

نقش تغییرات هندسه داخلی و خارجی مقطع بر روی مقاومت فشاری بتن توخالی محصورشده با ورق‌های CFRP

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

چکیده

ستون‌ها اجزای اصلی سازه‌ها هستند و گاهی اوقات به دلایل مختلف از جمله تغییر کاربری ساختمان، خطا در طراحی، تغییر در آیین نامه و خطا در ساخت بتن نیاز به مقاوم‌سازی دارند. استفاده از پلیمرهای مسلح الیافی (FRP) برای مقاوم‌سازی یا مرمت سازه‌ها با توجه به خواص آنها روز به روز در حال افزایش است. در این تحقیق به بررسی اثر محصورکننده CFRP بر روی مقاومت فشاری ستون‌های بتنی توخالی به صورت آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. به منظور بررسی اثر هندسه داخلی و بیرونی مقطع توخالی بر روی مقاومت فشاری بتن محصورشده با CFRP، ۴۵ نمونه آزمایشگاهی ساخته شد. متغیرهای این مطالعه عبارتند از: مقطع بیرونی (دایره، مربع و مستطیل)، مقطع داخلی (دایره و مربع با ابعاد مختلف) و تعداد لایه‌های محصورکننده CFRP (صفر، یک و دو لایه). در حالت کلی نتایج نشان می‌دهد محصور کردن بتن توخالی با استفاده از محصورکننده CFRP باعث افزایش مقاومت فشاری می‌گردد. محصورشدگی بر روی نمونه با مقطع بیرونی و داخلی دایره با قطر داخلی ۷۵ میلیمتر بیشترین اثر را دارد؛ به طوری که اضافه کردن ۱ و ۲ لایه CFRP به ترتیب باعث افزایش ۸۴ و ۱۰۸ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی بدون محصورشدگی متناظر با آن می‌گردد و کمترین اثر محصورکننده بر روی نمونه‌ی مربعی با مقطع داخلی مربعی با ضلع ۶۰ میلی‌متر است؛ به طوری که اضافه کردن ۱ و ۲ لایه CFRP به ترتیب باعث افزایش ۳ و ۱۲ درصدی مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌ی بدون محصورشدگی متناظر با آن می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: هندسه خارجی، هندسه داخلی، مقاومت فشاری، محصور کننده FRP، بتن توخالی.

۱- مقدمه

به وزن و مقاومت مطلوب آنها در برابر عوامل محیطی و جوی، سبکی، دوام و خاصیت میرایی، در سال‌های اخیر استفاده از این مواد در ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها بتنی رواج بسیاری یافته است (Khaloo و همکاران، ۲۰۰۸). برای نخستین بار در اواسط دهه ۸۰ میلادی از FRP جهت تقویت ستون بتن‌آرمه موجود در برابر بارهای زلزله استفاده شد (Teng و همکاران، ۲۰۰۲). همچنین نخستین سازه فولادی که توسط CFRP مقاوم‌سازی شد، پل راه‌آهن Hyte در کشور انگلستان بود (Hsu و Zhang، ۲۰۰۵). مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از ورقه‌های FRP برای مقاوم‌سازی بتن انجام شده است، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از FRP برای محصور نمودن ستون‌های بتنی مقاومت فشاری و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند (Nanni و Bradford، ۱۹۹۵؛ Mirmiran و همکاران، ۱۹۹۸؛ Wong و همکاران، ۲۰۰۸؛ Teng و همکاران، ۲۰۱۵؛ Mahmoudabadi و Sakhaeipour، ۲۰۲۰). با این حال، عمده این پژوهش‌ها متمرکز بر ستون‌های توپر بوده‌اند، در حالی که ستون‌های توخالی به دلیل هندسه خاص و الگوی متفاوت توزیع تنش، رفتاری متمایز از ستون‌های توپر از خود نشان می‌دهند. برخی از این تفاوت‌ها در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

(Fam، 2001). تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار محوری استوانه‌های GFRP پر شده از بتن و سیستم مرکب "استوانه در استوانه" (که فضای بین آن‌ها با بتن پر شده است) مورد

در سال‌های اخیر، استفاده از ستون‌های بتنی توخالی در ساخت انواع سازه‌ها به ویژه پل‌ها، دکل‌ها و پایه‌های بزرگراهی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این ستون‌ها به دلیل وزن کمتر، کاهش مصرف مصالح، بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش نیروهای وارد بر پی‌ها، نسبت به ستون‌های توپر مزایای متعددی دارند (Barghian و همکاران، ۲۰۱۶). ستون‌های توخالی ساخته شده در گذشته به دلایل متفاوتی نظیر خطا در طراحی، خطا در حین ساخت، خوردگی بتن و فولاد، ایجاد تیر قوی-ستون ضعیف، تغییر در آیین‌نامه‌ها و ... نیاز به ترمیم و مقاوم‌سازی دارند. در بسیاری از موارد، مقاوم‌سازی می‌تواند از نظر اقتصادی و عملکردی، جایگزین مناسبی برای تخریب و نوسازی کامل باشد؛ با این حال، تصمیم‌گیری در این زمینه نیازمند بررسی عواملی نظیر شدت آسیب، هزینه‌های ترمیم، شرایط بهره‌برداری و عمر باقی‌مانده سازه است (Ahmad و همکاران، ۱۹۹۱). استفاده از غلاف بتنی یا فولادی به منظور ترمیم و مقاوم‌سازی سبب افزایش ظرفیت باربری سازه می‌شود اما نیاز به تجهیزات و نیرو کار نسبتاً زیادی دارند و باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقطع عرضی ستون می‌شود، این در حالی است که سیستم غلاف فولادی نیز اغلب سنگین است و در برابر شرایط محیطی، نامطلوب عمل می‌کند (Fam، 2001).

