در شکل ۶، توسط نمودار ستونی افزایش مقاومت در نمونه‌های مختلف نسبت به مقاومت اولیه بتن غیر محصور، تصویر شده است. افزایش مقاومت تا ۱/۳۲ برای ستون‌های با دورپیچ کامل و ۱/۲۴ برای ستون‌های با دورپیچ مجزای مختلف دیده می‌شود و این افزایش مقاومت شدیداً به طرح‌بندی دورپیچ و مقدار آن بستگی دارد.

۵-۱. رفتار تنش - کرنش و تأثیر پیکربندی دورپیچ

مقایسه ستون‌ها بصورت کامل دورپیچ شده و ستون‌های با دورپیچ مجزا با تعداد لایه‌های برابر GFRP، افزایش بیشتری در مقاومت و شکل‌پذیری در ستون‌ها بصورت کامل دور پیچ شده نشان داده است. در اینجا اساساً افزایش مقاومت به مقدار و نوع چیدمان GFRP وابسته است. نسبت $\varepsilon_{fe}'/\varepsilon_{fu}$ (کرنش نهایی پیرامونی / کرنش نهایی GFRP) برای ستون‌های بصورت کامل دورپیچ شده ۰/۶۸ و برای ستون‌های بصورت مجزا دورپیچ شده بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۸ متغیر بود. این نسبت کمتر از یک که احتمالاً ناشی از تأثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی، مثل تمرکز تنش در GFRP به خاطر تغییر شکل‌های ناهمگن بتن آسیب‌دیده است، مهم و قابل توجه می‌باشد و باعث یک توزیع غیرخطی کرنش در دورپیچ GFRP خواهد شد. به این مساله باید توجه شود که کرنش گسیختگی کششی نهایی ε_{fu} بالاتر از مقدار کرنش متوسط بدست آمده (ε_{fe}) در این پژوهش است. کرنش گسیختگی کششی نهایی الیاف که از آزمایش کشش مستقیم حاصل شده است، در اینجا ۱/۳٪ بوده است. مقایسه ستون‌های دورپیچ شده کامل و جزئی با یک مقدار کلی FRP (جدول ۵ و شکل‌های ۳ تا ۵)، ستون‌های با دور پیچ جزئی در قسمتی از بتن که محصور شده نیستند، شکل‌پذیری کمتر و افزایشی کمتر در مقاومت نشان دادند. نسبت $\varepsilon_{fe}'/\varepsilon_{fu}$ برای ستون‌های جزئی دورپیچ شده بین ۰/۴۳ تا ۰/۶۵ بدست آمد، که از ستون‌های گرد بصورت کامل دورپیچ شده کمتر است. بررسی جدول ۵ همچنین نشان می‌دهد در ستون‌هایی که درصد پوشش الیاف از ۷۵ به ۵۰ درصد کاهش یافته، ضریب K_ε نیز افت زیادی نشان می‌دهد، که این نشان می‌دهد که تأثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی و تمرکز تنش‌ها به علت محصورشدگی کم این نواحی به شدت افزایش یافته و باعث گسیختگی زودرس الیاف خواهد شد. و همچنین در درصد‌های پوششی مساوی الیاف، هرچه عرض الیاف کمتر شود، ضریب K_ε افزایش یافته و استفاده بهتری از مقاومت کششی الیاف می‌توان نمود.

۵-۲. انتخاب نمونه‌های با دورپیچ مجزا جایگزین دورپیچ کامل، با ملاحظه رفتار تنش - کرنش

با توجه به جدول ۵. و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، می‌توان از نمونه‌های با دورپیچ مجزای K6، K8، K9، K12، K14، K18 و K20 به عنوان جایگزین نمونه K1 که در آن از دو لایه GFRP برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، بهره برد.



شکل ۶- نسبت مقاومت فشاری ستون محصور به ستون غیر محصور

با توجه به جدول ۵. و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، می‌توان از نمونه‌های با دورپیچ مجزای K8 و K14 به عنوان جایگزین نمونه K2 که در آن از سه لایه GFRP برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، بهره برد.

با توجه به جدول ۵. و دقت در مقاومت فشاری و کرنش محوری حاصل شده و همچنین بررسی نسبت مقاومت بتن محصور به بتن غیر محصور از شکل ۶، از آنجا که در این کار پژوهشی تعداد لایه‌های GFRP را به ۴ لایه محدود کرده‌ایم، نمونه‌ای با دورپیچ مجزا که از آن بتوان به عنوان جایگزین نمونه K3 که در آن از چهار لایه GFRP برای دورپیچ کردن کامل ستون استفاده شده است، نخواهیم داشت و جهت دستیابی به این منظور نیاز به افزایش تعداد لایه‌ها در حالت مجزا نسبت به ۴ لایه خواهیم داشت.

