Journal of Structural and Construction Engineering, 9(2), 2022, pp. 198-214

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigation of capacity, rupture and ductility of RCC's with GRP casing with and without CFRP application under eccetric load

Mehran Zolfaghari Hamooleh1, Seyed Fathollah Sajedi2*, Ahmad Dalvand3

1- PhD student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- Lorestan University, Department of Civil Engineering, Khoramabad, Iran

ABSTRACT

In this study, the capacity, rupture and ductility of circular reinforced concrete columns reinforced with glass-fibre reinforced plastic pipes and carbon- fibres reinforced plastic, under eccentric load was checked. The effects of eccentricity, casing, twist and number of layers on the behaviour of the columns were evaluated. Eighteen circular columns with and without casings, with diameters and heights of 150 and 600 mm, respectively, were subjected to axial loads with eccentricity of 20 and 50 mm, and the effects of GRP and CFRP as the enclosing factors of the columns were investigated. The results showed that the use of casing and twist separately and simultaneously causes a significant increase in the compressive capacity of the columns. On average, the addition of one layer and two twisted layers with and without casing, increased their capacity by 24%, 34%, 6.3% and 12%, respectively. The number of twisting layers did not have much effect on the ultimate compressive capacity in the columns with casing; while the casing increased the compressive capacity of the columns by 3.5 times on average. Rupture occurred in columns without casing mostly locally and gradually, and in columns with casings completely; the cause can be attributed to the very high degree of enclosure caused by the casing. The use of casing increased the ductility of reinforced concrete columns by a large amount, so that the average increase in axial displacement in columns with casing compared to similar columns without casing, was 399%.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 August 2021
Revise Date: 05 October 2021
Accept Date: 01 November 2021

Keywords: *Reinforced concrete circular column, Eccentric load, GRP casing, CFRP twist, Capacity, Rupture, Ductility.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2021.300315.2536

*Corresponding author: Seyed Fathollah Sajedi
Email address: zarfam@srbiau.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح با پوسته GRP با و بدون کاربرد CFRP تحت بار خارج از مرکز

مهران ذوالفقاری‌حموله[۱]، سیدفتح اله ساجدی[۲*]، احمد دالوند[۳]

۱ -دانشجوی دکتری عمران- سازه، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲ -دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- استادیار گروه عمران، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

در این تحقیق ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح دایره‌ای شکل که با استفاده از غلاف لوله‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف شیشه[۱]و دورپیچ الیاف پلیمری تقویتی کربنی[۲] تقویت شدند، تحت نیروی خارج از مرکز، بررسی گردید. اثرات خارج از مرکزیت، غلاف، دورپیچ و تعداد لایه‌های آن بر رفتار ستون‌ها ارزیابی شدند. ۱۸ ستون دایره‌ای با و بدون غلاف و به ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر، تحت بار محوری با خروج از مرکزیت‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر قرار گرفتند و اثرات GRP و CFRP به عنوان عوامل محصورکننده ستون‌ها بررسی شدند. نتایج نشان داد که کاربرد دورپیچ و غلاف به‌صورت جداگانه و همزمان باعث افزایش قابل‌توجه در ظرفیت فشاری ستون‌ها می‌شوند. افزودن یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌طور متوسط و به ترتیب در ستون های بدون غلاف و غلافدار، سبب افزایش ظرفیت آنها به میزان ٪۲۴، ٪۳۴ ، ٪۶/۳ و ٪۱۲ شدند. تعداد لایه‌های دورپیچ اثر زیادی بر ظرفیت فشاری نهایی در ستون‌های غلافدار نداشت؛ در حالی که غلاف به‌طور متوسط موجب افزایش ۳/۵ برابری ظرفیت فشاری ستون‌ها شد. گسیختگی در ستون‌های بدون غلاف اکثرا به صورت موضعی و به تدریج، و در ستون‌های غلادار کامل اتفاق افتاد؛ علت آن را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ناشی از غلاف دانست. کاربرد غلاف باعث افزایش شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح به مقدار زیادی شد، به‌گونه‌ای که میانگین افزایش تغییرمکان محوری در ستون‌های غلافدار نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، ٪۳۹۹ بود.

کلمات کلیدی: ستون دایره‌ای بتن‌مسلح، بار خارج از مرکز، غلاف GRP، دورپیچ CFRP، ظرفیت، گسیختگی، شکل‌پذیری.