با توجه به خواص کامپوزیت‌های FRP در مقایسه با غلاف بتنی یا فولادی از جمله نسبت بالای مقاومت و سختی نسبت

مطالعه قرار داد. در این آزمایش، لوله‌های GFRP به‌گونه‌ای طراحی شدند که در برابر بارهای محوری و عرضی مقاومت داشته باشند و همراه با هسته‌ی بتنی تحت بارگذاری محوری قرار گرفتند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که استوانه‌های GFRP توپر (پر شده از بتن)، بیشترین میزان محصورشدگی را تجربه می‌کنند. همچنین، وجود حفره‌ی داخلی گرچه باعث کاهش سطح محصورشدگی می‌شود، اما تأثیر قابل توجهی بر شکل‌پذیری عضو ندارد.

آزمایش‌هایی توسط (Mo و همکاران، ۲۰۰۴) در سال ۲۰۰۴ بر روی رفتار لرزه‌ای ستون‌های توخالی محصورشده با FRP صورت گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که هم شکل‌پذیری و هم مقاومت برشی با افزایش تعداد ورقه‌های FRP افزایش یافته و از ترک‌های برشی جلوگیری شده و همچنین باعث تغییر حالت شکست از برش به خمش شده است. (Pavese و همکاران، ۲۰۰۴) به ارزیابی رفتار ستون‌های توخالی مربعی تقویت شده با FRP تحت بار لرزه‌ای پرداختند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد ورقه‌های FRP در افزایش مقاومت برشی ستون‌های توخال بسیار کارآمد هستند. در سال ۲۰۰۷ (Lignola و همکاران، ۲۰۰۷) آزمایش‌هایی بر روی ستون‌های توخالی بتن مسلح تقویت شده با CFRP انجام دادند. هدف، بررسی اثر مقاوم سازی این ستون‌ها با CFRP و همچنین تعمیم دادن نتایج نظری بدست آمده از ستون‌های توپر برای ستون‌های توخالی بود. نتایج آزمایشگاهی نشان داد مقاومت فشاری نمونه‌های تقویت شده تا ۱۵ درصد تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت افزایش داشته است. (Wong و همکاران، ۲۰۰۸) آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های استوانه‌ی FRP کاملاً پر شده از بتن، استوانه‌ی FRP دارای حفره داخلی و استوانه‌ی FRP دارای حفره داخلی با لوله فولادی انجام دادند. این تحقیق نشان داد افزایش قطر مقطع داخلی باعث کاهش مقاومت و قرار دادن لوله فولادی اثر قابل توجهی در مقاومت فشاری نمونه داشته و مانع از ترک خوردگی لبه داخلی انتهایی مقطع می‌شود. (Yazici و Hadi، ۲۰۰۹) آزمایش‌هایی بر روی ۱۶ نمونه ستون دایره‌ای بتن مسلح انجام دادند. ۸ نمونه با هسته توپر و ۸ نمونه با هسته توخالی تحت خروج از مرکزیت متفاوت (۲۵ و ۵۰ میلی-متر) و همچنین بار فشاری هم‌مرکز قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد، دورپیچ کردن نمونه‌ها با FRP باعث افزایش باربری محوری و شکل‌پذیری هر دو گروه با هسته توخالی و توپر می‌شود، اگرچه این افزایش بیشتر در نمونه‌های توپر قابل مشاهده بود. (Hadi و Yazici، ۲۰۱۱) آزمایش‌هایی بر روی ۱۸ نمونه ستون دایره‌ای بتنی با قطر هسته توخالی یکسان (mm ۵۶) و قطر خارجی یکسان (mm ۱۵۰) در دو ارتفاع ۵۰۰ میلی-متر و ۸۸۵ میلی-متر با شرایط متفاوت مقاومت‌سازی هسته

توخالی و همچنین شرایط متفاوت مقاومت‌سازی هسته بیرونی تحت بار فشاری خالص و همچنین تحت بار خروج از مرکزیت ۲۵ و ۵۰ میلی-متر انجام داد. نتایج این تحقیق نشان داد دورپیچی نمونه‌ها با FRP باعث افزایش ظرفیت باربری محوری نمونه‌ها تحت بار فشاری هم‌مرکز می‌شود. و در بارگذاری تحت خروج از مرکزیت، با افزایش خروج از مرکزیت ظرفیت باربری محوری کاهش می‌یابد. (Micelli و Modarelli، ۲۰۱۳) مطالعه‌ای بر روی ۲۷ نمونه ستون بتنی توخالی شامل ۱۴ نمونه با مقطع دایره‌ای توخالی، ۱۳ نمونه با مقطع مربع یا مستطیل توخالی، و همچنین ۱۶ نمونه توپر استوانه‌ای و منشوری انجام دادند. در این تحقیق به اثر افزایش تعداد لایه‌های FRP (از ۱ به ۲، ۳ و ۵ لایه) و تفاوت آن با مقاطع توپر پرداخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد افزایش ظرفیت مقاومت فشاری نمونه‌ها از دایروی به مربعی و مستطیلی رو به کاهش می‌رود و این کاهش ظرفیت در نمونه‌ها با هسته توخالی به-مراتب آشکارتر است. (Mary و Asisha، ۲۰۱۷) در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی به اثر همزمان استفاده از FRP و لوله‌های PVC در ستون‌های توخالی بتنی تحت بار هم‌مرکز پرداختند. در این آزمایش لوله PVC در تمامی نمونه‌ها در لایه بیرونی نمونه قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد، لوله PVC باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های بتنی می‌شود و با افزایش ضخامت این لوله‌ها، محصورشدگی نیز افزایش می‌یابد. در نهایت نتایج نشان داد، بهترین محصورشدگی در این نمونه‌ها مربوط به بتن‌هایی است که به طور همزمان توسط PVC و FRP محصور شده‌اند. (Animesh و Bhuvaneshwari، ۲۰۱۸) در یک مطالعه آزمایشگاهی، رفتار چهار نمونه بتنی توخالی با مقطع دایره‌ای را بررسی کردند. ارتفاع تمامی نمونه‌ها یکسان و برابر ۵۱۰ میلی-متر است. در این تحقیق جهت محصور نمودن نمونه‌های بتنی از لوله‌های PVC استفاده شد. تمامی نمونه‌ها تحت بار هم‌مرکز فشاری قرار گرفتند. نتایج این پژوهش نشان داد، استفاده از PVC به عنوان محصور کننده سبب افزایش ظرفیت باربری در مقایسه با ستون‌ها مسلح توخالی بتنی می‌گردد. (Ismail و همکاران، ۲۰۲۲) به بررسی اثر استفاده از محصور کردن جزئی CFRP برای مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح توخالی پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که با محصورسازی جزئی CFRP، مقاومت ستون بتن مسلح توخالی دایره‌ای محصور نشده تا ۴۴ درصد افزایش می‌یابد. (Nayel و Kadhim، ۲۰۲۳) در سال ۲۰۲۳، به بررسی اثر دورپیچ CFRP بر روی ستون‌های توخالی پرداختند. در مطالعه مذکور نشان داده شده که استفاده از محصورکننده‌ی CFRP باعث افزایش ۲۲/۸ درصدی مقاومت فشاری می‌گردد و شکل‌پذیری نمونه‌ها ۱/۹ برابر نمونه‌ی محصورنشده می‌گردد. (Yang و همکاران،

