

بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و محصور شده با غلاف GRP و دورپیچ FRP

، سیدوحید رضوی طوسی*، محسن شفیعی نیا*، سیدفتح اله ساجدی

*: دانشجوی دکتری عمران- سازه، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

** : دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

*** : استادیار گروه عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

چکیده

این مقاله نتایج انجام آزمایش فشار محوری بر ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت بالا که با استفاده از غلاف لوله‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه^۲ و هم‌چنین دورپیچ کامپوزیت‌های الیاف پلیمری تقویتی^۳، محصور شده‌اند، را ارائه می‌کند. هدف این مطالعه، بررسی رفتار و ظرفیت باربری ستون‌های بتن مسلح محصور شده با غلاف GRP و دورپیچ ورق‌های FRP زیر بارهای فشاری است. در این تحقیق تأثیر استفاده از غلاف GRP، دورپیچ FRP و هم‌چنین تعداد لایه‌های FRP بررسی شده است. در این تحقیق ۶ ستون بتن مسلح استوانه‌ای از بتن با مقاومت بالا تهیه شدند، نصف ستون‌ها (گروه ۱) دارای غلاف GRP و نصف دیگر (گروه ۲) فاقد غلاف بودند. از هر گروه، یک ستون هیچ‌گونه لایه تقویتی FRP نداشت، یک ستون با یک لایه و ستون دیگر با دو لایه ورق تقویتی دورپیچ شدند. تمام ستون‌ها تحت نیروی فشاری متمرکز آزمایش شدند. نتایج نشان داد که استفاده از دورپیچ FRP و غلاف GRP باعث بهبود مقاومت فشاری و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح می‌شود. افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به طور میانگین باعث افزایش ۱۰/۲٪ و ۲۴/۸٪ مقاومت فشاری گردیدند، در حالی که استفاده از غلاف GRP به طور میانگین باعث افزایش ۳/۳۸٪ برابری مقاومت فشاری ستون‌ها شده است. نتایج حاکی از آن است که گرچه دورپیچ FRP و غلاف GRP هر دو ایجاد محصوریت می‌کنند، ولی غلاف GRP به خاطر محصوریت بیشتر، تأثیر بسیار افزون‌تری بر افزایش مقاومت فشاری و همین‌طور شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح دارد.

کلمات کلیدی: ستون بتن مسلح، بتن با مقاومت بالا، غلاف GRP، دورپیچ FRP، نیروی محوری، شکل‌پذیری.

¹ Corresponding author; Email: f_sajedi@yahoo.com; sajedi@iauahvaz.ac.ir

² Glass-fiber Reinforced Plastic Pipes (GRP)

³ Fiber Reinforced Polymer (FRP)

*نویسنده مسئول: سیدفتح اله ساجدی

پست الکترونیکی: f_sajedi@yahoo.com; sajadi@iauhvaz.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

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 بتن مسلح 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 اعضا محسوب می‌شوند. یکی از روش‌های رایج در مقاوم‌سازی و افزایش ظرفیت باربری ستون‌های بتن مسلح، محصورسازی آن‌ها توسط کامپوزیت FRP است. محصورسازی ستون‌های بتن مسلح باعث محدود شدن انبساط عرضی آن‌ها می‌شود و به دنبال آن با به تعویق انداختن جداسازی پوسته بتنی، از کماتورهای طولی ستون جلوگیری شده و در نهایت کماتش ستون به تاخیر می‌افتد.

بتن با مقاومت بالا به عنوان مصالح نسبتاً نوینی تلقی می‌شود که در طول سالیان گذشته گسترش فراوانی 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. اخیراً بتن‌هایی با مقاومت فشاری بیش از ۱۴۰ مگاپاسکال در نقاط مختلف دنیا در صنعت ساختمان‌سازی استفاده شده است [۱].

از جمله مزایای این بتن‌ها می‌توان به مقاومت‌های فشاری و کششی بالا، ضریب ارتجاعی بیش‌تر و نفوذپذیری کم‌تر آن‌ها اشاره کرد. از عوامل موثر در رسیدن به مقاومت‌های بالا در بتن، استفاده از شن و ماسه مقاوم و با شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت آب به سیمان مناسب برای همگنی بیش‌تر بتن می‌باشد. هم‌چنین با استفاده از مواد بسیار ریزدانه و با اندازه‌هایی کم‌تر از دهم میکرون مانند میکروسیلیس می‌توان مجموعه‌ای متراکم‌تر و با تخلخل بسیار کم را تهیه نمود. در بتن‌های با مقاومت بالا بایستی تا حد امکان نسبت آب به سیمان را کاهش داد، برای تامین روانی و کارایی کافی در چنین مخلوط‌هایی که با آب کم تهیه می‌شوند، لازم است از فوق روان‌کننده‌ها استفاده شود [۱]. با این وجود ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت بالا، رفتاری تردتر از ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی دارند. لذا این ستون‌ها نیازمند تقویت جهت افزایش شکل‌پذیری می‌باشند. مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح با دورپیچ نمودن آن‌ها با ورق‌های CFRP روشی است که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. ورق‌های CFRP به راحتی می‌توانند روی سطح ستون‌های بتنی نصب شوند، و از لحاظ اقتصادی و سرعت انجام، گزینه بسیار مناسبی می‌باشند [۲].

استفاده از مصالح CFRP باعث افزایش محصوریت هسته ستون‌های بتن مسلح و در نتیجه آن بهبود مشخصات مقاومتی و شکل‌پذیری این ستون‌ها می‌شود. عوامل تأثیرگذار بر روی مقاومت ستون‌های تقویت‌شده با ورق‌های CFRP، نوع الیاف، ضریب ارتجاعی و مقاومت کششی الیاف، ضخامت الیاف پلیمری، تعداد لایه‌های CFRP و زاویه اعمال الیاف می‌باشد.

تاکنون تحقیقات زیادی در خصوص مطالعه رفتار ستون‌های بتن مسلح استوانه‌ای مقاوم‌سازی شده با دورپیچ CFRP انجام شده است. میرمیران و شاهوی^۱ [۳]، شاهوی و میرمیران^۲ [۴]، وو و همکاران^۳ [۵]، شیخ^۴ [۶] و ونگ و همکاران^۵ [۷]، به بررسی ستون‌های بتن مسلح با مقطع دایره‌ای تقویت‌شده با استفاده از دورپیچ CFRP پرداختند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که استفاده از مصالح FRP باعث افزایش مقاومت فشاری

¹ Mirmiran and Shahawy² Shahawy and Mirmiran³ Wu et al.⁴ Sheikh⁵ Wong et al.

