تحقیقات بتن
سال چهاردهم، شمارهٔ چهارم
زمستان ۱۴۰۰
ص ۷۴ – ۵۹
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۳

بررسی و مقایسه ظرفیت و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌آرمه بیضی‌شکل با غلاف GRP و دورپیچ CFRP تحت نیروی محوری خالص

سیدفتح اله ساجدی *
دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
محمدمراد راغ پور
دانشجوی دکتری عمران- گرایش سازه، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

چکیده

پل‌ها به لحاظ رفتار نسبت به سازه‌های معمولی ویژه هستند. درجه نامعینی پل‌ها نسبت به ساختمان‌ها بسیار کم‌تر است، لذا شکست یک ستون در پل می‌تواند منجر به خرابی کامل شود. استفاده از کامپوزیت‌های الیاف پلیمری تقویتی به صورت دورپیچ به عنوان یکی از شیوه‌های مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌آرمه پل‌ها در سالیان اخیر مورد توجه زیادی است. سختی و مقاومت مشخصه بالا، عمر مفید زیاد، مقابله با خوردگی و خواص حرارتی قابل کنترل از امتیازات مهم FRP بر مصالح معمولی می‌باشد. کاربرد لوله‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه به‌عنوان غلاف ستون‌های پل‌ها باعث حذف قالب‌بندی، کاهش هزینه‌ها، افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری و کاهش آب‌شستگی اطراف پایه‌های پل می‌شوند. در این تحقیق بر روی شش نمونه ستون بتن‌آرمه بیضی‌شکل به قطرهای ۲۰۰ و۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر با و بدون غلاف، آزمایش مقاومت فشاری انجام شد و تأثیر دورپیچ الیاف پلیمری تقویتی کربنی برآن‌ها به‌عنوان محصورکننده بررسی گردید. نتایج نشان داد که دورپیچ و غلاف باعث افزایش مقاومت فشاری و شکل‌پذیری ستون‌ها می‌شوند. افزودن یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب به‌طور میانگین باعث افزایش ٪۱۹/۷ و ٪۲۸/۷ مقاومت گردید، درحالی‌که کاربرد غلاف افزایش ٤/١٥ برابری مقاومت ستون‌ها را نتیجه داد. هرچند دورپیچ و غلاف هر دو محصوریت ایجاد می‌کنند، ولی غلاف به خاطر محصوریت بیش‌تر، تأثیر بسیار افزون‌تر بر افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون‌های مذکور دارد. مقایسه محصوریت غلاف با دورپیچ در تغییرشکل نهایی محوری این ستون‌ها، نشان داد که غلاف بسیار مؤثرتر است.

واژه‌های کلیدی: **ستون بتن‌آرمه بیضی، ظرفیت، شکل‌پذیری، غلاف GRP، دورپیچ CFRP.**

* نویسنده مسئول: sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه کامپوزیت‌های CFRP با مقاومت بالا به‌طور گسترده در بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این کامپوزیت‌ها برای تقویت اجزای مختلف سازه از جمله تیرها، ستون‌ها و اجزای صفحه‌ای مانند دال‌های سقف و دیوارهای برشی قابل کاربرد هستند. با وجود استفاده گسترده، دستورکارهای موجود فاقد روش جامعی برای تقویت اجزای ستون‌های بتن‌مسلح تحت شرایط عمومی بارگذاری هستند. از آنجایی که ستون‌ها در سازه‌های بتنی درجا عموماً تحت اثرات توام نیروی محوری و خمش دو محوره قرار می‌گیرند، ارزیابی و تقویت آن‌ها تحت اثر تلاش‌های توام مذکور در کارهای عملی مقاوم‌سازی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. کاربرد CFRP برای تقویت اجزای سازه‌های بتن-مسلح به طور روزافزون در حال افزایش است. علت آن به سهولت نسبی اجراء، هزینه اجرای قابل قبول، عدم ایجاد اختلال زیاد در عملکرد روزانه ساختمان در مقایسه با سایر روش‌های تقویت برمی‌گردد. مصالح CFRP بسته به نحوهٔ قرارگیری الیاف (عرضی و یا طولی نسبت به محور ستون)، از طریق افزایش محصورشدگی بتن هسته و یا مقاومت کششی الیاف و در نتیجه افزایش لنگر خمشی قابل تحمل مقطع، می‌تواند منجر به بهبود رفتار ستون‌های بتن‌مسلح از نظر مقاومت و شکل‌پذیری گردند [۱].

تاکنون تحقیقات زیادی روی رفتار فشاری محوری بتن محصور شده با CFRP انجام شده است. قریب به اتفاق مطالعات انجام شده بر این امر اجماع نظر دارند که استفاده از دورپیچ CFRP باعث افزایش مقاومت و شکل‌پذیری محوری ستون‌ها می‌شود[۳-۲]. هم‌چنین تحقیقات انجام شده در مورد افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ نشان داده است که ظرفیت فشاری محوری و شکل‌پذیری ستون‌های محصور شده با دورپیچ CFRP با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش می‌یابند، اما این افزایش متناسب با افزایش تعداد لایه‌ها نیست، لایه اول دورپیچ تأثیر فراوانی بر ظرفیت نهایی خواهد داشت، اما افزودن لایه‌های بعدی تأثیر کم‌تری دارند [۵-۴]. همچنین تحقیقات انجام شده در مورد شکل مقطع ستون‌های مقاوم‌سازی شده نشان داده است، که مقاطع مربعی و مستطیلی به اندازه مقاطع دایره‌ای تحت اثر محصورشدگی قرار نمی-گیرند، زیرا در این مقاطع بر خلاف مقاطع دایره‌ای فشار محصورکننده یکنواخت نیست و ستون‌های مربعی نسبت به ستون‌های دایره‌ای در نقطه کرنش حداکثر تنش نهایی کم‌تری را از خود نشان می‌دهند [۹-۶]. به‌علاوه بررسی ستون‌های بتن‌مسلح توخالی محصورشده با دورپیچ CFRP نشان می‌دهد این ستون‌ها عملکرد بهتری در تحمل بارهای محوری دارند، و ستون‌های توخالی بتن‌مسلح که دارای حفره‌های دایره‌ای بودند، بار نهایی بیش‌تری در مقایسه با ستون‌هایی که حفره-های مربعی داشتند تحمل می‌کنند [۱۱-۱۰].

لوله‌های GRP از یک بستررزینی تشکیل و با الیاف شیشه تقویت می‌شوند. ساخت این لوله‌ها براساس فرآیند پیشرفته الیاف‌پیچی به روش پیوسته می‌باشد. این فرایند امکان استفاده از الیاف پیوسته شیشه را در پیرامون لوله به همراه الیاف بریده شده ناپیوسته که در جهات مختلف درترکیب لوله قرار می‌گیرند، فراهم می‌آورد. به‌کارگیری الیاف پیوسته در این جهت باعث افزایش مقاومت لوله وکاهش هزینه تولید آن می‌گردد. در این روش از سه نوع ماده اولیه اصلی جهت ایجاد لایه‌ای فشرده با حداکثر بازدهی استفاده می‌شود. علاوه بر رزین، الیاف شیشه‌ای پیوسته و الیاف بریده شده با هم برای ایجاد مقاومت حلقوی بالا و تقویت مقاومت محوری به‌کار می‌روند.

از مزایای لوله‌های GRP می‌توان به مواردی از قبیل مقاومت در برابر خلاء کامل، حداقل طول عمر ۵۰ سال، مقاومت در برابر خوردگی و عدم نیاز به پوشش‌های داخلی و خارجی، قابلیت تولید در طول‌های بلند (۱۲-۶) متر، مقاومت مکانیکی خوب و جذب نیروهای وارده در اثر ضربه به علت دارا بودن خاصیت ارتجاعی، صافی سطح داخلی لوله و در نتیجه افت فشار کمتر نسبت به برخی از لوله‌ها، سبکی وزن و نصب سریع‌تر، امکان نصب زیرزمینی لوله‌ها تا حداکثر عمق ۱۶ متر، تولید در اقطار ۱۰۰ تا ۲۴۰۰ میلی‌متر تا فشار کاری ۳۲ بار اشاره کرد [۱۲].