دهنده‌ی مقطع داخلی (F توپر، HS توخالی با مقطع مربع و HC توخالی با مقطع دایره)، c نشان‌دهنده‌ی بعد مقطع داخلی (ضلع مربع یا قطر دایره) و d نشان‌دهنده‌ی تعداد لایه‌های محصورکننده می‌باشد. شکل ۱ ابعاد و جزئیات نمونه‌ها قابل مشاهده است. تمامی نمونه‌ها دارای طرح اختلاط یکسان و در شرایط یکسان بتن‌ریزی شده‌اند. مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲- مواد تشکیل دهنده‌ی نمونه‌ها

اکثر سازه‌های بتنی که نیازمند مقاوم‌سازی و ترمیم با استفاده از دورپیچ هستند، با بتن معمولی ساخته شده‌اند. بنابراین بتن مورد استفاده در این مطالعه دارای مشخصات ویژه و مقاومت بالا نیست. با توجه به احتمال شکست نمونه‌های توخالی از ناحیه داخلی، در این مطالعه از بتن با مقاومت متوسط استفاده شد. در این مطالعه از یک بتن با عیار 400 kg/m^3 ، نسبت آب به سیمان $0/45$ و اندازه اسمی بزرگترین سنگدانه مصرفی ۱۲ میلی‌متر استفاده شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن استفاده شده در این مطالعه $37/4$ مگاپاسکال می‌باشد.

به منظور محصور کردن بتن از صفحات کامپوزیتی با الیاف کربنی تک جهته استفاده شده است. الیاف کربنی استفاده شده در این مطالعه از محصولات شرکت "کوانتوم" و از نوع Wrap 300 C است. در جدول ۲ مشخصات مکانیکی صفحات CFRP مورد استفاده ارائه شده است. ماده زمینه مورد نیاز برای چسباندن ورقه‌های CFRP به بتن از ترکیب رزین و ماده سخت‌کننده به نسبت اختلاط وزنی ۳ به ۱ تهیه می‌شود که از نوع QUANTOM EPR 3301 می‌باشد.

۲-۳- ساخت، آماده‌سازی و شکست نمونه‌ها

به منظور ساخت نمونه‌ها، از قالب فولادی با سطح مقطع استوانه، مربع و مستطیل برای سطح بیرونی نمونه‌ها استفاده شد. جهت ایجاد حفره داخلی دایره‌ای از دو سری لوله‌های PVC به قطرهای ۴۰ و ۷۵ میلی‌متری استفاده شد. جهت ایجاد حفره داخلی مربعی شکل نیز از داکت‌های برق به ابعاد 30×30 و 60×60 میلی‌متر استفاده شده است. از یک ورق ۴ میلی‌متری نیز به عنوان تکیه‌گاه برای قالب بیرونی و حفره داخلی استفاده شد. جهت ثابت کردن لوله‌ها از قسمت پایین تکیه‌گاه، یک لوله فولادی با قطری کوچکتر از لوله‌های PVC به کف جوش داده شد که لوله PVC بتواند در آن قرار بگیرد و ثابت بماند. همین فرآیند برای حفره‌های مربعی شکل نیز با ساخت قوطی با اضلاعی کمتر ادامه پیدا کرد به شکلی که داکت در درون آن و دقیقاً وسط نمونه قرار بگیرد و جابه‌جایی نداشته باشد. به منظور تثبیت موقعیت لوله‌ها و داکت‌های داخلی در بخش

(۲۰۲۴) به بررسی اثر ضخامت لوله‌های GFRP محصورکننده بتن توخالی با مقاومت بالا تحت فشار محوری پرداختند و نشان دادند که افزایش ضخامت لوله‌های GFRP می‌تواند به طور قابل توجهی ظرفیت تحمل بار فشاری محوری و ظرفیت تغییر شکل محوری این ستون‌ها را بهبود بخشد.

با این حال، مروری بر مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اغلب پژوهش‌ها تنها به بررسی یک نوع مقطع خارجی (عموماً دایره‌ای) یا یک نوع حفره داخلی پرداخته‌اند، و بررسی جامع اثرات توأم شکل مقطع بیرونی و داخلی در ستون‌های توخالی تقویت‌شده با FRP مغفول مانده است. این خلأ پژوهشی ضرورت انجام تحقیقی جامع برای بررسی رفتار محوری ستون‌های توخالی با ترکیب‌های مختلف از مقاطع بیرونی و داخلی را برجسته می‌سازد. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق بررسی اثر شکل و ابعاد مقطع بیرونی و حفره‌ی داخلی بر رفتار فشاری ستون‌های بتنی توخالی محصورشده با ورقه‌های CFRP است. در این راستا، نمونه‌هایی با سه شکل مختلف مقطع بیرونی (دایره، مربع و مستطیل) و دو نوع مقطع داخلی (دایره و مربع) در ابعاد گوناگون ساخته و با یک یا دو لایه CFRP محصور شدند.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

