بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های تقویت شده با غلاف GRP و دورپیچ CFRP تحت بار خارج از مرکز

سیدفتح اله ساجدی[1*]، مهران ذوالفقاری حموله[1]

[1]گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت با وجود دارا بودن مقاومت فشاری بالا، از رفتار ترد و شکل‌پذیری محدودی برخوردارند. این پژوهش به منظور بررسی راهکاری برای بهبود شکل پذیری و ظرفیت باربری این ستون ها از طریق محصور سازی با غلاف GRP و دورپیچ CFRP انجام شده است. هدف اصلی ، غلبه بر رفتار ترد بتن پرمقاومت از طریق افزایش شکل‌پذیری است، اگرچه افزایش مقاومت نیز به عنوان یک نتیجه ثانویه گزارش می شود. ۱۸ عدد ستون با مقطع دایره، با و بدون غلاف به‌ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر، تحت آزمایش بار محوری با خروج از مرکزیت‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر قرار گرفتند و تاثیر غلاف GRP و دورپیچ CFRP به‌عنوان عوامل محصورکننده ستون‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به طور متوسط به ترتیب سبب افزایش ظرفیت در ستون های فاقد غلاف به‌میزان ٪۱۴ و ٪۴۴ و در ستون‌های دارای غلاف به‌مقدار ٪۷/۳و ٪۱۲/۲ شد. درحالی‌که استفاده از غلاف به‌طور میانگین به صورت‌های جداگانه و همزمان با کاربرد دورپیچ، باعث افزایش بیش از ۳ برابر نسبت به ستون بدون غلاف در میزان ظرفیت ستون‌ها گردید. نتایج حاکی از آن است که گرچه دورپیچ و غلاف هر دو محصوریت ایجاد می‌کنند، ولی غلاف به خاطر محصوریت بیشتر، تاثیر بسیار افزونتری بر افزایش ظرفیت و همین‌طور شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح دایره‌ای دارد. ستون‌های ساخته شده از بتن پرمقاومت، رفتار تردتری دارند و بنابراین به منظور افزایش شکل‌پذیری، به تقویت نیاز دارند.

کلمات کلیدی: ستون بتن مسلح دایره ای، گسیختگی، شکل پذیری، غلاف GRP، دورپیچ CFRP.

* Corresponding author; email: fa.sajedi@iau.ac.ir; sajedi.ac@gmail.com

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

تعمیر و تقویت اعضای اصلی سازه‌ای در موارد مختلف، به منظور جلوگیری از آسیب‌های احتمالی امری ضروری است. لذا استفاده از راهکارهای عملی و موثر برای تعمیر و تقویت سازه‌های بتنی اجتناب‌ناپذیر است. در این سازه‌ها ستون‌های بتن‌مسلح به عنوان اعضای عمودی سازه، که تحت بار محوری خالص و یا تحت بار محوری و لنگر خمشی به صورت همزمان قرار می‌گیرند، از جمله آسیب‌پذیرترین اعضاءِ محسوب می‌شوند.

تحقیقات فراوانی در سه‌دهه اخیر نشان داده است که تقویت و بهسازی ستون‌های بتنی موجود با غلاف و دورپیچ، می‌تواند ظرفیت باربری ستون را افزایش دهد[۵-۱]. بتن با مقاومت بالا به عنوان مصالح نسبتاً نوینی تلقی می‌شود و در طول سالیان گذشته گسترش فراوانی در اجرای سازه ها داشته است. در گذر زمان تعریف بتن با مقاومت بالا بارها تغییر کرده است؛ در دهه ۱۹۵۰ میلادی بتن با مقاومت ۳۴ مگاپاسکال بتن با مقاومت بالا تلقی می‌شد. در دهه ۱۹۶۰ بتن‌های با مقاومت فشاری ۴۱ تا ۵۲ مگاپاسکال به عنوان بتن مقاومت بالا شناخته می‌شدند و در اوایل دهه ۱۹۷۰، بتن‌هایی با مقاومت ۶۲ مگاپاسکال ساخته شدند و این روند تا زمان حال ادامه یافته است. اکنون بتن‌هایی با مقاومت فشاری بیش از ۱۴۰ مگاپاسکال در نقاط مختلف دنیا در صنعت ساختمان‌سازی استفاده می‌شوند. ستون‌هایی با این مقاومت فشاری بتن جهت رسیدن به ظرفیت نهایی خود نیاز به محصور سازی زیادی می باشد، که استفاده از غلاف و دورپیچ، این مهم را بخوبی ایجاد می‌کند.

اوزبای و همکاران[1] (۲۰۰۹) تحقیقی بر طرح اختلاط بتن‌های خودتراکم با مقاومت بالا انجام دادند. آن‌ها در یک رتبه‌بندی میزان و اثر شش پارامتر مختلف شامل نسبت آب به سیمان، مقدار آب بتن، نسبت سنگدانه ریز به کل سنگدانه‌ها، مقدار خاکستر بادی، مقدار عامل هوازا و مقدار فوق روان‌کننده را روی مقاومت و خواص بتن‌های خودتراکم با مقاومت بالا در حالات تازه و سخت‌شده بررسی کردند و مقادیر بهینه برای عوامل و افزودنی‌های مختلف را ارائه کردند[۶].

در بتن‌های پرمقاومت بایستی تا حد امکان نسبت آب به سیمان را کاهش داد، برای تامین روانی و کارآیی کافی در چنین مخلوط‌هایی که با آب بسیار اندک تهیه می‌شوند، لازم است از فوق روان‌کننده‌ها استفاده شود [۷]. با این وجود ستون‌های بتن-مسلح ساخته شده از بتن پرمقاومت، رفتاری تردتر از ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی دارند، لذا این ستون‌ها نیازمند تقویت جهت افزایش شکل‌پذیری هستند. مقاوم‌سازی‌ستون‌های بتن‌مسلح با دورپیچ نمودن آنها با ورق‌های دورپیچ روشی است که اخیرا بسیار استفاده شده است.

ورق‌های دورپیچ به راحتی می‌توانند روی سطح ستون‌های بتنی نصب شوند، و از لحاظ اقتصادی و سرعت اجراء، گزینه بسار مناسبی می‌باشند[۸]. هم‌چنین تحقیقات انجام شده در خصوص شکل مقطع ستون‌های مقاوم‌سازی شده نشان داده است که مقاطع مربعی و مستطیلی به اندازه مقاطع دایره‌ای تحت اثر محصورشدگی قرار نمی‌گیرند، زیرا در این مقاطع برخلاف مقاطع دایره‌ای، فشار محصورکننده یکنواخت نیست [۱۲-۹].

رهایی و همکاران[2] [۱۳] (۲۰۰۸) تحقیقی آزمایشگاهی بر رفتار ستون‌های استوانه‌ای محصور در ورق‌های دورپیچ انجام دادند. در این تحقیق ۴۰ نمونه ستون بتنی با ابعاد ۳۰۰×۱۵۰ میلی‌متر با دورپیچ کردن ورق‌های دورپیچ و با ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه ورق با زاویه-های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه و ترکیب آن‌ها تا حد گسیختگی تحت نیروی محوری فشاری قرار داده شدند و پارامترهای مختلفی از جمله ضخامت پوشش ورق و امتداد الیاف، بررسی شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که استفاده از ۱، ۲، ۳ و ۴ لایه از ورق‌های دورپیچ افقی می‌تواند مقاومت محوری را به میزان ۱/۹۷، ۲/۳۵، ۳/۱۳ و ۳/۵۷ برابر افزایش دهد. مشاهده شد که با افزایش تعداد لایه‌ها، از سرعت افزایش مقاومت کاسته می‌شود و پس از تعداد مشخصی لایه، این افزایش غیراقتصادی می‌شود. تحقیقات نشان داده که درصد مقاوم‌سازی ایجاد شده با ورق‌های دورپیچ برای ستون‌های ساخته شده از بتن‌های با مقاومت پایین و متوسط در

[1] Ozbay et al.
2 Rahai et al.

ACCEPTED MANUSCRIPT

مقایسه با بتن‌های پرمقاومت، بیشتر است؛ دلیل احتمالی این امر را می‌توان کمتر بودن مقاومت ایجاد شده از سوی لایه محصور کننده نسبت به مقاومت فشاری بتن دانست[۱۵-۱۴].

در زمینه بارگذاری محوری خارج از مرکز، تقریبا تمام مطالعات انجام شده بر این امر اجماع نظر دارند که بارگذاری محوری خارج از مرکز و اعمال لنگر خمشی، از مقدار تحمل بار فشاری می‌کاهد، به‌علاوه استفاده از مصالح الیاف پلیمری تقویتی مقاومت فشاری و شکل‌پذیری این اعضاء را بهبود می‌بخشد[۱۸-۱۶]. اصفهانی و صالحیان (۱۳۸۴) به بررسی رفتار ستون‌های بتن-مسلح تقویت شده با دورپیچ کردن ورق‌های دورپیچ تحت اثر نیروی برون‌محور پرداختند. در این تحقیق، نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۶ ستون دورپیچ شده هر یک به طول ۷۰۰ میلی‌متر و با مقطع مربع‌شکل به ضلع ۲۰۰ میلی‌متر بودند که در برون محوری‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر تحت اثر بار فشاری قرار گرفتند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با افزایش برون-محوری، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد[۹].

پان و همکاران[1] (۲۰۰۷) مشاهده کردند که اثر تقویت با افزایش نسبت لاغری کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که تاثیر نسبت لاغری بر ظرفیت فشاری ستون‌های بتن‌مسلح با دورپیچ قابل توجه‌تر بوده، که محصورسازی با دورپیچ باعث افزایش ظرفیت به‌جای سختی خمشی ستون‌های بتن‌مسلح با بتن معمولی می‌شود[۱۹]. ستون‌های بتنی پر شده در لوله‌های غلاف، ستون کامپوزیتی می‌باشند و اخیرا تحقیقات زیادی بر ستون‌های بتنی با کاربرد این غلاف‌ها انجام شده است. در این ستون‌ها لوله‌های غلاف به عنوان قالب ماندگار عمل می‌کنند و باعث تامین محصوریت جانبی برای بتن هسته ستون و محدود شدن گسترش ترک‌های ریز[2] می‌شوند و همزمان هسته بتنی باعث جلوگیری از کمانش غلاف می‌شود. تحقیقات انجام شده روی ستون‌های بتنی با غلاف نشان داده که این ستون‌ها از حیث ظرفیت باربری، سختی و شکل‌پذیری عملکرد مناسبی دارند [۲۴-۲۰]. هم‌چنین، استفاده از این نوع غلاف در ستون‌ها، تحت اثر ضربه بررسی شده و مشاهده گردید که محصوریت ایجاد شده ناشی از کاربرد غلاف اثر مطلوبی بر افزایش مقاومت این ستون‌ها تحت بارهای ضربه‌ای محوری دارد[۲۵].