از مواردی که به‌ندرت بررسی شده است، استفاده از لوله‌های GRP بیضی‌شکل به‌عنوان غلاف ستون‌های بتنی می‌باشد، که در این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد. تاکنون تحقیقات زیادی درخصوص رفتار ستون‌های فولادی بیضوی پرشده با بتن تحت نیروی فشاری انجام شده است. دراکثر مطالعات انجام شده مودهای شکست به‌صورت کمانش موضعی در لوله‌های فلزی و گسیختگی برشی در بتن پرکننده مشاهده گردید، و با کاهش نسبت قطر به ضخامت شکل‌پذیری خمشی افزایش، و با افزایش نسبت قطر به ضخامت شکل‌پذیری کاهش یافت. شکست تمام ستون‌های لاغر با کمانش خمشی کلی اتفاق افتاد، اما در اکثر موارد تسلیم موضعی فولاد قبل از کمانش نهایی رخ داده است [۱۶-۱۳]. علاوه بر این

تحقیقات انجام شده بر روی تیرستون‌های لاغر با مقطع بیضی‌شکل توخالی پرشده از بتن نشان داده است که ظرفیت باربری نهایی با افزایش لاغری کاهش می‌یابد و با افزایش درصد فولاد تقویتی ظرفیت باربری اضافی ایجاد شده است، که منجر به افزایش ظرفیت باربری نهایی گردید. افزایش نسبت ابعاد بیضی باعث کاهش ظرفیت فشاری محوری و خمشی می‌شود[۱۸-۱۷].

در این تحقیق هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر جداگانه و همزمان اثر غلاف GRP و دورپیچ CFRP بر رفتار ستون‌های بتن‌مسلح با مقطع بیضی می‌باشد، که با ساخت ۶ نمونه ستون بتن‌مسلح بیضی-شکل با قطرهای ۱۲۰ و ۲۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر با و بدون حضور غلاف لوله‌ای GRP، و انجام آزمایش مقاومت فشاری و تعیین تغییرشکل محوری آن‌ها، این هدف دنبال شده است.

۲- مشخصات دورپیچ CFRP و غلاف GRP مصرفی

ورقه‌های کامپوزیتی CFRP استفاده شده در تحقیق به صورت یک‌جهته و ساخت شرکت TORAY ژاپن می‌باشند. خواص مکانیکی مصالح CFRP براساس اطلاعات کارخانه تولید کننده، از آزمایش‌های انجام شده به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D7565 [۱۹] و ASTM D2996 [۲۰] در جدول (۱) ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مصرفی ساخت شرکت پایا و به‌صورت دوجزئی متشکل از رزین و سخت کننده می‌باشد که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط می‌شوند. 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 [۲۱] به‌دست آمده‌اند.

لوله‌های کامپوزیتی GRP بیضی‌شکل ساخت کارخانه فرابرد شیراز می‌باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می‌شوند. این لوله‌ها برحسب فشار داخلی که تحمل می‌کنند، دسته‌بندی می‌شوند. در این تحقیق از لوله‌های GRP بیضی‌شکل با تحمل فشار داخلی ۱۰ بار استفاده شده است. مشخصات لوله‌های GRP مصرفی براساس اطلاعات کارخانه تولید کننده از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D2996 [۲۲] در جدول (۱) ارائه شده‌اند. جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق از لوله‌های GRP به طول ۶۰۰، قطرهای داخلی ۱۲۰ و ۲۰۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی دورپیچ CFRP و لوله‌های کامپوزیتی GRP [۲۰، ۲۲]

مشخصات کامپوزیت	دورپیچ CFRP	غلاف لوله GRP
ضخامت (mm)	۰/۱۶۶	۸
چگالی (kg/m^3)	–	۱۸۰۰
وزن در واحد سطح (g/m^2)	۳۰۰	–
تنش کششی(MPa)	۴۹۰۰	۷۵
ضریب ارتجاعی استاتیکی (GPa)	۲۳۰	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۴
کرنش نهایی (%)	۲/۵	۱/۳

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 ACI211 [۲۳] تهیه و پس از عمل‌آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها به‌عمل آمد. جهت ایجاد تراکم در بتن استفاده شده در ساخت ستون‌ها، اسلامپ ۸۰ میلی‌متر بود. جزئیات طرح اختلاط بتن مصرفی در ساخت نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است.

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

سیمان نوع۲	آب	شن	ماسه	w/c
۴۰۰	۱۶۰	۹۰۴	۹۰۶	۰/۴

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای ۳۲/۳ مگاپاسکال بوده است.

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

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین
۳۱/۹	۳۳/۰	۳۱/۹	۳۲/۳

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۶ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر هستند، که آزمایش مقاومت فشاری بر روی آن‌ها انجام شده است. تمام ستون‌ها از بتن‌مسلح ساخته شدند. ستون‌ها به دو گروه ۳ تایی تقسیم شده و در گروه (۱) سه ستون دارای غلاف GRP و در گروه (۲) سه ستون دیگر فاقد غلاف بودند، از هر بخش ۳ تایی یک ستون فاقد دورپیچ FRP، یک ستون با یک لایه و دیگری با دو لایه دورپیچ شدند. ستون‌ها براساس اجزای تشکیل دهنده نام‌گذاری شدند. برای ستون-های بتنی فاقد دورپیچ و غلاف حرف (N)، ستون‌های دارای غلاف GRP حرف (G) و ستون‌های دارای دورپیچ FRP حرف (F) منظور گردیدند. عددی که پس از حرف F آمده نشانگر تعداد لایه-های FRP می‌باشد. در جدول (۴) مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق ارائه گردیده است.

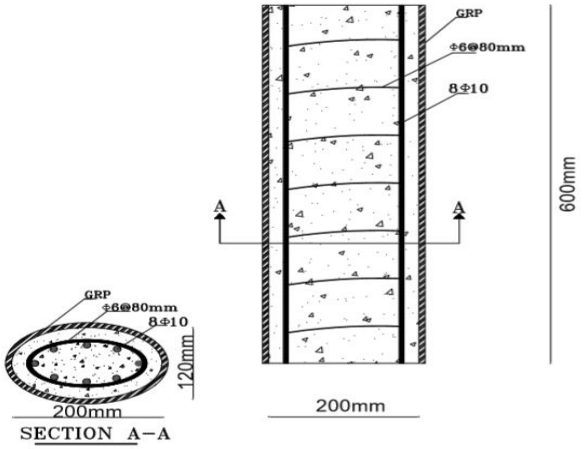
جدول ۴- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق

نام نمونه	ارتفاع (mm)	لوله غلاف GRP	دورپیچ CFRP	تعداد لایه-های دورپیچ
N	۶۰۰	ندارد	ندارد	–
NF1	۶۰۰	ندارد	دارد	۱
NF2	۶۰۰	ندارد	دارد	۲
GN	۶۰۰	دارد	ندارد	–
GNF1	۶۰۰	دارد	دارد	۱
GNF2	۶۰۰	دارد	دارد	۲

ابعاد مقطع همه نمونه‌ها mm ۲۰۰*۱۲۰ است.

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۶ عدد ستون بتنی با مقطع بیضی با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر هستند. همچنین یک نمونه به‌عنوان ذخیره در نظر گرفته شد که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش‌ها، مورد استفاده قرار بگیرد. میزان آرماتورهای طولی مصرفی در همهٔ ستون‌ها برابر ٪۲/۸ سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد آرماتور آجدار به قطر ۱۰ میلی‌متر و ۲ عدد آرماتور آجدار به قطر ۶ میلی‌متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش روی آرماتورهای طولی، این آرماتورها در فاصلهٔ ۲۰ میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند؛ بنابراین طول واقعی آرماتورهای طولی ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در هر شبکه، آرماتور مارپیچ با گام ۸۰ و به قطر ۶ میلی‌متر استفاده گردید؛ این گام به‌صورتی انتخاب شده که محصورشدگی داخلی زیادی توسط خاموت‌ها ایجاد نشود. پوشش بتن روی آرماتورها به مقدار ۲۰ میلی‌متر منظور گردید. جهت تأمین پوشش مورد نظر برای آرماتورهای طولی و عرضی، از فاصله‌انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماتورها براساس کاتالوگ کارخانه سازنده برای آرماتورهای طولی و عرضی به‌ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال می‌باشد [۲۴]. در شکل ۱ مقاطع عرضی و طولی ستون‌های مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- مقاطع طولی و عرضی ستون‌های تحقیق

در مرحله بعد ساخت ستون‌ها، قالب بیضی‌شکل مطابق شکل ۲ با قطرهای ۲۰۰ و ۱۲۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر ساخته شده، سپس ۳ عدد لوله GRP جهت ساخت ستون‌های با غلاف و ۴ عدد لوله GRP جهت قالب ستون‌های بدون غلاف تهیه گردید. لوله‌ها و قالب‌ها بر روی صفحات فلزی قرار گرفتند و سطح داخلی قالب‌ها جهت جداسازی آسان قالب از سطح بتن به روغن آغشته شدند و قفسه میلگردها در قالب قرار داده شدند. شکل (۳) نحوهٔ قرارگیری قفسه میلگردها را درون غلاف GRP و قالب نشان می‌دهد.