۲-۱- جزئیات و ابعاد نمونه‌ها

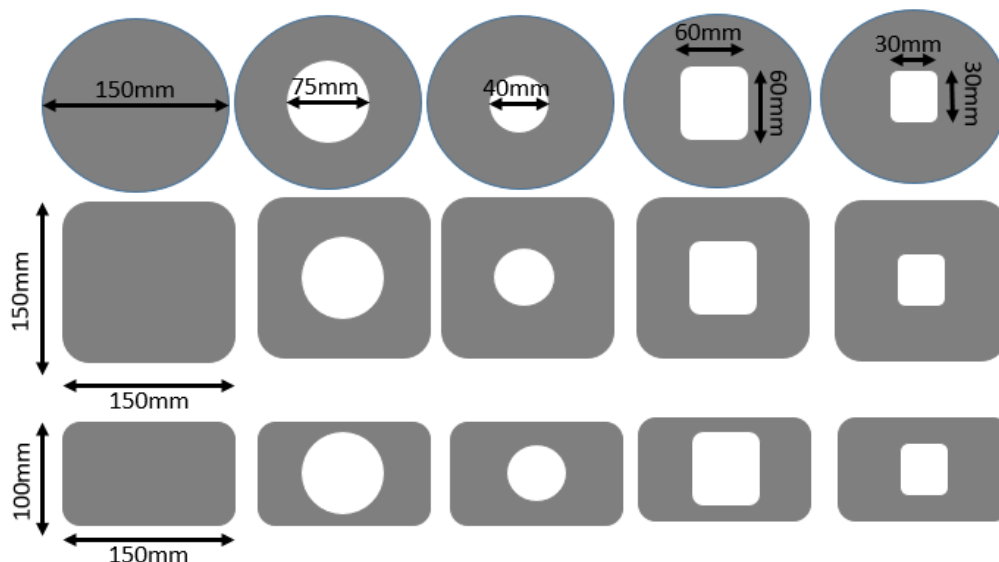
در این مطالعه، ۴۵ نمونه بتنی توخالی محصورشده با CFRP ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. ابعاد و تعداد نمونه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که ضمن رعایت اصول متداول در آزمایش مقاومت فشاری بتن، امکان شبیه‌سازی مناسب رفتار ستون‌های توخالی و بررسی اثر متغیرهای مختلف هندسی فراهم گردد. متغیرهای این نمونه‌ها عبارتند از: نوع سطح مقطع بیرونی و درونی، ابعاد سطح مقطع حفره داخلی و تعداد لایه‌ها محصورکننده‌ی CFRP می‌باشد. سطح مقطع بیرونی به دو دسته دایره‌ای با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و مربعی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر تقسیم می‌شوند. هر دسته شامل ۱۵ نمونه است که در ۵ گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول مقاطع توپر، گروه دوم مقاطع با هسته داخلی دایره با قطر ۷۵ میلی‌متر، گروه سوم مقاطع با هسته داخلی دایره با قطر ۴۰ میلی‌متر، گروه چهارم مقاطع با هسته توخالی مربع به ضلع ۶۵ میلی‌متر و گروه پنجم مقاطع با هسته توخالی مربع به ضلع ۳۰ میلی‌متر می‌باشد. تمامی نمونه‌ها دارای ارتفاع یکسان ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشند. هر گروه شامل ۳ نمونه می‌باشد (صفر لایه، یک لایه و دو لایه محصورکننده). نمونه‌ها به صورت aBcLd نام‌گذاری شدند که در این نامگذاری a نشان‌دهنده مقطع بیرونی (C مقطع دایره، S مقطع مربع و R مقطع مستطیل)، B نشان-

۰	۴۰	دایره	مربع	SHC40L0
۱	۴۰	دایره	مربع	SHC40L1
۲	۴۰	دایره	مربع	SHC40L2
۰	۷۵	دایره	مربع	SHC75L0
۱	۷۵	دایره	مربع	SHC75L1
۲	۷۵	دایره	مربع	SHC75L2
۰	۳۰	مربع	مربع	SHS30L0
۱	۳۰	مربع	مربع	SHS30L1
۲	۳۰	مربع	مربع	SHS30L2
۰	۶۰	مربع	مربع	SHS60L0
۱	۶۰	مربع	مربع	SHS60L1
۲	۶۰	مربع	مربع	SHS60L2
۰	-	-	مستطیل	RF0L0
۱	-	-	مستطیل	RF0L1
۲	-	-	مستطیل	RF0L2
۰	۴۰	دایره	مستطیل	RHC40L0
۱	۴۰	دایره	مستطیل	RHC40L1
۲	۴۰	دایره	مستطیل	RHC40L2
۰	۷۵	دایره	مستطیل	RHC75L0
۱	۷۵	دایره	مستطیل	RHC75L1
۲	۷۵	دایره	مستطیل	RHC75L2
۰	۳۰	مربع	مستطیل	RHS30L0
۱	۳۰	مربع	مستطیل	RHS30L1
۲	۳۰	مربع	مستطیل	RHS30L2
۰	۶۰	مربع	مستطیل	RHS60L0
۱	۶۰	مربع	مستطیل	RHS60L1
۲	۶۰	مربع	مستطیل	RHS60L2

فوقانی نمونه‌ها، از یک نگهدارنده مطابق شکل ۲ (الف و ب) برای هر نمونه استفاده گردید. بدین ترتیب لوله‌ها و داکت‌های داخلی از بالا و پایین ثابت و در مرکز نمونه قرار گرفتند.