ال ماداوی و همکاران[3] (۲۰۱۰) تاثیر نحوه بارگذاری را بر عملکرد ستون محصورشده در دورپیچ تحت بار محوری خارج از مرکز بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقاومت ستون محصور شده تحت بار محوری مرکزی، ۴۴٪ و تحت بار خارج از مرکز ۲۸٪ در مقاطع دایروی تغییر کرد، هم‌چنین در خصوص شکل‌پذیری ستون‌های بتنی بیان نمودند که محصور نمودن ستون‌ها با دورپیچ باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود که این افزایش تحت بار خالص، ۳۵۰٪ و تحت بار خارج از مرکز ۱۲۰٪ متغیر بود [۱۱].

حسن و همکاران[4] (۲۰۱۶) تحقیقی بر رفتار ستون‌های بتنی با مقاومت بالا و با ژاکت دورپیچ تحت بار خارج از محور انجام دادند. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از یک‌لایه ورق دورپیچ برای خروج از مرکزیت‌های کوچک و بزرگ به ترتیب به مقدار ۱۲٪ و ۴۱٪ و استفاده از دولایه ورق دورپیچ به ترتیب به مقدار ۲۱٪ و ۵۳٪ مقاومت را افزایش می‌دهند[۲۶].

ساجدی و شفیعی‌نیا تحقیقی مشابه روی ۱۲ عدد ستون بتن‌مسلح با مقطع دایره‌ای به ترتیب به قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و میزان میلگرد طولی ۲/۷٪ سطح مقطع ناخالص ستون با گروه‌بندی مشابه و ساخته شده از بتن با مقاومت میانگین فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۳۲/۷ مگاپاسکال تحت بار محوری بدون خروج از مرکزیت انجام دادند[۲۷]. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در ستون‌های تقویت شده با ورق‌های دورپیچ استفاده از یک‌لایه و دولایه نوار تقویت عمودی به‌ترتیب باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ۲۶٪ و ۳۴٪ شدند[۲۷].

[1] Pan et al.
[2] micro-cracks
[3] EL Maaddawy et al.
[4] Hassan et al.

ACCEPTED MANUSCRIPT

پروین و وانگ[1] **[۲۸]** (۲۰۰۱) رفتار اعضای بتنی غیرمسلح تحت بار با خروج از مرکزیت را بررسی نمودند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که گرادیان کرنشی ناشی از از خروج از محوری تا ۰/۱۵ عرض ستون می‌تواند تاثیر محصورشدگی را با دورپیچ را به‌میزان ۲۰٪ کاهش دهد.

تورگای و همکاران[2] **[۲۹]** (۲۰۰۹)، آزمایش‌هایی با در نظر گرفتن تاثیر فولاد طولی و عرضی روی ۲۰ ستون مربعی بتن‌مسلح انجام دادند. دسته‌ای از نمونه‌ها فاقد تقویت دورپیچ، دسته‌ای با دورپیچ کم و جزئی و دسته‌ای نیز کاملا محصور شده بودند. امتداد الیاف دورپیچ در نمونه‌های تقویت شده عمود بر محور طولی ستون بود. تمام نمونه‌ها تحت بار محوری قرار گرفتند. در این تحقیق مشخص شد که در نمونه‌های با دورپیچ کامل، شکل‌پذیری بسیار افزایش یافت و زوال ستون با گسیختگی دورپیچ انجام شد.

بلوآر و همکاران[3] **[۳۰]** (۲۰۱۳)، بر روی ۴۸ ستون بتن‌مسلح مربعی که دورپیچ شده بودند، تحقیقاتی انجام دادند. متغیرهای تحقیق عبارت بودند از لاغری ستون‌ها، تعداد لایه‌های دورپیچ و مقاومت بتن. نتایج این تحقیق نشان داد که افزایش لاغری، مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها را کاهش می‌دهد. هم‌چنین دورپیچ کردن ستون‌ها در نمونه‌های با بتن ضعیف‌تر در مقایسه با نمونه‌های با بتن قوی‌تر، افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بیشتری داشته است. پیکارچیک و همکاران[4] **[۳۱]** (۲۰۱۱)، تاثیر ورق‌های یک‌جهته و دوجهته دورپیچ با آرایش مختلف را با انجام آزمایش بر روی ۶ نمونه استوانه‌ای به قطر ۴۷ و ارتفاع ۱۱۲ میلی‌متر را مطالعه کردند. نمونه‌های این تحقیق با ورق‌های یک‌جهته و دوجهته **FRP** که با زوایای صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه بافته شده بودند، دورپیچ شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ورق‌های الیاف یک‌جهته نسبت به ورق‌های الیاف دوجهته افقی و قائم و هم‌چنین ورق‌های الیاف دوجهته ۴۵ درجه عملکرد بهتری داشته و باعث افزایش بیش‌تر ظرفیت فشاری نمونه‌های بتنی شدند [۳۱].

مطالعات زیادی نیز برای ارزیابی دوام [۳۶-۳۲]، خمش [۳۹-۳۷] و عملکرد برشی [۴۶-۴۰] نمونه‌های بتنی تقویت شده با کربن انجام شده است. در مطالعات دیگری تأثیر بارگذاری محوری بررسی شده است**[۳۲]**؛ با این حال، تاکنون پژوهش درخوری در راستای بررسی ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح با پوسته غلاف با و بدون کاربرد دورپیچ تحت بار خارج از مرکز انجام نشده است.

بنابراین، در این پژوهش به صورت آزمایشگاهی اثرات کاربرد جداگانه و همزمان غلاف و دورپیچ بر ظرفیت و گسیختگی ستون‌های بتن‌مسلح دایره‌ای ساخته شده با بتن پرمقاومت بررسی شدند. به همین منظور با ساخت ۱۸ عدد ستون به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و با و بدون‌حضور غلاف و دورپیچ و انجام آزمایش فشار با بارگذاری‌های خارج از مرکز و تعیین تغییرشکل محوری آن‌ها، این هدف دنبال شده است. یک مثال کاربردی از روش پیشنهادی، در مقاوم‌سازی ستون‌های بتنی پل‌ها یا سازه‌های موجود که به دلیل تغییر کاربری یا ضعف‌های آیین‌نامه‌ای نیازمند افزایش توأم ظرفیت باربری و شکل‌پذیری هستند، می‌توان غلاف‌های پیش‌ساخته را به صورت دو نیم‌استوانه درجا دور ستون موجود مستقر نموده و فضای خالی را با تزریق اپوکسی یا بتن خوداتراکم پر کرد؛ سپس جهت یکپارچه‌سازی و جلوگیری از بازشدگی درزها و افزایش فشار محصورکنندگی، دورپیچ الیاف پیرامون آن اجرا می‌گردد.

[1] Parvin and Wang
[2] Turgay et al.
[3] Belouar et al.
[4] Piekarczyk et al.

ACCEPTED MANUSCRIPT

۲- مشخصات دورپیچ و غلاف مصرفی

مواد **FRP** از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ تقویت‌کننده‌ها یا الیاف و رزین (ماده زمینه). الیاف اصولا ارتجاعی، ترد و بسیار مقاوم هستند، و جزء اصلی باربر در مصالح **FRP** محسوب می‌شوند. بسته به نوع الیاف، قطر آن در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد. الیاف ممکن است از شیشه، کربن، آرامید، وینیلون و بازالت باشد. که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام های **GFRP** ، **CFRP**، **AFRP**، **VFRP** و **BFRP** شناخته می‌شوند[۵۰-۴۶].

امروزه با توجه به دوام، مقاومت و سختی بالای الیاف کربنی بیشترین کاربرد را پیدا نموده‌اند. ورقه‌های کامپوزیتی استفاده شده در این پژوهش از جنس الیاف کربن **CFRP** و به‌صورت یک‌جهته و ساخت شرکت کوانتوم انگلستان می‌باشند. خواص مکانیکی مصالح **CFRP** براساس اطلاعات کارخانه سازنده، از آزمایش‌های انجام شده به‌ترتیب طبق استانداردهای **ASTM D7565** [۵۳] و **ASTM D2996** [۵۴] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مصرفی در این پژوهش ساخت شرکت پایا و به صورت دو جزئی متشکل از رزین و سخت کننده با نسبت اختلاط ۳ به ۱ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط می‌شوند. تنش کششی قابل تحمل چسب ۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی کششی آن ٪۳/۶ می‌باشد. مشخصات ترکیب چسب مذکور براساس کاتالوگ کارخانه سازنده و از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد **ASTM D638** [۵۵] به‌دست آمده‌اند. همچنین الیاف کربن مورد استفاده از نوع یک‌جهته **(CFRP)** ساخت شرکت **Quantum** انگلستان با ضخامت اسمی مؤثر $t = 0.131$ **mm** برای هر لایه، ضریب ارتجاعی ۲۳۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۳۴۵۰ مگاپاسکال می‌باشد که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور طولی ستون (دورپیچ محیطی کامل) و با هم‌پوشانی ۱۰۰ میلی‌متری توسط رزین اپوکسی روی نمونه‌ها چسبانده شدند.

لوله‌های کامپوزیتی **GRP** ساخت کارخانه فراسان شیراز[1] می‌باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می‌شوند. این لوله‌ها برحسب فشار داخلی که تحمل می‌کنند، دسته‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از لوله‌های **GRP** با تحمل فشار داخلی ۶۱ بار استفاده گردید. مشخصات لوله‌های **GRP** براساس استاندارد **ASTM D2996-98** [۵۴] در جدول ۱ داده شده‌اند. به‌منظور انجام آزمایش‌های این تحقیق از لوله‌های **GRP** به طول ۶۰۰، قطر داخلی ۱۵۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شد.

جدول ۱- خواص مکانیکی دورپیچ CFRP وغلاف GRP مصرفی[۲۴]

Table 1 – Mechanical properties of the CFRP wraps and GRP shells used [24]

مشخصات کامپوزیت	دورپیچ **CFRP**	لوله **GRP**
ضخامت **(mm)**	۰/۱۶۶	۸/۰
چگالی **(kg/m^3)**	۱۹۰۰	۱۸۰۰
وزن در واحد سطح **(g/m^2)**	۳۰۰	------
وزن در واحد طول **(g/m)**	------	۶۷۸۶
تنش کشش **(MPa)**	۴۹۰۰	۷۵
ضریب ارتجاعی استاتیک **(GPa)**	۲۳۰	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۴
کرنش نهایی (٪)	۲/۵	۱/۳

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش‌های اولیه

به‌منظور تعیین مقاومت فشاری بتن مصرفی در ساخت ستون‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب با قطر داخلی و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر طبق توصیه **ACI 211 [۵۶]** تهیه و پس از عمل‌آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها به عمل آمد. هم‌چنین برای افزایش مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان میزان ۰/۲ (بیست درصد) و اسلامپ بتن در هنگام ساخت نمونه‌ها ۱۲۰ میلی‌متر بود.