جهت بتن‌ریزی از بتن با مقاومت معمولی و با اسلامپ ۸۰ میلی‌متر استفاده گردید. پس از باز کردن قالب‌ها، ستون‌ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار گرفتند و پس از عمل‌آوری، ستون‌ها با مصالح CFRP دورپیچ شدند. جهت آماده‌سازی ستون‌های بتنی برای نصب لایه‌های CFRP قبل از استفاده از چسب اپوکسی،

ابتدا سطح بیرونی ستون‌ها به‌طور کامل صاف، تمیز و خشک گردید. چسب اپوکسی مصرفی دوجزئی 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 بیضی‌شکل ستون‌های بتنی مالیده شد و لایه-های دورپیچ CFRP با دقت به دور ستون‌ها پیچیده شدند. لبه‌های انتهایی دورپیچ CFRP جهت اطمینان از عدم جدایی، به میزان ۱۰۰ میلی‌متر همپوشانی شدند.

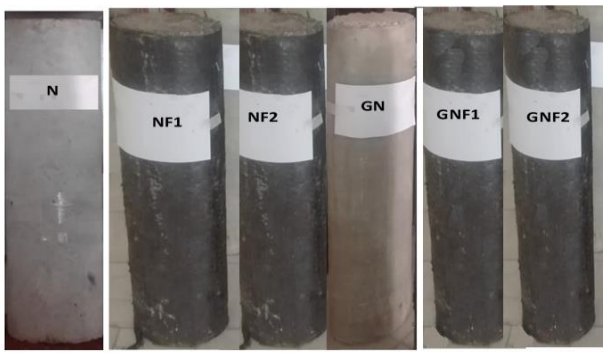
شکل ۲- قالب بیضی‌شکل

شکل ۳- نحوه قرارگیری قفسه میلگردها درون غلاف و قالب GRP

برای ستون‌هایی که دارای دو لایه CFRP بودند، به مدت ۲ ساعت پس از نصب لایه اول، لایه دوم دورپیچ گردید. تمام ستون-ها با زاویه صفر درجه دورپیچ شدند و به‌منظور عمل‌آوری چسب اپوکسی، ستون‌ها به‌مدت 7 روز در دمای محیط نگهداری شدند. در شکل (۴) ستون‌های تحقیق، پس از دورپیچی با CFRP نشان داده شده‌اند.

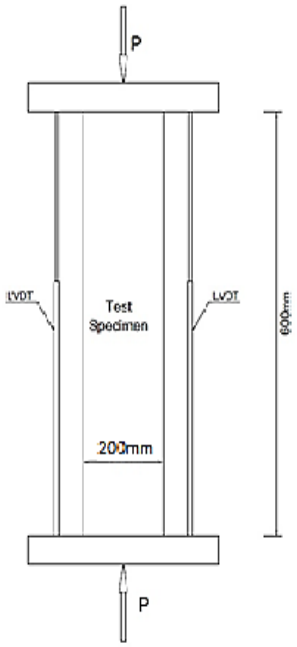
۳-٤- آزمایش ستون‌ها

ستون‌های تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک‌محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلونیوتن در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان آزمایش شدند.



شکل ۴- ستون‌های تحقیق پس از دورپیچی با CFRP

آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییرشکل و با نرخ بارگذاری $\frac{KN}{S}$ ۱۰ انجام شد[۲۳]. جهت تعیین تغییرشکل‌های محوری ستون‌ها، دو عدد جابجایی‌سنج[1] در دوطرف ستون‌ها نصب شدند که در شکل ۵ محل نصب آن‌ها نشان داده شده است.



شکل۵- محل نصب جابجایی‌سنج‌های محوری

اطلاعات مربوط به تغییرشکل‌های محوری ستون‌ها، در هر ثانیه با استفاده از دیتالاگر الکترونیکی[2] متصل به کامپیوتر ثبت شدند. هم-چنین به‌منظور ترسیم نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰۰ کیلونیوتنی 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.

[1] Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

[2] Electronic data-logger

در شکل ۶ نحوه آزمایش نمونه‌ها توسط جک آزمایشگاهی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی نمایش داده شده است.

شکل ۶- نحوه آزمایش نمونه‌ها توسط جک هیدرولیکی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی

٤- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

٤-١- ظرفیت نهایی ستون‌ها

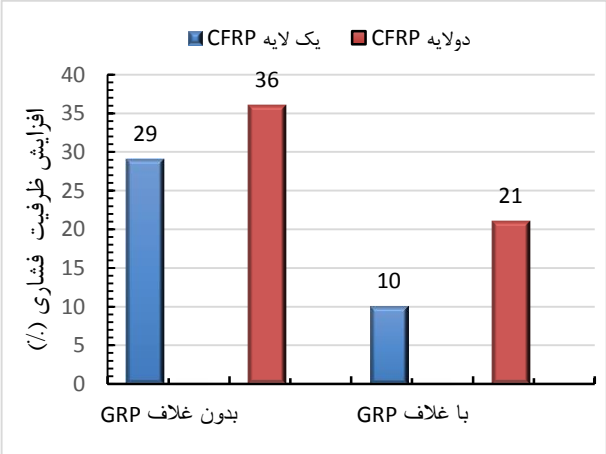
ستون‌ها توسط جک آزمایشگاهی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت $\frac{KN}{S}$ ۱۰ بارگذاری شدند، ظرفیت و تغییرمکان نهایی ستون‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

جدول ۵- ظرفیت و تغییرمکان نهایی ستون‌های تحقیق

نام ستون	ظرفیت نهایی (kN)	* میانگین تغییرمکان‌های محوری (mm)
N	۴۷۲/۵	۱/۹
NF1	۶۱۱/۲	۲/۴
NF2	۶۴۴/۶	۲/۸
GN	۲۱۴۹/۲	۷/۹
GNF1	۲۳۶۳/۷	۹/۶
GNF2	۲۶۰۱/۵	۱۱/۷

* باتوجه به استفاده از دو عدد جابجایی‌سنج در دو طرف ستون‌های تحقیق، میانگین تغییرمکان‌های محوری لحاظ گردید.

همان‌گونه که در جدول ۵ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، استفاده از یک لایه و دو لایه CFRP در ستون‌های بتن‌مسلح فاقد غلاف GRP به ترتیب باعث افزایش ۲۹٪ و ۳۶٪ و در ستون‌های دارای غلاف GRP نیز باعث افزایش ۱۰٪ و ۲۱٪ در ظرفیت نهایی ستون‌ها شده است. لذا تأیید می‌گردد که استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور نمودن ستون‌های بتن‌مسلح، می‌تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی آن‌ها داشته باشد. به‌علاوه استفاده از CFRP در ستون‌های دارای غلاف GRP به علت اثر محصوریت زیاد غلاف، تاثیر قابل‌توجهی ایجاد نمی‌کند، لذا می‌توان گفت که در صورت استفاده از غلاف، کارآیی CFRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل اقتصادی نمی‌باشد.

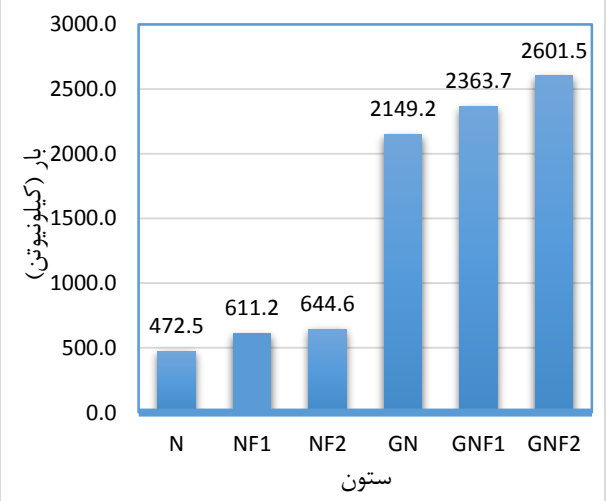


شکل ۷- تاثیر دورپیچ CFRP بر افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های تحقیق

همان‌گونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، استفاده از غلاف GRP در مقایسه با دورپیچ CFRP بسیار موثرتر می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از غلاف GRP به طور میانگین باعث افزایش ۴/۱۵ برابری ظرفیت فشاری ستون‌ها شده است. این در حالی است که افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به طور متوسط باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ٪ ۱۹/۷ و ٪۲۸/۷ شده است.