جدول ۱- مشخصات کامل نمونه‌های آزمایشگاهی

نام نمونه	نوع مقطع بیرونی	نوع مقطع داخلی	ضلع/قطر مقطع داخلی	تعداد لایه‌های محصورکننده
CF0L0	دایره	-	-	۰
CF0L1	دایره	-	-	۱
CF0L2	دایره	-	-	۲
CHC40L0	دایره	دایره	۴۰	۰
CHC40L1	دایره	دایره	۴۰	۱
CHC40L2	دایره	دایره	۴۰	۲
CHC75L0	دایره	دایره	۷۵	۰
CHC75L1	دایره	دایره	۷۵	۱
CHC75L2	دایره	دایره	۷۵	۲
CHS30L0	دایره	مربع	۳۰	۰
CHS30L1	دایره	مربع	۳۰	۱
CHS30L2	دایره	مربع	۳۰	۲
CHS60L0	دایره	مربع	۶۰	۰
CHS60L1	دایره	مربع	۶۰	۱
CHS60L2	دایره	مربع	۶۰	۲
SF0L0	مربع	-	-	۰
SF0L1	مربع	-	-	۱
SF0L2	مربع	-	-	۲



شکل ۱- ابعاد و جزئیات نمونه‌ها

کردن گوشه‌ها، گرد و غبار موجود بر روی سطح نمونه‌ها با استفاده از دستگاه باد با فشار قوی پاک شد.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی FRP

مقدار	مشخصه
۰/۱۶۷	ضخامت (mm)
۲/۲	کرنش نهایی (%)
۴۲۵۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۳۰	مدول الاستیسیته (GPa)

پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها در یک دوره ۲۸ روزه نمونه‌های مورد نظر با استفاده از ۱ یا ۲ ورقه‌ی CFRP مقاوم-سازی شدند. پیش از اعمال دورپیچ CFRP، سطح خارجی نمونه‌های بتنی با استفاده از سنگ فرز پرداخت شد تا لایه‌ی سطحی شیره‌ی بتن حذف شده و چسبندگی مناسب بین بتن و ورقه‌های CFRP تضمین شود. همچنین به منظور کاهش تمرکز تنش در گوشه‌های نمونه‌های مربعی و مستطیلی، این گوشه‌ها با شعاع ۱۵ میلی‌متر به صورت گرد درآورده شدند. بعد از گرد



ب



الف

شکل ۲- قالب و نگه‌دارنده

در انتها تمامی نمونه‌ها در شرایط یکسان توسط جک هیدرولیکی ۲۰۰ تنی تحت بارگذاری هم‌مرکز فشاری تا لحظه شکست بارگذاری شدند.

۳- نتایج و بحث

آزمایشات مطابق فرآیندهای گفته شده انجام شد و مقاومت فشاری نمونه‌ها ثبت و در جدول ۳ ارائه شده است. همانطوری که در جدول ۳ قابل مشاهده است افزایش تعداد لایه‌های محصورکننده در تمامی مقاطع باعث افزایش محصورشدگی بیرونی می‌شود و در نهایت باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد. همچنین، به منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار شکست نمونه‌ها، مود شکست هر یک از نمونه‌ها پس از آزمایش ثبت و در جدول ۳ ارائه شده است. در نمونه‌های بدون دورپیچ CFRP، شکست عمدتاً در جداره بیرونی مقطع رخ داد. در نمونه‌هایی که تنها از یک لایه CFRP استفاده شده بود، شکست بیشتر به صورت پارگی در پوشش CFRP مشاهده شد. این حالت بیانگر عملکرد مؤثر CFRP در ایجاد محصورشدگی نسبی بتن می‌باشد، هرچند ظرفیت نهایی نمونه‌ها هنوز نسبت به حالت دو لایه

در این تحقیق از روش "چسباندن مرطوب"^۱ برای دورپیچ نمودن ستون استفاده می‌شود. چسب مورد نیاز با نسبت اختلاط وزنی ۳ به ۱ تهیه شد و با یکدیگر مخلوط شدند. سپس سطح نمونه با کمک کاردک به طور کامل به چسب آغشته شد و سپس الیاف کربن با فشار دست بر روی سطح نمونه قرار داده شد. چسباندن الیاف به دور نمونه‌ها با اعمال نوعی کشش در آنها صورت می‌پذیرد تا چسبندگی میان الیاف و بتن به خوبی حاصل شود. همچنین در این پژوهش امتداد قرارگیری الیاف کاملاً عمود بر امتداد طولی ستون است و طول همپوشانی ۱۰۰ میلی-متر در نظر گرفته شده است. در انتها بار دیگر روی سطح الیاف به‌طور کامل با چسب پوشش داده شد تا چسبندگی کامل میان الیاف و بتن حاصل شود، همین فرآیند جهت نصب لایه دوم نیز در نمونه‌هایی که نیاز به بیش از یک لایه داشتند، تکرار شد.

¹ Wet Lay Up

داخلی مقطع منتقل می‌کند، به ویژه در حالاتی که از دو لایه CFRP استفاده شده باشد.

در شکل ۳ برخی از نمونه‌های شکسته شده ارائه شده است. همانطوری که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، در اکثر مواردی که از یک لایه برای مقاوم‌سازی ستون‌ها استفاده می‌شود، شکست از نوع پارگی CFRP می‌باشد. اما زمانی که از ۲ لایه CFRP استفاده می‌شود و مساحت مقطع حفره داخلی افزایش می‌یابد، شکست از پارگی CFRP به ایجاد ترک در حفره و یا انبساط حجم بتن در حفره (بدون پارگی CFRP) تبدیل می‌شود.

محدود است. در نمونه‌هایی با دو لایه CFRP، مود شکست بسته به نوع حفره داخلی متنوع بود. در برخی نمونه‌ها، شکست به صورت پارگی CFRP همراه با گسترش ترک در حفره داخلی مشاهده شد، در حالی که در برخی دیگر، گسیختگی عمدتاً از ناحیه حفره داخلی آغاز شده و به بیرون گسترش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش محصورشدگی، گرایش به تغییر مود شکست از جداره بیرونی به نواحی ضعیف‌تر یعنی اطراف حفره داخلی وجود دارد. در مجموع می‌توان گفت که حضور حفره داخلی نه تنها باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود، بلکه الگوی شکست نمونه‌ها را نیز تغییر داده و آن را به نواحی