و شکل‌پذیری ستون‌های بتنی محصور شده به وسیله تامین اثر محصورکنندگی هسته بتن، زیر بارهای فشاری می‌شود. میرمیران و همکاران^۱ [۸]، آل مداوی و همکاران^۲ [۹] و ازبک اوگلو و شی^۳ [۱۰] در مورد شکل مقطع ستون‌های مقاوم‌سازی شده به بررسی و تحقیق پرداختند و نشان دادند 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. رهایی و همکاران^۴ [۱۱]، کوماتا و همکاران^۵ [۱۲] و پروین و جامال^۶ [۱۳]، تاثیر تعداد لایه‌های تقویتی FRP اعمال شده بر روی سطح ستون‌های بتنی را بررسی نمودند و نتیجه‌گیری کردند که استفاده از لایه‌های بیش‌تر و ورق‌های ضخیم‌تر، سبب افزایش زیادتر مقاومت فشاری در ستون‌های مقاوم‌سازی شده می‌شود. ضمناً نوع الیاف، نوع بافت الیاف، مقدار چسب و عوامل دیگر در میزان مقاوم‌سازی انجام شده تاثیر دارند. آل مُسلم^۷ [۱۴] و وینسنت و ازبک اوگلو^۸ [۱۵]، به بررسی درصد مقاوم‌سازی ایجاد شده با ورق‌های FRP برای ستون‌های ساخته شده از بتن‌های با مقاومت پایین، متوسط و بالا پرداختند و نتیجه‌گیری کردند که مقدار مقاوم‌سازی ایجاد شده در ستون‌های با مقاومت بالا، کم‌تر است. دلیل احتمالی این امر را می‌توان کم‌تر بودن مقاومت ایجادشده از سوی لایه محصورکننده نسبت به مقاومت فشاری بتن دانست. سمعان و همکاران^۹ [۱۶]، ازبک اوگلو و همکاران [۱۷] و یوسف و همکاران^{۱۰} [۱۸]، مدل‌هایی برای پاسخ ستون‌های بتن مسلح محصور شده با دورپیچ FRP پیشنهاد کردند. در این مدل‌ها روابطی برای تعیین تنش محصورکننده جانبی دورپیچ و مقاومت فشاری بتن محصورشده ارائه شده است. هادی^{۱۱} [۱۹-۲۱] نتایج بارگذاری خارج از مرکز بر روی ستون‌های بتن مسلح تقویت‌شده با دورپیچ FRP که از بتن‌های معمولی و با مقاومت بالا ساخته شده بودند را گزارش کرد. نتایج نشان دادند که استفاده از مصالح FRP باعث افزایش مقاومت فشاری، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی بیش‌تر در ستون‌های بتن مسلح با بارگذاری غیرمتمرکز می‌شود. هم‌چنین نتایج نشان داد که بارگذاری محوری خارج از مرکز و اعمال لنگر خمشی، از مقدار تحمل بار فشاری می‌کاهد. جهت بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح با مقاومت بالا و فوق‌العاده بالا مقاوم‌سازی شده با دورپیچ CFRP، تحقیقات مختلفی انجام شده است. ازبک اوگلو [۲۲] و مالیک و فوستر^{۱۲} [۲۳] با بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های با مقاومت فوق‌العاده بالا که با ورق‌های CFRP تقویت شده بودند، نشان دادند که این ستون‌ها رفتار تردتری نسبت به ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی دارند و استفاده از ورق‌های تقویتی جهت مقاوم‌سازی این ستون‌ها، تاثیر زیادی در افزایش شکل‌پذیر دارد؛ بعلاوه، مقاومت فشاری ستون‌های مذکور بهبود یافت.

ستون‌های بتنی پرشده در لوله‌های GRP، ستون کامپوزیتی می‌باشند و اخیراً تحقیقات زیادی بر روی ستون‌های بتنی با این غلاف‌ها انجام شده است. در این ستون‌ها لوله‌های GRP به عنوان قالب ماندگار عمل می‌کنند و باعث تامین محصوریت جانبی برای بتن هسته ستون و محدود شدن گسترش ترک‌های ریز^{۱۳} می‌شوند و هم‌زمان هسته بتنی باعث جلوگیری از کم‌انحرف غلاف GRP می‌گردد. شیو و همکاران^{۱۴} [۲۴] و پارک و همکاران^{۱۵} [۲۵] ستون‌های بتن مسلح و غیرمسلح محصورشده در غلاف GRP را بررسی کردند. نتایج این تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از غلاف GRP باعث افزایش مقاومت فشاری، سختی و شکل‌پذیری ستون‌های محصور در غلاف GRP می‌شود. هم‌چنین این ستون‌ها تحت بار خارج از مرکز نیز مورد آزمایش قرار گرفتند و مشاهده شد که عملکرد آن‌ها از ستون‌های فاقد غلاف بهتر است. هادی

¹ Mirmiran et al.

² El Maaddawy

³ Ozbakkaloglu and Xie

⁴ Rahai et al.

⁵ Kumutha et al.

⁶ Parvin and Jamwal

⁷ Almusallam

⁸ Vincent and Ozbakkaloglu

⁹ Samaan et al.

¹⁰ Youssef et al.

¹¹ Hadi

¹² Malik and Foster

¹³ micro-cracks

¹⁴ Xiao et al.

¹⁵ Park et al.

و همکاران^۱ [۲۶] و ونگ و همکاران^۲ [۲۷] به بررسی ستون‌های بتنی حلقوی با هسته داخلی غلاف GRP پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که ستون‌های دارای غلاف مقاومت فشاری و شکل‌پذیری بهتری نسبت به ستون‌های بدون غلاف دارند. به‌علاوه، تحقیقات یانگ و همکاران^۳ [۲۸]، ایچینوز و همکاران^۴ [۲۹] و شرسا و همکاران^۵ [۳۰] روی ستون‌های بتنی در لوله‌های غلافی نشان دادند که غلاف خارجی ستون‌های بتنی محصور شده، به علت جلوگیری از تبادل رطوبت بتن با محیط اطراف باعث محدود شدن جمع‌شدگی^۶ در بتن هسته ستون می‌شود، که همین امر باعث کاهش خزش^۷ در این ستون‌ها نسبت به ستون‌های غیرمحصور می‌شود.

هدف این تحقیق، بررسی آزمایشگاهی تاثیر جداگانه و همزمان اثر غلاف GRP و دورپیچ FRP بر رفتار ستون‌های بتن مسلح ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و با مقطع دایره‌ای می‌باشد که با ساخت ۶ نمونه ستون بتن مسلح استوانه‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر با و بدون حضور غلاف لوله‌ای GRP، و انجام آزمایش مقاومت فشاری و تعیین تغییرشکل‌های محوری و جانبی آن‌ها، این هدف دنبال شده است.

۲- مشخصات دورپیچ FRP و غلاف GRP مصرفی

ورقه‌های کامپوزیتی مورد استفاده در این تحقیق از نوع CFRP و به صورت یک‌جهته بوده و ساخت شرکت TORAY ژاپن می‌باشند. خواص مکانیکی مصالح FRP براساس اطلاعات کارخانه تولیدکننده، از آزمایش‌های انجام شده به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D7565 [۳۱] و ASTM D2996 [۳۲] در جدول شماره (۱) ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مورد استفاده ساخت شرکت پایا و به صورت دو جزئی متشکل از رزین و سخت‌کننده می‌باشد که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط شده است. مدت زمان لازم برای گیرش رزین و مراقبت از آن متأثر از دمای محیط بوده و در حالت متعارف و با توجه به توصیه‌های شرکت سازنده بین ۵ تا ۷ روز متغیر می‌باشد. تنش کششی قابل تحمل چسب ۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی کششی ۳/۶٪ می‌باشد. مشخصات ترکیب چسب مذکور براساس گزارش‌های کارخانه سازنده و از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D638 [۳۲] به‌دست آمده‌اند.