جدول ۲- جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی در ساخت ستون‌ها (kg/m^3)

Table 2 – Concrete mix design details used for column construction (kg/m³)

سیمان نوع ۲	آب	شن	ماسه	w/c
۵۵۰	۱۱۱/۵	۹۳۰	۷۲۰	۰/۲

جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی در ساخت نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جدول ۳ ارائه گردیده است. میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای بتن ۶۳/۱ مگاپاسکال بود.

جدول ۳- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد در سن ۲۸ روزه (MPa)

Table 3 – Compressive strength test results for standard cylindrical specimens at 28 days (MPa)

سیمان	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین
نوع۲ رامهرمز	۶۰/۵	۶۴/۵	۶۴/۳	۶۳/۱

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها

تعداد ۱۸ عدد ستون با هندسه مشابه ستون‌های آزمایش شده توسط ساجدی و شفیعی‌نیا**[۵۲-۵۱]** ساخته و آزمایش شدند. ارتفاع ستون‌ها ۶۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر با مقطع دایره‌ای بوده، که نسبت قطر به ارتفاع نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش ٪۲۵، در حالی‌که این مقدار جهت نمونه‌های واقعی ٪۲۰ می‌باشد تهیه و ساخته شدند. برای تسلیح طولی نمونه‌ها از ۶ عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۲ میلی‌متر **(Φ12)** با مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شد که نشان‌دهنده درصد آرماتور طولی برابر با ۱/۴ درصد سطح مقطع ناخالص ستون **(A_g)** است. تسلیح عرضی شامل دورپیچ با میلگرد ساده قطر ۶ میلی‌متر **(Φ6)** و گام ۱۰۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است که مقدار و گام آرماتور عرضی به‌کاررفته الزامات شکل‌پذیری و محصورکنندگی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای جدید (نظیر **ACI 318**) را تأمین نمی‌کند؛ این انتخاب به‌صورت هدفمند جهت شبیه‌سازی ستون‌های موجودِ آسیب‌پذیر با جزئیات آرماتوربندی ضعیف و ارزیابی توانمندی غلاف **GRP** و دورپیچ **CFRP** در جبران این کاستی صورت گرفته است. و در انتها ستون‌ها تحت بار با خروج از مرکزیت صفر،۲۰ و ۵۰ میلی‌متر به دلیل بارگذاری در داخل و خارج از هسته مرکزی مقطع تحت آزمایش قرار گرفتند. به این منظور ستون‌ها به سه‌گروه ۶ تایی تقسیم گردیده، و هرگروه شامل شش ستون با خروج از مرکزیت صفر، و شش ستون با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر معادل ۰/۱۳۳ قطر ستون و شش ستون با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر معادل ۰/۳۳۳ قطر ستون بود، که به‌ترتیب اولین ستون فاقد لایه دورپیچ تقویتی، دومین ستون یک لایه دورپیچ و سومین ستون دو لایه تقویتی دورپیچ، چهارمین ستون با غلاف **GRP** تنها و پنجمین ستون با غلاف و یک لایه دورپیچ و ششمین ستون با غلاف و دو لایه دورپیچ شده بودند. ستون‌ها براساس اجزای سازنده نام‌گذاری شدند. به‌عنوان مثال برای عمومیت ستون‌ها از حرف **(H)**، ستون‌های دارای غلاف**GRP** حرف**(G)** و ستون‌های دارای دورپیچ حرف**(F)** استفاده شد. عدد پس از حرف **F** نشانگر تعداد لایه‌هایدورپیچ است. در جدول ۴ مشخصات ستون‌ها ارائه گردیده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۴- مشخصات ستون‌های آزمایشگاهی تحقیق

Table 4 – Specifications of the experimental columns in this study

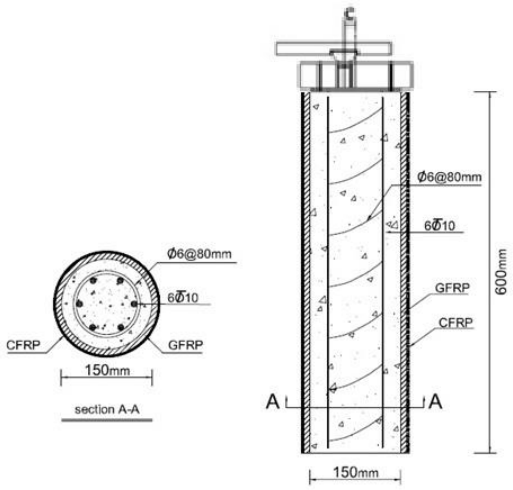
نام نمونه	خروج از مرکزیت (mm)	غلاف	دورپیچ	تعداد لایه دورپیچ	نام نمونه	خروج از مرکزیت (mm)	غلاف	دورپیچ	تعداد لایه دورپیچ
H-0	۰	ندارد	ندارد	۰	**GH-0**	ه	دارد	ندارد	۰
H-20	۲۰	ندارد	ندارد	۰	**GH-20**	۲۰	دارد	ندارد	۰
H-50	۵۰	ندارد	ندارد	۰	**GH-50**	۵۰	دارد	ندارد	۰
HF1-0	۰	ندارد	دارد	۱	**GHF1-0**	۰	دارد	دارد	۱
HF1-20	۲۰	ندارد	دارد	۱	**GHF1-20**	۲۰	دارد	دارد	۱
HF1-50	۵۰	ندارد	دارد	۱	**GHF1-50**	۵۰	دارد	دارد	۱
HF2-0	۰	ندارد	دارد	۲	**GHF2-0**	۰	دارد	دارد	۲
HF2-20	۲۰	ندارد	دارد	۲	**GHF2-20**	۲۰	دارد	دارد	۲
HF2-50	۵۰	ندارد	دارد	۲	**GHF2-50**	۵۰	دارد	دارد	۲

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

برای تسلیح طولی نمونه‌ها از ۶ عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۲ میلی‌متر **(Φ12)** با مقاومت تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال استفاده شد که نشان‌دهنده درصد آرماتور طولی برابر با ۱/۴ درصد سطح مقطع ناخالص ستون **(A_g)** است. تسلیح عرضی شامل دورپیچ با میلگرد ساده قطر ۶ میلی‌متر **(Φ6)** و گام ۱۰۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است که مقدار و گام آرماتور عرضی به‌کاررفته الزامات شکل‌پذیری و محصورکنندگی آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای جدید (نظیر **ACI 318** را تأمین نمی‌کند؛ این انتخاب به‌صورت هدفمند جهت شبیه‌سازی ستون‌های موجودِ آسیب‌پذیر با جزئیات آرماتوربندی ضعیف و ارزیابی توانمندی غلاف و دورپیچ در جبران این کاستی صورت گرفته است.نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل تعداد ۱۸ عدد ستون بتنی با مقطع دایره‌ای به‌ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر هستند. هم‌چنین سه نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شد که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش‌ها، استفاده شوند. میزان میلگرد طولی استفاده شده در همه ستون‌ها برابر ٪ ۲/۷ سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۰ میلی‌متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش، این میلگردها در فاصله ۲۰ میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند، بنابراین طول در نظر گرفته شده برای میلگردهای طولی ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد.

هم‌چنین در هر شبکه، میلگرد مارپیچ با گام ۸۰ و به قطر ۶ میلی‌متر استفاده گردید؛ فاصله خاموت‌ها کمتر از حداقل الزامات آیین‌نامه‌ای برای ستون‌های تحت بار محوری-خمشی در نظر گرفته شد تا اثر محصورسازی خارجی ناشی از غلاف و دورپیچ به‌طور برجسته‌تری مورد مطالعه قرار گیرد. پوشش بتن روی میلگردها به مقدار ۲۵ میلی‌متر لحاظ شد. برای تأمین پوشش مد نظر برای میلگردهای طولی و عرضی، از فاصله‌انداز استفاده گردید. تنش تسلیم آرماتورها با استفاده از آزمایش کشش میلگرد تعیین و برای آرماتورهای طولی و عرضی به‌ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال به دست آمد، که در شکل ۱ مقاطع عرضی و طولی ستون، هم‌چنین نحوه اعمال بار نقطه‌ای با خروج از مرکزیت نشان داده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT



شکل۱- مقاطع عرضی و طولی ستون‌های تحقیق

Figure 1 – Cross-sections and longitudinal sections of the columns investigated

سپس سطح داخلی قالب‌ها به منظور جداسازی آسان قالب از سطح بتن، به روغن آغشته گشته و قفسه میلگردها در قالب قرار داده شدند. مرحله بعدی ساخت، تهیه ۹ عدد لوله غلاف و ۹ عدد لوله پلی وینیل کراید برای قالب ستون‌های بدون غلاف با مقطع دایره‌ای بود. پس از باز کردن قالب‌ها، ستون‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار گرفتند و پس از عمل‌آوری، ستون‌ها با مصالح دورپیچ، دورپیچی شدند. به منظور آماده‌سازی ستون‌های بتنی برای نصب لایه‌های دورپیچ قبل از استفاده از چسب اپوکسی، ابتدا سطح بیرونی ستون‌ها به طور کامل صاف، تمیز و خشک گردید.چسب اپوکسی مصرفی دوجزئی و متشکل از رزین و سخت‌کننده بوده، که به ترتیب با نسبت ۳ به ۱ ترکیب و به‌مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط گردید، و سپس یک لایه نازک از چسب روی سطح استوانه بتنی مالیده شد و لایه دورپیچ با دقت به دور ستون پیچیده شد. لبه‌های انتهایی دورپیچ جهت اطمینان از عدم جداشدگی، به میزان ۱۰۰ میلی‌متر همپوشانی شدند. برای ستون‌هایی که دارای دو لایه دورپیچ بودند، به مدت ۲ ساعت پس از نصب لایه اول، لایه دوم دورپیچ گردید. به‌منظور عمل‌آوری چسب اپوکسی، ستون‌ها به مدت ۷ روز در دمای محیط نگهداری شدند. برای اندازه‌گیری تغییرمکان نمونه‌ها در حین انجام آزمایش مقاومت فشاری ستون‌ها و بررسی نحوه رفتار ستون‌ها و کرنش و تغییر طول نمونه‌ها از جابجایی‌سنج[1] استفاده شد.