مقایسه تغییرمکان محوری نهایی در ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل فاقد غلاف GRP نشان می‌دهد که، استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به‌ترتیب باعث افزایش ٪۲۳/۷ و ٪۴۲/۹ در تغییرمکان نهایی این ستون‌ها می‌شود، در حالی‌که در ستون‌های دارای غلاف GRP، این مقادیر افزایش ٪۲۱/۶ و ٪۴۸/۳ می‌باشند. لذا مشاهده می‌گردد که استفاده از دورپیچ CFRP برای محصور

کردن ستون‌های بتنی باعث افزایش تغییرمکان نهایی محوری آن‌ها می‌گردد، که این تاثیر در ستون‌های دارای غلاف به جهت اثر محصوریت غلاف مذکور بیش‌تر می‌باشد. هم‌چنین مقایسه اثر محصوریت غلاف لوله‌های GRP با دورپیچ CFRP در تغییرمکان نهایی محوری ستون‌های بتن‌مسلح نشان می‌دهد که این غلاف‌ها بسیار مؤثرتر می‌باشند. به‌عنوان مثال در ستون‌های دارای غلاف GRP و بدون کاربرد دورپیچ CFRP به میزان ٪۳۱۰ افزایش در تغییرمکان نهایی محوری ایجاد شده، در حالی که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش تغییرمکان نهایی محوری به میزان ٪۲۳/۷ و ٪۴۲/۹ شده است. تاثیر زیاد لوله‌های GRP در ایجاد تغییرمکان نهایی محوری را می‌توان در ساختار این لوله‌ها و وجود الیاف در ساخت آن‌ها دانست، لذا استفاده از غلاف GRP در مناطقی که نیاز به طراحی شکل‌پذیر دارند، می‌تواند بسیار مفید باشد.

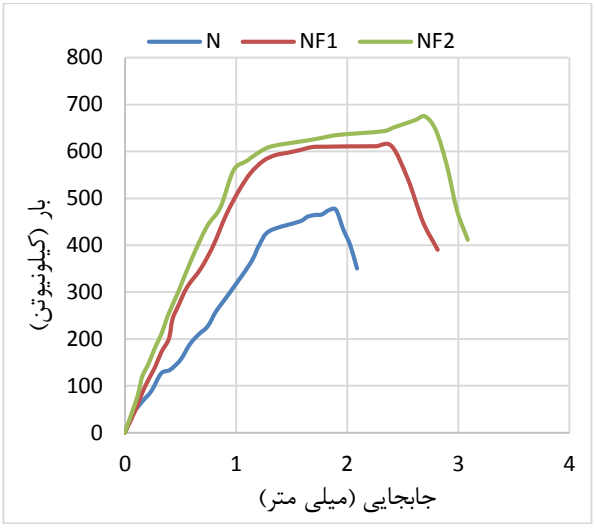


شکل ۸- ظرفیت فشاری ستون‌های تحقیق

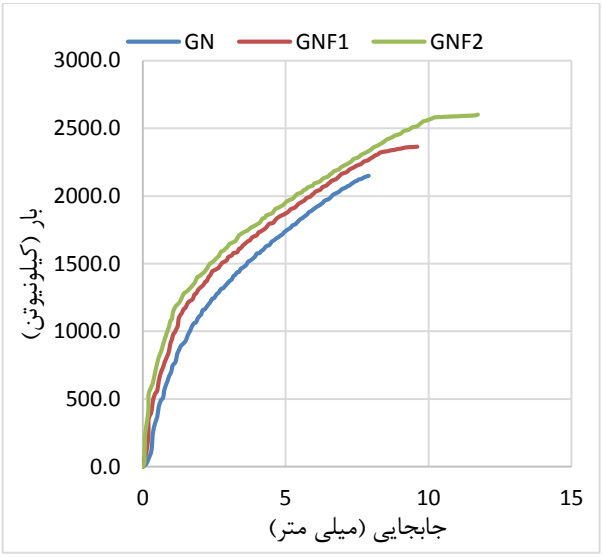
٤-۲- منحنی بار - تغییرمکان ستون‌ها

به منظور مقایسه رفتار ستون‌ها، منحنی‌های بار-تغییرمکان مربوط به تغییرمکان محوری ستون‌های با و بدون غلاف در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

بر اساس منحنی‌های بار-تغییرمکان محوری در اشکال ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌شود که با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن مسلح با مصالح CFRP، تغییرمکان‌های محوری آن‌ها افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش شکل‌پذیری در ستون‌های دورپیچ‌شده با CFRP می‌باشد. هم‌چنین ظرفیت فشاری در این ستون‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.



شکل ۹- منحنی بار-تغییرمکان محوری برای ستون‌های فاقد غلاف GRP



شکل ۱۰- منحنی بار-تغییرمکان محوری برای ستون‌های دارای غلاف GRP

بررسی دقیق‌تر منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری ستون‌های فاقد غلاف نشان می‌دهد که این منحنی‌ها از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل شده‌اند، مشاهده شده که تغییر رفتار ستون ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و شروع به‌کار دورپیچ CFRP و ادامه روند مقاومت تحت بارهای فشاری می‌باشد. هم‌چنین منحنی‌های بار- تغییرمکان محوری ستون‌های دارای غلاف از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم-شونده 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 مشهود است که

دورپیچ نمودن ستون‌ها با CFRP باعث افزایش سختی ستون و کاهش تغییرمکان محوری شده که علت آن را می‌توان ایجاد محصوریت ناشی از دورپیچ دانست.

٤-٣- بررسی نحوهٔ گسیختگی ستون‌ها

نحوهٔ گسیختگی ستون‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، در ستون‌های فاقد غلاف GRP اکثرا گسیختگی به علت کمانش میلگردهای ستون، به صورت موضعی و به‌تدریج 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 دانست. در ستون N که فاقد هرگونه محصوریت بود، ستون به‌علت ایجاد ترک‌های فشاری در بتن بالای ستون و در نهایت جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت و کمانش میلگردهای طولی، گسیخته شد. ستون NF1 که دارای یک لایه دورپیچ CFRP بود، نیز گسیختگی در بالای ستون و به علت خرد شدن بتن و در نهایت پارگی CFRP اتفاق افتاد. در این ستون برخلاف ستون قبلی محصوریت ناشی از دورپیچ CFRP باعث خردشدگی کمتر بتن و گسیخته نشدن شبکه میلگردها و افزایش باربری ستون گردید.گسیختگی و تخریب در ستون NF2 مشابه ستون محصور شده با یک لایه CFRPبود. 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 ستون‌ها اتفاق افتاد. در ستون‌های دارای ورق تقویتی، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زودهنگام گردید و در نهایت با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورق CFRP دچار پارگی و نهایتاً گسیختگی ستون گردید. در ستون‌های دارای غلاف GRP نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های فاقد غلاف بود. در ستون GN گسیختگی به طور کامل و به‌صورت انهدام با صدای انفجار در امتداد محور طولی و نیمه پایینی ستون اتفاق افتاد. در ستونGNF1 گسیختگی مشابه ستون GNبود، با این تفاوت که محصوریت بیشتر ناشی از اعمال لایه CFRPباعث گردید تا بتن ستون تغییرشکل فشاری بیشتری تحمل کند، و در نهایت در یک سوم پایینی با کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ گسیخته شود.

N NF1 NF2

GN GNF1 GNF2

شکل ۱۱- نحوه گسیختگی ستون‌ها پس از بارگذاری

در ستون GNF2 نیز گسیختگی مشابه ستون قبلی بود، با این تفاوت که محصوریت زیادتر ناشی از اعمال دولایه CFRP باعث گردید تا گسیختگی به‌صورت کلی در میانه طول ستون با وقوع کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ اتفاق افتد . به‌طور کلی علت گسیختگی کامل و آنی ستون‌های دارای غلاف GRPرا می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ایجاد شده ناشی از غلاف GRP دانست، این میزان محصوریت باعث رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر تغییرشکل قابل تحمل خود و هم‌چنین

کمانش میلگردهای طولی و در نهایت گسیختگی ستون گردید.

٤-٤- تجزیه و تحلیل نتایج

٤-٤-١- مقایسه نتایج با روابط آیین‌نامه‌ای

تاکنون روابط متعددی برای محاسبه ظرفیت فشاری بتن محصورشده با دورپیچ CFRP و همچنین ظرفیت نهایی ستون-های مقاوم‌سازی شده با غلاف و دورپیچ CFRP پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به مدل لام و تنگ [۲۵][1] به‌صورت رابطه (۱) اشاره کرد. در این رابطه f'_{co} ، f'_{cc} و f_l به‌ترتیب ظرفیت فشاری بتن محصورنشده، ظرفیت فشاری بتن محصورشده و فشار محصورشدگی معادل می‌باشند.

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 k_s f_l \qquad (۱)$$

در رابطه (۱)، k_1 ضریب تأثیر محصورشدگی می‌باشد که طبق پیشنهاد لام و تنگ برابر ۲ می‌باشد. ضریب k_s با استفاده از رابطه ساده (۲) به‌دست می‌آید.

$$ks = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \qquad (۲)$$

در مدل لام و تنگ برای تعیین فشار محصورشدگی معادل (f_l)، برای ستون‌های دایروی این مقدار برابر واحد در نظر گرفته شد تا بتوان از آن برای تعیین و مقایسه این مقدار با مقاطع غیردایروی که به همین میزان دورپیچ CFRP دارند، استفاده کرد.