لوله‌های کامپوزیتی GRP ساخت کارخانه مشهد صدرا شرق بوده 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 ۱۰ بار استفاده شده است. مشخصات لوله‌های GRP براساس اطلاعات کارخانه تولیدکننده از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D2996 [۳۳] در جدول شماره (۱) ارائه شده‌اند. جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق از لوله‌های GRP به طول ۶۰۰، قطر داخلی ۱۵۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شده است.

مشخصات کامپوزیت	لوله‌های GRP	مصالح FRP
ضخامت (mm)	۸	۰/۱۶۶
چگالی (kg/m ³)	۱۸۰۰	-
وزن در واحد سطح (g/m ²)	-	۳۰۰
وزن در واحد طول (kg/m)	۶/۷۸۶	-
تنش کششی (MPa)	۷۵	۴۹۰۰
ضریب ارتجاعی (GPa)	۱۲۰	۲۳۰
ضریب پواسون	۰/۴	۰/۳
کرنش نهایی (%)	۱/۳	۲/۵

¹ Hadi et al.

² Wang et al.

³ Yang et al.

⁴ Ichinose et al.

⁵ Shrestha et al.

⁶ shrinkage

⁷ creep

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش‌های اولیه

جهت تعیین مقاومت فشاری بتن، از بتن مصرفی جهت ساخت ستون‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر طبق توصیه ACI-211 [۳۴] تهیه و پس از عمل‌آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها به عمل آمد. جهت ساخت بتن متراکم و کم تخلخل از ژل میکروسیلیس استفاده شد. هم‌چنین برای افزایش مقاومت فشاری بتن نسبت آب به سیمان تا مقدار ۰/۲ کاهش یافت و برای حفظ کارایی بتن به مقدار کمی از مواد فوق‌روان‌کننده همراه با آب اختلاط استفاده شد. اسلامپ بتن در حین ساخت ستون‌ها، ۲۱۰ میلی‌متر بود. جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی در ساخت نمونه‌ها در جدول شماره (۲) ارائه شده است.

w/b	فوق‌روان‌کننده (kg)	ژل میکروسیلیس (kg)	ماسه (kg)	شن (kg)	آب (kg)	سیمان نوع ۲ (kg)
۰/۲	۲/۵	۵۵	۷۲۰	۹۳۰	۱۱۱/۵	۴۹۵

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول شماره (۳) ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای ۶۳/۱ مگاپاسکال به دست آمد.

سن نمونه	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
۷ روزه	۴۵/۵	۴۷/۱	۴۸/۴	۴۷/۰
۲۸ روزه	۶۱/۷	۶۳/۴	۶۴/۲	۶۳/۱

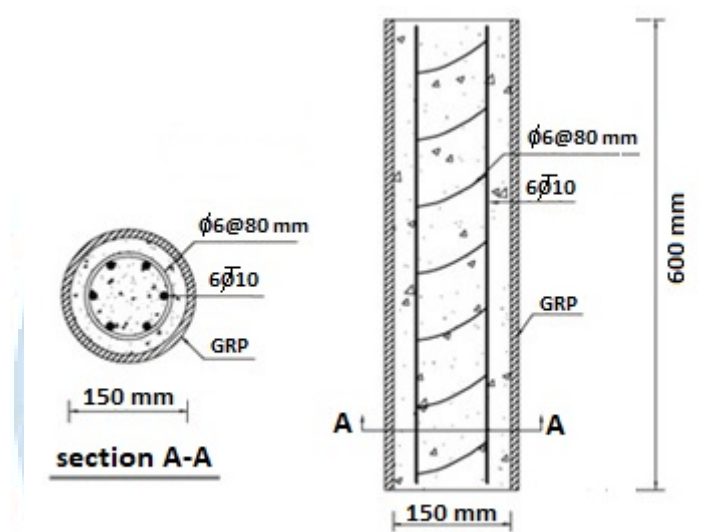
۳-۲- مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۶ عدد ستون بتن مسلح با مقطع دایره‌ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر بودند. تمام ستون‌ها از بتن مسلح ساخته شدند؛ سه ستون دارای غلاف GRP (گروه ۱) و سه ستون دیگر فاقد GRP (گروه ۲) بودند، از هر گروه یک ستون فاقد دورپیچ FRP، یک ستون با یک لایه و دیگری با دو لایه FRP دورپیچ شده بودند. ستون‌ها براساس اجزای تشکیل‌دهنده نام‌گذاری شدند. برای ستون‌های ساخته شده از بتن با مقاومت بالا حرف (H)، ستون‌های دارای غلاف GRP حرف (G) و ستون‌های دارای دورپیچ FRP حرف (F) منظور گردید. عددی که پس از حرف F آمده نشانگر تعداد لایه‌های FRP مصرفی می‌باشد. در جدول شماره (۴) مشخصات تمام ستون‌ها ارائه گردیده است.

نام ستون	قطر (mm)	ارتفاع (mm)	غلاف GRP	دورپیچ FRP	تعداد لایه
H	150	600	NO	NO	0
HF1	150	600	NO	YES	1
HF2	150	600	NO	YES	2
GH	150	600	YES	NO	0
GHF1	150	600	YES	YES	1
GHF2	150	600	YES	YES	2

۳-۳- آماده سازی نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل تعداد ۶ عدد ستون بتنی با مقطع دایره ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر بودند. همچنین یک نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شد که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش ها، مورد استفاده قرار گیرد. میزان آرماتورهای طولی مورد استفاده در همه ستون ها برابر $2/7\%$ سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد آرماتور آجدار به قطر ۱۰ میلی متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش روی آرماتورهای طولی، این آرماتورها در فاصله ۲۰ میلی متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند؛ بنابراین طول در نظر گرفته شده برای آرماتورهای طولی ۵۶۰ میلی متر می باشد. همچنین در هر شبکه، آرماتور مارپیچ با گام ۸۰ و به قطر ۶ میلی متر استفاده گردید؛ این گام به صورتی انتخاب شده که محصورشدگی داخلی زیادی توسط خاموت ها ایجاد نشود. پوشش بتن روی آرماتورها به مقدار ۲۵ میلی متر منظور گردید. جهت تأمین پوشش مورد نظر برای آرماتورهای طولی و عرضی، از فاصله انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماتورها با استفاده از آزمایش کشش میلگرد تعیین شده و برای آرماتورهای طولی و عرضی به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال به دست آمد. در شکل (۱) مقاطع طولی و عرضی ستون های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- مقاطع طولی و عرضی ستون های تحقیق

جهت اندازه گیری کرنش میلگردها در حین انجام آزمایش مقاومت فشاری ستون ها و بررسی نحوه رفتار ستون ها از کرنش سنج های دیجیتالی استفاده گردید. لذا قبل از بتن ریزی بر روی میلگردهای هر ستون، این کرنش سنج ها نصب گردیدند. شکل (۲) نحوه نصب این کرنش سنج ها را نشان می دهد.