جدول ۳- نتایج آزمایشگاهی نمونه‌ها

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مود شکست	نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مود شکست	نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مود شکست
CF0L0	۳۹/۵۷	جداره بیرونی	SF0L0	۳۴/۴۹	جداره بیرونی	RFL0	۲۸/۹۱	جداره بیرونی
CF0L1	۴۳/۰۱	پارگی FRP	SF0L1	۳۷/۹۰	پارگی FRP	RFL1	۳۵/۳۶	پارگی FRP
CF0L2	۴۷/۰۰	پارگی FRP	SF0L2	۳۹/۲۰	پارگی FRP	RFL2	۳۸/۸۵	پارگی FRP
CHC40L0	۳۳/۸۱	جداره بیرونی	SHC40L0	۲۶/۰۷	جداره بیرونی	RHC40L0	۲۵/۱۸	جداره بیرونی
CHC40L1	۳۵/۶۳	پارگی FRP	SHC40L1	۲۹/۷۳	پارگی FRP	RHC40L1	۲۹/۳۶	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی
CHC40L2	۴۷/۹۴	پارگی FRP	SHC40L2	۳۲/۹۲	پارگی FRP	RHC40L2	۳۰/۱۸	پارگی FRP
CHC75L0	۱۷/۳۰	جداره بیرونی	SHC75L0	۲۵/۰۷	جداره بیرونی	RHC75L0	۱۴/۷۲	جداره بیرونی
CHC75L1	۳۱/۸۷	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی	SHC75L1	۲۸/۳۴	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی	RHC75L1	۲۳/۵۴	حفره داخلی
CHC75L2	۳۵/۹۱	حفره داخلی	SHC75L2	۲۸/۵۸	حفره داخلی	RHC75L2	۲۵/۸۳	حفره داخلی
CHS30L0	۳۵/۹۱	جداره بیرونی	SHS30L0	۲۶/۳۳	جداره بیرونی	RHS30L0	۲۴/۱۶	جداره بیرونی
CHS30L1	۴۰/۲۴	پارگی FRP	SHS30L1	۲۹/۷۵	پارگی FRP	RHS30L1	۲۸/۹۱	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی
CHS30L2	۴۲/۶۲	پارگی FRP	SHS30L2	۳۳/۵۳	پارگی FRP	RHS30L2	۳۸/۶۵	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی
CHS60L0	۲۴/۷۲	جداره بیرونی	SHS60L0	۲۴/۴۲	جداره بیرونی	RHS60L0	۱۷/۳۲	جداره بیرونی
CHS60L1	۳۰/۵۴	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی	SHS60L1	۲۵/۰۷	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی	RHS60L1	۲۳/۹۴	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی
CHS60L2	۳۲/۵۳	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی	SHS60L2	۲۷/۳۱	حفره داخلی	RHS60L2	۲۴/۹۹	پارگی FRP همراه ترک حفره داخلی

حالتی که ۱ لایه استفاده می‌شود، بیشتر است. برای بررسی بیشتر اثر محصورشدگی بر افزایش مقاومت، در هر مقطع بیرونی و هر نوع ضخامت CFRP نمونه‌های دارای بیشترین میزان افزایش مقاومت فشاری در جدول ۴ مشخص شده است. در مقاطع با سطح مقطع بیرونی دایره و مستطیل، اثر دورپیچ CFRP با ۱ و ۲ لایه بر روی نمونه‌ها با سطح مقطع داخلی دایره با قطر ۷۵ میلی‌متر بیشتر است. اما در بتن با مقطع بیرونی مربع، بیشترین اثر دورپیچ با ۱ لایه CFRP در مقطع توخالی دایره‌ای با قطر ۴۰ میلی‌متر و با ۲ لایه CFRP در مقطع توخالی مربعی با

۱-۳- اثر دورپیچ برای افزایش مقاومت فشاری

برای نشان دادن اثر دورپیچ CFRP برای افزایش مقاومت فشاری بتن توخالی، میزان افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های محصورشده با CFRP نسبت به نمونه بدون محصورشدگی متناظر با آن در جدول ۴ ارائه شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود در همه مقاطع، میزان افزایش مقاومت فشاری در زمانی که ۲ لایه CFRP برای محصورشدگی استفاده می‌شود نسبت به

حفره داخلی بر کاهش مقاومت، در هر مقطع بیرونی و هر نوع ضخامت CFRP نمونه‌های دارای بیشترین میزان کاهش مقاومت فشاری در جدول ۵ مشخص شده است. همانطوری که در جدول ۵ مشخص است در نمونه‌های بدون محصورشدگی در مقاطع بیرونی دایروی و مستطیلی زمانی که حفره داخلی دایره با قطر ۷۵ میلی‌متر استفاده می‌شود بیشترین کاهش مقاومت فشاری حاصل می‌شود، اما در مقطع مربعی زمانی که حفره داخلی مربعی با ضلع ۶۰ میلی‌متر استفاده می‌شود، بیشترین کاهش مقاومت فشاری حاصل می‌گردد. در مقاطع با ۱ لایه دورپیچ CFRP با مقطع بیرونی دایره و مربع بیشترین کاهش مقاومت زمانی حاصل می‌شود که حفره داخلی به صورت مربع با ضلع ۶۰ میلی‌متر باشد، اما در مقطع بیرونی مستطیلی، حفره داخلی دایره با قطر ۷۵ میلی‌متر باعث بیشترین کاهش مقاومت فشاری می‌گردد.

ضلع ۳۰ میلی‌متر است. قابل توجه است که اثر دورپیچ CFRP برای افزایش مقاومت فشاری معمولاً در نمونه‌های دارای حفره داخلی بیشتر است. به طور میانگین در نمونه‌های بدون حفره داخلی با ۱ و ۲ لایه دورپیچ CFRP به ترتیب ۱۳/۶۳ و ۲۲/۲۷ افزایش مقاومت وجود داشته و در نمونه‌های دارای حفره با ۱ و ۲ لایه دورپیچ CFRP به ترتیب ۲۵/۲۰ و ۴۰/۵۴ افزایش مقاومت ایجاد می‌شود.