۳-۴- آزمایش ستون‌ها

آزمایش ستون‌های بتنی در تحقیق حاضر، پس از ساخت تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلونیوتن در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان آزمایش شدند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییرمکان و با نرخ $\frac{KN}{s}$ ۱۰ بارگذاری انجام شد[۵۷]. به منظور تعیین تغییر مکان طولی ستون‌ها دو عدد جابجایی‌سنج در دو طرف ستون‌ها نصب شد. اطلاعات مربوط به تغییر مکان ستون با استفاده از دو کانال دیتالاگر الکترونیکی[2] متصل به کامپیوتر ثبت شد. هم‌چنین به‌منظور تعیین نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰۰ کیلونیوتنی به

[1] Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

[2] Electronic data-logger

ACCEPTED MANUSCRIPT

طور خودکار ثبت گردید. در هنگام قرار گرفتن ستون‌ها در دستگاه دقت کافی جهت اطمینان از اینکه ستون‌ها در مرکز جک قرار گرفته باشند، انجام شد. در شکل ۲ نحوه نصب دستگاه آزمایش و قرارگیری و بارگذاری نمایش داده شده است.



ب- نحوه قرارگیری ستون‌بتنی در جک بتن شکن **الف- جک بتن‌شکن و دیتالاگر**

شکل۲- آماده‌سازی و نحوه قرارگیری ستون‌بتنی در جک بتن‌شکن برای اعمال بار خارج از مرکز

Figure 2 – Preparation and positioning of the concrete column in the testing machine for the application of eccentric loading

a) Testing machine and data logger; (b) Positioning of the concrete column in the testing machine)

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- ظرفیت نهایی ستون‌ها

ابتدا سه نمونه مرجع آزمایش شدند. بار محوری با نرخ بارگذاری **۱۰ kN/s**، به صورت یکنواخت افزایش یافت تا اینکه ستون‌ها با خرد شدن بتن شکسته شدند. این نرخ بارگذاری معادل **۰/۲۳ MP/s** است. نرخ بارگذاری استاندارد **ASTM C39** برای مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی استوانه‌ای در محدوده **MP/s** (۰/۳۴-۰/۱۴) است، بنابراین، نرخ بارگذاری انتخاب شده در محدوده استاندارد **ASTM C39** قرار دارد. ظرفیت و تغییرمکان متوسط نهایی(این مقدار متناظر با لحظه افت بار به میزان ۱۵ درصد از بار اوج **$(0.85P_u)$**در شاخه نزولی نمودار بار-تغییرمکان محاسبه شده است) ستون‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۵- ظرفیت و تغییرمکان نهایی ستون‌های تحقیق

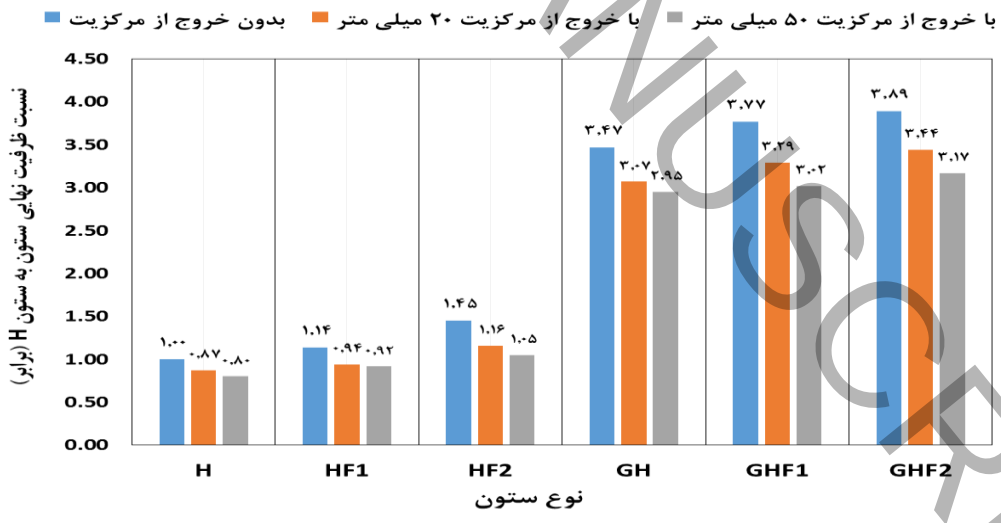
Table 5 – Ultimate capacity and displacement of the columns in this study

ردیف	نام ستون	ظرفیت نهایی (ton)	تغییر مکان متوسط نهایی (mm)	ردیف	نام ستون	ظرفیت نهایی (ton)	تغییر مکان متوسط نهایی (mm)
۱	**H-0**	۶۶/۸۲	۵/۴۰۳	۱۰	**GH-20**	۲۰۵/۲۹	۲۱/۵۵۱
۲	**HF1-0**	۷۵/۹	۸/۶۴۵	۱۱	**GHF1-20**	۲۲۰/۱۷	۲۲/۱۹۷
۳	**HF2-0**	۹۶/۶۶	۱۲/۹۶۸	۱۲	**GHF2-20**	۲۳۰/۱۴	۲۲/۶۱۹
۴	**GH-0**	۲۳۱/۶۳	۱۹/۵۸۰	۱۳	**H-50**	۵۳/۷۷	۱۴/۱۱۸
۵	**GHF1-0**	۲۵۲/۲۱	۲۰/۵۵۹	۱۴	**HF1-50**	۶۱/۵۹	۱۴/۴۴۳
۶	**GHF2-0**	۲۶۰/۲۶	۲۱/۱۴۶	۱۵	**HF2-50**	۶۹/۶۴	۱۵/۱۳۶
۷	**H-20**	۵۷/۸	۱۰/۰۸۰	۱۶	**GH-50**	۱۹۶/۹۷	۲۰/۸۰۰
۸	**HF1-20**	۶۲/۹۱	۱۱/۰۳۴	۱۷	**GHF1-50**	۲۰۱/۶	۲۳/۳۷۰
۹	**HF2-20**	۷۷/۶۸	۱۳/۲۴۱	۱۸	**GHF2-50**	۲۱۱/۷۷	۲۳/۸۳۷

ACCEPTED MANUSCRIPT

الیاف کربن مصرفی از نوع یک‌جهته ساخت شرکت **Quantum** انگلستان با ضخامت اسمی مؤثر $t = 0.131$ mm برای هر لایه، مدول الاستیسیته ۲۳۰ گیگاپاسکال و مقاومت کششی ۳۴۵۰ مگاپاسکال می‌باشد که با زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور طولی ستون (دورپیچ محیطی کامل) و با هم‌پوشانی ۱۰۰ میلی‌متری توسط رزین اپوکسی روی نمونه‌ها چسبانده شدند.

همان‌گونه که در جدول ۵ و شکل ۳ مشهود است، در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت صفر و فاقد غلاف استفاده از یک لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب باعث افزایش ٪۱۳/۶ و ٪۴۴/۶ شد، و در ستون‌های دارای غلاف استفاده از یک لایه و دولایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ٪۹ و ٪۱۲/۳ در ظرفیت فشاری ستون گردید. لذا تایید می شود که استفاده از دورپیچ برای محصور کردن ستون‌های بتنی، می‌تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی ستون‌های بتن‌مسلح داشته باشد. به‌علاوه استفاده از دورپیچ در ستون‌های دارای غلاف به علت وجود اثر محصوریت زیاد این غلاف، تاثیر قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند و نیز اقتصادی نبوده و توصیه نمی‌شود. در حالت مشابه در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر و فاقد غلاف استفاده از یک و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ٪۸/۸ و ٪۳۴ شد. در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر و دارای غلاف استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ٪۷ و ٪۱۲/۱، در ظرفیت فشاری ستون گردید. در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر و فاقد غلاف استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌ترتیب سبب افزایش ظرفیت فشاری ٪۱۴/۵ و ٪۲۹/۵ شد. و در ستون‌های دارای غلاف به‌ترتیب ٪۳ و ٪۷/۵ در ظرفیت فشاری ستون شد. از سوی دیگر همان‌گونه که در شکل (۳) دیده می‌شود، استفاده از غلاف در مقایسه با دورپیچ بسیار موثرتر است، به طوری‌که استفاده از غلاف در حالت خروج از مرکزیت بر ظرفیت باربری فشاری نهایی بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۵۰ و ۳/۳۶ و ۲/۷ برابر است، و به‌طور میانگین باعث افزایش ۳/۱۸ برابری ظرفیت فشاری ستون‌ها شده است، در حالی‌که با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر اثر غلاف بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۶۰ و ۳/۵۰ و ۳ برابر بود که به‌طور میانگین باعث افزایش ۳/۳۳ برابری ظرفیت فشاری شد. این مقادیر در حالت مشابه با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر اثر غلاف بر ظرفیت باربری فشاری نهایی بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۷۰ و ۳/۳۰ و ۳/۱۰ برابر بود و دارای متوسط ۳/۳۳ برابر است و می‌توان بیان نمود که نمونه‌های ستون بتنی با غلاف به‌طور میانگین سبب افزایش ۳/۱۳ برابری ظرفیت باربری فشاری نهایی شدند.