جهت ساخت ستون ها، ۳ عدد لوله GRP و ۴ عدد لوله PVC جهت قالب ستون های بدون غلاف، همگی با مقطع دایره ای با قطر داخلی ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر تهیه شدند. سپس، لوله ها بر روی صفحات فلزی متصل شدند. شکل (۳) لوله های GRP و قالب های PVC را نشان می دهد.



سپس سطح داخلی قالب‌ها جهت جداسازی آسان قالب از سطح بتن، به روغن آغشته گردیدند و قفسه میلگردها در قالب‌ها قرار داده شدند. شکل (۴) نحوه قرارگیری قفسه میلگردها را درون غلاف‌های GRP و قالب‌های PVC نشان می‌دهد.

جهت بتن‌ریزی از بتن با مقاومت بالا استفاده گردید و اسلامپ بتن در بتن‌ریزی ۲۱۰ میلی‌متر بود. همان‌گونه که در بخش ۱-۳ اشاره گردید، مقاومت فشاری بتن نمونه استاندارد در سن ۲۸ روزه به مقدار ۶۳/۱ مگاپاسکال گردید. پس از بازکردن قالب‌ها، ستون‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار گرفتند و پس از عمل‌آوری، ستون‌ها با مصالح CFRP دورپیچ شدند.

جهت آماده‌سازی ستون‌های بتن مسلح، قبل از استفاده از چسب اپوکسی برای نصب لایه‌های CFRP، ابتدا سطح بیرونی ستون‌ها به‌طور کامل صاف، تمیز و خشک گردید. چسب اپوکسی مورد استفاده دو جزئی و متشکل از رزین و سخت‌کننده بوده، که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط گردید، و سپس یک لایه نازک از چسب روی سطح استوانه بتنی مالیده شد و لایه دورپیچ CFRP با دقت به دور ستون پیچیده شدند. لایه‌های انتهایی دورپیچ FRP جهت اطمینان از عدم جداشدگی از سطح خارجی ستون، به میزان ۱۰۰ میلی‌متر همپوشانی شدند. برای ستون‌هایی که دارای دو لایه CFRP بودند، به مدت ۲ ساعت پس از نصب لایه اول، لایه دوم دورپیچ گردید. تمام ستون‌ها با زاویه صفر درجه نسبت به بعد عرضی ستون دورپیچ شدند و به‌منظور عمل‌آوری چسب اپوکسی، ستون‌ها به‌مدت ۷ روز در دمای محیط نگهداری شدند. در شکل (۵) ستون‌های مورد تحقیق، بعد از اعمال دورپیچ CFRP و پس از نصب کرنش‌سنج‌ها نشان داده شده‌اند.



۳-۴- آزمایش ستون‌ها

ستون‌های تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰ تن در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییرمکان و با نرخ بارگذاری ۱۰ kN/S انجام شد [۳۴]. به منظور تعیین کرنش‌های طولی و عرضی ستون‌ها به ترتیب دو کرنش‌سنج محوری و یک کرنش‌سنج عرضی در وسط ارتفاع هر ستون نصب شدند، که در شکل (۶) محل نصب کرنش‌سنج‌ها نشان داده شده است. اطلاعات مربوط به کرنش ستون و میلگردها در هر ثانیه با استفاده از دیتالاگر الکترونیکی^۱ متصل به کامپیوتر ثبت شدند. همچنین به منظور تعیین نمودار بار-کرنش ستون‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰ تنی به طور خودکار با استفاده از عدد مربوط به فشار روغن دستگاه 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 (۷) جک آزمایشگاهی ۵۰۰ تن و نحوه قرارگیری ستون‌ها نمایش داده شده است.



۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- ظرفیت نهایی ستون‌ها

ستون‌ها توسط جک آزمایشگاهی ۵۰۰ تن آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت ۱۰ kN/S بارگذاری شدند، ظرفیت و کرنش نهایی ستون‌ها در جدول شماره (۵) ارائه گردیده است.

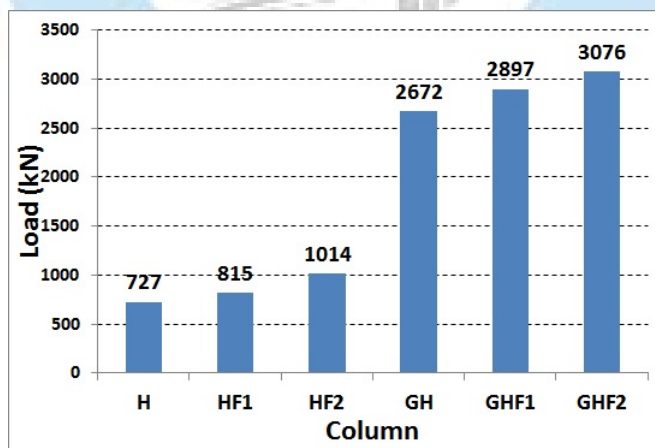
¹ electronic data-logger

نام ستون	ظرفیت نهایی (kN)	میانگین کرنش‌های محوری (10^{-6} mm/mm)	کرنش عرضی (10^{-6} mm/mm)
H	۷۲۷	* -۴۴۵۱	۱۷۴۵
HF1	۸۱۵	-۵۱۹۶	۱۸۶۱
HF2	۱۰۱۴	-۵۹۷۶	۲۳۰۴
GH	۲۶۷۲	-۱۶۴۲۹	۴۶۴۲
GHF1	۲۸۹۷	-۱۹۶۲۲	۵۴۱۹
GHF2	۳۰۷۶	-۲۳۰۲۹	۶۳۳۶

* علامت منفی نشانگر کرنش منفی (کاهش طول) می‌باشد.

همان‌گونه که در جدول شماره (۵) مشاهده می‌شود، استفاده از یک لایه و دو لایه FRP در ستون‌های فاقد غلاف GRP به ترتیب باعث افزایش ۱۲٪ و ۳۹٪ و در ستون‌های دارای غلاف GRP به ترتیب باعث افزایش ۸٪ و ۱۵٪ در ظرفیت نهایی ستون‌ها شده است. لذا تایید می‌گردد که استفاده از دورپیچ FRP جهت محصور کردن ستون‌های بتن مسلح، می‌تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی آن‌ها داشته باشد. به‌علاوه استفاده از FRP در ستون‌های دارای غلاف GRP به علت وجود اثر محصوریت زیاد این غلاف تاثیر قابل توجهی ایجاد نمی‌کند، لذا در صورت استفاده از این غلاف‌ها، استفاده از FRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح اقتصادی نمی‌باشد.

از سوی دیگر همان‌گونه که در شکل (۸) دیده می‌شود، استفاده از غلاف لوله‌های GRP در مقایسه با استفاده از دورپیچ FRP بسیار موثرتر می‌باشد. به عنوان مثال استفاده از غلاف GRP بدون استفاده از دورپیچ FRP به میزان ۲۶۷٪ افزایش در مقاومت فشاری ستون‌های بتن مسلح ایجاد کرده است، در حالی که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری به میزان ۱۲٪ و ۳۹٪ شده است.