۵-۳. انتخاب نمونه‌های با دورپیچ مجزا جایگزین دورپیچ کامل، با ملاحظه رفتار تنش - کرنش و ملاحظات

اقتصادی

برای بررسی و مقایسه نمونه‌های انتخاب شده که معیار انتخاب آن‌ها مقاومت فشاری نهایی و شکل‌پذیری ستون بود، در جدول ۷. اقدام به محاسبه هزینه‌های مربوط به تهیه الیاف، چسب اپوکسی و هزینه آماده‌سازی و نصب برای هرکدام از ستون‌های انتخابی کرده‌ایم و نهایتاً نمونه‌هایی انتخاب می‌شوند که هم مقاومت فشاری نهایی و شکل‌پذیری آن‌ها قابل قبول باشد و هم از لحاظ اقتصادی قابل مقایسه با ستون با دورپیچ کامل باشند.

در جدول ۶ برای محاسبه هزینه الیاف مصرفی، مقدار مساحت الیاف مصرفی با توجه به عرض، فاصله خالص الیاف، تعداد لایه‌ها و مقدار هم‌پوشانی (اورلپ در محل اتصال) ۱۰۰ میلی‌متر بدست آمده و در قیمت یک متر مربع الیاف شیشه که در بازار ایران حدوداً ۲۹۰۰۰ تومان می‌باشد، ضرب شده است. برای محاسبه هزینه رزین اپوکسی، وزن رزین با توجه به عرض و فاصله خالص الیاف بدست آمده و در قیمت یک کیلوگرم چسب اپوکسی که در بازار ایران حدوداً ۳۵۰۰۰ تومان می‌باشد، ضرب شده است. برای محاسبه وزن اپوکسی، مقدار آن در لایه اول ۱/۴ کیلوگرم در متر مربع و در لایه‌های بعدی به ازای هر لایه ۶۰۰ گرم به مقدار مصرف شده در لایه اول اضافه می‌گردد. برای محاسبه هزینه آماده‌سازی و نصب، مساحت با توجه به عرض و فاصله خالص الیاف بدست آمده است. به ازای هر متر مربع آماده‌سازی شامل زدودن شیره سیمان، فرزکاری خطوط بجا مانده از قالب‌بندی و برآمدگی‌ها و پر کردن مک‌ها و حفرات و کرموهای سطحی با ملات مناسب، مبلغ ۲۰۰۰۰ تومان و هر متر مربع نصب برای هر لایه مبلغ ۳۰۰۰ تومان، بصورت تقریبی در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۶. و ملاحظه اقتصادی که شامل هزینه الیاف، چسب، آماده‌سازی و نصب

می‌باشد، به نظر می‌رسد ستون K9 بهترین انتخاب در حالت دورپیچ مجزا برای جایگزینی با ستون K1 که با ۲ لایه GFRP به صورت کامل دورپیچ شده است، می‌باشد. بعد از آن نیز ستون‌های K6، K12 و K18 با توجه به مزایای ذکر شده در خصوص نصب الیاف بصورت مجزا، مناسب به نظر می‌رسند. استفاده از ستون‌های K8، K14 و K20 به عنوان جایگزینی برای ستون K1 غیراقتصادی خواهد بود.

به ترتیب بالا، همچنین دو ستون K8 و K14 انتخاب‌های بسیار مناسبی در حالت دورپیچ مجزا، برای جایگزینی با ستون K2 که با ۳ لایه GFRP به صورت کامل دورپیچ شده است، هستند.

جدول ۶- نتایج مربوط به ملاحظات اقتصادی برای نمونه‌های K1، K6، K8، K9، K12، K14، K18 و K20

نمونه	مقدار الیاف مصرفی (m ²)	هزینه الیاف مصرفی (تومان)	مقدار چسب اپوکسی مصرفی (Kg)	هزینه چسب اپوکسی مصرفی (تومان)	مساحت آماده‌سازی و نصب (m ²)	هزینه آماده-سازی و نصب	جمع کل هزینه (تومان)
K1	5.424	157296	5.024	175840	2.512	65312	400000
K6	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K8	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000
K9	6.508	188755	4.823	168806	1.507	48230	405000
K12	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K14	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000
K18	6.508	188755	5.224	182873	2.009	58278	430000
K20	8.678	251673	6.430	225075	2.009	64307	540000

۶. نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های انجام شده روی ستون‌های بزرگ مقیاس دورپیچ شده نتایج زیر بدست آمده است:

۱. محصور شدگی بتن بوسیله دورپیچ GFRP، تکنیکی موثر برای افزایش مقاومت و شکل‌پذیری است. با این وجود پیکربندی دورپیچ تأثیر قابل ملاحظه روی اثربخشی دورپیچ GFRP دارد. در مورد اعضای با دورپیچ مجزا قسمتی از بتن که محصور نشده است، فشار محصور کننده نهایی کم و در نتیجه افزایش مقاومت پایین نمایش داده بود.