مساحت یک بیضی برابر با πab می‌باشد و محیط آن تقریبا به مقدار $\pi\left[1.5(a+b)-\sqrt{\text{ab}}\right]$ نزدیک می‌باشد. بنابراین نسبت حجمی CFRP برای ستون بیضوی که با CFRP به ضخامت t_{frp} روکش شده است، از رابطه (۳) به‌دست می‌آید.

$$\rho_{frp} = \frac{t_{frp}\left[1.5(a+b)-\sqrt{\text{ab}}\right]}{ab} \qquad (۳)$$

a و b نصف قطرهای بیضی می‌باشند؛ بنابراین فشار محصورشدگی معادل از رابطه (۴) قابل محاسبه خواهد بود.

$$f_l = \frac{f_{frp}\rho_{frp}}{2} = \frac{t_{frp}\left[1.5(a+b)-\sqrt{\text{ab}}\right]f_{frp}}{2ab} \qquad (۴)$$

لذا ظرفیت محوری نهایی ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل با غلاف و دورپیچ CFRP طبق آئین‌نامه BS810 [۲۶] از رابطه (۵) به-دست می‌آید.

$$P_u = \left(\frac{0.67}{\gamma_c} f'_{co} + \frac{k_1 k_s f_l}{\gamma_{frp}}\right)A_c + \frac{f_y A_{sc}}{\gamma_s} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، A_{sc}، A_c، γ_c، γ_s و γ_{frp} به‌ترتیب بیانگر سطح مقطع میلگردهای طولی، سطح مقطع بتن، ضریب جزئی ایمنی بتن، ضریب جزئی ایمنی فولاد و ضریب جزئی ایمنی دورپیچ CFRP می‌باشند. با جایگذاری مشخصات کامپوزیت‌های مصرفی تحقیق در روابط بالا و با تجمیع اثرات غلاف و دورپیچ در ستون‌های ترکیبی، مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط مذکور در جدول ۶ ارائه شده است.

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که همخوانی خوبی بین نتایج تحقیق و روابط آیین‌نامه‌ای وجود دارد.

جدول ۶- مقایسه ظرفیت فشاری آزمایشگاهی ستون‌های تحقیق با آیین‌نامه BS810

نام ستون	ظرفیت فشاری بتن محصورنشده f'_{co}(MPa)	ظرفیت فشاری بتن محصورشده f'_{cc}(MPa)	ظرفیت نهایی ستون محصورشده $P_u(kN)$	ظرفیت نهایی آزمایشگاهی $P_{exp}(kN)$	$\frac{P_u-P_{exp}}{P_{exp}}$ (٪)
N	۳۲/۳	۳۲/۳	۴۸۲/۱	۴۷۲/۵	۲/۰
NF1	۳۲/۳	۴۰/۲	۶۰۱/۷	۶۱۱/۲	−۱/۶
NF2	۳۲/۳	۴۸/۱۶	۷۲۱/۳	۶۴۴/۶	۱۱/۹
GN	۳۲/۳	۱۵۱/۸	۲۲۸۲/۷	۲۱۴۹/۲	۶/۲
GNF1	۳۲/۳	۱۵۹/۷	۲۴۰۲/۰	۲۳۶۳/۷	۱/۶
GNF2	۳۲/۳	۱۶۷/۶	۲۵۲۱/۹	۲۶۰۱/۵	−۳/۰

[1] Lam and Teng

٤-٤-٢- مقایسه نتایج با سایر تحقیقات

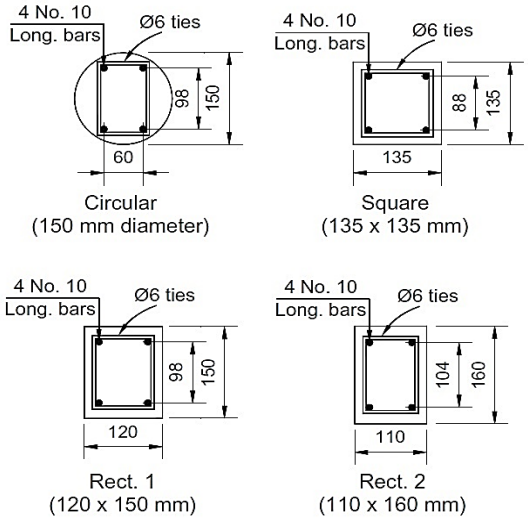
ساجدی و شفیعی‌نیا در سال ۲۰۱۹ تحقیقی روی ۱۲ عدد ستون بتن‌مسلح با مقطع دایره‌ای به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر و میزان میلگرد طولی ٪۲/۷ سطح مقطع ناخالص ستون با گروه‌بندی مشابه و ساخته شده از بتن با میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای به مقدار ۳۲/۷ مگاپاسکال انجام دادند[۲۷]. مقایسه ظرفیت فشاری نهایی ستون‌های این تحقیق با نتایج تحقیق مذکور در جدول ۷ ارائه گردیده است.

جدول ۷- مقایسه ظرفیت فشاری نهایی آزمایشگاهی ستون‌های تحقیق با نتایج تحقیق ساجدی و شفیعی‌نیا [۲۷]

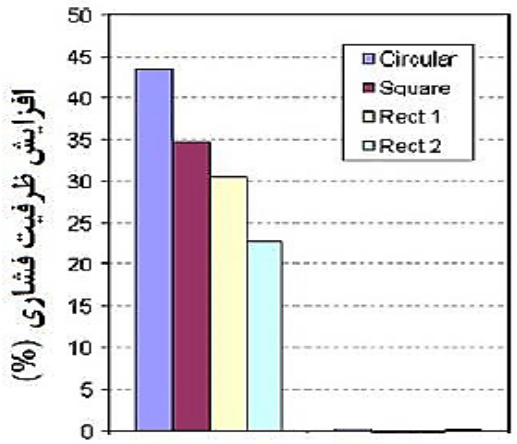
نام ستون	ظرفیت نهایی تحقیق ساجدی و شفیعی‌نیا $P_u(kN)$	ظرفیت نهایی آزمایشگاهی تحقیق $P_{exp}(kN)$	$\frac{P_u-P_{exp}}{P_{exp}}$ (٪)
N	۵۶۶/۰	۴۷۲/۵	-۱۹/۸
NF1	۷۱۵/۰	۶۱۱/۲	-۱۷/۰
NF2	۷۶۳/۰	۶۴۴/۶	-۱۸/۴
GN	۲۴۸۵/۰	۲۱۴۹/۲	-۱۵/۶
GNF1	۲۷۶۵/۰	۲۳۶۳/۷	-۱۷/۰
GNF2	۲۹۴۰/۰	۲۶۰۱/۵	-۱۳/۰

از جدول ۷ مشهود است که ظرفیت فشاری نهایی ستون‌های این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی ساجدی و شفیعی‌نیا [۲۷] و نتایج آزمایشگاهی لام و تنگ[۲۶] و هم‌چنین میرمیران و همکاران[1][۶] که معتقدند تأثیر محصورکنندگی دورپیچ CFRP در مقاطع بتنی غیردایروی نسبت به مقاطع دایروی تا حدی کم‌تر می‌باشد، همخوانی خوبی دارند.

ال ماداوی و همکاران[2] در سال ۲۰۱۰ تاثیر شکل مقطع و نحوه بارگذاری را بر عملکرد ستون بتن‌مسلح محصورشده با CFRP تحت بار محوری بررسی کردند. آن‌ها ۳۲ عدد ستون بتن‌مسلح با مقاطع دایروی، مربعی و مستطیلی با دو نسبت ابعاد مختلف (۱:۱/۲۵ و ۱:۱/۴۵) و به ارتفاع ۴۸۰ میلی‌متر را تحت بارگذاری محوری خالص قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش ظرفیت نهایی ستون محصور شده تحت بار محوری خالص از ٪۲۳ تا ٪۴۴ به ترتیب در مقاطع مستطیلی و دایروی تغییر می‌کند. افزایش ظرفیت در تحقیق حاضر ٪۲۹ است که همخوانی خوبی با نتایج آنها دارد. مقاطع استفاده شده در تحقیق ال ماداوی و همکاران در شکل ۱۲ و درصد افزایش ظرفیت فشاری در شکل ۱۳ نشان داده شده اند [۲۸].