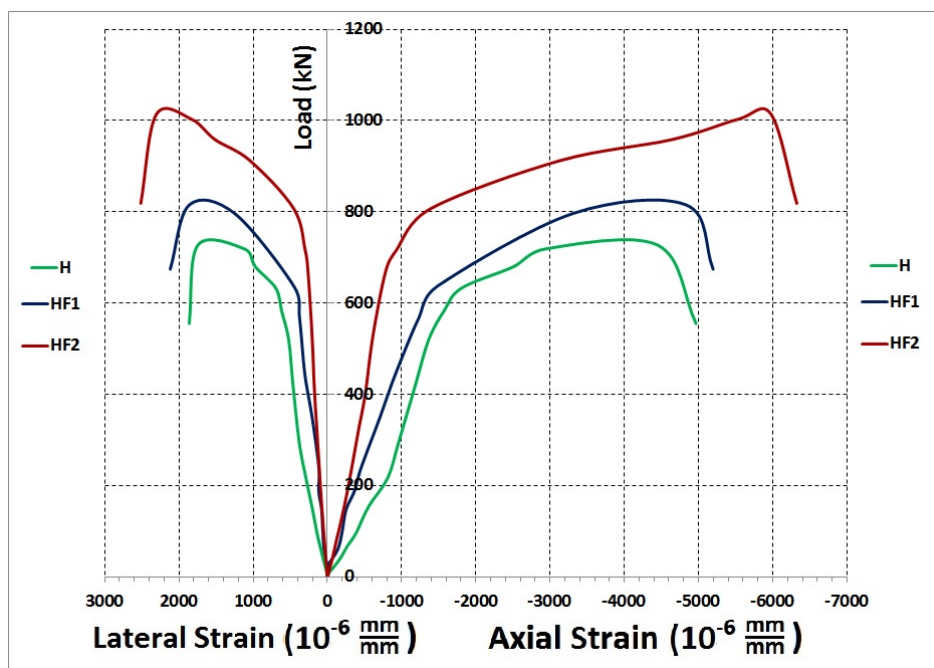
شکل ۸- ظرفیت فشاری ستون‌های استفاده شده در تحقیق

مقایسه کرنش نهایی در ستون‌های فاقد غلاف GRP نشان می‌دهد که، استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به ترتیب باعث افزایش ۱۶٪ و ۳۴٪ در کرنش نهایی این ستون‌ها می‌شود. در حالی که در ستون‌های دارای غلاف GRP، این مقادیر افزایش به ترتیب ۱۹٪ و ۴۰٪ می‌باشند. لذا مشاهده می‌گردد که استفاده از دورپیچ FRP جهت محصور کردن ستون‌های بتنی باعث افزایش شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح می‌شود، که این تاثیر در ستون‌های دارای غلاف GRP به جهت اثر محصوریت غلاف مذکور بیش‌تر می‌باشد. هم‌چنین مقایسه اثر

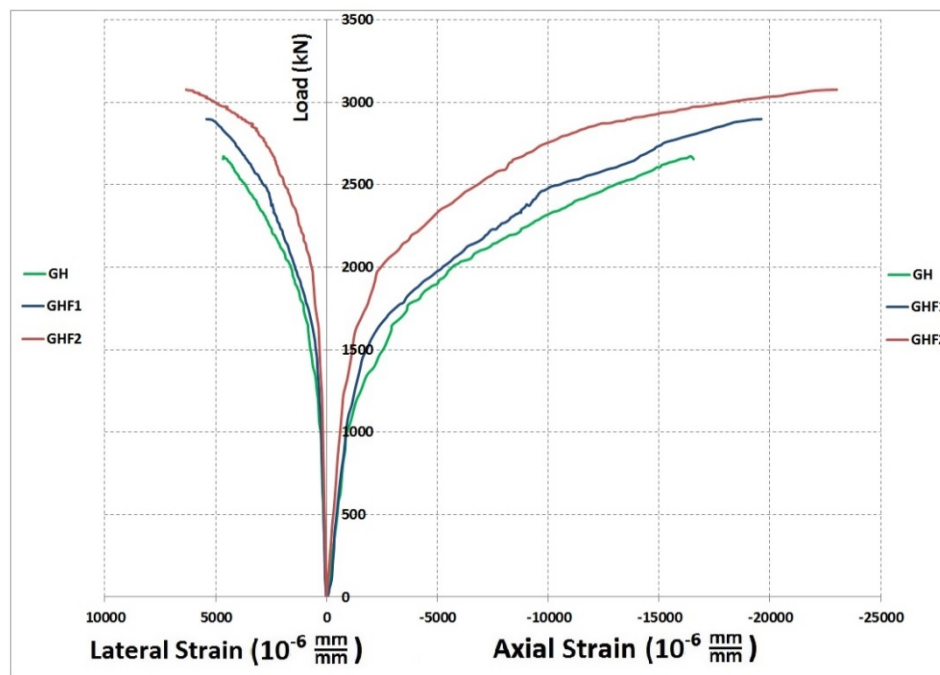
محصولیت غلاف لوله‌های GRP با دورپیچ FRP در شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح نشان می‌دهد که این غلاف‌ها بسیار موثرتر می‌باشند. به عنوان مثال استفاده از غلاف GRP بدون استفاده از دورپیچ FRP به میزان ۲۶۹٪ افزایش در شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح ایجاد نموده، در حالی که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به ترتیب باعث افزایش شکل‌پذیری به میزان ۱۶٪ و ۳۴٪ شده است. تاثیر زیاد لوله‌های GRP در ایجاد شکل‌پذیری را می‌توان در ساختار این لوله‌ها و وجود الیاف در ساخت آن‌ها دانست. لذا استفاده از غلاف‌های GRP در مناطقی که نیاز به طراحی شکل‌پذیر دارند، می‌تواند بسیار مفید باشد.

۲-۴- منحنی بار- کرنش ستون‌ها

به منظور مقایسه رفتاری ستون‌ها، منحنی بار-کرنش در حالات کرنش‌های طولی و عرضی در شکل‌های (۹) و (۱۰) برای ستون‌های مورد بررسی ارائه شده است.