شکل۳- نسبت ظرفیت نهایی ستون به ستون H

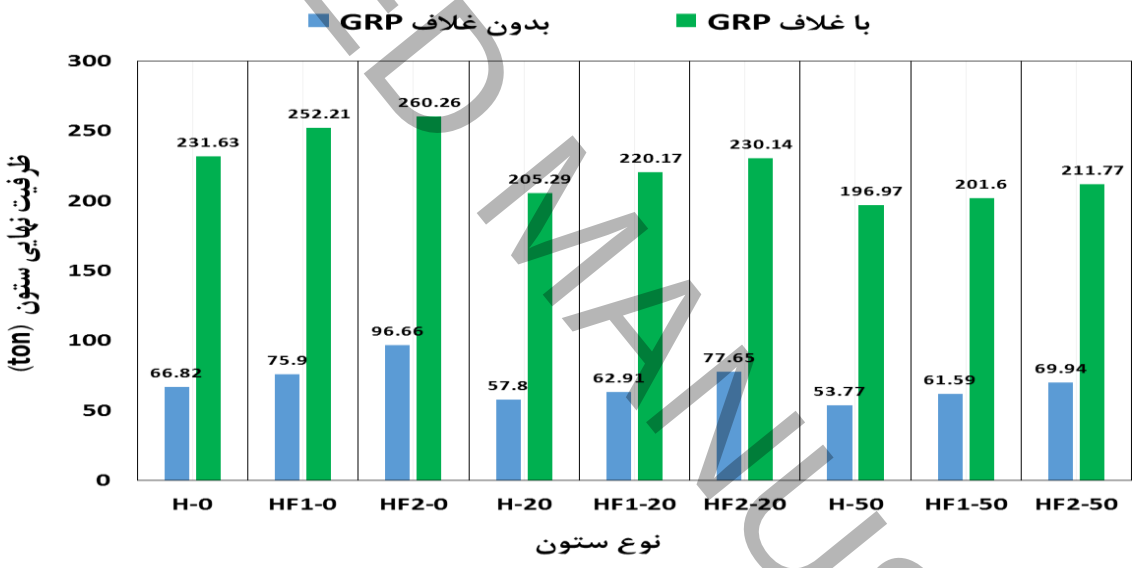
Figure 3 – Ratio of the column's ultimate capacity to that of column H

در حالی‌که با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر اثر غلاف **GRP** بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ **CFRP** به‌ترتیب ۳/۶۰ و ۳/۵۰ و ۳ برابر بود که به‌طور میانگین باعث افزایش ۳/۳۶ برابری ظرفیت فشاری شد. این مقادیر در حالت مشابه با خروج

ACCEPTED MANUSCRIPT

از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر اثر غلاف بر ظرفیت باربری فشاری نهایی بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۷۰ و ۳/۳۰ و ۳ برابر بود و دارای متوسط ۳/۳۳ برابر است و می‌توان بیان نمود که نمونه‌های ستون بتنی با غلاف به‌طور میانگین سبب افزایش ۳/۱۳ برابری ظرفیت باربری فشاری نهایی شدند.

افزودن یک‌لایه و دولایه دورپیچ در ستون‌های بتنی فاقد غلاف و با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر به‌ترتیب سبب افزایش ٪۸/۸ و ٪۳۶/۲ ظرفیت باربری فشاری شد، در حالیکه در ستون‌های بتنی دارای غلاف این مقادیر افزایش به‌صورت ٪۷/۲ و ٪۱۲ بود. هم‌چنین با افزودن یک‌لایه و دولایه دورپیچ در ستون‌های بتنی فاقد غلاف با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر به‌ترتیب سبب افزایش ٪۱۴/۵ و ٪۲۹/۵ در ظرفیت باربری فشاری نهایی شد، که در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر دارای غلاف به‌ترتیب باعث افزایش ٪۲/۳ و ٪۷/۵ ظرفیت باربری فشاری گردید (شکل۴). در ادامه می‌توان بیان نمود محصورسازی با دورپیچ باعث افزایش شکل‌پذیری بیشتر به‌جای ظرفیت باربری ستون‌های بتن‌مسلح با بتن پرمقاومت می‌شود که این افزایش تحت بار خالص، ٪۱۶۰ و تحت بار با خروج از مرکزیت۲۰ و ۵۰ میلی‌متر، به‌ترتیب ٪۱۱۰ و ٪۱۰۴متغیر بود. دلیل احتمالی این نتیجه را می‌توان کمتر بودن میزان مقاومت ایجاد شده از سوی لایه محصور کننده نسبت به مقاومت فشاری بتن با مقاومت بالا دانست و اینکه با افزایش خروج از مرکزیت، ظرفیت باربری و تاثیر تعداد لایه‌های دورپیچ کاهش می‌یابد. هم‌چنین اثر استفاده از یک‌لایه یا دو-لایه دورپیچ با و بدون غلاف تنها و نیز غلاف و یک‌لایه و دولایه دورپیچ در شکل ۴ نشان داده شده‌اند.



شکل۴- تاثیر استفاده از غلاف GRP بر ظرفیت نهایی ستون‌های تحقیق

Figure 4 – Effect of using a GRP jacket on the ultimate capacity of the columns investigated

۴-۲- منحنی بار-تغییرمکان ستون‌ها

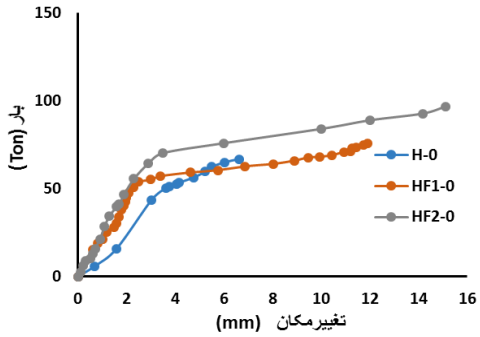
به‌منظور مقایسه رفتاری ستون‌ها، منحنی بار- تغییرمکان در ستون‌های دارای غلاف و بدون غلاف در اشکال ۵ و ۶ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن‌مسلح با مصالح دورپیچ، تغییرمکان محوری آنها افزایش یافته است. هم‌چنین میزان تحمل فشار در این ستون‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای رشد داشته است. بررسی دقیق‌تر منحنی‌های بار-تغییرمکان ستون‌های فاقد غلاف نشان می‌دهد که این منحنی‌ها از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل شده‌اند. مشهود است که شیب هر دو منحنی در ناحیه ابتدایی نمودار تقریبا مساوی بوده که بیانگر سختی یکسان نمونه‌ها در مراحل اولیه بارگذاری است که دلیل احتمالی این نتیجه را می‌توان ناشی از استفاده از بتن با مقاومت بالا دانست.

ACCEPTED MANUSCRIPT

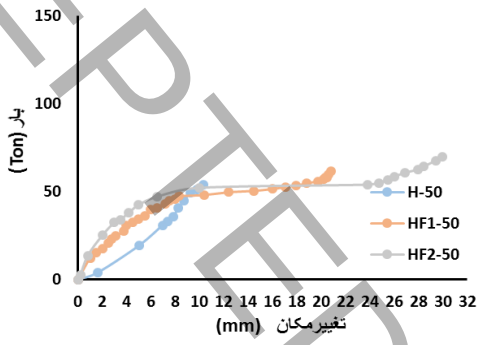
در نمونه محصور شده با دورپیچ، پس از فعال شدن محصورشدگی، منحنی با شیب بیشتری نسبت به نمونه بدون دورپیچ ادامه یافته و به نقطه حداکثر خود می‌رسد. سپس به صورت تقریبا افقی جلو رفته که بیانگر رفتار خمیری کامل و نیز محصورشدگی مؤثر و کافی برای این نمونه‌ها می‌باشد.

تغییر رفتار ستون ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و شروع به‌کار دورپیچ و ادامه روند مقاومت تحت بارهای فشاری دارد. این رفتار بیانگر این است که محصورشدگی به میزان مؤثر در این نمونه تأمین نشده است. هم‌چنین منحنی‌های بار- تغییرمکان ستون‌های دارای غلاف از دو قسمت خطی و غیرخطی نرم‌شونده تشکیل شدند، ولی تغییر رفتار این نوع ستون‌ها تدریجی بوده که علت آن را می‌توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیشتر غلاف با ستون‌های بتنی دانست. پس مشهود است که دورپیچ نمودن ستون‌ها با دورپیچ باعث افزایش سختی ستون می‌شود که می‌توان علت آن را ایجاد محصوریت ناشی از دورپیچ بیان نمود.

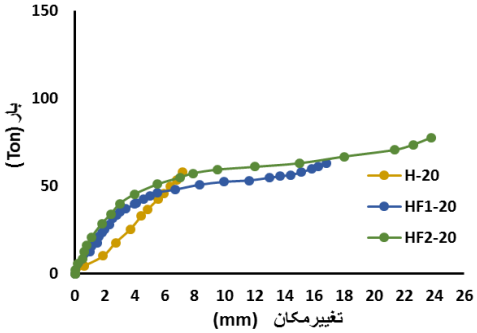
ACCEPTED MANUSCRIPT



الف- منحنی بار- تغییر مکان بدون خروج از مرکزیت

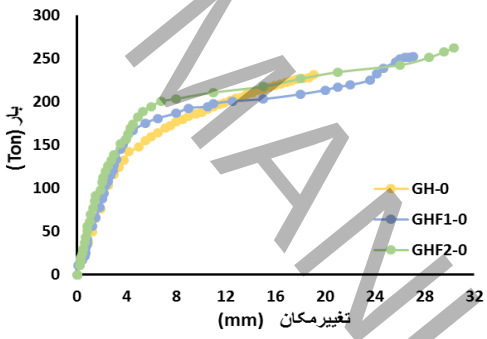


ج- منحنی بار – تغییرمکان با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر

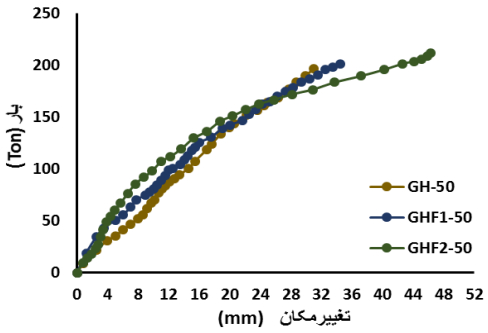


ب- منحنی بار- تغییر مکان با خروج از مرکزیت۲۰میلی‌متر

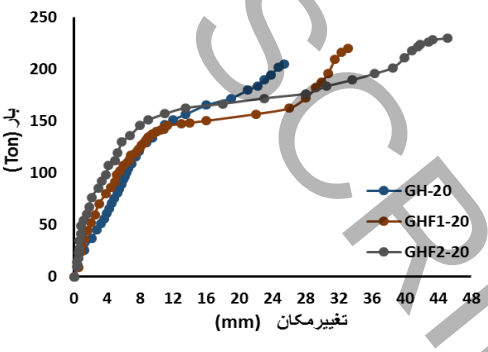
شکل۵- منحنی بار-تغییرمکان محوری ستون‌های فاقد غلاف GRP



الف- منحنی بار – تغییرمکان بدون خروج از مرکزیت



ج- منحنی بار – تغییرمکان با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر



ب- منحنی بار – تغییرمکان با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر

شکل۶- منحنی بار- تغییرمکان محوری ستون‌های دارای غلاف GRP

Figure 5 – Axial load-displacement curves for columns without a GRP jacket
a) Load-displacement curve without eccentricity)

ACCEPTED MANUSCRIPT

b) Load-displacement curve with an eccentricity of 20 mm)
c) Load-displacement curve with an eccentricity of 50 mm)

Figure 6 – Axial load-displacement curves for columns with a GRP jacket
a) Load-displacement curve without eccentricity)
b) Load-displacement curve with an eccentricity of 20 mm)
c) Load-displacement curve with an eccentricity of 50 mm)