شکل ۱۲- مقاطع نمونه‌های استفاده شده در تحقیق ال‌ماداوی و همکاران[۲۸]



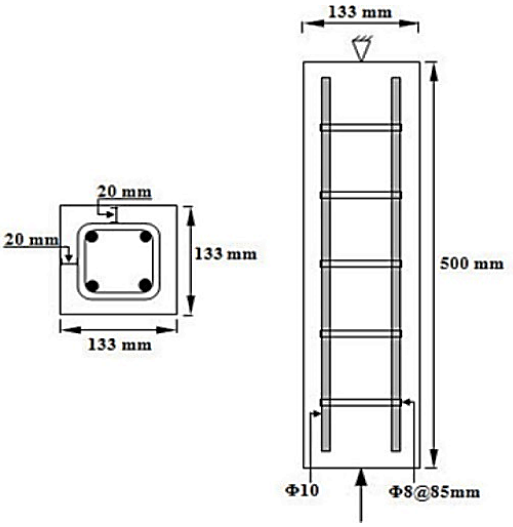
شکل ۱۳- درصد افزایش مقاومت فشاری ستون‌های استفاده شده در تحقیق ال‌ماداوی و همکاران [۲۸]

مستوفی‌نژاد و همکاران در سال ۱۳۹۳ به بررسی رفتار محوری ستون‌های بتن‌مسلح با مقطع مربعی، محصورشده با دورپیچ CFRP پرداختند. در این تحقیق ۴ نمونه ستون مربعی بتن‌آرمه به به مقطع ۱۳۳ و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و با خروج از مرکزیت‌های صفر و ۳۰ میلی‌متر آزمایش شدند. براساس نتایج آزمایشگاهی،

[1] Mirmiran et al.

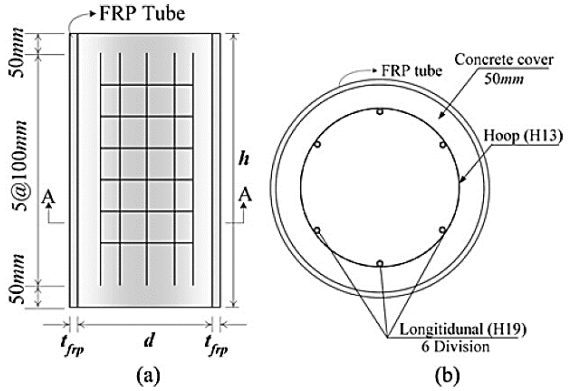
[2] EL Maaddawy et al.

محصورشدگی ستون‌ها باعث افزایش ظرفیت باربری آن‌ها گردید. میزان افزایش ظرفیت باربری مربوط به خروج از مرکزیت‌های صفر و ۳۰ میلی‌متر به ترتیب ٪۲۸/۲ و ٪۲۷/۱ بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که محصورکردن ستون‌ها با دورپیچ CFRP باعث افزایش شکل‌پذیری آن‌ها نیز می‌شود. در تحقیق حاضر میزان افزایش طرفیت فشاری نهایی با دورپیچ، ٪۲۹ است که با نتایج تحقیق آنها همخوانی خوبی دارد مقاطع طولی و عرضی ستون‌های تحقیق آنها در شکل ۱۴ نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۱۴- مقاطع طولی و عرضی نمونه‌های استفاده شده در تحقیق مستوفی‌نژاد و همکاران [۲۹]

پارک و همکاران[1] در سال ۲۰۰۹ تحقیقی آزمایشگاهی بر روی ستون‌های بتن‌مسلح با غلاف CFRP تحت بارهای محوری فشاری انجام دادند. در این تحقیق ۴ ستون بتنی به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر تحت بار محوری فشاری آزمایش شدند، که از این ستون‌ها یکی فاقد غلاف و سه ستون دیگر دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بودند. نتایج تحقیق نشان داد که محصور نمودن ستون‌ها با کاربرد غلاف CFRP باعث بهبود ظرفیت و شکل‌پذیری می‌شود، به طوری که ظرفیت فشاری نهایی در ستون‌های دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر به ترتیب ٪۶۸، ٪۱۴۵ و ٪۲۱۹ نسبت به ستون‌های فاقد غلاف افزایش داشته است. این میزان افزایش ظرفیت نهایی در تحقیق حاضر ٪۳۱۵ است؛ علت اختلاف ظرفیت را می‌توان به تفاوت موجود در جنس و ضخامت غلاف و دورپیچ مصرفی در دو تحقیق، مربوط دانست. در شکل ۱۵ مقاطع طولی و عرضی نمونه-های استفاده شده در تحقیق آنها نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۱۵- مقاطع طولی و عرضی ستون‌های استفاده شده در تحقیق پارک و همکاران [۳۰]

کوماتا و همکاران[2] در سال ۲۰۱۴ تحقیقی آزمایشگاهی بر رفتار ستون‌های مستطیلی به ارتفاع ۷۵۰ میلی‌متر تحت بار محوری خالص که با یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP محصور شده بودند، انجام دادند. در این تحقیق نه عدد ستون مستطیلی با نسبت ابعاد مقطع ۱، ۱/۲۵ و ۱/۶۷ با استفاده از دورپیچ مقاوم‌سازی شدند و اثر دورپیچ بر ظرفیت نهایی ستون‌ها بررسی گردید. در این تحقیق ستون‌ها به‌وسیله ۴ عدد میلگرد آجدار طولی به قطر ۱۰ و خاموت به قطر ۶ و با فاصله ۱۲۵ میلی‌متر مسلح شده بودند؛ مقاومت فشاری بتن ساخت ستون‌ها، ۲۷/۵ مگاپاسکال بود. نتایج نشان داد که استفاده از یک لایه دورپیچ باعث افزایش ظرفیت فشاری نهایی به میزان ٪۳/۵ ، ٪۳/۰ و ٪۲/۹ و دو لایه دورپیچ ٪۲۶/۱ ، ٪۲۲/۶ و ٪۱۶/۲ به ترتیب برای ستون‌های مستطیلی با نسبت ابعاد مقطع ۱، ۱/۲۵ و ۱/۶۷ گردید[۳۱]. در تحقیق حاضر مقدار افزایش ظرفیت نهایی برای یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب ٪۱۹/۷ و ٪۲۸/۷ می‌باشد؛ علت اختلاف نتایج تحقیق آنها با تحقیق حاضر را می‌توان در شکل مقطع دانست.

شابختی و همکاران در سال ۱۳۸۷ تحقیقی برای تعیین ظرفیت ستون‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP تحت بار محوری انجام دادند. در این تحقیق تعداد ۵۰ ستون با مقاطع مختلف دایره‌ای، مربعی و مستطیلی که با استفاده از لایه‌های مختلف CFRP مقاوم‌سازی شده بودند، مورد بررسی قرار گرفت؛ ستون‌ها در

[1] Park et al.

[2] Kumutha et al.

نرم‌افزار انسیس[1] مدل‌سازی گردیدند و اثر سطح مقطع و تعداد لایه‌های کامپوزیتی در ظرفیت ستون بررسی شدند. پس از انجام آزمایش‌ها به این نتیجه رسیدند که در تمام ستون‌ها دورپیچ کردن آن‌ها با یک لایه CFRP تأثیر فراوانی بر ظرفیت نهایی خواهد داشت، اما افزودن لایه دوم تأثیر چندانی بر افزایش ظرفیت باربری نخواهد گذاشت. ستون‌های دایره‌ای در مجموع عملکرد بهتری نسبت به ستون‌های مربعی داشتند[۳۲]. در تحقیق حاضر به‌کارگیری لایه اول دورپیچ باعث افزایش ظرفیت نهایی فشاری در ستون‌ها به میزان ٪۲۹ و لایه دوم نسبت به لایه اول باعث افزایش به میزان ٪۵ گردید که همخوانی خوبی با نتایج تحقیق مذکور دارد. قلیه و همکاران[2]در سال ۲۰۱۷ تحقیقی بر ستون‌های بتنی دورپیچ شده با CFRP انجام دادند. در این تحقیق آزمایشگاهی اثر CFRP به‌عنوان محصورکننده بر ستون‌های بتنی و اثر پارامترهای مختلفی که می‌توانست بر رفتار ستون‌های محصورشده با CFRP تأثیر بگذارند، بررسی شد. متغیرهای آزمایش شامل تعداد لایه‌های محصورکننده و نسبت لاغری ستون‌ها بودند. آزمایش فشاری بر روی ۳۰ نمونه انجام گرفت. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ظرفیت فشاری محوری و شکل‌پذیری ستون‌های محصورشده با دورپیچ CFRP با افزایش تعداد لایه‌ها افزایش یافتند[۳۳]. نتایج تحقیق مذکور با نتایج تحقیق حاضر همخوانی خوبی دارد.

پوراهوازی و گندمکار در سال ۱۳۹۵ مطالعه‌ای عددی بر رفتار ستون‌های فولادی بیضوی پرشده با بتن تحت نیروی فشاری محوری انجام دادند. آنها رفتار فشاری ستون مرکب با مقطع بیضوی پر شده با بتن را بررسی نمودند. ضمن مدل‌سازی ستون‌های کوتاه توخالی و توپر با و بدون سخت‌کننده، مقایسه ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری ستون‌های مذکور با مقطع دایره‌ای هم‌ارز آن‌ها (دو مقطع با سطح مقطع یکسان) و تأثیر پارامترهای ضخامت جداره لوله، مساحت مقطع و رده بتن بر رفتار آن‌ها مطالعه شدند. مدل‌سازی با روش عددی اجزاء محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس[3] و تحلیل استاتیکی غیرخطی و با الگوی بار خطی انجام گردید. نتایج کار آنها نشان داد که در شرایط یکسان، ستون لوله‌ای با مقطع دایره‌ای ظرفیت باربری و شاخص شکل‌پذیری بیش‌تری نسبت به مقطع بیضوی هم‌ارز خود دارند. استفاده از سخت‌کننده طولی باعث افزایش ظرفیت باربری نهایی به‌میزان ٪۱۰ گردید[۳۴]. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق مذکور از منظر کاهش ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری مقاطع بیضوی نسبت به دایروی همخوانی خوبی دارد.

یویو و جیان[4] در سال ۲۰۱۷ تحقیقی بر ظرفیت باربری محوری ستون‌های لوله‌ای فلزی بیضی‌شکل پرشده از بتن انجام دادند. در این تحقیق تئوری محاسبات و دقت فرمول‌های موجود برای بررسی ظرفیت باربری محوری ستون‌های لوله‌ای فلزی بیضی‌شکل پرشده با بتن، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مقایسه نتایج محاسبات فرمول‌های موجود و نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که دقت محاسبات در محدوده قابل‌قبول مهندسی قرار دارند [۳۵]. با مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج محاسبات فرمول‌ها نیز این نتیجه حاصل می‌شود که دقت محاسبات در محدوده قابل‌قبول مهندسی قرار دارد.

٤-٥- ارزیابی فنی و اقتصادی

در ادامه به ارزیابی هزینه‌های انجام شده جهت ساخت ستون‌ها و ظرفیت نهایی هر ستون و مقایسه فنی و اقتصادی آن‌ها اقدام گردید. در جدول ۸ نسبت هزینه‌های ساخت ستون‌های تحقیق و تأثیر آن‌ها بر ظرفیت نهایی آن‌ها ارائه شده است. نسبت هزینه ساخت و ظرفیت فشاری ستون‌های تحقیق به هزینه و ظرفیت ستون N و مقایسه آنها در شکل ۱۶ نشان داده شده است.

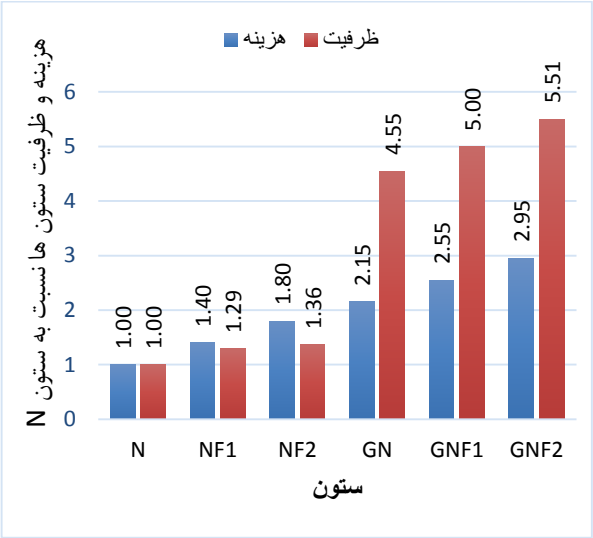
جدول ۸- مقایسه فنی و اقتصادی ستون‌های تحقیق

نام نمونه	نسبت هزینه ساخت ستون به هزینه ستون N	نسبت مقاومت ستون به مقاومت ستون N
N	۱/۰۰	۱/۰۰
NF1	۱/۴۰	۱/۲۹
NF2	۱/۸۰	۱/۳۶
GN	۲/۱۵	۴/۵۵
GNF1	۱/۵۵	۵/۰۰
GNF2	۱/۹۵	۵/۵۱

بررسی شکل ۱۶ نشان می‌دهد که نسبت ظرفیت فشاری ایجاد شده توسط دورپیچ‌های CFRP در ستون‌های فاقد غلاف کمتر از

1 Ansys
2 Ghalieha et al.
3 Abaqus
4 Youwu and Jian

نسبت هزینه انجام شده می‌باشد، در حالی که در ستون‌های دارای غلاف GRP، افزایش ظرفیت ایجاد شده بیش‌تر از هزینه انجام شده برای غلاف‌های آن‌ها می‌باشد، و به‌طور میانگین افزایش ظرفیت حدود ۱/۹۷ برابر افزایش هزینه ساخت نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف بوده است. بنابراین استفاده از غلاف GRP جهت افزایش مقاومت ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل مقرون به صرفه می‌باشد.



شکل ۱۶- مقایسه افزایش ظرفیت فشاری و هزینه ساخت ستون‌ها نسبت به ستون N

همچنین مشهود است که استفاده از CFRP، در ستون‌های دارای غلاف مقرون به صرفه نیست، زیرا ظرفیت فشاری ایجاد شده ناشی از مقاوم‌سازی با این مصالح، کم‌تر از هزینه انجام شده می‌باشد. از بین ستون‌های مورد مطالعه ستون دارای غلاف GRP و فاقد دورپیچ CFRP، یعنی ستون GN بیش‌ترین نسبت افزایش ظرفیت فشاری به هزینه ساخت به میزان ۲/۱۲ را دارد، لذا این ستون را به عنوان اقتصادی ترین ستون برای اجراء می‌توان پیشنهاد کرد.

٦- نتایج

نتیجه کلی این تحقیق معرفی یک نوع جدید از ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل مرکب دارای غلاف GRP و الیاف دورپیچ CFRPمی‌باشد. نتایج رضایت‌بخش استفاده از غلاف بیضی‌شکل نشان داد که این غلاف می‌تواند در اجرای پایه پل‌ها و ساختمان‌های جدید استفاده شود؛ هم‌چنین الیاف دورپیچ می‌توانند به‌منظور تقویت ستون‌های بتنی موجود که به‌دلیل استفاده از آیین‌نامه‌های قدیمی طراحی و یا به دلایل اجرایی دچار ضعف هستند، برای افزایش ظرفیت باربری، سختی و ارتقاء عملکرد ستون‌ها استفاده گردد.

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- استفاده از GRP به‌عنوان قالب و غلاف تقویتی ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در ظرفیت فشاری ستون‌ها گردید، به‌طوری‌که ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، به طور میانگین ظرفیت فشاری ۴/۱۵ برابر بیش‌تر دارند.
- تقویت ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل با دورپیچ CFRP در ستون‌های فاقد غلاف GRP به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش ظرفیت فشاری می‌شود، به‌طوری‌که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ٪29 و ٪۳۶ گردید، این در حالی که در ستون‌های دارای غلاف این اثرات به خاطر اثر محصوریت غلاف کم‌تر است، به این ترتیب که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ٪۱۰ و ٪۲۱ شده است.
- افزایش لایه‌های دورپیچ CFRP موجب افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل گردید، به‌طوری‌که میانگین افزایش مقاومت ناشی از استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ نسبت به ستون‌های مشابه فاقد آن به‌ترتیب ٪۱۹/۷ و ٪۲۸/۷ می‌باشد.
- تغییرمکان محوری نهایی ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل با دورپیچ CFRP در مقایسه با ستون‌های فاقد دورپیچ بیش‌تر است، به‌طوری‌که کاربرد یک لایه و دو لایه دورپیچ باعث افزایش تغییرمکان محوری نهایی به ترتیب به میزان ٪۲۳/۷ و ٪۴۲/۹ در ستون‌های فاقد غلاف و ٪۲۱/۶ و ٪۴۸/۳ در ستون‌های دارای غلاف شده است.
- استفاده از غلاف GRP باعث تغییرمکان محوری نهایی ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل به مقدار زیادی شده به‌گونه‌ای که میانگین افزایش تغییرمکان محوری نهایی در ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف ٪۳۱۳ بوده است.
- بررسی نحوه شکست ستون‌های بتن‌مسلح بیضی‌شکل نشان داد که اکثر ستون‌ها در اثر کمانش میلگردهای طولی گسیخته شدند. در ستون‌های فاقد غلاف اکثرا گسیختگی به صورت موضعی و

تدریجی اتفاق افتاد؛ در این ستون‌ها گسیختگی در یکی از دو انتهای ستون رخ داد که علت آن را می‌توان محصوریت کمتر هسته بتنی در دو انتهای ستون ناشی از شبکه میلگردها دانست؛ در حالی که در ستون‌های دارای غلاف، گسیختگی به‌طور کامل و به‌صورت انهدام و با صدای انفجار در کل طول ستون واقع شد؛ علت را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت حاصل از غلاف دانست، این میزان محصوریت باعث جلوگیری از کمانش زودهنگام میلگردها، رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش ممکنه، کمانش میلگردهای طولی، قطع میلگرد مارپیچ و نهایتا گسیختگی ستون‌ها گردید.