سابقه مقاله:					
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	شناسه دیجیتال:
۱۴۰۰/۵/۲۷	۱۴۰۰/۷/۱۳	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۰/۸/۱۰	۱۴۰۱/۰۲/۳۱	https://doi.org/10.22065/JSCE.2021.300315.2536
					doi: 10.22065/JSCE.2021.300315.2536

*نویسنده مسئول: سیدفتح اله ساجدی
پست الکترونیکی: sajedi@iauahvaz.ac.ir

[1] Glass-fibre reinforced plastic pipes (GRP)
[2] Carbon-fibre reinforced plastic (CFRP)

۱- مقدمه

سازه‌های بتن‌مسلح، جزو سازه‌های متداول می‌باشند که یکی از عوامل تخریب این نوع سازه‌ها مانند پل‌ها، ساختمان‌ها و بنادر، افزایش سن و فرسوده شدن آن‌ها تحت شرایط محیطی می‌باشد. لذا بهسازی و مقاوم‌سازی آنها نقش مهم و موثری در عملکرد مناسب سازه‌های مذکور در زلزله دارد. برای بهسازی و مقاوم‌سازی سازه‌های بتن‌مسلح روش‌های متفاوتی مرسوم می‌باشدکه از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به بهره‌گیری از غلاف GRP و هم‌چنین دورپیچ CFRP اشاره نمود.

با توجه به عملکرد بالای سیستم دورپیچ به علت جلوگیری از شکست‌های ترد برشی، مصالح الیافی در صنعت ساختمان استفاده شده‌اند، که در مقایسه با فولاد مزیت‌هایی دارند[۱]، و در شرایط مختلف محیط زیستی و عوامل آب و هوایی و اثر خوردگی و نمک‌ها و فعل و انفعالات شیمیایی، الیاف پلیمری و غلاف لوله‌های پلاستیکی یک انتخاب موفقیت‌آمیز و عملی در جایگزینی مواد و مصالح ستون‌های رایج بتن‌مسلح بوده است. تاکنون مطالعات فراوانی در حوزه بهسازی و مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌مسلح انجام شده است، که این تحقیقات عمدتاً با تمرکز بر بارگذاری محوری، مدل‌های تنش-کرنش و شکل مقطع‌ستون انجام شده‌اند[۵-۲].

اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه از اوایل دهه ۱۹۸۰ آغاز شده است. اولین بار ماتسودا و همکاران[۳] در سال‌های۱۹۸۷-۱۹۸۸ روش استفاده از CFRP را جهت مقاوم‌سازی ستون‌های بتن‌مسلح ارائه دادند، که در مطالعه آنها آزمایش‌هایی بر روی ۵ ستون با مقاطع دایره‌ای و۱۰ ستون با مقاطع مستطیلی تحت بارهای دینامیکی انجام شد. سپس ماتسودا و همکاران در سال ۱۹۹۰ دو روش مقاوم‌سازی ستون‌های پل بتنی با استفاده از دورپیچ CFRP را ارائه دادند که عبارتند از: مقاوم‌سازی برای افزایش مقاومت و مقاوم‌سازی به‌منظور افزایش شکل-پذیری. در هر دو روش مذکور می‌توان قابلیت جذب انرژی را در عضو مقاوم‌سازی شده بالا برد[۶]، که نتایج مشابهی توسط سامان و همکاران[۴](۱۹۹۸) ارائه گردیده است[۷].

پان و همکاران[۵](۲۰۰۷) مشاهده کردند که اثر تقویت با افزایش نسبت لاغری کاهش می‌یابد، به‌گونه‌ای که تاثیر نسبت لاغری بر ظرفیت فشاری ستون‌های بتن‌مسلح با CFRP قابل توجه‌تر بوده، که محصورسازی با CFRP باعث افزایش ظرفیت به‌جای سختی خمشی ستون‌های بتن‌مسلح با بتن معمولی می‌شود[۸].

از سوی دیگر تحقیقات انجام شده در زمینه بارگذاری محوری با خروج از مرکزیت، نشان می‌دهد که این نوع بارگذاری و اعمال لنگر خمشی، ظرفیت فشاری ستون های بتنی می‌کاهد، هم‌چنین استفاده از مصالح CFRP ظرفیت فشاری و شکل‌پذیری این اعضا را بهبود می-بخشد[۱۰-۹].

یکی دیگر از روش‌های تقویت ستون‌های بتنی در سیستم دورپیچ، استفاده از لوله‌های GRP می‌باشد. 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 می‌شوند و همزمان هسته بتنی باعث جلوگیری از کمانش غلاف GRP می‌شود[۱۳-۱۱].