۳-۲- اثر حفره داخلی برای کاهش مقاومت فشاری

برای نشان دادن اثر حفره داخلی بر روی مقاومت فشاری، میزان کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های دارای حفره نسبت به نمونه‌های بدون حفره متناظرشان محاسبه و در جدول ۵ ارائه گردیده است. علامت منفی در جدول ۵ نشانه افزایش مقاومت نسبت به نمونه‌ی متناظر با آن می‌باشد. برای بررسی بیشتر اثر



شکل ۳- نمایشی از نمونه‌های آزمایش شده پس از شکست و انواع مدهای شکست

جدول ۵- میزان کاهش مقاومت ناشی از وجود حفره

نمونه	درصد کاهش	نمونه	درصد افزایش	نمونه	درصد افزایش
CHC40L0	۱۴/۵۶	SHC40L0	۲۴/۴۱	RHC40L0	۱۲/۹۰
CHC40L1	۱۷/۱۶	SHC40L1	۲۱/۵۶	RHC40L1	۱۶/۹۷
CHC40L2	-۲	SHC40L2	۱۶/۰۲	RHC40L2	۲۲/۳۲
CHC75L0	۵۶/۲۸	SHC75L0	۲۷/۳۱	RHC75L0	۴۹/۰۸
CHC75L1	۲۵/۹۰	SHC75L1	۲۵/۲۲	RHC75L1	۳۳/۴۳
CHC75L2	۲۳/۶۰	SHC75L2	۲۲/۰۹	RHC75L2	۳۳/۵۱
CHS30L0	۹/۲۵	SHS30L0	۲۳/۶۶	RHS30L0	۱۶/۴۳
CHS30L1	۶/۴۴	SHS30L1	۲۱/۵۰	RHS30L1	۱۸/۲۴
CHS30L2	۹/۳۲	SHS30L2	۱۴/۴۶	RHS30L2	۰/۵۱
CHS60L0	۳۷/۵۳	SHS60L0	۲۹/۲۰	RHS60L0	۴۰/۰۹
CHS60L1	۲۸/۹۹	SHS60L1	۲۳/۸۵	RHS60L1	۳۲/۳۰
CHS60L2	۳۰/۷۹	SHS60L2	۳۰/۳۳	RHS60L2	۳۵/۶۶

جدول ۴- میزان افزایش مقاومت ناشی از دورپیچ CFRP

نمونه	درصد کاهش	نمونه	درصد کاهش	نمونه	درصد کاهش
CF0L1	۸/۶۹	SF0L1	۹/۸۹	RFL1	۲۲/۳۱
CF0L2	۱۸/۷۸	SF0L2	۱۳/۶۶	RFL2	۳۴/۳۸
CHC40L1	۵/۳۸	SHC40L1	۱۴/۰۴	RHC40L1	۱۶/۶۰
CHC40L2	۴۱/۷۹	SHC40L2	۲۶/۲۸	RHC40L2	۱۹/۸۶
CHC75L1	۸۴/۲۲	SHC75L1	۱۳/۰۴	RHC75L1	۵۹/۹۲
CHC75L2	۱۰۷/۵۷	SHC75L2	۲۱/۸۲	RHC75L2	۷۵/۴۸
CHS30L1	۱۲/۰۶	SHS30L1	۱۲/۹۹	RHS30L1	۱۹/۶۶
CHS30L2	۱۸/۶۹	SHS30L2	۲۷/۳۵	RHS30L2	۵۹/۹۸
CHS60L1	۲۳/۵۴	SHS60L1	۲/۶۶	RHS60L1	۳۸/۲۲
CHS60L2	۳۱/۵۹	SHS60L2	۱۱/۸۳	RHS60L2	۴۴/۲۸

- به طور کلی حفره داخلی باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌گردد؛ این کاهش مقاومت در نمونه‌های محصور شده با CFRP دارای حفره داخلی مربعی با ضلع ۶۰ میلی-متر بیشترین مقدار است.
- در نمونه‌های با محصورشدگی کمتر (بدون CFRP یا با یک لایه)، اثر منفی حفره داخلی بر مقاومت فشاری برجسته‌تر بوده و میانگین کاهش مقاومت به ترتیب ۲۸/۳۹٪، ۲۳/۴۶٪ و ۱۹/۷۲٪ برای حالت‌های بدون CFRP، یک لایه و دو لایه ثبت شده است.

۵- مراجع

Ahmad, S.H., Khaloot, A.R. and Irshaid, A. (1991) 'Behaviour of Concrete Spirally Confined by Fibreglass Filaments'. *Magazine of Concrete Research*, 43(156), pp. 143-148. DOI: 10.1680/macrc.1991.43.156.143.

Animesh, Mal.B.M. (2018) 'Study on Behavior of Reinforced Concrete Hollow Columns Confined with PVC'. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(4), pp. 284-291.

Barghian, M., Farzam, M. and Ramazani, P. (2016) 'Interaction Diagrams of FRP Wrapped Hollow Core Reinforced Concrete Columns'. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 48(1), pp. 53-63. DOI: 10.22060/CEEJ.2016.492.

Fam, A.Z.R.S.H., (2001) 'Behavior of Axially Loaded Concrete-Filled Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes'. *ACI Structural Journal*, 98(3), pp. 280-289.

Hadi, M. and Yazici, V. (2011) 'Testing FRP Confined Columns under Eccentric Loading'. *Faculty of Engineering - Papers (Archive)*, pp. 569-573. Available at: <https://ro.uow.edu.au/engpapers/4066> (Accessed: 11 March 2024).

Ismail, R. et al. (2022) 'AXIAL BEHAVIOUR OF STRENGTHENED CIRCULAR HOLLOW REINFORCED CONCRETE COLUMN WITH CFRP PARTIAL CONFINEMENT'. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 33, pp. 250-255. DOI: 10.14311/APP.2022.33.0250.

Khaloo, A.R., Javid, Y. and Tazarv, M. (2008) 'Experimental Study of the Internal and External (FRP) Confinement Effect on Performance Compressive Concrete Members'. In *14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing.

Lignola, G.P. et al. (2007) 'Experimental Performance of RC Hollow Columns Confined with CFRP'. *Journal of Composites for Construction*, 11(1), pp. 42-49. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:1(42).