شکل ۹- منحنی بار-کرنش ستون‌های فاقد غلاف GRP

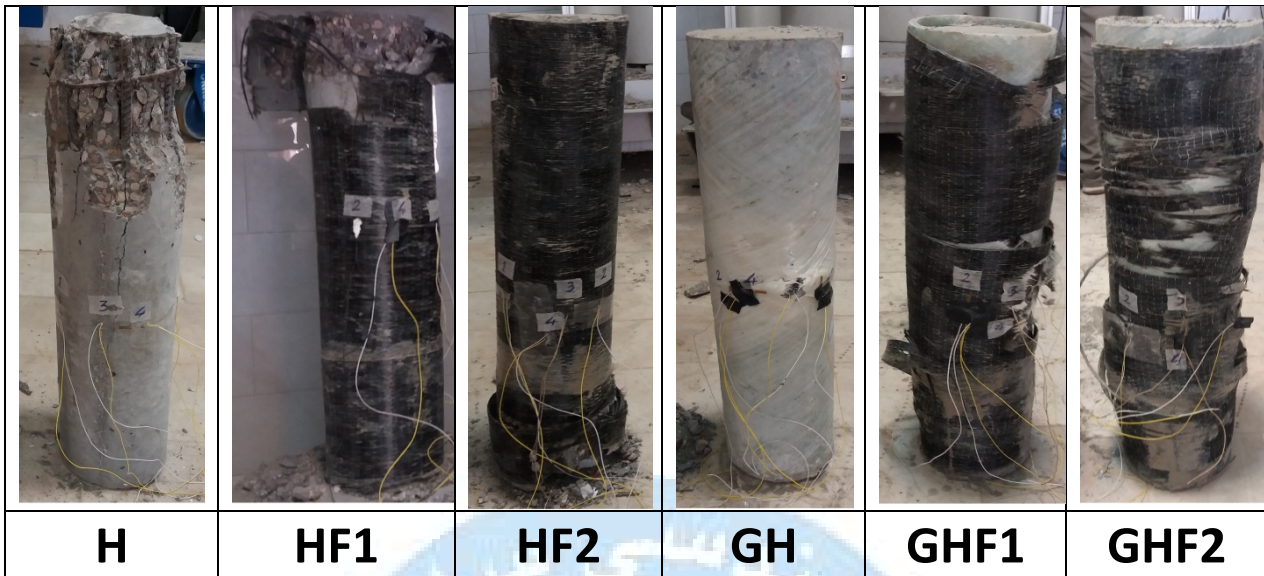


شکل ۱۰- منحنی بار- کرنش ستون‌های دارای غلاف GRP

با مشاهده منحنی‌های بار-کرنش ملاحظه می‌شود با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن مسلح با مصالح FRP، کرنش‌های جانبی و محوری آن‌ها افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری در ستون‌های دارای FRP می‌باشد. هم‌چنین میزان تحمل فشار در این ستون‌ها به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

بررسی دقیق‌تر منحنی‌های بار-کرنش ستون‌های فاقد غلاف نشان می‌دهد که این منحنی‌ها از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل گردیده‌اند. تغییر رفتار ستون‌ها ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و شروع به کار دورپیچ FRP و ادامه روند مقاومت تحت بارهای فشاری دارد. هم‌چنین منحنی‌های بار-کرنش ستون‌های دارای غلاف از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل شده‌اند، ولی تغییر رفتار ستون تدریجی بوده که علت آن را می‌توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیش‌تر غلاف GRP با ستون بتنی دانست. هم‌چنین مشاهده می‌شود که دورپیچ نمودن ستون‌ها با FRP باعث افزایش سختی ستون و کاهش تغییرشکل محوری می‌شود که علت احتمالی آن را می‌توان ناشی از محصوریت دورپیچ دانست.

نحوه گسیختگی ستون‌ها در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شکست اکثر ستون‌ها در اثر کماتش میلگردهای ستون رخ داده است. در ستون‌های فاقد غلاف GRP اکثراً گسیختگی به صورت موضعی و به تدریج اتفاق افتاد، در حالی که در ستون‌های دارای غلاف GRP گسیختگی به صورت کلی و انهدام تمام ستون روی داد، علت این تفاوت را در میزان محصوریت ایجاد شده ناشی از دورپیچ FRP و غلاف GRP می‌توان دانست، به طوری که محصوریت ناشی از دورپیچ FRP کم‌تر بوده و با ایجاد اولین تمرکز تنش (معمولاً در دو انتهای ستون) گسیختگی روی داده، اما محصوریت ناشی از غلاف GRP بسیار بیش‌تر بوده و تا رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود و هم‌چنین جاری شدن میلگردها گسیختگی رخ نداده است؛ لذا گسیختگی در ستون‌های دارای غلاف GRP به صورت ترد و با صدای انفجار همراه بود، در حالی که گسیختگی در ستون‌های فاقد غلاف GRP و دارای دورپیچ FRP به صورت نرم و ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و پارگی FRP محصورکننده رخ داده است.



شکل ۱۱- نحوه گسیختگی ستون‌ها پس از بارگذاری

۳-۴- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت نهایی ستون‌های محصور شده تاکنون روابط متعددی برای محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده جهت تعیین مقاومت ستون‌های محصور شده با FRP پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به مدل جولی و لیستون^۱ [۳۵] به صورت رابطه (۱) اشاره کرد. در این رابطه f'_{cc} و f'_{co} به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری بتن اولیه و مقاومت فشاری بتن محصور شده هستند.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.594 \left(\frac{2t_{frp}}{D} \right) \left(\frac{E_{frp} \epsilon_{frp}}{f'_{co}} \right) \quad (1)$$

هم‌چنین در رابطه (۱) D ، ϵ_{frp} ، E_{frp} ، t_{frp} ، به ترتیب بیانگر ضخامت دورپیچ FRP، ضریب ارتجاعی دورپیچ FRP، کرنش نهایی FRP و قطر مقطع ستون می‌باشند. در رابطه (۱) ϵ_{frpu} به طور محافظه کارانه برابر ۰/۰۰۲ فرض می‌شود. با جایگذاری مشخصات کامپوزیت مورد استفاده در این تحقیق در رابطه (۱) مقدار مقاومت فشاری محصور نشده محاسبه می‌شود. این مقادیر در جدول شماره (۷) ارائه شده است. در ستون‌های دارای غلاف GRP و دورپیچ FRP به صورت همزمان، جهت محاسبه مقاومت فشاری بتن محصور شده (f'_{cc})، اثر غلاف و دورپیچ با هم جمع شده است. برای محاسبه ظرفیت نهایی ستون محصور شده از رابطه (۲) استفاده شده است.

$$P_u = f'_{cc}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (2)$$

¹ Jolly and Lillistone

جدول شماره ۷- مقایسه روابط مرجع با نتایج آزمایشگاهی [۳۵]

نام ستون	تنش فشاری محصور نشده f'_{co} (MPa)	تنش فشاری بتن محصور شده f'_{cc} (MPa) [۳۲]	ظرفیت نهایی ستون محصور شده P_u (kN) [۳۲]	ظرفیت نهایی آزمایشگاهی P_{exp} (kN)	$\frac{P_u - P_{exp}}{P_{exp}}$ (%)
HF1	۶۳/۱	۶۶/۷۶	۱۳۳۶	۸۱۵	۶۴
HF2	۶۳/۱	۷۰/۴۲	۱۳۹۹	۱۰۱۴	۳۸
GH	۶۳/۱	۱۵۵/۱۲	۲۸۵۶	۲۶۷۲	۶/۸
GHF1	۶۳/۱	۱۵۸/۳	۲۹۱۹	۲۸۹۷	۰/۷
GHF2	۶۳/۱	۱۶۲/۴۲	۲۹۸۲	۳۰۷۶	-۳

نتایج جدول (۷) نشان می‌دهد، گرچه ظرفیت نهایی ستون‌های فاقد غلاف در این پژوهش نسبت به روابط ارائه شده توسط محققان دیگر، مقداری کمتر است، ولی ظرفیت نهایی ستون‌های دارای غلاف همخوانی خوبی با روابط مذکور دارد. دلیل این امر را می‌توان در مقاومت بالای بتن استفاده شده برای ساخت ستون‌ها دانست، زیرا معمولاً روابط تجربی ارائه شده برای بتن‌های معمولی پیشنهاد شده‌اند؛ در حالی که در این تحقیق از بتن با مقاومت بالا استفاده گردید. ولی در ستون‌های دارای غلاف GRP به خاطر زیاد بودن نیروی محصوریت جانبی، اثر مقاومت فشاری بتن محصور نشده در ظرفیت نهایی ستون کم‌تر می‌شود.