۴-۳- بررسی نحوه گسیختگی ستون‌ها

نحوه گسیختگی ستون‌ها در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. در ستون‌های فاقد غلاف اکثرا گسیختگی به علت کمانش میلگردهای ستون، به صورت موضعی و موازی با بار محوری اتفاق افتاد. در این ستون‌ها گسیختگی در یکی از دو انتها رخ داد که علت آن را می‌توان محصوریت کمتر هسته بتنی در دو انتهای ستون از سوی شبکه میلگردها و نیز وجود ستون‌های بتن‌مسلح ساخته شده از بتن مقاومت بالا دانست، که رفتاری تردتر نسبت به ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی دارند. در ستون‌های فاقد هرگونه محصوریت، ایجاد ترک‌های فشاری در بتن‌های بالا و پایین ستون و در نهایت جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت‌ها و کمانش میلگردهای طولی، سبب گسیخته شدن در ستون‌های **HF1** با یک‌لایه دورپیچ شد، که گسیختگی در بالای ستون و به‌علت خرد شدن بتن و در نهایت پارگی دورپیچ اتفاق افتاد. در این ستون‌ها برخلاف ستون‌های قبلی، محصوریت ناشی از دورپیچ باعث خردشدگی کمتر بتن و گسیخته‌نشدن شبکه میلگردها و افزایش ظرفیت باربری ستون گردید. گسیختگی و تخریب در ستون **HF2** مشابه ستون محصور شده با یک‌لایه دورپیچ بود، با این تفاوت که گسیختگی و پارگی دورپیچ در انتهای پایین ستون‌ها اتفاق افتاد. به طور کلی در ستون‌های فاقد غلاف، گسیختگی به‌صورت تدریجی و نرم اتفاق افتاد. در این ستون‌ها با افزایش فشار و شروع ترک‌های فشاری به‌تدریج انبساط جانبی در بتن ستون‌ها اتفاق افتاد. در ستون‌های دارای دورپیچ، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زود هنگام گردید و با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورق دورپیچ دچار پارگی شده و در نهایت ستون گسیخته شد. در ستون‌های دارای غلاف نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های فاقد غلاف بود. در ستون **GH** گسیختگی به‌علت پارگی میلگرد مارپیچ در میانه ستون و کمانش میلگردهای طولی در این محل و در نهایت گسیختگی غلاف به‌صورت موضعی اتفاق افتاد. در ستون‌های **GHF1** گسیختگی مشابه ستون **GH** بود، با این تفاوت که محصوریت بیشتر ناشی از اعمال لایه دورپیچ باعث گردید تا نمونه ستون کرنش بیشتری تحمل کند، و در یک سوم طول میانی ستون با وقوع کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ گسیخته شود. در ستون‌های **GHF2** نیز گسیختگی مشابه ستون‌های قبلی بود، با این تفاوت که محصوریت بیش‌تر ناشی از اعمال دولایه دورپیچ باعث شد تا گسیختگی به صورت کلی در سرتاسر طول ستون با وقوع کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ اتفاق افتد. به‌طور کلی علت گسیختگی کامل و آنی ستون‌های دارای غلاف را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ایجاد شده ناشی از غلاف دانست؛ این میزان محصوریت باعث رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود و هم‌چنین کمانش میلگردهای طولی و در نهایت گسیختگی ستون شد. گسیختگی و تخریب در ستون‌های **HF2** مشابه ستون محصورشده با یک لایه دورپیچ بود، با این تفاوت که گسیختگی و پارگی دورپیچ در انتهای پایین ستون‌ها اتفاق افتاد. به طور کلی در ستون‌های فاقد غلاف، گسیختگی به صورت تدریجی و نرم اتفاق افتاد. در این ستون‌ها با افزایش فشار و شروع ترک‌های فشاری به‌تدریج انبساط جانبی در بتن ستون رخ داد. در ستون‌های دارای دورپیچ، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زودهنگام گردید و در نهایت با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورق دورپیچ دچار پارگی و گسیختگی ستون شد. در ستون‌های دارای غلاف نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های فاقد غلاف بوده است در بارگذاری‌های با خروج از مرکزیت $(e/D = 0.133)$ و $(e/D = 0.333)$، به دلیل توزیع غیریکنواخت تنش در مقطع، ناحیه فشاری تحت گرادیان تنش فشاری بالایی قرار می‌گیرد. ترک‌های فشاری ناشی از تنش‌های کششی جانبیِ متعامد

ACCEPTED MANUSCRIPT

با راستای فشار، در لایه پوشش بتن (پوسته) پدیدار شده و با افزایش بار به سمت خردشدگی موضعی پیش می‌رود. در ستون‌های تقویت‌شده با غلاف، غلاف صلب به عنوان مانعی مؤثر در برابر بیرون‌زدگی بتن خردشده عمل نموده و با مهار تغییرشکل‌های جانبی، رفتار بتن پرمقاومت را از حالت ترد به شکل‌پذیر تغییر می‌دهد.



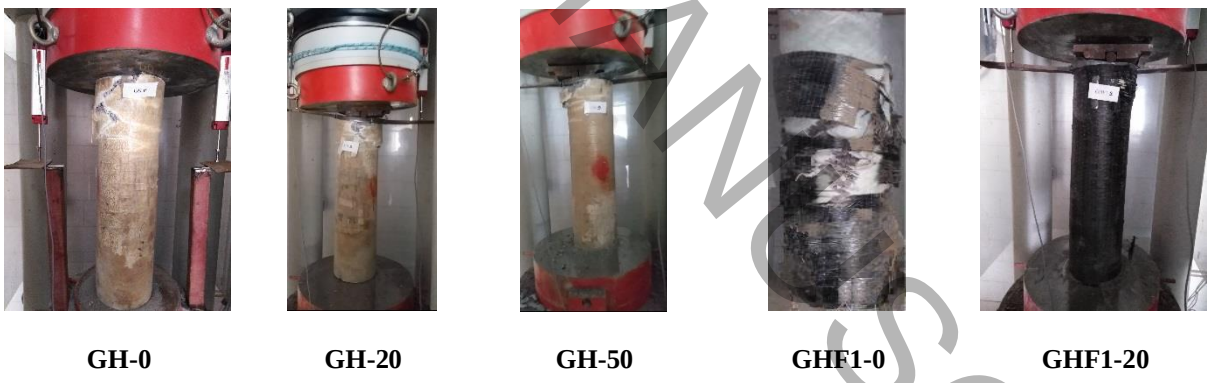
H-0 H-20 H-50 HF1-0 HF1-20



HF1-50 HF2-0 HF2-20 HF2-50

شکل۷- نمایش گسیختگی نهایی ستون‌های فاقد غلاف GRP پس از بارگذاری

Figure 7 – Ultimate failure of columns without a GRP jacket after loading



GH-0 GH-20 GH-50 GHF1-0 GHF1-20



GHF1-50 GHF2-0 GHF2-20 GHF2-50

شکل۸- نمایش گسیختگی نهایی ستون‌های دارای غلاف GRP پس از بارگذاری

Figure 8 – Ultimate failure of columns with a GRP jacket after loading

ACCEPTED MANUSCRIPT

۴-۴- بررسی ضریب شکل‌پذیری ستون‌ها

شکل‌پذیری در سازه به عنوان خاصیت ذاتی اعضای سازه، نقشی تعیین‌کننده در رفتار مصالح دارد؛ این خاصیت در اعضا باعث می‌شود تا تغییرشکل‌های بزرگ قبل از شکست کامل در مصالح قابل نمایش باشد. عوامل زیادی در ضریب شکل‌پذیری سازه‌های بتنی نقش دارند که از آن جمله می‌توان به مقاومت فشاری بتن، مساحت فولاد کششی و مساحت فولاد فشاری اشاره کرد[۲۷]. برای مقایسه ضریب شکل‌پذیری ستون‌های بررسی شده در این تحقیق، از ضریب شکل‌پذیری که از نسبت تغییر مکان نهایی به تغییر مکان ارتجاعی حاصل می شود [۵۳]، استفاده شده است.

بر این اساس، تغییرمکان نهایی (Δu)، تا نقطه گسیختگی برای ستون‌های آزمایش شده با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در اشکال ۵ و ۶ محاسبه شده و نتایج آن به‌منظور مقایسه بین نمونه‌های مختلف، در جدول ۶ ارائه گردیده است. طبق جدول ۶ مشهود است که در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت صفر و فاقد غلاف استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ برای محصور کردن ستون‌های بتنی به‌ترتیب باعث افزایش در ضریب شکل‌پذیری به میزان ۲ و ۲/۵ برابر شد. بنابراین می‌توان بیان نمود که استفاده از غلاف تنها برای محصور کردن ستون بتنی، سبب افزایش ۱/۵ برابر در ضریب شکل‌پذیری می‌گردد (جدول۶). منظور از تغییرمکان نهایی($\boldsymbol{\Delta_u}$) ، تغییرمکان محوری متناظر با افت بار محوری به میزان ۱۵ درصد از ظرفیت باربری اوج ($\boldsymbol{0.85P_u}$) در شاخه نزولی منحنی بار-تغییرمکان نمونه‌های آزمایشگاهی می‌باشد

در ستون‌های فاقد غلاف با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌ترتیب باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری محوری به‌میزان ۲ و ۳ برابر نسبت به ستون‌های فاقد دورپیچ و بدون خروج از مرکزیت شده است. در حالت مشابه (فاقد غلاف) در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌ترتیب باعث افزایش ضریب شکل‌پذیری محوری به‌میزان ۱/۲۷ و ۱/۸۳ برابری گردید. ضریب شکل‌پذیری جابجایی به‌صورت نسبت تغییرمکان نهایی به تغییرمکان تسلیم معادل ($\mu = \Delta_u/\Delta_y$) محاسبه شد. بر این اساس، تعبیه غلاف GRP به‌تنهایی موجب افزایش میانگین ضریب شکل‌پذیری ستون‌ها تا ۳□۵ برابر نمونه بتن‌آرمه مرجع گردید. همچنین افزودن یک و دو لایه دورپیچ CFRP بر روی غلاف GRP تحت خروج از مرکزیت $e/D = 0.333$، به ترتیب شاخص شکل‌پذیری را ۱□۲۷ و ۱□۸۳ برابر نسبت به نمونه غلاف‌دار بدون دورپیچ ارتقا داد استفاده از لوله GRP علاوه بر ایجاد محصورشدگی جانبی مؤثر، هزینه قالب‌بندی موقت را حذف کرده و هزینه اولیه بتن‌ریزی را حدود ۱۵٪ کاهش داده است.