شهاوی و همکاران[۶] در سال ۲۰۰۰ عنوان نمودند که تاثیر دورپیچ ورق‌های CFRP بر ستون‌های با مقاومت فشاری کم‌تر، بیش‌تر است. همچنین استفاده از ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ لایه از ورق‌های CFRP در ستون‌های با بتن معمولی می‌تواند ظرفیت محوری را به میزان ۱/۷۴، ۲/۳۹، ۳/۲۳ ، ۳/۹ و ۴/۱۳ برابر افزایش دهد، ولی این افزایش‌ها، روند یکسان نداشته و با افزایش تعداد لایه‌ها به تدریج روند کاهشی خواهد داشت[۱۳].

ازبکاگلو و همکاران[۷] در سال ۲۰۰۴ تحقیقی بر عملکرد پایداری ستون‌های بتنی ساخته شده از بتن با مقاومت بالا و تقویت‌شده با دورپیچ ورق‌های CFRP انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که ظرفیت تحمل بار جانبی ستون ساخته شده از بتن با مقاومت بالا با استفاده از

[1] Matsuda et al.
[2] Samaan et al.
[1] Pan et al.
[2] Shahawy et al.
[3] Ozbakkaoglu et al.

دورپیچ CFRP به طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. هم‌چنین استفاده از دورپیچ CFRP باعث بهبود شکل‌پذیری جانبی ستون به اندازه ٪۱۲ می‌شود[۱۴]. که نتایج مشابهی توسط هادی[۴] در سال ۲۰۰۶ نیز ارائه شده است[۹].

اصفهانی و صالحیان در سال ۱۳۸۴ به بررسی رفتار ستون‌های بتن‌مسلح تقویت شده با دورپیچ ورق‌های CFRP تحت اثر نیروی برون‌محور پرداختند. در این تحقیق، نمونه‌های آزمایشگاهی شامل ۶ ستون دورپیچ شده هر یک به طول ۷۰۰ میلی‌متر و با مقطع مربع‌شکل به ضلع ۲۰۰ میلی‌متر بودند که در برون محوری‌های ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ میلی‌متر تحت اثر بار فشاری قرار گرفتند. نتایج حاصل از این پژوهش آنها نشان داد که با افزایش برون‌محوری، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد[۱].

ال‌ماداوی و همکاران[۵] در سال ۲۰۱۰ تاثیر نحوه بارگذاری را بر عملکرد ستون محصورشده در CFRP تحت بار محوری خارج از مرکز بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزایش مقاومت ستون محصور شده تحت بار محوری مرکزی، ۴۴٪ و تحت بار خارج از مرکز ٪۲۸ در مقاطع دایروی تغییر کرد، هم‌چنین نتایج تحقیقات ال‌ماداوی و همکاران درخصوص شکل‌پذیری ستون‌های بتنی نشان داد که محصور نمودن ستون‌ها با CFRP باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود که این افزایش تحت بار خالص، ٪۳۵۰ و تحت بار خارج از مرکز ٪۱۲۰ متغیر بود[۲]، که نتایج مشابهی نیز توسط هادی در سال ۲۰۰۹ ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به کاهش بار نهایی ستون‌ها با افزایش خروج از مرکزیت بار وارده اشاره کرد[۱۵].

پارک و همکاران[۶] در سال ۲۰۰۹ تحقیقی آزمایشگاهی بر روی ستون‌های بتنی مسلح با غلاف GRP تحت بارهای محوری فشاری و خمشی 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 سه‌تای دیگر دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی‌متر بودند. هم‌چنین ۳ ستون بتنی به قطر ۳۰۰ و ارتفاع ۱۵۰۰ میلی‌متر تحت بار خمشی ناشی از نیروی افقی آزمایش گردیدند، که از این ستون‌ها یکی فاقد غلاف و دوتای دیگر دارای غلاف به ضخامت‌های ۱/۲۵، ۲/۵ میلی‌متر بودند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که محصور نمودن ستون‌های بتن‌مسلح با استفاده از غلاف GRP باعث بهبود مقاومت و انعطاف‌پذیری می‌شود، به‌طوری‌که در گروه ستون‌های تحت نیروی محوری فشاری که دارای غلاف به ضخامت ۱/۲۵، ۲/۵ و ۵ میلی متر بودند، بار فشاری نهایی به‌ترتیب ٪۶۸، ٪۱۴۵ و ٪۲۱۹ نسبت به ستون‌های فاقد غلاف افزایش نشان داد. هم‌چنین در گروه ستون‌هایی که تحت لنگر خمشی قرار گرفتند و دارای غلاف به ضخامت ۱/۲۵، ۲/۵ میلی‌متر بودند، بار افقی نهایی به‌ترتیب ٪۱۲ و ٪۲۹ نسبت به ستون‌های فاقد غلاف افزایش داشتند. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که تاثیر غلاف در افزایش ظرفیت فشاری ستون‌ها بیش‌تر از افزایش ظرفیت خمشی آن‌ها می‌باشد[۱۶]. هم‌چنین نتایج مشابهی توسط کوسماواردنینگیش و همکاران[۱] و نیز کوماتا و همکاران[۲] گزارش شده است.