۴-۴- مقایسه فنی و اقتصادی

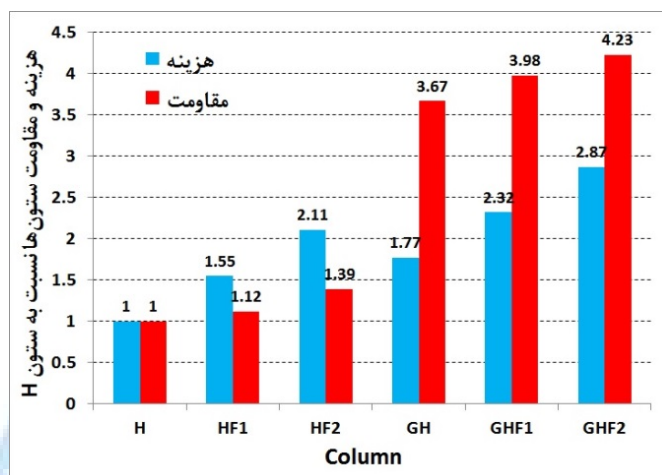
در ادامه به بررسی هزینه‌های انجام شده جهت تهیه ستون‌ها و مقاومت نهایی هر ستون و مقایسه فنی و اقتصادی آن‌ها اقدام شد. هزینه قالب‌بندی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی هر یک از ستون‌های مورد مطالعه با غلاف و بدون غلاف به ترتیب ۵۵۰,۰۰۰ و ۶۵۰,۰۰۰ ریال برآورد گردید. لوله‌های غلافی GRP دارای قطر داخلی ۱۵۰ میلی‌متر و با تحمل فشار داخلی ۱۰ بار بوده که هزینه تامین هر متر از این لوله‌ها ۱,۰۰۰,۰۰۰ ریال است. هم‌چنین دورپیچ‌های CFRP مورد استفاده از نوع یک‌جهته بوده و با هزینه هر مترمربع ۶۰۰,۰۰۰ ریال تامین شدند. هزینه چسب و رزین مصرفی نیز برای یک متر مربع دورپیچ CFRP به میزان ۳۰۰,۰۰۰ ریال بوده است. در جدول شماره (۸) طول لوله GRP و سطح دورپیچ CFRP مصرف شده و ریز هزینه آن‌ها برای ستون‌های این تحقیق و تاثیر آن‌ها بر روی مقاومت نهایی ارائه شده است.

جدول شماره ۸- مقایسه فنی و اقتصادی ستون‌های مورد مطالعه

نام نمونه	هزینه قالب‌بندی، آرماتوربندی و بتن‌ریزی (ریال)	غلاف GRP (m)	هزینه غلاف GRP (ریال)	CFRP (m ²)	هزینه CFRP (ریال)	هزینه ساخت ستون (ریال)	نسبت هزینه ساخت ستون به هزینه ستون H	نسبت مقاومت ستون به مقاومت ستون H
H	۶۵۰,۰۰۰	-	-	-	-	۶۵۰,۰۰۰	۱	۱
HF1	۶۵۰,۰۰۰	-	-	۰/۴	۳۶۰,۰۰۰	۱,۰۱۰,۰۰۰	۱/۵۵	۱/۱۲
HF2	۶۵۰,۰۰۰	-	-	۰/۸	۷۲۰,۰۰۰	۱,۳۷۰,۰۰۰	۲/۱۱	۱/۳۹
GH	۵۵۰,۰۰۰	۰/۶	۶۰۰,۰۰۰	-	-	۱,۱۵۰,۰۰۰	۱/۷۷	۳/۶۷
GHF1	۵۵۰,۰۰۰	۰/۶	۶۰۰,۰۰۰	۰/۴	۳۶۰,۰۰۰	۱,۵۱۰,۰۰۰	۲/۳۲	۳/۹۸
GHF2	۵۵۰,۰۰۰	۰/۶	۶۰۰,۰۰۰	۰/۸	۷۲۰,۰۰۰	۱,۸۷۰,۰۰۰	۲/۸۷	۴/۲۳

نسبت مقاومت و هزینه ستون‌های این تحقیق به ستون H در شکل (۱۲) نشان داده شده است. مقایسه مقاومت و هزینه ستون‌ها، در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که نسبت مقاومت فشاری ایجاد شده توسط دورپیچ‌های CFRP در ستون‌های فاقد غلاف کم‌تر از نسبت هزینه

انجام شده می‌باشد، در حالی که در ستون‌های دارای غلاف GRP، افزایش مقاومت ایجاد شده نسبت به ستون H بیش‌تر از هزینه انجام شده برای مقاوم‌سازی آن‌ها می‌باشد، و به‌طور میانگین افزایش مقاومت فشاری حدود ۱/۷۱ برابر افزایش هزینه ساخت بوده است؛ لذا استفاده از غلاف GRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح مقرون به صرفه می‌باشد. همچنین مشهود است که استفاده از CFRP، در ستون‌های دارای غلاف مقرون به صرفه نیست، زیرا اضافه مقاومت ایجاد شده ناشی از مقاوم‌سازی با این مصالح کم‌تر از هزینه انجام شده می‌باشد. از بین ستون‌های مورد مطالعه ستون GH بیش‌ترین نسبت افزایش مقاومت فشاری به هزینه ساخت به میزان ۲/۰۷ را دارد، لذا می‌توان این ستون‌ها را به عنوان اقتصادی‌ترین ستون‌ها برای اجراء پیشنهاد کرد.



شکل ۱۲- مقایسه درصد افزایش مقاومت و هزینه ساخت ستون‌ها نسبت به ستون H

۵- نتایج

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

- ۱- استفاده از غلاف GRP به عنوان قالب و تقویت ستون‌های بتن مسلح باعث افزایش تحمل بار فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای گردید، به‌طوری‌که در ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، مقاومت فشاری به طور میانگین ۳/۳۸ برابر بیش‌تر می‌باشد.
- ۲- تقویت ستون‌های بتن مسلح با دورپیچ FRP در ستون‌های فاقد غلاف GRP به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش تحمل بار فشاری می‌شود. به‌طوری‌که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به ترتیب باعث افزایش ۱۲٪ و ۳۹٪ در مقاومت فشاری گردید؛ در حالی است که در ستون‌های دارای غلاف GRP این اثر به دلیل وجود محصوریت GRP کم‌تر است، به این ترتیب که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ FRP به ترتیب باعث افزایش ۸٪ و ۱۵٪ در مقاومت فشاری گردید.
- ۳- افزایش لایه‌های دورپیچ FRP موجب افزایش تحمل نیروی فشاری گردید، این‌گونه که میانگین افزایش مقاومت ناشی از کاربرد یک لایه و دو لایه FRP نسبت به ستون‌های مشابه فاقد دورپیچ به ترتیب ۱۰/۲٪ و ۲۴/۸٪ بود.
- ۴- شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح با دورپیچ FRP در مقایسه با ستون‌های بتن مسلح فاقد دورپیچ بیشتر است. این‌گونه که استفاده از یک لایه و دو لایه الیاف باعث افزایش کرنش محوری نهایی به ترتیب به مقدار ۱۸٪ و ۳۷/۲٪ گردید. همچنین استفاده از غلاف GRP شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح را به مقدار زیادی افزایش داد، به‌طوری‌که میانگین افزایش کرنش محوری نهایی در ستون‌های دارای غلاف GRP نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف ۲۷۸٪ بوده است.
- ۵- گسیختگی در ستون‌های دارای غلاف GRP به‌صورت ترد و با صدای انفجار همراه بود، درحالی که گسیختگی در ستون‌های فاقد غلاف و دارای دورپیچ FRP به‌صورت نرم و با ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و پارگی FRP محصورکننده رخ داده است.
- ۶- مقایسه فنی و اقتصادی ستون‌های مورد مطالعه نشان داده که، استفاده از لوله‌های غلافی GRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها بسیار مقرون به صرفه‌تر از کاربرد دورپیچ FRP می‌باشد، به‌طوری‌که افزایش مقاومت در ستون‌های دارای غلاف بیش‌تر از هزینه انجام شده