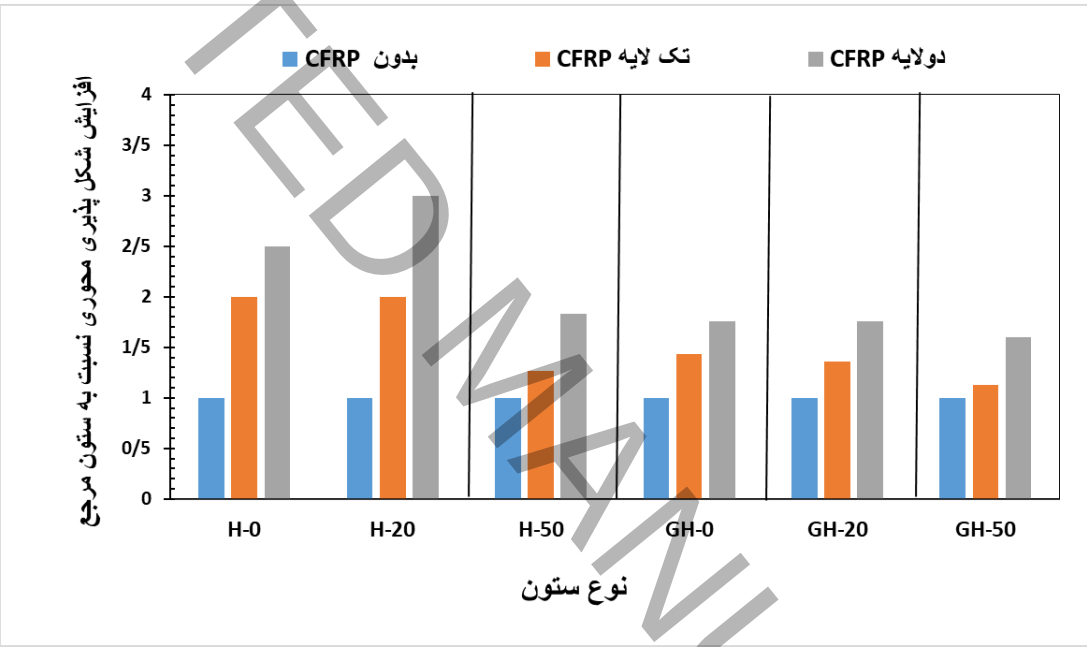
در نمونه‌های تقویت‌شده صرفاً با الیاف کربن (HF1 و HF2)، با وجود افزایش هزینه‌ها (به ترتیب 1.84 و 2.49 برابر ستون مرجع، افزایش باربری به مراتب کمتر بوده(1.44و 1.79 برابر) و شاخص راندمان (نسبت افزایش مقاومت» به «نسبت افزایش هزینه) اقتصادی کمتر از ۱ (0.78و 0.72ثبت شده است که نشان‌دهنده توجیه اقتصادی پایین دورپیچ کربن به تنهایی در این شرایط است.در مقابل، نمونه GH با غلاف GRP به تنهایی، توانسته است با افزایش 2.9 برابری هزینه، باربری را 4.72 برابر افزایش دهد و به بالاترین شاخص راندمان اقتصادی (2.26) دست یابد.نمونه‌های ترکیبی GHF1 و GHF2 بالاترین ظرفیت‌های باربری نهایی را (به ترتیب 5.19 و 5.43 برابر ستون مرجع فراهم کرده‌اند.با افزایش لایه‌های CFRP از یک به دو لایه در ستون غلاف‌دار (مقایسه GHF1 با GHF2)، شیب رشد باربری ملایم‌تر شده اما هزینه افزایش یافته است؛ بنابراین از منظر راندمان هزینه-مقاومت، نمونه GHF1 نسبت به GHF2 عملکرد بهینه‌تری را از حیث هزینه-فایده در میان سیستم‌های هیبریدی نشان می‌دهد(جدول ۷).

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول۶- نسبت ضریب شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت‌شده به ضریب شکل‌پذیری نمونه مرجع(μ/μ_{ref})

Table 6 – Ratio of the ductility factor of strengthened specimens to that of the reference specimen (μ/μ_{ref})

نام ستون	ضریب شکل‌پذیری	ضریب شکل‌پذیری ستون نسبت به ستون مرجع	نام ستون	ضریب شکل‌پذیری	ضریب شکل‌پذیری ستون نسبت به ستون مرجع
H-0	۲	۱	GH-0	۳	۱
H-20	۱	۱	GH-20	۲/۵	۱
H-50	۱/۸	۱	GH-50	۱/۵	۱
HF1-0	۴	۲	GHF1-0	۴/۳	۱/۴۳
HF1-20	۲	۲	GHF1-20	۳/۴	۱/۳۶
HF1-50	۲/۳	۱/۲۷	GHF1-50	۱/۷	۱/۱۳
HF2-0	۵	۲/۵	GHF2-0	۵/۳	۱/۷۶
HF2-20	۳	۳	GHF2-20	۴/۴	۱/۷۶
HF2-50	۳/۳	۱/۸۳	GHF2-50	۲/۴	۱/۶



شکل۹- نتایج شکل‌پذیری محوری ستون‌های تحقیق نسبت به ستون مرجع

Figure 9 – Axial ductility results for the columns investigated, relative to the reference column

جدول ۷- ارزیابی کارایی فنی-اقتصادی طرح‌های مختلف مقاوم‌سازی ستون‌ها

Table 7– Technical-economic performance evaluation of various column strengthening schemes

نام نمونه	هزینه اجراء (تومان)	طول غلاف (m)	هزینه غلاف (تومان)	دورپیچ (m^2)	هزینه دورپیچ (تومان)	هزینه ساخت ستون (تومان)	نسبت هزینه ساخت	نسبت مقاومت
H	۶۵۰۰۰	*	*	*	*	۶۵۰۰۰	۱/۱۸	۱/۲۸
HF1	۶۵۰۰۰	*	*	۰/۴	۳۶۰۰۰	۱۰۱۰۰۰	۱/۸۴	۱/۴۴
HF2	۶۵۰۰۰	*	*	۰/۸	۷۲۰۰۰	۱۳۷۰۰۰	۲/۴۹	۱/۷۹
GH	۵۵۰۰۰	۰/۶	۶۰۰۰۰	*	*	۱۱۵۰۰۰	۲/۰۹	۴/۷۲
GHF1	۵۵۰۰۰	۰/۶	۶۰۰۰۰	۰/۴	۳۶۰۰۰	۱۵۱۰۰۰	۲/۷۴	۵/۱۹
GHF2	۵۵۰۰۰	۰/۶	۶۰۰۰۰	۰/۸	۷۲۰۰۰	۱۸۷۰۰۰	۳/۴۰	۵/۴۳

ACCEPTED MANUSCRIPT

۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که غلاف مصرفی می‌تواند در اجرای ساختمان‌های نوساز استفاده شود، هم‌چنین الیاف پلیمری تقویتی **CFRP** می‌توانند به منظور افزایش ظرفیت ستون‌های بتنی موجود، استفاده شوند.

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- استفاده از غلاف به عنوان قالب و غلاف تقویتی ستون‌های بتن‌مسلح باعث افزایش ظرفیت باربری به طور قابل ملاحظه‌ای گردید، به گونه‌ای که ظرفیت در ستون‌های غلافدار نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، حداقل دو برابر بیشتر بوده است.

۲- تقویت ستون‌ها با دورپیچ سبب افزایش ظرفیت ستون‌ها می‌شود. به‌طور میانگین استفاده از یک‌لایه و دولایه دورپیچ در ستون-های فاقد غلاف به میزان ٪۱۴ و ٪۴۴ و در ستون‌های غلافدار به مقدار ٪۷/۲ و ٪۱۲ ظرفیت فشاری ستون افزایش می‌یابد؛ این نتیجه یعنی اینکه تاثیر تقویت دورپیچ بر ستون‌های دارای غلاف کمتر است.

۳- بررسی ستون‌های بتن‌مسلح در ابعاد اجرایی نشان می‌دهد کاربرد دورپیچ برای محصور کردن ستون‌ها، می‌تواند اثر خوبی در افزایش شکل‌پذیری و کاربرد غلاف نیز قادر به افزایش قابل توجه ظرفیت ستون‌های بتن‌مسلح است؛ این نتیجه را می‌توان ناشی از محصوریت کامل ستون‌ها توسط غلاف دانست.

۴- بررسی نحوه شکست ستون‌ها نشان داد که در ستون‌های فاقد غلاف عمدتا گسیختگی به صورت موضعی و به تدریج اتفاق افتاد، در حالی که در ستون‌های غلافدار، گسیختگی به طور کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در کل طول ستون واقع شد؛ علت آن را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ایجاد شده توسط غلاف دانست.

۵- با افزایش خروج از مرکزیت، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که میانگین کاهش ظرفیت تحت بار با خروج از مرکزیت‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر، در مقایسه با خروج از مرکزیت صفر به‌ترتیب ٪۱۵ و ٪۲۴ بوده است.

۶- ستون‌های بتن‌مسلح ساخته شده از بتن پرمقاومت، رفتار تردتری داشتند، بنابراین این ستون‌ها نیازمند تقویت برای افزایش شکل‌پذیری هستند.

۷- تایج ارزیابی نسبت مقاومت به هزینه نشان داد که غلاف نمونه **GH** به دلیل حذف هزینه قالب‌بندی و افزایش ۴/۷۲ برابری ظرفیت باربری، بالاترین راندمان اقتصادی را با شاخص ۲,۶۲ کسب کرده است؛ همچنین در میان سیستم‌های مرکب با باربری بالا، ترکیب غلاف با یک لایه دورپیچ نمونه **GHF1** با افزایش ۵/۱۹ برابری مقاومت و راندمان مطلوب ۱/۹۸، کارایی بهینه فنی-اقتصادی را ارائه می‌دهد.

مراجع

[1] Shahawy M., Mirmiran A., Beitelman T., Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns. Composites Part B: Engineering, Vol. 31, pp. 471-480, 2000.

[2] Wu, G., Lu, Z.T., Wu, Z.S., Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites, Construction and Building Materials, Vol. 20, pp. 134-148, 2006.

[3] Wong, Y.L., Yu, T., Teng, J.G., Dong, S.L., Behavior of FRP-confined concrete in annular section columns, Composites Part B: Engineering, Vol. 39, pp. 451-466, 2008.

[4] Jiang Sh.F., Ma, Sh.L., Wu, Zh,Q., Experimental study and theoretical analysis on slender concrete-filled CFRP–PVC tubular columns, Construction and Building Materials, Vol. 53, pp. 475-487, 2014.