۲. در کنار و به اضافه اثربخشی (تأثیر دورپیچ مجزا)، افزایش مقاومت عموماً به مقدار دورپیچ GFRP بستگی دارد.

۳. چونکه GFRP بصورت الاستیک خطی برخورد می‌کند، متناظر با افزایش در انبساط جانبی بتن، به یک فشار محصور کننده افزایشی تمایل دارد؛ اگر چه وضعیت نهایی عضو محصور شده با گسیختگی GFRP همزمان است، کرنش موثر گسیختگی GFRP

کمتر از f_{frrp} / E_{frrp} است.

۴. به خاطر چندین فاکتور تأثیرگذار، از جمله گسیختگی نزدیک تمرکز تنش‌های موضعی، یک کرنش متوسط گسیختگی GFRP کاهش یافته، برای نمونه‌های دورپیچ شده، مشاهده شد.

۵. در ستون‌هایی که درصد پوشش الیاف از ۷۵ به ۵۰ درصد کاهش یافته، ضریب K_E یا ضریب تأثیر گسیختگی الیاف، افت زیادی نشان می‌دهد، که این نشان می‌دهد که تأثیرات ثانویه نزدیک گسیختگی و تمرکز تنش‌ها به علت محصورشدگی کم این نواحی به شدت افزایش یافته و باعث گسیختگی زودرس الیاف خواهد شد. همچنین در درصد‌های پوششی مساوی الیاف، هرچه عرض الیاف کمتر شود، ضریب K_E افزایش یافته و استفاده بهتری از مقاومت کششی الیاف می‌توان نمود.

۶. در صورت انتخاب صحیح چیدمان و ضخامت، استفاده از نوارهای مجزای GFRP، یک روش موثر و اقتصادی، برای بهبود مقاومت و شکل‌پذیری بتن می‌باشد. پی برده شد که نصب ورقه‌های GFRP باریک مجزا، آسان بوده و فضای بین آنها باعث می‌شود که براحتی بتوانیم هوای ایجاد شده را خارج کرده و از کیفیت چسبندگی مطمئن بشویم.

۷. مراجع

1. Zihan Yan and Chris P. Pantelides. (2006), "Fiber-Reinforced Polymer Jacketed and Shape-Modified Compression Members: II—Model," ACI Structural Journal, V. 103, No. 91, pp. 894-903.
2. Houssam A. Toutanji. (1999), "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets," ACI Material Journal, V. 96, No. 50, pp. 397-404.
3. ACI Committee 440. (2008), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures," American Concrete Institute, ACI 440.2R-08, pp. 34-37.

۴. مرتضوی علوی، ن. (۱۳۸۹)، "مطالعه رفتار بتن محصور شده در FRP به روش اجزای محدود" پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.
5. B.G. Charalambidi, T.C. Rousakis & A.I. Karabinis. (2012), "Finite element modeling of reinforced concrete columns seismically strengthened through jacketing partial FRP jacketing," 15 WCEE Lisboa.
6. S. Matthys, H. Toutanji, K. Audenaert, and L. Taerwe. (2005), "Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites," ACI Structural Journal, V. 102, No. 26, pp. 258-267.
7. Ferreira, D.R.S.M, Barros, J.A.O. (2008), "Assessing the Efficiency of CFRP Discrete Confinement Systems for Concrete Cylinders," ASCE, Journal of Composites for Construction, DOI: 8.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:2(134).
8. S. Achilopoulos, D. Rousakis, and A. Karabinis. (2010), "Square Reinforced Concrete Columns Strengthened Through Fiber Reinforced Polymer (FRP) Sheet Straps."
9. Park, T. Na, U. Chung, L. Feng, M. (2008), "Compressive behavior of concrete cylinders confined by narrow strips of CFRP with spacing," Composites: Part B 1093-1103.
10. H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and M. W. Li. (1994), "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps," ACI Structural Journal, V. 91, No. 43, pp. 434-447.
۱۱. بنائی پور، ع. توکلی زاده، م.ر. (۱۳۹۴)، "بررسی تاثیر تغییر جهت الیاف بر رفتار فشاری بتن محصور شده با FRP" هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران.
۱۲. شهیازی، ر. یکرنگنیا، م. (۱۳۹۳)، "راهنمای کاربردی Abaqus به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک"، تهران، نشر علم عمران، ص ۲۴۵، ۱۳۹۳.
13. Kent D.C. and Park R. (1971), "Flexural Members with Confined Concrete, Journal of Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol.97, No. ST7, 1969-1990.
14. Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R. (1988), "Theoretical stress-strain model for confined concrete, Journal of Structural Engineering ASCE, 114(8), 1804-1825.
15. Teng, J. G., and Lam, L. (2004), "Behavior and modeling of fiberreinforced polymer-confined concrete," J. Struct. Eng., 130(11), 1713-1723.

هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵"