



مطالعه آزمایشگاهی و مقایسه کاربرد غلاف GRP و دورپیچ CFRP بر رفتار ستون های بتن مسلح با مقطع دایره ای

محسن شفیعی نیا^۱، سیدفتح اله ساجدی*^۱، سیدوحید رضوی طوسی^۲

^۱ گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

^۲ گروه عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۳-۰۹

بازنگری: ۱۳۹۷-۰۵-۰۵

پذیرش: ۱۳۹۷-۰۶-۰۳

ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۶-۱۴

کلمات کلیدی:

مطالعه آزمایشگاهی

ستون بتن مسلح، غلاف GRP

دورپیچ CFRP

نیروی محوری

خلاصه: امروزه تقویت ستون ها با استفاده از کامپوزیت های الیاف پلیمری تقویتی، از جمله روش های تقویت در سازه محسوب می شوند. در این روش افزایش فشار محاطی بر سطح جانبی ستون های بتنی، باعث افزایش مقاومت های فشاری و کششی عضو بتنی، افزایش مقاومت در برابر کمانش و افزایش شکل پذیری این اعضا می شود. هم چنین استفاده از لوله های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه به عنوان غلاف ستون های بتنی، علاوه بر بی نیازی به قالب بندی، باعث ایجاد اثر محصورکنندگی بر بتن، شکل پذیری و جذب انرژی بالا، کاهش جمع شدگی و خزش بتن، عدم تماس بتن با عوامل خوردنده، سرعت ساخت بالا و ظرفیت باربری مناسب می گردد. در این پژوهش بر روی ۶ نمونه ستون بتن مسلح استوانه ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر با و بدون غلاف GRP، آزمایش مقاومت فشاری انجام شده و اثر دورپیچ الیاف پلیمری تقویتی کربنی بر آن ها، به عنوان عامل محصورکننده بررسی گردید. نتایج نشان داد که استفاده از دورپیچ CFRP و غلاف GRP باعث بهبود ظرفیت فشاری ستون های بتن مسلح می شود. افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به طور میانگین باعث افزایش ۱۸/۵٪ و ۲۶/۵٪ ظرفیت فشاری گردید، درحالی که استفاده از غلاف GRP به طور میانگین باعث افزایش ۳۰٪ در ظرفیت فشاری ستون شده است. نتایج حاکی از آن است که گرچه دورپیچ CFRP و غلاف GRP هر دو ایجاد محصوریت می کنند، ولی غلاف GRP به خاطر محصوریت بالاتر، تأثیر بسیار بیش تری بر روی افزایش ظرفیت فشاری ستون های بتن مسلح دارد.

۱- مقدمه

زیاد فولاد و خوردگی آن، توجهات به توسعه ورقه های کامپوزیتی به عنوان یک گزینه مقاوم سازی ساده تر و اقتصادی تر به جای آرماتورهای فولادی معطوف گردید. به علاوه در برخی موارد، تغییر کاربری سازه، افزایش بارهای وارد بر سازه و یا توسعه بخشی از سازه های موجود، نیاز به مقاوم سازی را ایجاد می کند. استفاده از مصالح CFRP باعث افزایش محصوریت هسته ستون های بتن مسلح و در نتیجه آن بهبود مشخصات مقاومتی و شکل پذیری این ستون ها می شود. عوامل تأثیر گذار بر روی

یکی از عوامل تخریب سازه های بتن مسلح مانند پل ها، ساختمان ها و بندار، افزایش سن و فرسوده شدن آن ها تحت شرایط محیطی می باشد. این فرسایش شامل ترک های بتن، خوردگی آرماتور و تغییر شکل اعضای سازه ای است که می توانند به طور چشم گیری عملکرد و ایمنی سازه را کاهش دهند. در دهه های گذشته بیشتر از مصالح فولادی جهت مقاوم سازی استفاده می شد، ولی به علت وزن

* نویسنده عهده دار مکاتبات: f_sajedi@yahoo.com
sajedi@iauhvaz.ac.ir



مقاومت ستون های تقویت شده با ورق های CFRP، نوع الیاف، مدول ارتجاعی و مقاومت کششی الیاف، ضخامت الیاف پلیمری، تعداد لایه های CFRP، زاویه اعمال الیاف و غیره می باشد.

تاکنون تحقیقات زیادی درخصوص مطالعه رفتار ستون های بتن مسلح استوانه ای مقاوم سازی شده با دورپیچ CFRP انجام شده است. میرمیران و شهاوی^۱ [۱]، شهاوی و همکاران^۲ [۲]، وو و همکاران^۳ [۳]، شیخ^۴ [۴]، ونگ و همکاران^۵ [۵]، به بررسی ستون های بتن مسلح با مقطع دایروی تقویت شده با استفاده از دورپیچ CFRP پرداختند و نتیجه گیری کردند که استفاده از مصالح FRP باعث افزایش مقاومت فشاری و شکل پذیری ستون های بتنی محصور شده به وسیله تامین اثر محصورکنندگی هسته بتن، زیر بارهای فشاری می شود. میرمیران و همکاران^۶ [۶]، آل مداوی و همکاران^۷ [۷]، ازبک اوگلو و شی^۸ [۸] در مورد شکل مقطع ستون های مقاوم سازی شده به بررسی و تحقیق پرداختند و نشان دادند که مقاطع مربعی و مستطیلی به اندازه مقاطع دایره ای تحت اثر محصور شدگی قرار نمی گیرند، زیرا در این مقاطع برخلاف مقاطع دایره ای فشار محصورکننده یکنواخت نیست. رهایی و همکاران^۹ [۹]، کوماتا و همکاران^{۱۰} [۱۰]، پروین و جاموال^{۱۱} [۱۱]، تأثیر تعداد لایه های تقویتی FRP اعمال شده بر روی سطح ستون های بتنی را بررسی کردند و نتیجه گیری کردند که استفاده از لایه های بیش تر و ورق های ضخیم تر، سبب افزایش بیش تر مقاومت فشاری، ستون های مقاوم سازی شده می شود. ضمناً نوع الیاف، نوع بافت الیاف، مقدار چسب و عوامل دیگر در میزان مقاوم سازی انجام شده تأثیر دارند. آل مُسلم^{۱۲} [۱۲]، وینسنت و ازبک اوگلو^{۱۳} [۱۳]، به بررسی نسبت افزایش ظرفیت فشاری ایجاد شده با ورق های FRP به ظرفیت اولیه ستون های ساخته شده از بتن های با مقاومت پایین، متوسط و بالا پرداختند و به دست

- 1 Mirmiran and Shahawy
- 2 Shahawy et al.
- 3 Wu et al.
- 4 Sheikh
- 5 Wong et al.
- 6 Mirmiran et al.
- 7 El Maaddawy
- 8 Ozbakkaloglu and Xie
- 9 Rahai et al.
- 10 Kumutha et al.
- 11 Parvin and Jamwal
- 12 Almusallam
- 13 Vincent and Ozbakkaloglu

آوردند که مقدار این نسبت در ستون های با مقاومت بالا، کم تر بوده است. دلیل احتمالی این امر را می توان کم تر بودن مقاومت ایجاد شده از سوی لایه محصورکننده نسبت به مقاومت فشاری محصور نشده بتن دانست. سمعان و همکاران^{۱۴} [۱۴]، کاربهاری و ژائو^{۱۵} [۱۵]، ازبک اوگلو و همکاران [۱۶]، یوسف و همکاران^{۱۶} [۱۷]، مدل هایی برای پاسخ ستون های بتن مسلح محصور شده با دورپیچ FRP پیشنهاد کردند. در این مدل ها روابطی برای تعیین تنش محصور کننده جانبی دورپیچ و مقاومت فشاری بتن محصور شده ارائه شده است. هادی^{۱۷} [۱۸-۲۰] نتایج بارگذاری خارج از مرکز بر روی ستون های بتن مسلح تقویت شده با دورپیچ FRP که از بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا ساخته شده بودند را گزارش کرد. این نتایج نشان دادند که استفاده از مصالح FRP باعث افزایش مقاومت فشاری، شکل پذیری و ظرفیت جذب انرژی بیش تر در ستون های بتن مسلح با بارگذاری غیرمتمرکز می شود. هم چنین نتایج نشان داد که بارگذاری محوری خارج از مرکز و اعمال لنگر خمشی، از مقدار تحمل بار فشاری می کاهد. جهت بررسی رفتار ستون های بتن مسلح با مقاومت بالا و فوق العاده بالا مقاوم سازی شده با دورپیچ CFRP تحقیقات مختلفی انجام شده است؛ ازبک اوگلو [۲۱] و مالیک و فوستر^{۱۸} [۲۲] با بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون های با مقاومت فوق العاده بالا که با ورق های CFRP تقویت شده بودند، نشان دادند که این ستون ها رفتار تردتری نسبت به ستون های ساخته شده از بتن معمولی دارند و استفاده از ورق های تقویتی جهت مقاوم سازی این ستون ها تأثیر زیادی در افزایش شکل پذیری دارد، به علاوه مقاومت فشاری ستون های مذکور بهبود یافت.

ستون های بتنی پر شده در لوله های GRP، ستون کامپوزیتی می باشند و اخیراً پژوهش های زیادی بر روی ستون های بتنی با این غلاف ها انجام شده است. در این ستون ها لوله های GRP به عنوان قالب ماندگار عمل می کنند و باعث تأمین محصوریت جانبی برای بتن هسته ستون و محدود شدن گسترش ترک های ریز^{۱۹} می شوند و همزمان هسته بتنی باعث جلوگیری از کمانش غلاف

- 14 Samaan et al.
- 15 Karbhari & Gao
- 16 Youssef et al.
- 17 Hadi
- 18 Malik and Foster
- 19 micro-cracks

الیاف کربن (CFRP) و به صورت یک جهته و ساخت شرکت TORAY ژاپن می باشند. خواص مکانیکی مصالح FRP براساس اطلاعات کارخانه سازنده، از آزمایش های انجام شده به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D۷۵۶۵ [۳۰] و ASTM D۲۹۹۶ [۳۱] در جدول شماره (۱) ارائه شده اند. چسب اپوکسی مورد استفاده ساخت شرکت پایا و به صورت دو جزئی متشکل از رزین و سخت کننده است که به ترتیب با نسبت ۱:۳ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط می شوند. مدت زمان لازم برای گیرش رزین و مراقبت از آن متأثر از دمای محیط بوده و در حالت متعارف و با توجه به توصیه های شرکت سازنده بین ۵ تا ۷ روز متغیر می باشد. تنش کششی قابل تحمل چسب ۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی کششی % ۳/۶ می باشند. مشخصات ترکیب چسب مذکور براساس گزارش های کارخانه ی سازنده و از آزمایش های انجام شده طبق استاندارد ASTM D۶۳۸ [۳۲] به دست آمده اند.

لوله های کامپوزیتی GRP ساخت کارخانه مشهد صدرا شرق می باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می شوند. این لوله ها برحسب فشار داخلی که تحمل می کنند، دسته بندی می شوند. در این پژوهش از لوله های GRP با تحمل فشار داخلی ۱۰ بار استفاده شده است. مشخصات لوله های GRP براساس اطلاعات کارخانه سازنده از آزمایش های انجام شده طبق استاندارد ASTM D۲۹۹۶ [۳۱] در جدول ۱ ارائه شده اند. جهت انجام آزمایش های این تحقیق از لوله های GRP به طول ۶۰۰، قطر داخلی ۱۵۰ و ضخامت ۸ میلی متر استفاده گردیده است.

جدول ۱. خواص مکانیکی مصالح CFRP و لوله های کامپوزیتی GRP [۳۰-۳۲]
Table 1. Mechanical properties of CFRP materials and GRP composite pipes [32-30]

مشخصات کامپوزیت	مصالح CFRP	لوله های GRP
ضخامت (mm)	۰/۱۶۶	۸
چگالی (kg/m ³)	۱۹۰۰	۱۸۰۰
وزن در واحد سطح CFRP (g/m ²) وزن در واحد طول لوله GRP (g/m)	۳۰۰	۶۷۸۶
مقاومت کششی (MPa)	۴۹۰۰	۷۵
ضریب ارتجاعی (GPa)	۲۳۰	۱۲۰
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۴
کرنش نهایی (%)	۲/۵	۱/۳

GRP می شود. شیائو و همکاران^۱ [۲۳]، پارک و همکاران^۲ [۲۴] ستون های بتن مسلح و غیرمسلح محصور در غلاف GRP را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن ها نشان داد که استفاده از غلاف GRP باعث افزایش مقاومت فشاری، سختی و شکل پذیری ستون های محصور در غلاف GRP می شود. هم چنین این ستون ها تحت بار خارج از مرکز نیز مورد آزمایش قرار گرفتند و مشاهده شد که عملکرد آن ها از ستون های فاقد غلاف بهتر است. هادی و همکاران^۳ [۲۵]، ونگ و همکاران^۴ [۲۶] به بررسی ستون های بتنی حلقوی با هسته داخلی غلاف GRP پرداختند؛ نتایج تحقیق آن ها نشان داد که ستون های دارای غلاف مقاومت فشاری و شکل پذیری بهتری نسبت به ستون های بدون غلاف دارند. به علاوه پژوهش های یانگ و همکاران^۵ [۲۷]، ایچینوز و همکاران^۶ [۲۸] و شرسا و همکاران^۷ [۲۹] روی ستون های بتنی در لوله های غلافی نشان دادند که غلاف خارجی ستون های بتنی محصور شده، به علت جلوگیری از تبادل رطوبت بتن با محیط اطراف باعث محدود شدن جمع شدگی^۸ در بتن هسته ستون می شود، که همین امر باعث کاهش خزش^۹ در این ستون ها نسبت به ستون های غیر محصور می شود.

در این پژوهش، هدف بررسی آزمایشگاهی تأثیر جداگانه و همزمان اثر غلاف GRP و دورپیچ CFRP بر رفتار ستون های بتن مسلح با مقطع دایره ای می باشد که با ساخت ۶ نمونه ستون بتن مسلح استوانه ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر با و بدون حضور غلاف لوله ای GRP، و انجام آزمایش تعیین ظرفیت فشاری و تعیین تغییرشکل محوری و جانبی آن ها، این هدف دنبال شده است.

۲- مشخصات دورپیچ CFRP و غلاف GRP مصرفی

ورقه های کامپوزیتی مورد استفاده در این تحقیق از جنس

- 1 Xiao et al.
- 2 Park et al.
- 3 Hadi et al.
- 4 Wang et al.
- 5 Yang et al.
- 6 Ichinose et al.
- 7 Shrestha et al.
- 8 shrinkage
- 9 creep

جدول ۲. جزئیات طرح اختلاط یک مترمکعب بتن مصرفی در ساخت ستونها

Table 2: Details of the mixing design of one cubic meter of concrete used in the construction of columns

w/c	ماسه (kg)	شن (kg)	آب (kg)	سیمان نوع ۲ (kg)
۰/۴۵	۹۳۳	۹۳۲	۱۵۷/۵	۳۵۰

جدول ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای استاندارد در سنین ۷ و ۲۸ روزه (MPa)

Table 3. Compressive strength test results of standard cylindrical specimens at 7 and 28 days of age (MPa)

سن نمونه	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	میانگین مقاومت
۷ روزه	۲۳/۲	۲۴/۰	۲۵/۷	۲۴/۳
۲۸ روزه	۳۱/۲	۳۳/۱	۳۳/۸	۳۲/۷

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش های اولیه

جهت تعیین مقاومت فشاری بتن، از بتن مصرفی جهت ساخت ستون ها، نمونه های استوانه ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی متر طبق توصیه ۲۱۱-ACI [۳۳] تهیه و پس از عمل آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن ها به عمل آمد. جهت ایجاد تراکم در بتن استفاده شده در ساخت ستون ها، اسلامپ ۸۰ میلی متر بود. جزئیات طرح اختلاط برای یک مترمکعب بتن مصرفی در ساخت نمونه ها در جدول ۲ داده شده است.

نتایج آزمایش های مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه در جدول ۳ ارائه شده است. میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه های استوانه ای ۳۲/۷ مگاپاسکال به دست آمد. یک نمونه از آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۱ نشان داده شده است.

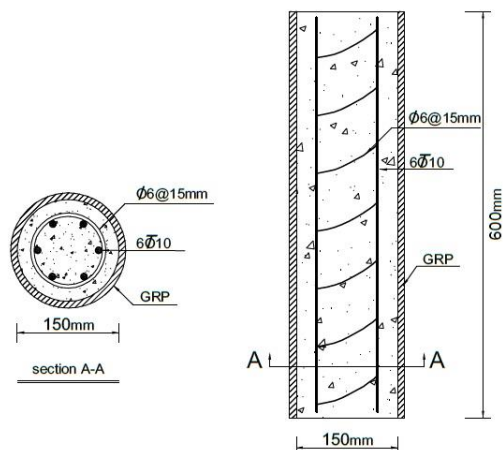
۳-۲- مشخصات نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۶ عدد ستون بتن مسلح با مقطع دایره ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر بودند. تمام ستون ها از بتن مسلح ساخته شدند، سه ستون دارای غلاف GRP (گروه ۱) و سه ستون دیگر فاقد غلاف (گروه ۲) بودند، از هر گروه یک ستون فاقد دورپیچ CFRP، یک ستون با یک لایه و دیگری با دو لایه CFRP دورپیچ شده بودند. ستون ها

براساس اجزای تشکیل دهنده نام گذاری شدند. برای ستون های ساخته شده از بتن حرف (N)، ستون های دارای غلاف GRP حرف (G) و ستون های دارای دورپیچ CFRP حرف (F) منظور گردیدند. عددی که پس از حرف F آمده نشان گر تعداد لایه های CFRP مصرفی می باشد. در جدول ۴ مشخصات تمام نمونه های آزمایشگاهی ارائه گردیده است.

۳-۳- آماده سازی نمونه ها

نمونه های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل ۶ عدد ستون بتنی با مقطع دایره ای به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر هستند. هم چنین یک نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شد که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش ها، مورد استفاده قرار بگیرد. میزان آرماتورهای طولی مورد استفاده در همه ستون ها برابر ۲/۷٪ سطح مقطع ناخالص ستون منظور شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد آرماتور آج دار 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. هم چنین 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



شکل ۲. مقاطع عرضی و طولی ستون های تحقیق

Fig. 2: Transverse and longitudinal sections of research columns



شکل ۱. تعیین مقاومت فشاری یکی از نمونه های بتنی استوانه ای استاندارد تحقیق

Fig. 1: Determination of compressive strength of one of the concrete specimens of standard research cylinders

جدول ۴. مشخصات نمونه های آزمایشگاهی تحقیق

Table 4. Characteristics of research laboratory specimens

نام نمونه	غلاف GRP	دورپیچ CFRP	تعداد لایه CFRP
N	ندارد	ندارد	۰
NF1	ندارد	دارد	۱
NF2	ندارد	دارد	۲
GN	دارد	ندارد	۰
GNF1	دارد	دارد	۱
GNF2	دارد	دارد	۲

بود. سپس، لوله ها بر روی صفحات فلزی متصل شدند. شکل ۴ لوله های GRP و قالب های PVC را نشان می دهد.

سپس سطح داخلی قالب ها جهت جداسازی آسان قالب از سطح بتن به روغن آغشته شده و قفسه میلگردها در قالب قرار داده شدند. شکل ۵ نحوه قرارگیری قفسه میلگردها را درون غلاف GRP و قالب نشان می دهد.

جهت بتن ریزی از بتن با مقاومت معمولی استفاده گردید و اسلامپ بتن مورد استفاده در بتن ریزی ۸۰ میلی متر بود. همان گونه که در بخش ۲-۱ اشاره گردید، مقاومت فشاری بتن نمونه استاندارد در سن ۲۸ روزه به مقدار ۳۲/۷ مگاپاسکال گردید. پس از باز کردن قالب ها، ستون ها به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب قرار گرفتند و پس از عمل آوری، ستون ها با مصالح

پوشش مورد نظر برای آرماتورهای طولی و عرضی، از فاصله انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماتورها براساس اطلاعات کارخانه سازنده برای آرماتورهای طولی و عرضی به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال می باشد. در شکل ۲ مقاطع عرضی و طولی ستون های مورد مطالعه نشان داده شده است.

جهت سنجش کرنش میلگردها در حین انجام آزمایش مقاومت فشاری ستون ها و بررسی نحوه رفتار ستون ها از کرنش سنج استفاده گردید. لذا قبل از بتن ریزی، بر روی میلگردهای هر ستون این کرنش سنج ها نصب گردیدند. شکل ۳ نحوه نصب این کرنش سنج ها را نشان می دهد. مرحله بعد ساخت ستون ها، تهیه ۳ عدد لوله GRP و ۴ عدد لوله PVC جهت قالب ستون های بدون غلاف با مقطع دایره ای با قطر داخلی ۱۵۰ و ارتفاع ۶۰۰ میلی متر



شکل ۵. نحوه قرارگیری قفسه میلگردها درون غلاف های GRP و قالب PVC
Fig. 5. How to place the rebar rack inside the GRP casings and PVC mold



شکل ۳. نحوه نصب کرنشسنجها روی میلگردها
Fig. 3. How to install strain gauges on rebars



شکل ۶. ستون های تحقیق بعد از اعمال دورپیچ CFRP
Fig. 6. Research columns after applying CFRP wrapping



شکل ۴. لوله های GRP و قالب های PVC
Fig. 4. GRP pipes and PVC molds

داده شده اند.

CFRP دورپیچ شدند.

۴-۴- آزمایش ستون ها

ستون های تحقیق حاضر، تحت بارگذاری فشاری تک محوری توسط جک هیدرولیکی با ظرفیت ۵۰۰۰ کیلو نیوتنی در آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش نمونه ها به روش کنترل تغییرمکان و با نرخ بارگذاری ۱۲ کیلو نیوتن بر ثانیه انجام شد [۳۴]. به منظور تعیین کرنش های طولی و عرضی ستون ها به ترتیب دو کرنش سنج محوری و یک کرنش سنج عرضی در وسط هر ستون نصب شدند، که در شکل ۷ محل نصب کرنش سنج ها 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. هم چنین، به منظور

جهت آماده سازی ستون های بتنی برای نصب لایه های CFRP قبل از استفاده از چسب اپوکسی، ابتدا سطح بیرونی ستون ها به طور کامل صاف، تمیز و خشک گردید. چسب اپوکسی مورد استفاده دو جزئی و متشکل از رزین و سخت کننده 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 شد. لبه های انتهایی دورپیچ CFRP جهت اطمینان از جدانشدن از سطح ستون، به میزان ۱۰۰ میلی متر همپوشانی شدند. برای ستون هایی که دارای دو لایه CFRP بودند، به مدت ۲ ساعت پس از نصب لایه اول، لایه دوم دورپیچ گردید. تمام ستون ها با زاویه ۹۰ درجه نسبت به محور طولی خود دورپیچ شدند و به منظور عمل آوری چسب اپوکسی، ستون ها به مدت ۷ روز در دمای محیط نگهداری شدند. در شکل ۶ ستون های مورد تحقیق، بعد از اعمال دورپیچ CFRP نشان

1 Electronic Data-Logger (EDL)



شکل ۸. ست آپ آزمایش و قرارگیری ستونها در جک
Fig. 8. Test setup and placement of columns in the jack



شکل ۷. محل نصب کرنشسنجهای طولی و عرضی
Fig. 7. Installation of longitudinal and transverse strain gauges

جدول ۵. ظرفیت و کرنش نهایی ستونهای تحقیق
Table 5. Ultimate capacity and strain of research columns

نام ستون	ظرفیت نهایی (kN)	میانگین کرنشهای محوری (micro strain)	کرنش عرضی (micro strain)
N	۵۶۶	* -۳۸۴۸	۱۳۵۶
NF1	۷۱۵	-۴۱۴۴	۱۵۷۹
NF2	۷۶۳	-۵۴۳۲	۲۰۲۲
GN	۲۴۸۵	-۱۵۲۲۹	۴۰۵۱
GNF1	۲۷۶۵	-۱۸۷۳۸	۵۳۴۷
GNF2	۲۹۴۰	-۲۲۰۷۵	۵۹۹۳

* علامت منفی نشان دهنده کرنش منفی (کاهش طول) می باشد.

خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت ۱۲ کیلونیوتن بر ثانیه بارگذاری شدند، ظرفیت و کرنش نهایی ستون ها در جدول شماره ۵ ارائه گردیده است.

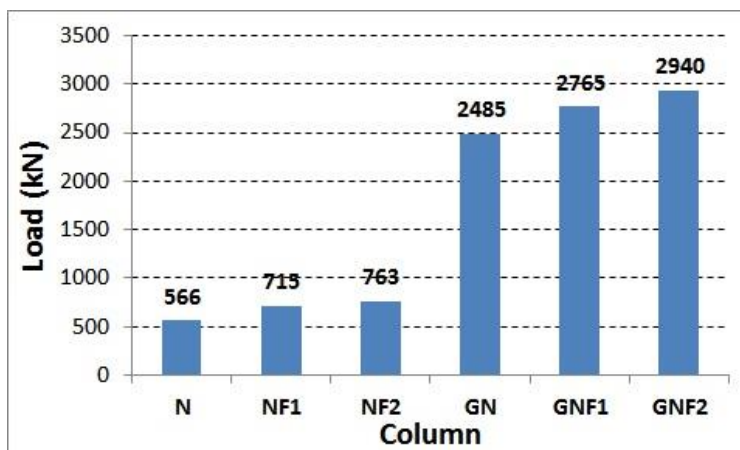
همان گونه که در جدول شماره ۵ مشاهده می شود، استفاده از یک و دو لایه CFRP در ستون های فاقد غلاف GRP به ترتیب باعث افزایش ۲۶٪ و ۳۵٪ و در ستون های دارای غلاف GRP به ترتیب باعث افزایش ۱۱٪ و ۱۸٪ نسبت به ستون های فاقد CFRP در ظرفیت نهایی شده است. لذا تأیید می گردد استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور کردن ستون های بتنی، می تواند اثر بسیار خوبی در افزایش ظرفیت نهایی ستون های بتن مسلح داشته باشد.

تعیین نمودار بار-کرنش نمونه ها، 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 ستون ها در دستگاه دقت کافی جهت اطمینان از اینکه ستون ها در مرکز جک قرار گرفته باشند، انجام شد. در شکل ۸ جک آزمایشگاهی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی و نحوه قرارگیری نمونه ها در آن نمایش داده شده است.

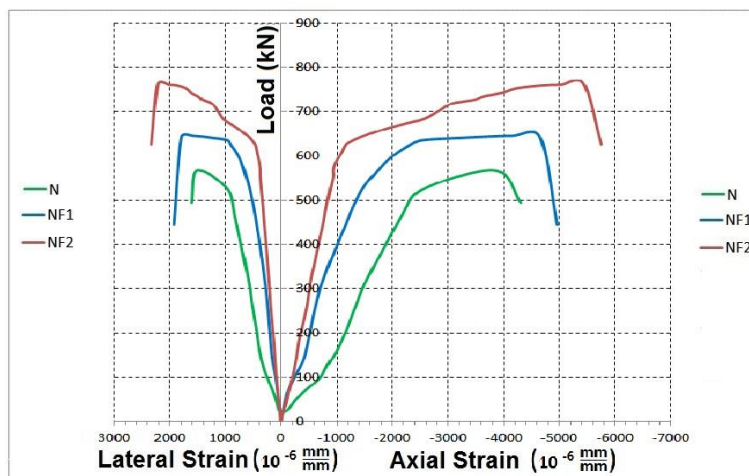
۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش ها

۴-۱- ظرفیت نهایی ستون ها

ستون ها توسط جک آزمایشگاهی ۵۰۰ تن آزمایشگاه مکانیک



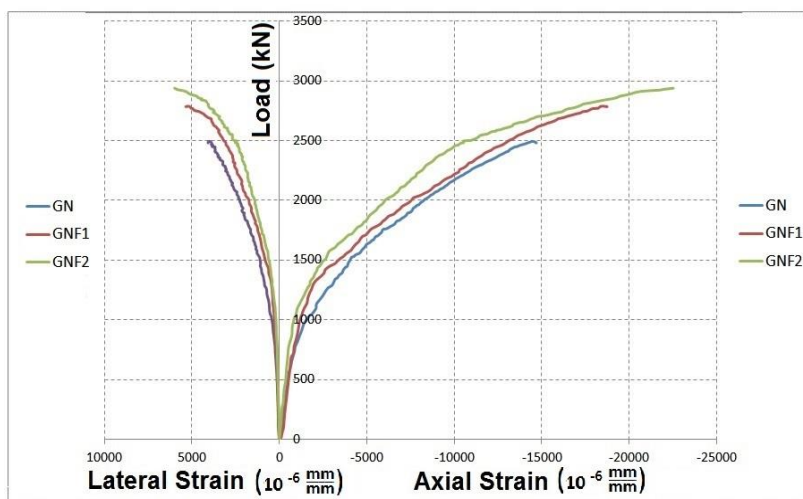
شکل ۹. ظرفیت فشاری ستونهای استفاده شده در تحقیق
 Fig. 9. Compressive capacity of the columns used in the research



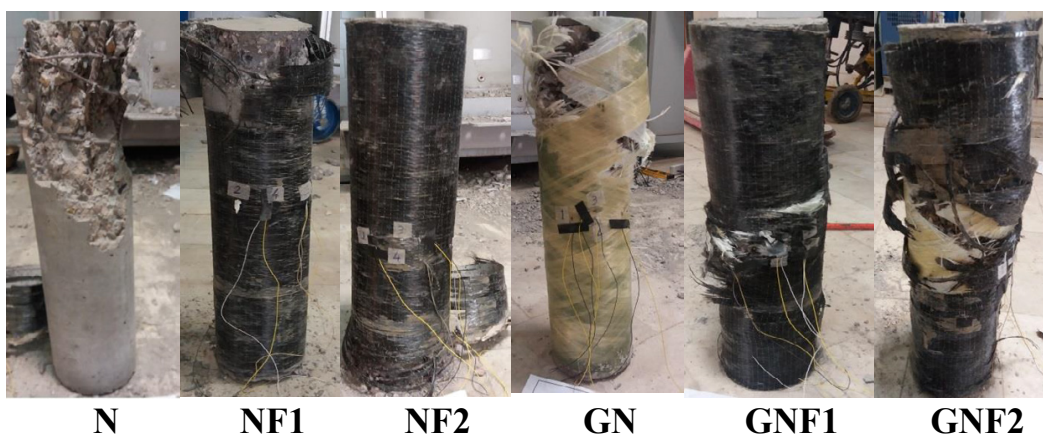
شکل ۱۰. منحنی بار- کرنش برای ستون های فاقد غلاف GRP
 Fig. 10. Load-strain curve for columns without GRP casing

مقایسه کرنش در بار نهایی ستون های فاقد غلاف GRP نشان می دهد که استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش ۸٪ و ۴۱٪ در این پارامتر نسبت به ستون N شده است؛ در حالی که در ستون های دارای غلاف GRP، این مقادیر افزایش به ترتیب ۲۳٪ و ۴۸٪ می باشند. لذا مشاهده می گردد استفاده از دورپیچ CFRP جهت محصور کردن ستون های بتنی باعث افزایش کرنش در بار نهایی ستون های بتن مسلح می شود، که این تأثیر در ستون های دارای غلاف GRP به جهت اثر محصوریت غلاف مذکور بیش تر می باشد. هم چنین، مقایسه اثر محصوریت غلاف لوله های GRP با دورپیچ CFRP در کرنش در نهایی ستون های بتن مسلح، نشان می دهد که این غلاف ها بسیار مؤثرتر هستند. به عنوان مثال،

به علاوه، استفاده از CFRP در ستون های دارای غلاف GRP به علت وجود اثر محصوریت زیاد این غلاف تأثیر کمتری دارد، لذا در صورت استفاده از این غلاف ها، استفاده از CFRP جهت مقاوم سازی ستون های بتن مسلح اقتصادی نمی باشد. از سوی دیگر همان گونه که در شکل ۹ دیده می شود، استفاده از غلاف لوله های GRP در مقایسه با استفاده از دورپیچ CFRP بسیار مؤثرتر می باشند. به عنوان مثال، استفاده از غلاف GRP بدون استفاده از دورپیچ CFRP به میزان ۳۳۹٪ در ظرفیت فشاری ستون های بتن مسلح نسبت به ستون N افزایش ایجاد کرده است، در حالی که استفاده از یک و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ۲۶٪ و ۳۵٪ نسبت به ستون های فاقد CFRP شده است.



شکل ۱۱. منحنی بار-کرنش برای ستون های دارای غلاف GRP
 Fig. 11. Load-strain curve for columns with GRP casing



شکل ۱۲. نحوه گسیختگی ستون ها پس از بارگذاری
 Fig. 12. How the columns fail after loading

کرنش های طولی و عرضی در شکل های ۱۰ و ۱۱ برای ستون های مورد بررسی نشان داده شده است.

با مشاهده منحنی های بار-کرنش ملاحظه می شود با دورپیچ نمودن ستون های بتن مسلح با مصالح CFRP، کرنش های جانبی و محوری آن ها افزایش یافته که نشان گر افزایش شکل پذیری در ستون های دارای CFRP می باشد. هم چنین میزان تحمل فشار در این ستون ها به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. بررسی دقیق تر منحنی های بار-کرنش ستون های فاقد غلاف نشان می دهد که این منحنی ها از دو قسمت سخت شونده خطی و نرم شونده غیرخطی تشکیل شده اند؛ تغییر رفتار ستون ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک های فشاری در بتن و شروع به کار دورپیچ CFRP و ادامه

استفاده از غلاف GRP بدون استفاده از دورپیچ CFRP به میزان ۲۹۵٪ در کرنش در بار نهایی ستون های بتن مسلح افزایش ایجاد نموده، در حالی که استفاده از یک و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش کرنش در بار نهایی به میزان ۸٪ و ۴۱٪ نسبت به ستون های فاقد CFRP شده است. تأثیر زیاد لوله های GRP در ایجاد کرنش در بار نهایی را می توان در ساختار این لوله ها و وجود الیاف در ساخت آن ها دانست. لذا استفاده از غلاف های GRP در مناطقی که نیاز به طراحی شکل پذیر دارند، می تواند بسیار مفید باشد.

۲-۴- منحنی بار کرنش- ستون ها

به منظور مقایسه رفتاری ستون ها، منحنی بار-کرنش در حالات

جدول ۶. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط مرجع [۱۵]
Table 6. Comparison of laboratory results with reference relations [15]

نام ستون	تنش فشاری محصور نشده f'_{co} (MPa)	تنش محصور- کننده جانبی دورپیچ (MPa) f'_{fip}	تنش فشاری بتن محصور شده (MPa) f'_{cc} [۱۵]	ظرفیت نهایی ستون محصور شده P_u (kN) [۱۵]	ظرفیت نهایی آزمایشگاهی P_{exp} (kN)	$\frac{P_u - P_{exp}}{P_{exp}}$ (%)
NF1	۳۲/۷	۳/۲۶	۴۱/۹۳	۷۴۰/۶	۷۱۵	۳/۶۰
NF2	۳۲/۷	۶/۵۲	۴۹/۵۹	۸۷۵/۸	۷۶۳	۱۴/۷۸
GN	۳۲/۷	۶۴	۱۵۵/۸۶	۲۷۵۳	۲۴۸۵	۱۰/۷۸
GNF1	۳۲/۷	۶۷/۲۶	۱۶۱/۳	۲۸۴۹	۲۷۶۵	۳/۰۴
GNF2	۳۲/۷	۷۰/۵۲	۱۶۶/۷۱	۲۹۴۴	۲۹۴۰	۰/۱۴

گردید. گسیختگی و تخریب در ستون NF۲ مشابه ستون NF۱ بود، با این تفاوت که گسیختگی و پارگی ورق تقویتی کربنی در انتهای پایین ستون اتفاق افتاد. در ستون های N، NF۱ و NF۲ گسیختگی به صورت تدریجی، و به صورت نرم اتفاق افتاد؛ در این ستون ها با افزایش فشار و شروع ترک های فشاری به تدریج انبساط محوری در بتن ستون رخ داد، در ستون های دارای ورق تقویتی نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زودهنگام گردید و در نهایت با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک ها، ورق CFRP دچار پارگی و گسیختگی ستون گردید. در ستون های دارای غلاف GRP نحوه گسیختگی متفاوت با ستون های فاقد غلاف بود. در ستون GN گسیختگی به طور کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در نیمه بالایی ستون اتفاق افتاد، که علت این نوع گسیختگی را می توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ایجاد شده ناشی از غلاف GRP دانست؛ این میزان محصوریت باعث رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود و هم چنین کمانش میلگردهای طولی و در نهایت گسیختگی ستون می شود. در ستون GNF۱ گسیختگی مشابه ستون GN بود، با این تفاوت که محصوریت بیش تر ناشی از اعمال لایه CFRP باعث گردید تا بتن ستون کرنش فشاری بیش تری تحمل کند، و در نهایت در یک سوم میانی با کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ گسخته شود. در ستون GNF۲ نیز گسیختگی مشابه ستون های قبلی بود، با این تفاوت که محصوریت زیادتر ناشی از اعمال دولایه CFRP باعث گردید تا گسیختگی به صورت کلی در

روند مقاومت تحت بارهای فشاری می باشد. هم چنین، منحنی های بار-کرنش ستون های دارای غلاف از دو قسمت سخت شونده خطی و نرم شونده غیرخطی تشکیل شده اند، ولی تغییر رفتار ستون تدریجی بوده که علت آن را می توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیش تر غلاف GRP با ستون بتنی دانست. به علاوه، مشاهده می گردد که دورپیچ نمودن ستون ها با CFRP باعث افزایش سختی ستون و کاهش تغییرشکل محوری می شود که علت آن ایجاد محصوریت ناشی از دورپیچ است.

۳-۴ بررسی نحوه گسیختگی ستون ها

نحوه گسیختگی ستون ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، شکست اکثر ستون ها در اثر کمانش میلگردهای ستون رخ داده است. در ستون های فاقد غلاف GRP اکثراً گسیختگی به صورت موضعی و به تدریج اتفاق افتاد، در این ستون ها گسیختگی در یکی از دو انتهای اتفاق افتاد. علت آن را می توان محصوریت کمتر هسته بتنی در این قسمت ها از سوی شبکه میلگردها دانست. در ستون N که فاقد هرگونه محصوریت بود، ستون به علت ایجاد ترک های فشاری در بتن بالای ستون و در نهایت جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت و کمانش میلگردهای طولی، گسیخته شد. ستون NF۱ دارای یک لایه دورپیچ CFRP بود؛ در این ستون نیز گسیختگی در بالای ستون و به علت خرد شدن بتن و در نهایت پارگی ورق تقویتی کربنی اتفاق افتاد، در این ستون برخلاف ستون قبلی محصوریت ناشی از دورپیچ CFRP باعث خردشدگی کم تر بتن و گسیخته نشدن شبکه میلگردها و افزایش باربری ستون

جدول ۷. مقایسه فنی و اقتصادی ستونهای بررسی شده در تحقیق
Table 7. Technical and economic comparison of the columns studied in the research

نام نمونه	نسبت هزینه ساخت ستون به هزینه ستون N	نسبت ظرفیت ستون به ظرفیت ستون N
N	۱	۱
NF1	۱/۶۵	۱/۲۶
NF2	۲/۳۱	۱/۳۴
GN	۱/۹۱	۴/۳۹
GNF1	۲/۵۶	۴/۸۸
GNF2	۳/۲۲	۵/۱۹

$$f_{lfrp} = \frac{2N_b E_{frp} \varepsilon_{frpu} t_{frp} (d+h)}{dh} \quad (3)$$

با جای گذاری مشخصات کامپوزیت مورد استفاده در این تحقیق در روابط بالا، مقدار مقاومت فشاری محصور نشده محاسبه می شود. این مقادیر در جدول ۷ ارائه شده است. در ستون های دارای غلاف GRP و دورپیچ CFRP به صورت هم زمان، جهت محاسبه تنش محصور کننده جانبی (f_{lfrp})، تنش جانبی ناشی از غلاف و دورپیچ با هم جمع شده است.

برای محاسبه ظرفیت نهایی ستون محصور شده از رابطه ۴ استفاده شده است.

$$P_u = f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (4)$$

نتایج جدول ۷ نشان می دهد، که ظرفیت نهایی ستون های این پژوهش همخوانی خوبی با روابط ارائه شده توسط محققان دیگر برای تخمین ظرفیت ستون های بتن مسلح محصور شده با غلاف یا دورپیچ CFRP دارد.

۴-۴- مقایسه فنی و اقتصادی

در ادامه به بررسی نسبت هزینه های انجام شده جهت تهیه ستون ها و ظرفیت فشاری نهایی هر ستون و مقایسه فنی و اقتصادی آن ها اقدام شد. در جدول ۷ نسبت هزینه های ساخت ستون های این تحقیق و تأثیر آن ها بر روی ظرفیت نهایی ارائه شده است.