[5] Pan. Y., Rui, G., Li, H., Tang, H., Xu, L., Study on stress-strain relation of concrete confined by CFRP under preload, Engineering Structures, Vol. 143, pp. 52-63, 2017.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[6] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A., Ozbebek, H., Investigating mix proportions of high strength self-compacting concrete by using Taguchi method, Construction and building materials, Vol. 23, pp. 694-702, 2009.

[7] Tokgoz, S., Dundar, C., Tanrikulu., Experimental behavior of steel fiber high strength reinforced concrete and composite columns, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 74, pp. 98-107, 2012.

[8] Dundar, C., Erturkmen, D., Tokgoz, S., Studies on carbon fiber polymer confined slender plain and steel fiber reinforced concrete columns, Engineering Structures, Vol. 102, pp. 31- 39, 2015.

[9] Mirmiran. A., Shahawy. M., Samaan. M., El Echary. H., Mastrapa. J.C., Pico. O., Effect of column parameters on FRP-confined concrete, journal of composites for construction, Vol. 2, pp. 4-175, 1998.

[10] Ozbakkaloglu, T., Axial Compressive Behavior of Square and Rectangular High- Strength Concrete-Filled FRP Casings, journal of composites for construction, Vol. 17, pp. 151-161, 2013.

[11] EL Maaddawy. T., EL Sayed. M., Abdel-Magid. B., The effects of cross-sectional shape and loading condition on performance of reinforced concrete members confined with Carbon Fiber-Reinforced Polymers, Materials and Design, Vol. 31, pp. 2330-2341, 2010.

[12] Ozbakkaloglu, T., Xie, T., Geopolymer concrete-filled FRP casings: Behavior of circular and square columns under axial compression, Composites Part B: Engineering, Vol. 96, pp. 215-230, 2016.

[13] Rahai, A.R., Sadeghian, P., Ehsani, M.R., Experimental Behavior of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Vol. 147, pp. 3-5, 2008.

[14] Almusallam, T.H., Behavior of normal and high-strength concrete cylinders confined with E-glass/epoxy composite laminates. Composites Part B: Engineering, Vol.38, pp. 629- 639, 2007.

[15] Vincent, T., Ozbakkaloglu, T., Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high- and ultra-high-strength concrete. Composites part B: Engineering, Vol. 50, pp. 413-428, 2013.

[16] Hadi M.N.S., Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns, Composite Structures, Vol.74, pp. 127-135, 2006.

[17] Hadi, M.N.S., Behavior of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading, Composites Structure; Vol.77, pp. 92-96, 2007.

[18] Hadi M.N.S., The behavior of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads, Composites Structure, Vol.78, pp. 560-566, 2007.

[19] Esfahani, M., Salehian, H., "Study of the behavior of reinforced concrete columns strengthen with CFRP wrapping under the effect of extra-axial force", 2nd Concrete and Development Conference, 2005.

[20] Hadi, M.N.S., Wang, W., Sheikh, M.N, "Axial compressive behavior of GFRP tube reinforced concrete columns, Construction and Building Materials, Vol.81, pp. 198-207, 2015.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[21] Xiao, J., Tresserras, J., Tam, V.W.Y., GFRP-casing confined RAC under axial and eccentric loading with and without expansive agent, Construction and Building Materials, Vol.73, pp. 575-585, 2014.

[22] Wang, W., Sheikh, M.N., Hadi, M.N.S., Gao, D., Chen, G., Behavior of concrete- encased concrete-filled FRP casing (CCFT) columns under axial compression, Engineering Structures, Vol.147, pp. 256-268, 2017.

[23] Ozbakkaloglu, T., Oehlers, D.J., Concrete filled square and rectangular FRP Casings under axial compression, Journal Composites Construction, Vol.12, 2008.

[24] Park, J.H., Jo, B.W., Yoon, S.J., Park, S.K., Experimental investigation on the structural behavior of concrete filled FRP casings with/without steel rebar, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.15, pp. 337-345, 2011.

[25] Huang, L., Sun, X., Yan, L., Kasal. B., Impact behavior of concrete columns confined by both GFRP casing and steel spiral reinforcement, Construction and Building Materials, Vol. 131, pp. 438-448, 2017.

[26] Hassan, W., Hodhod, O., Hilal, M., Bahnasaway, H., "Behavior of eccentrically loaded high strength concrete columns jacketed with FRP laminates", Construction and Building Materials, Vol. 138, pp. 508-527, 2017.

[27] Shafieinia, M., Sajedi, F., "Evaluation and comparison of GRP and FRP applications on the behavior of RCCs made of NC and HSC", Smart Structures and Systems, Vol. 23, pp. 495-506, 2019.

[28] Parvin A, Wang W. Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading, Journal of Composites for Construction, Vol. 5, pp. 154-176, 2001.

[29] Turgay T, Köksal HO, Polat Z, Karakoç C. Stress–strain model for concrete confined with CFRP jackets, Materials and Design, Vol. 30, pp. 3243-3253, 2009.

[30] Belouar, A., Laraba, A., Benzaid, R and Chikh, N. "Structural Performance of Square Concrete Columns Wrapped with CFRP Sheets", Procedia Engineering, Vol. 54, pp. 232-240, 2013.

[31] Piekarczyk J, Piekarczyk W, Blazewicz S. Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 2365-2369, 2011.

[32] El Refai, A.; Abed, F.; Altalmas, A. Bond Durability of Basalt Fiber–Reinforced Polymer Bars Embedded in Concrete under Direct Pullout Conditions, journal of composites construction, Vol. 19, pp. 401-416, 2015.

[33] Al Rifai, M.; El-Hassan, H.; El-Maaddawy, T.; Abed, F. Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline` solution and moist concrete environments, journal of Construction and Building Materials, Vol. 10, pp. 243, 2020.

[34] Al-Tamimi, A.; Abed, F.H.; Al-Rahmani, A.; Effects of harsh environmental exposures on the bond capacity between concrete and GFRP reinforcing bars, Advances in concrete construction, Vol. 2, pp. 1-11, 2014.

[35] Altalmas, A.; El Refai, A.; Abed, F.; Bond degradation of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) bars exposed to accelerated aging conditions, journal of Construction and Building Materials, Vol. 81, pp. 162-171, 2015.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[36] Tello, N.A.H.; Abdelrahman, M.; El-Tonsy, S.; Weheda, F.; Abed, F.H. Effect of Harsh Environmental Exposure on the Flexural Performance of BFRP-RC Beams, In Proceedings of the 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, UAE, Vol. 10, pp. 1–5, 2020.

[37] Barris, C.; Torres, L.; Turon, A.; Baena, M.; Catalan, A.; An experimental study of the flexural behavior of GFRP RC beams and comparison with prediction models, Journal of Composites Structure, Vol. 91, pp. 286–295, 2009.

[38] Abed, F.; Alhafiz, A.R. Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars, Journal of Composites Structure, Vol. 215, pp. 23–34, 2019.

[39] Abed, F.; Alhafiz, A.R. Finite element simulation of the flexural behavior of BFRP-FRC beams. In Proceedings of the 2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Abu Dhabi, Vol. 5, pp. 1–5, 2018;

[40] El Refai, A.; Abed, F. Concrete Contribution to Shear Strength of Beams Reinforced with Basalt Fiber Reinforced Bars. Journal of Composites. Structure, Vol. 20, pp. 34-39, 2016.

[41] Alhamad, S.; Al Banna, Y.; Al Osman, A.; Mouthassseeb, J.; Abdalla, S.; Abed, F. Effect of shear span-to-depth ratio on the shear behavior of BFRP-RC deep beams. MATEC Web Conferences, Vol. 120, pp, 1–8, 2017.

[42] Zhang, T.; Oehlers, D.J.; Visintin, P. Shear strength of FRP RC beams and one-way slabs without stirrups, Journal of Composites for Construction, Vol. 18, PP. 22-25, 2014.

[43] Abed, F.; El-Chabib, H.; AlHamaydeh, M. Shear characteristics of GFRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 31, pp. 1063–1073, 2012.

[44] Abed, F.; El Refai, A.; Abdalla, S. Experimental and finite element investigation of the shear performance of BFRP-RC short beams. Structures, Vol. 20, pp. 689–701, 2019.

[45] Abed, F.H.; Al-Rahmani, A.; Al-Rahmani, A.H. Finite element simulations of the shear capacity of FRP-reinforced concrete short beams. In Proceedings of the 2013 5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Hammamet, Tunisia, Vol. 30, pp. 28-30, 2013.

[46] Wenwei, W. and Guo, Z. 2006. Experimental Study and Analysis of RC Beams Strengthened with CFRP Laminates under Sustaining Load. International journal of solids and structures, Vol. 6, pp. 1372-1387, 2006.

[47] Rizzo, A. and De Lorenzis, L. 2007. Behavior and Capacity of RC Beams Strengthened in Shear with NSM FRP Reinforcement. Construction and Building Materials, Vol. 23, pp. 1555–1567, 2009.

[48] Barros, J. and Dias, S. 2009. Influence of the Percentage of Steel Stirrups in the Effectiveness of the NSM Laminates Shear Strengthening Technique Issues. FRPRCS-9 Sydney, Australia, University of Minho, Portugal.

[49] El Hacha, R. and Wagner, M. 2009. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Near-Surface Mounted CFRP Strips. FRPRCS-9 Sydney, Australia.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[50] Khaldoun, N. R. and Hatem, A. R. 2011. Tests on Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear Using Near Surface Mounted CFRP and Steel Bars. Engineering Structures, Vol. 1, pp. 53-62, 2011.

[51] Shafieinia, M.,Sajedi, S. F., Razavi Toosi, V., "Experimental study and comparison of the use of GRP casing and CFRP wrapping on the behavior of reinforced concrete columns with circular cross section", Amirkabir Civil Engineering Journal, Vol. 1, pp. 73-78, 2020.

[52] Shafieinia, M., Sajedi, S. F., Razavi Toosi, V., "Study of the behavior of reinforced concrete columns made of high-strength concrete and enclosed with GRP casing and CFRP wrapping", Journal of Structural Engineering, Vol. 4, pp. 202-219, 2020.

[53] ASTM D7565/D7565M-10, Standard test method for determining tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures, United States: ASTM International, 2010.

[54] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber- Reinforced Thermosetting- Resin) Pipe, ASTM Committee D29, 2001.

[55] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63, 2002.

[56] ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete (Reapproved 2009), ACI 211.1-91. Farmington Hills, MI, USA, 1991.

[57] ASTM C39/C39M-03, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Committee C39, 2003.

ACCEPTED MANUSCRIPT