Mahmoudabadi, M. and Sakhaeipour, F. (2020) 'Numerical Analysis on the Influence of the Cross Section of Ultimate Capacity of Reinforced Concrete

همانطوری که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، میانگین کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های محصور نشده، محصور شده با ۱ و ۲ لایه دورپیچ CFRP به ترتیب ۲۸/۳۹، ۲۳/۴۶ و ۱۹/۷۲ می‌باشد که نشان می‌دهد اثر حفره بر روی نمونه‌های دارای محصورشدگی کمتر بیشتر می‌باشد. میانگین کاهش مقاومت در نمونه‌ها با سطح مقطع بیرونی دایره، مربع و مستطیل به ترتیب برابر ۲۱/۴۸، ۲۴/۱۳ و ۲۵/۹۵ می‌باشد که نشان می‌دهد اثر حفره داخلی در نمونه‌های دارای مقطع بیرونی مستطیلی بیشتر است.

همچنین قابل مشاهده می‌باشد که با افزایش سطح مقطع حفره داخلی مقاومت فشاری در نمونه‌های محصور شده و محصور نشده کاهش می‌یابد و میزان کاهش مقاومت افزایش می‌یابد. به طور خاص، با افزایش قطر حفره داخلی از ۴۰ به ۷۵ میلی‌متر، میانگین میزان کاهش مقاومت فشاری (جدول ۵) در مقاطع بیرونی دایره، مربع و مستطیل به ترتیب ۳/۵۶، ۱/۲۰ و ۲/۲۲ برابر می‌شود. همچنین، در صورت افزایش طول ضلع حفره مربعی داخلی از ۳۰ به ۶۰ میلی‌متر، این میزان کاهش در مقاومت به‌طور میانگین برای همان مقاطع بیرونی به ترتیب ۳/۸۹، ۱/۵۷ و ۳/۰۷ برابر خواهد بود.

۴- نتایج

در این مطالعه، به منظور بررسی اثر هندسه داخلی و خارجی مقطع بر مقاومت فشاری بتن توخالی محصور شده با CFRP، تعداد ۴۵ نمونه آزمایشگاهی با متغیرهایی نظیر نوع مقطع بیرونی (دایره‌ای، مربعی و مستطیلی)، شکل و ابعاد مقطع داخلی (دایره‌ای و مربعی با اندازه‌های مختلف) و تعداد لایه‌های CFRP (صفر، یک و دو لایه) ساخته و آزمایش شدند. با انجام آزمایش مقاومت فشاری بر روی این نمونه‌ها نتایج زیر حاصل گردید:

- استفاده از دورپیچ CFRP منجر به افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های توخالی می‌گردد. این افزایش با افزایش تعداد لایه‌ها بیشتر می‌شود.
- با مقایسه میزان افزایش مقاومت فشاری ناشی از دورپیچ CFRP مشاهده شد که اثر دورپیچ بر روی نمونه‌های دارای حفره داخلی نسبت به نمونه‌های بدون حفره بیشتر است و بیشترین اثر دورپیچ برای افزایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های دارای حفره داخلی دایره‌ای با قطر ۷۵ میلی‌متر است.
- در برخی نمونه‌ها، افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ CFRP موجب تغییر مکانیزم شکست از پارگی الیاف به افزایش حجم بتن درون حفره یا ایجاد ترک در بخش داخلی نمونه شد.

- Yazici, V. and Hadi, M. (2009) 'Behaviour of FRP Wrapped Circular Reinforced Concrete Columns'. *Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, pp. 215-220. DOI: 10.1201/9780203859926.CH33.
- Zhang, Z. and Hsu, C.-T.T. (2005) 'Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon-Fiber-Reinforced Polymer Laminates'. *Journal of Composites for Construction*, 9(2), pp. 158-169. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2005)9:2(158).
- Columns Reinforced with CFRP'. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(Special Issue 1), pp. 107-125. DOI: 10.22065/JSC.2018.138522.1603.
- Mary Mammen, Asisha.A.M. (2017) 'EXPERIMENTAL STUDY ON FRP-PVC CONFINED CIRCULAR COLUMNS'. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), pp. 1386-1390.
- Micelli, F. and Modarelli, R. (2013) 'Experimental and Analytical Study on Properties Affecting the Behaviour of FRP-Confined Concrete'. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), pp. 1420-1431. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESB.2012.09.055.
- Mirmiran, A. et al. (1998) 'Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete'. *Journal of Composites for Construction*, 2(4), pp. 175-185. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:4(175).
- Mo, Y.L., Yeh, Y.-K. and Hsieh, D.M. (2004) 'Seismic Retrofit of Hollow Rectangular Bridge Columns'. *Journal of Composites for Construction*, 8(1), pp. 43-51. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:1(43).
- Nanni, A. and Bradford, N.M. (1995) 'FRP Jacketed Concrete under Uniaxial Compression'. *Construction and Building Materials*, 9(2), pp. 115-124. DOI: 10.1016/0950-0618(95)00004-Y.
- Nayel, W.K. and Kadhim, M.J. (2023) 'The Behaviour of Hollow Reinforced Concrete Columns Confined by Partial Laminates of CFRP under Concentric Loading'. *AIP Conference Proceedings*, 2631(1). DOI: 10.1063/5.0131177/2890895.
- Pavese, A., Bolognini, D. and Peloso, S. (2004) 'FRP SEISMIC RETROFIT OF RC SQUARE HOLLOW SECTION BRIDGE PIERS'. *JOURNAL OF EARTHQUAKE ENGINEERING*, 8, pp. 225-250. DOI: 10.1080/13632460409350526.
- Teng, J.G. et al. (2015) 'Behaviour and Strength of FRP-Strengthened RC Structures: A State-of-the-Art Review'. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 156(1), pp. 51-62. DOI: 10.1680/STBU.2003.156.1.51.
- Teng, J.G. et al. (2002) 'FRP: Strengthened RC Structures'. *Frontiers in Physics*, 53(2), p. 266. DOI: 10.1002/pi.1312.
- Wong, Y.L. et al. (2008) 'Behavior of FRP-Confined Concrete in Annular Section Columns'. *Composites Part B: Engineering*, 39(3), pp. 451-466. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESB.2007.04.001.
- Yang, Z., Xu, C. and Li, G. (2024) 'Behavior of GFRP Tube Confined Hollow High-Strength Concrete Short Columns under Axial Compression'. *Structures*, 61, p. 106017. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2024.106017.