نسبت هزینه ساخت و ظرفیت فشاری ستون های این تحقیق به

سرتاسر طول ستون با وقوع کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای ماریچ رخ دهد

۴-۳- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط ارائه شده برای تخمین

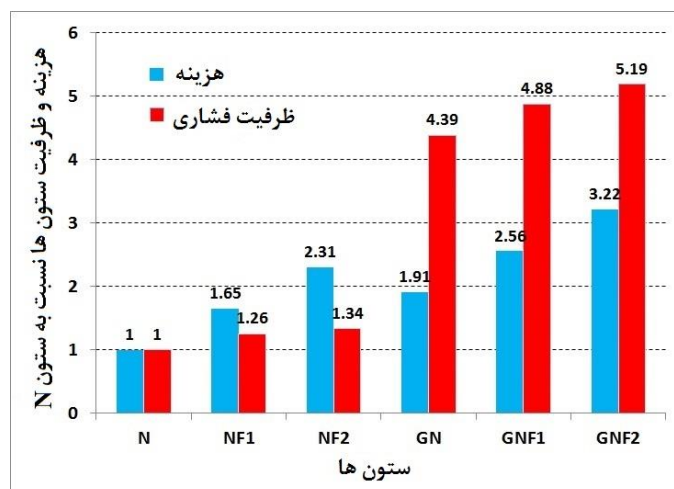
ظرفیت نهایی ستون های محصور شده

تاکنون روابط متعددی برای محاسبه مقاومت بتن محصور شده جهت ستون های محصور شده با CFRP پیشنهاد شده است که از آن جمله می توان به مدل سمان و همکاران [۱۴] بصورت رابطه ۱ و مدل کاربهراری و ژائو [۱۵] طبق رابطه ۲ اشاره کرد. در این روابط f'_{cc} ، f'_{co} و f_{lfrp} به ترتیب بیانگر مقاومت فشاری بتن اولیه، مقاومت فشاری بتن محصور شده و تنش محصور کننده جانبی دورپیچ هستند.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 6.0 f_{lfrp}^{0.7} \quad (1)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} \left[1 + 2.1 \left(\frac{f_{lfrp}}{f'_{co}} \right)^{0.87} \right] \quad (2)$$

برای محاسبه f_{lfrp} روابط مختلفی پیشنهاد شده که از آن جمله رابطه توصیه نامه انجمن ISIS^۱ کانادا [۳۵] بصورت رابطه ۳ می باشد. در رابطه ۳، d و h ابعاد مقطع و N_b ، t_{frp} و E_{frp} به ترتیب تعداد لایه ها، ضخامت و ضریب ارتجاعی CFRP هستند. هم چنین ε_{frpu} کرنش نهایی CFRP است و به طور محافظه کارانه برابر ۰/۰۰۲ فرض می شود.



شکل ۱۳. مقایسه درصد افزایش ظرفیت فشاری و هزینه ساخت ستون ها نسبت به ستون N

Fig. 13. Comparison of the percentage of increase in compressive capacity and construction cost of columns compared to column N

حضور غلاف لوله ای GRP و انجام آزمایش تعیین ظرفیت فشاری و تعیین تغییر شکل های محوری و جانبی آن ها، مقایسه پارامترهای مختلف این تحقیق انجام گردید. نتیجه کلی این پژوهش معرفی یک نوع جدید از ستون های مرکب شامل غلاف GRP، بتن مسلح و الیاف پلیمری CFRP بود. نتایج عالی استفاده از غلاف GRP نشان داد که این غلاف ها می توانند در اجرای ساختمان های جدید استفاده شوند، هم چنین الیاف پلیمری CFRP می توانند به منظور تقویت ستون های بتنی جهت افزایش باربری و سختی این اعضاء به کار گرفته شوند.

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به صورت زیر می باشند:

۱- استفاده از غلاف GRP به عنوان قالب و تقویت ستون های بتن مسلح باعث افزایش تحمل بار فشاری به طور قابل ملاحظه ای گردید، به طوری که ستون های دارای غلاف نسبت به ستون های مشابه بدون غلاف، به طور میانگین ظرفیت فشاری ۴ برابر بیش تر دارند.

۲- تقویت ستون های بتن مسلح با دورپیچ CFRP در ستون های فاقد غلاف GRP به طور قابل ملاحظه ای باعث افزایش تحمل بار فشاری می شود، به طوری که استفاده از یک و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش ۲۶٪ و ۳۵٪ نسبت به ستون های فاقد CFRP گردید؛ این در حالی است که در ستون های دارای غلاف GRP این اثر به خاطر وجود محصوریت GRP کمتر بوده است، به این ترتیب که استفاده از یک و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث ۱۱٪ و ۱۸٪ افزایش در ظرفیت فشاری نسبت به ستون های فاقد CFRP شده است.

هزینه و ظرفیت ستون N و مقایسه آنها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بررسی شکل ۱۳ نشان می دهد که نسبت ظرفیت فشاری ایجاد شده توسط دورپیچ های CFRP در ستون های فاقد غلاف کمتر از نسبت هزینه انجام شده می باشد، در حالی که در ستون های دارای غلاف GRP، افزایش ظرفیت فشاری ایجاد شده بیشتر از هزینه انجام شده برای استفاده از این غلاف ها می باشد، و به طور میانگین در ستون های دارای غلاف افزایش ظرفیت فشاری حدود ۱/۹ برابر افزایش هزینه ساخت نسبت به ستون های مشابه بدون غلاف بوده است، لذا استفاده از غلاف GRP جهت افزایش مقاومت ستون های بتن مسلح مقرون به صرفه می باشد. هم چنین مشهود است که استفاده از CFRP، در ستون های دارای غلاف مقرون به صرفه نمی باشد، زیرا ظرفیت فشاری ایجاد شده ناشی از مقاوم سازی با این مصالح کم تر از هزینه انجام شده می باشد. از بین ستون های مورد مطالعه ستون GN بیش ترین نسبت افزایش ظرفیت فشاری نسبت به هزینه ساخت به میزان ۲/۳ را دارد، لذا این ستون ها را به عنوان اقتصادی ترین ستون ها برای اجرا می توان پیشنهاد کرد.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی تأثیر جداگانه و همزمان اثر غلاف GRP و دورپیچ CFRP بر رفتار ستون های بتن مسلح با مقطع دایره ای پرداخته شد که با ساخت ۶ نمونه ستون بتن مسلح استوانه ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی متر با و بدون

- structural engineering, 123(5) (1997) 583-590.
- [2] M. Shahawy, A. Mirmiran, T. Beitelman, Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns, *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7) (2000) 471-480.
- [3] G. Wu, Z. Lü, Z. Wu, Strength and ductility of concrete cylinders confined with FRP composites, *Construction and building materials*, 20(3) (2006) 134-148.
- [4] S.A. Sheikh, Performance of concrete structures retrofitted with fibre reinforced polymers, *Engineering structures*, 24(7) (2002) 869-879.
- [5] Y. Wong, T. Yu, J. Teng, S. Dong, Behavior of FRP-confined concrete in annular section columns, *Composites Part B: Engineering*, 39(3) (2008) 451-466.
- [6] A. Mirmiran, M. Shahawy, M. Samaan, H.E. Echary, J.C. Mastrapa, O. Pico, Effect of column parameters on FRP-confined concrete, *Journal of Composites for construction*, 2(4) (1998) 175-185.
- [7] 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)*, 31(5) (2010) 2330-2341.
- [8] T. Ozbakkaloglu, T. Xie, Geopolymer concrete-filled FRP tubes: Behavior of circular and square columns under axial compression, *Composites Part B: Engineering*, 96 (2016) 215-230.
- [9] A. Rahai, P. Sadeghian, M.R. Ehsani, Experimental behavior of concrete cylinders confined with CFRP composites, in: *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [10] R. Kumutha, R. Vaidyanathan, M. Palanichamy, Behaviour of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP, *Cement and concrete composites*, 29(8) (2007) 609-615.
- [11] A. Parvin, A.S. Jamwal, Effects of wrap thickness and ply configuration on composite-confined concrete cylinders, *Composite structures*, 67(4) (2005) 437-442.