برای مقاومسازی آنها بود، ولی نسبت افزایش مقاومت حاصل از دورپیچ FRP در ستون‌های با و بدون غلاف به هزینه صرف‌شده جهت مقاومسازی با این مصالح، کمتر بوده است.

۷- مقایسه مقاومت نهایی ستون‌های دارای غلاف این پژوهش با روابط ارائه شده توسط محققان دیگر برای تخمین مقاومت نهایی ستون‌های بتن مسلح محصور شده با غلاف یا دورپیچ FRP، همخوانی خوبی دارد.

مراجع

- [1] Tokgoz, S., Dundar, C., Tanrikulu., A.K., Experimental behaviour of steel fibre high-strength reinforced concrete and composite columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 74, pp. 98–107, 2012.
- [2] Dundar, C., Erturkmen, D., Tokgoz, S., Studies on carbon fibre polymer confined slender plain and steel fibre reinforced concrete columns, *Engineering Structures*, Vol. 102, pp. 31–39, 2015.
- [3] Mirmiran, A., Shahawy, M., A new concrete-filled hollow FRP composite column, *Composites: Part B*, Vol. 27, pp. 263-268, 1996.
- [4] Shahawy M., Mirmiran A., Beitelman T., Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns, *Composites: Part B, Engineering*, Vol.31, No.6, pp.471–80, 2000.
- [5] 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.
- [6] Sheikh, Sh.A., Performance of concrete structures retrofitted with fiber reinforced polymers, *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 869–879, 2002.
- [7] Wong, Y.L., Yu, T., Teng, J.G., Dong, S.L., Behavior of FRP-confined concrete in annular section columns, *Composites: Part B*, Vol. 39, pp. 451–466, 2008.
- [8] 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, No.4, pp. 175–85, 1998.
- [9] 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.
- [10] Ozbakkaloglu, T., Xie, T., Geopolymer concrete-filled FRP casings: Behaviour of circular and square columns under axial compression, *Composites: Part B*, Vol. 96, pp. 215-230, 2016.
- [11] Rahai, A.R., Sadeghian, P., Ehsani, M.R., Experimental Behaviour of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, October 2008.
- [12] Kumutha, R., Vaidyanathan, R., Palanichamy, M.S., Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 29, pp. 609–615, 2007.
- [13] Parvin, A., Jamwal, A.S., Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders, *Composites Structure*, Vol. 67, No. 4, pp. 437–422, 2005.
- [14] Almusallam, T.H., Behaviour of normal and high-strength concrete cylinders confined with E-glass/epoxy composite laminates, *Composites: Part B*, Vol.38, pp.629–639, 2007.
- [15] Vincent, T., Ozbakkaloglu, T., Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behaviour of FRP confined high- and ultra-high-strength concrete, *Composites: Part B*, Vol. 50, pp. 413–428, 2013.

- [16] Samaan, M., Miemiran, A. Shahawy, M., Model of concrete confined by fibre composite, Journal of Structural Engineering, Vol. 124, No. 9, pp. 1025-1031, 1998.
- [17] Ozbakkaloglu, T., Lim, J.C., Vincent, T., FRP-confined concrete in circular sections: review and assessment of stress-strain models, Engineering Structure, Vol.49, pp.1068-1088, 2013.
- [18] Youssef. M., Feng, M.Q., Mossalam, A., Stress-strain model for concrete confined by FRP composites, Composites: Part B, Engineering, Vol.38, pp.614-628, 2007.
- [19] Hadi M.N.S., Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns, Composite Structures, Vol.74, pp. 127-135, 2006.
- [20] Hadi, M.N.S., Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading, Composite Structures; Vol.77, No.1, pp.92-96, 2007.
- [21] Hadi M.N.S., The behaviour of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads, Composite Structures, Vol. 78, No. 4, pp. 560-566, 2007.
- [22] Ozbakkaloglu, T., Axial Compressive Behaviour of Square and Rectangular High-Strength Concrete-Filled FRP Tubes, journal of Composites for Construction, Vol. 17, pp. 151-161, 2013.
- [23] Malik, A.R., Foster, S.J., Carbon fiber-reinforced polymer confined reactive powder concrete columns - experimental investigation, ACI Structure Journal, Vol.107, No.3, pp.263-271, 2010.
- [24] 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.
- [25] Park, J.H., Jo, B.W., Yoon, S.J., Park, S.K., Experimental investigation on the structural behaviour of concrete filled FRP casings with/without steel rebar, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.15, No.2, pp. 337-345, 2011.
- [26] Hadi, M.N.S., Wang, W., Sheikh, M.N., Axial compressive behaviour of GFRP casing reinforced concrete columns, Construction and Building Materials, Vol. 81, pp. 198-207, 2015.
- [27] Wang, W., Sheikh, M.N., Hadi, M.N.S., Gao, D., Chen, G., Behaviour of concrete-encased concrete-filled FRP casing (CCFT) columns under axial compression, Engineering Structures, Vol. 147, pp. 256-268, 2017.
- [28] Yang, Y. F., Han, L.H., Wu, X., Concrete shrinkage and creep in recycled aggregate concrete-filled steel casings, Advances in Structural Engineering, Vol. 11, No.4, pp.383-396, 2008.
- [29] Ichinose, L.H., Watanabe, E., Nakai, H., An experimental study on creep of concrete filled steel pipes, Journal of Constructional Steel Research, Vol.57, pp. 453-466, 2001.
- [30] Shrestha, K. M., Chen, B.C., Chen, Y.F., State of the Art of Creep of Concrete Filled Steel Tubular Arches, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol.15, No.1, pp.145-151, 2011.
- [31] ASTM D7565/D7565M-10, Standard test method for determining tensile properties of fibre reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures, United States: ASTM International, 2010.
- [32] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29; 2001.

- [33] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63; 2002.
- [34] 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.
- [35] Jolly, C.K., Lilistone, D., The stress-strain behaviour of concrete confined by advanced fibre composites. In: Proc. 8th BCA conference higher education and the concrete industry. Southampton; 1998.