- ارزیابی فنی و اقتصادی ستون‌های تحقیق نشان داده که، استفاده از غلاف GRP جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها بسیار مقرون به صرفه‌تر از کاربرد دورپیچ CFRP می‌باشد، به‌طوری که افزایش ظرفیت در ستون‌های دارای غلاف بیش‌تر از هزینه انجام شده برای مقاوم‌سازی آن‌ها است؛ ولی نسبت افزایش مقاومت حاصل از کاربرد دورپیچ در ستون‌های با و بدون غلاف به هزینه لازم مقاوم‌سازی با این مصالح، کم‌تر بوده است. بیش‌ترین نسبت افزایش ظرفیت فشاری به هزینه ساخت، مربوط به ستون دارای غلاف و فاقد دورپیچ، یعنی ستون GN است، لذا می‌توان آن را به عنوان اقتصادی‌ترین ستون برای اجراء پیشنهاد داد.

۷- مراجع

[۱] منیعی، س.، جامی، ا.، رستمی، س.، " تقویت ستون‌های بتن-آرمه تحت اثرات توام نیروی محوری و گشتاور خمشی دومحوره با استفاده از مصالح FRP" فصلنامه تحقیقات بتن، سال نهم، شماره اول، صص ۹۵- ۸۳، ۱۳۹۵.

[2] Zeng, J.J., Guo, Y. Ch., Guo, W.Y., Chen, W.P., Li, L.J., " Stress-Strain Behavior of Circular Concrete Columns Partially Wrapped with FRP Strips", Composite Structures, Vol. 200, pp. 810–828, 2018.

[۳] اجتماعی، ب.، توکلی‌زاده ، م، ر.،قدس، ا، ص.، " بررسی اثر دورپیچ GFRP به صورت نوارهای مجزا در رفتار ستون‌های بتن-آرمه "، هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، مهرماه ۱۳۹۵.

[۴] برقیان، م.، فرزام، م.، رمضانی، پ.، "نمودار اندرکنش ستون بتنی مسلح توخالی محصور با FRP"، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر- مهندسی عمران و محیط زیست، دوره ۴۸، شماره ۱، صص ۶۴ - ۵۳ ، ۱۳۹۵.

[5] Seffo, M., Hamcho, M., "Strength of Concrete Cylinder Confined by Composite Materials (CFRP) ", Energy Procedia, Vol. 19, pp. 276–285, 2012.

[6] 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. 175–185, 1998.

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

[8] 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.

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

[10] Mirmiran, A., Shahawy, M., "A new concrete-filled hollow FRP composite column", Composites Part B, Vol. 27B, pp. 263-268, 1996.

[11] Kusumawardaningsih, Y., Hadi, M.N.S., "Comparative behaviour of hollow columns confined with FRP composites", Composite Structures, Vol. 93, pp. 198–205, 2010.

[۱۲] حیدری، م.، نجاتی، س.، نجاتی، آ.، "معرفی و دامنه کاربرد لوله‌های GRP مورد کاربردی در مطالعات شبکه آبیاری و زهکشی اراضی جایگزین طرح شهریار"، کنفرانس و نمایشگاه مهندسی آب، ۱۳۹۴.

[13] Uenaka, K., " Experimental study on concrete filled elliptical/oval steel tubular stub columns under compression", Thin-Walled Structures, Vol. 78, pp. 131-137, 2014.

[14] Shen, Q., Wang, J., Wang, W., Wang, Zh., " Performance and design of eccentrically-loaded concrete-filled round-ended elliptical hollow section stub columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 150, pp. 99-114, 2018.

[15] Uenaka, K., Tsunokake, H., Gardner, L., " Concrete filled elliptical steel tubular members with

large diameter-to-thickness ratio subjected to bending ", Engineering Structures, Vol. 5, pp. 58-66, 2016.
[16] Jamaluddin, N., Lam, D., Dai, X.H., Ye, J., "An experimental study on elliptical concrete filled columns under axial compression", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 87, pp. 6-16, 2013.
[17] Mccann, F., Gardner, L., Qiu, W., "Experimental study of slender concrete-filled elliptical hollow section beam-columns", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 113, pp. 185-194, 2015.
[18] Yanga, H., Liua, F., Chanc, T.M., Wang, W., " Behaviours of concrete-filled cold-formed elliptical hollow section beam columns with varying aspect ratios", Thin-Walled Structures, Vol. 120, pp. 9-28, 2017.
[19] 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.
[20] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29, 2001.
[21] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63, 2002.
[22] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29, 2001.
[23] 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.
[24] https://www.ahanpakhsh.com
[25] Teng, J.G., Lam, L., "Compressive strength of FRP-confined elliptical columns", to be published, 2001.
[26] B. 8110, Structural use of concrete Part 1, Code of practice for design and construction, in, British Standard Institution, London, 1997.
[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, No. 5, pp. 495-506, 2019.
[28] T, El Maaddawy., M, El Sayed., B, Abdel-Magid., " The effects of cross-sectional shape and loading condition on performance of reinforced concrete members confined with carbon fiber-reinforced polymers", Materials & Design (1980-2015), vol. 23, No. 5, pp. 2330-2341, 2010.
[۲۹] د. مستوفی, ع.س. اصفهانی, بررسی رفتار محوری و خمشی ستون‌های بتن‌آرمه با مقطع مربعی، محصور شده با کامپوزیت CFRP, هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، بابل، اردیبهشت ماه ۱۳۹۳.
[30] J.H, Park., B.W, Jo., S.J, Yoon., S.K, Park., " Experimental investigation on the structural behavior of concrete filled FRP tubes with/without steel re-bar", KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 15, No. 2, pp. 337-345, 2011.
[31] R, Kumutha, R, Vaidyanathan, M, Palanichamy, "Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP", Cement and concrete composites, vol. 29, No. 8, pp. 609-615, 2007.
[۳۲] شابختی ، ن.، قلعه نوعی، م.، شهرکی، م.، " تعیین ظرفیت ستون‌های مقاوم‌سازی شده با FRP تحت بار محوری"، اولین کنفرانس بین المللی،تبریز. ایران، ۲۹ مهرماه الی ۱ آبان ماه ۱۳۸۷.
[۳۳] پوراهوازی ، پ.، گندمکار ، ف، ع.، " مطالعه عددی رفتار ستون‌های فولادی بیضوی پرشده با بتن تحت نیروی فشاری محوری "، چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری، تهران، دبیرخانه دایمی کنفرانس، دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۵.
[34] Ghalieha, L., Awwad, F., Saad, G., Khatib, H., Mabso, M.," Concrete Columns Wrapped with Hemp Fiber Reinforced Polymer An Experimental Study", Procedia Engineering, Vol. 200, pp. 440–447, 2017.
[35] Youwu, Xu., Jian, Yao., " Axial Bearing Capacity of Elliptical Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns ", Materials Science and Engineering, Vol. 220, pp. 12-20, 2017.

Investigation and comparison of capacity and ductility of oval reinforced concrete columns with GRP casing and CFRP wrapping under pure axial force

Seyed Fathollah Sajedi *
Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
Mohamad Morad Raghpour
Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

Abstract
Bridges are behaviorally special compared to conventional structures. The uncertainty of bridges is much less than that of buildings, so the failure of columns in a bridge can lead to complete failure. The use of fiber reinforced polymer (FRP) composites into wrapping as one of the methods of strengthening of reinforced concrete columns (RCCs) of bridges has received much attention in recent years. High stiffness and characteristic strength, long life, corrosion resistance and controllable thermal properties are important advantages of FRP over conventional materials. The use of glass-fiber reinforced plastic pipes (GRP) as casing for bridge piers, removes molds, reduces costs, increases energy absorption and ductility, and reduces water-washing around bridge piers. In this study, compressive strength tests were performed on six samples of oval RCCs with diameters of 200 and 120 and height of 600 mm with and without casings and the effect of carbon-FRP on them as an enclosing was investigated. The results showed that the wrapping and casing increases the strength and ductility of the columns. Addition of one-layer and two-layer wrapping averagely increased the strength by 19.7% and 28.7%, respectively; while the use of casing resulted in a 4.15-fold increase in the strength. Although the wrapping and the casing both create the enclosure, the casing has a much greater effect on increasing the strength and ductility of the columns due to its greater enclosure. Comparison of wrapping enclosure with casing in the final axial deformation of these columns showed that the casing is much more effective.

Keywords: Oval reinforced concrete column, Capacity, Ductility, GRP casing, CFRP wrapping.

* Corresponding Author: sajedi@iauahvaz.ac.ir