۳- افزایش لایه های دورپیچ CFRP موجب افزایش تحمل نیروی فشاری شد، به طوری که میانگین افزایش ظرفیت فشاری ناشی از استفاده از یک و دو لایه CFRP نسبت به ستون های مشابه فاقد دورپیچ، به ترتیب ۵/۱۸٪ و ۵/۲۶٪ می باشد.

۴- کرنش در بار نهایی ستون های بتن مسلح با دورپیچ CFRP در مقایسه با ستون های بتن مسلح بدون دورپیچ، بیش تر است، هم چنین، استفاده از غلاف GRP باعث افزایش کرنش در بار نهایی ستون های بتن مسلح به مقدار زیادی شده است.

۵- با بررسی نحوه شکست ستون ها مشخص شد که اکثر ستون ها در اثر کماتش میلگردهای طولی دچار گسیختگی شدند. در ستون های فاقد غلاف GRP اکثرا گسیختگی به صورت موضعی و تدریجی اتفاق افتاد؛ در این ستون ها گسیختگی در یکی از دو انتهای اتفاق افتاد. علت آن را می توان محصوریت کم تر هسته بتنی در این دو انتهای از سوی شبکه میلگردها دانست، این در حالی است که در ستون های دارای غلاف GRP گسیختگی متفاوت و به طور کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در کل طول ستون اتفاق افتاد، که علت این امر را نیز می توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ناشی از وجود غلاف GRP دانست؛ این میزان محصوریت باعث جلوگیری از کماتش زود هنگام میلگردها، رسیدن تمام نقاط ستون به حداکثر کرنش قابل تحمل خود، جاری شدن میلگردهای طولی، قطع میلگرد مارپیچ و در نهایت گسیختگی ستون گردید.

۶- مقایسه فنی و اقتصادی ستون های مورد مطالعه نشان داده که استفاده از لوله های غلافی GRP جهت مقاوم سازی ستون ها بسیار مقرون به صرفه تر از کاربرد دورپیچ CFRP می باشد، به طوری که افزایش مقاومت در ستون های دارای غلاف بیش تر از هزینه انجام شده برای مقاوم سازی آن ها می باشد، ولی نسبت افزایش مقاومت حاصل از دورپیچ CFRP در ستون های با و بدون غلاف به هزینه صرف شده جهت مقاوم سازی با این مصالح، کمتر بوده است.

۷- مقایسه مقاومت نهایی ستون های این تحقیق با روابط ارائه شده توسط محققان دیگر برای تخمین مقاومت نهایی ستون های بتن مسلح محصور شده با غلاف GRP یا دورپیچ CFRP، همخوانی مناسبی دارد

مراجع

- [1] A. Mirmiran, M. Shahawy, Behavior of concrete columns confined by fiber composites, *Journal of*

- Journal, 107(3) (2010).
- [23] J. Xiao, J. Tresserras, V.W. Tam, GFRP-tube confined RAC under axial and eccentric loading with and without expansive agent, *Construction and Building Materials*, 73 (2014) 575-585.
- [24] A.Q.L. Al-Baali, Behaviour of fibre-reinforced polymer (FRP) tube reinforced concrete (FTRC) specimens under different loading conditions, (2016).
- [25] M.N. Hadi, W. Wang, M.N. Sheikh, Axial compressive behaviour of GFRP tube reinforced concrete columns, *Construction and Building Materials*, 81 (2015) 198-207.
- [26] W. Wang, M.N. Sheikh, M.N. Hadi, D. Gao, G. Chen, Behaviour of concrete-encased concrete-filled FRP tube (CCFT) columns under axial compression, *Engineering Structures*, 147 (2017) 256-268.
- [27] Y.F. Yang, L.H. Han, X. Wu, Concrete shrinkage and creep in recycled aggregate concrete-filled steel tubes, *Advances in Structural Engineering*, 11(4) (2008) 383-396.
- [28] L.H. Ichinose, E. Watanabe, H. Nakai, An experimental study on creep of concrete filled steel pipes, *Journal of Constructional Steel Research*, 57(4) (2001) 453-466.
- [29] K. Shrestha, B.-c. Chen, Y.-f. Chen, State of the art of creep of concrete filled steel tubular arches, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(1) (2011) 145-151.
- [30] D. Astm, Standard test method for determining tensile properties of fibre reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures, in, *ASTM West Conshohocken, PA*, 2010.
- [31] B. ASTM, D2996-Standard Specification for Filament-Wound" Fiberglass, Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, (2001).
- [32] A. International, Standard test method for tensile properties of plastics, *ASTM International*, 2014.
- [33] A. Standard, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, *ACI Manual of Concrete Practice*, (1996) 1-38.
- [34] A.I.C.C.o. Concrete, C. Aggregates, Standard test
- [12] T.H. Almusallam, Behavior of normal and high-strength concrete cylinders confined with E-glass/epoxy composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6) (2007) 629-639.
- [13] T. Vincent, T. Ozbakkaloglu, Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high-and ultra high-strength concrete, *Composites Part B: Engineering*, 50 (2013) 413-428.
- [14] M. Samaan, A. Mirmiran, M. Shahawy, Model of concrete confined by fiber composites, *Journal of structural engineering*, 124(9) (1998) 1025-1031.
- [15] V.M. Karbhari, Y. Gao, Composite jacketed concrete under uniaxial compression—Verification of simple design equations, *Journal of materials in civil engineering*, 9(4) (1997) 185-193.
- [16] T. Ozbakkaloglu, J.C. Lim, T. Vincent, FRP-confined concrete in circular sections: Review and assessment of stress-strain models, *Engineering Structures*, 49 (2013) 1068-1088.
- [17] M.N. Youssef, M.Q. Feng, A.S. Mosallam, Stress-strain model for concrete confined by FRP composites, *Composites Part B: Engineering*, 38(5-6) (2007) 614-628.
- [18] M.N. Hadi, Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns, *Composite structures*, 74(2) (2006) 127-135.
- [19] M.N. Hadi, Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading, *Composite Structures*, 77(1) (2007) 92-96.
- [20] M.N. Hadi, The behaviour of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads, *Composite Structures*, 78(4) (2007) 560-566.
- [21] T. Ozbakkaloglu, Axial compressive behavior of square and rectangular high-strength concrete-filled FRP tubes, *Journal of Composites for Construction*, 17(1) (2013) 151-161.
- [22] A.R. Malik, S.J. Foster, Carbon Fiber-Reinforced Polymer Confined Reactive Powder Concrete Columns--Experimental Investigation, *ACI Structural*

of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, in, ISIS Canada Corporation Winnipeg (Spring), 2001.

method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International, 2014.
[35] D.M.N. ISIS Canada, Canadian Network of Centers

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Shafieinia, S.F. Sajedi, S.V. Razavi Tosi, An Experimental study on the behavior of circular RCC enclosed GRP casing and FRP wrapping, Amirkabir J. Civil Eng., 52(1) (2020) 73-88.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14530.5677](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14530.5677)