حسن و همکاران[۳] در سال ۲۰۱۶ تحقیقی بر رفتار ستون‌های بتنی با مقاومت بالا و با ژاکت CFRP تحت بار خارج از محور انجام دادند. نتایج کار آنها نشان داد که استفاده از یک لایه ورق CFRP برای خروج از مرکزیت‌های کوچک و بزرگ به ترتیب به مقدار ٪۱۲ و ٪۴۱ و استفاده از دو لایه ورق CFRP به ترتیب به مقدار ٪۲۱ و ٪۵۳ مقاومت را افزایش می‌دهند[۱۹]. هم‌چنین ساجدی و شفیعی‌نیا تحقیقی مشابه روی ۱۲ عدد ستون بتن مسلح با مقطع دایره‌ای به قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و میزان میلگرد طولی ٪۲/۷ سطح مقطع ناخالص ستون با گروه بندی مشابه و ساخته شده از بتن با مقاومت میانگین فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای ۳۲/۷ مگاپاسکال تحت بار محوری بدون خروج از مرکزیت انجام دادند[۲۰]. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در ستون‌های تقویت شده با ورق‌های دورپیچ CFRP استفاده از یک‌لایه و دو لایه نوار تقویت عمودی به‌ترتیب باعث افزایش ظرفیت فشاری به میزان ٪۲۶ و ٪۳۴ شدند. به‌علاوه به‌دست آمد که استفاده از ورق‌های دورپیچ GFRP نسبت به ورق‌های CFRP افزایش مقاومت محوری بیش‌تری ایجاد می‌کنند[۲۰] .

[4] Hadi
[5] EL Maaddawy et al.
[6] Park et al.
[1] Kusumawardaningsih et al.
[2] Kumutha et al.
[3] Hassan et al.

در این پژوهش به‌طور آزمایشگاهی اثرات جداگانه و همزمان غلاف و دورپیچ بر ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح با مقطع دایره‌ای بررسی گردید. به این‌منظور با ساخت ۱۸ عدد ستون دایره‌ای با قطر و ارتفاع به ترتیب ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر و با و بدون-حضور غلاف و دورپیچ و انجام آزمایش‌های فشاری با بارگذاری‌های خارج از مرکز و تعیین تغییرشکل محوری آن‌ها، این هدف دنبال شده است.

۲- مشخصات دورپیچ CFRP وغلاف GRP مصرفی

ورقه‌های کامپوزیتی استفاده شده در این پژوهش از جنس الیاف کربن CFRP و به‌صورت یک جهته و ساخت شرکت کوانتوم انگلستان می-باشند. خواص مکانیکی مصالح CFRP براساس اطلاعات کارخانه سازنده، از آزمایش‌های انجام شده به‌ترتیب طبق استانداردهای D7565 ASTM [۲۱] و ASTM D2996 [۲۲] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. چسب اپوکسی مصرفی در این پژوهش ساخت شرکت پایا*و به صورت دو جزئی متشکل از رزین و سخت کننده با نسبت اختلاط ۳ به ۱ ترکیب و به مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط می‌شوند. تنش کششی قابل تحمل چسب ۳۰ مگاپاسکال و کرنش گسیختگی کششی آن ٪۳/۶ می‌باشد. مشخصات ترکیب چسب مذکور براساس کاتالوگ کارخانه سازنده و از آزمایش‌های انجام شده طبق استاندارد ASTM D638 [۲۳] به‌دست آمده‌اند.

لوله‌های کامپوزیتی GRP ساخت کارخانه فراسان شیراز*می‌باشند که با الیاف شیشه آغشته به رزین تولید می‌شوند. این لوله‌ها برحسب فشار داخلی که تحمل می‌کنند، دسته‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از لوله‌های GRP با تحمل فشار داخلی ۶۱ بار استفاده گردید. مشخصات لوله‌های GRP براساس استاندار ASTM D2996-98 [۲۴] در جدول ۱ ارائه شده‌اند. به‌منظور انجام آزمایش‌های این تحقیق از لوله‌های GRP به طول ۶۰۰، قطر داخلی ۱۵۰ و ضخامت ۸ میلی‌متر استفاده شد.

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

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

۳- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- آزمایش‌های اولیه

به‌منظور تعیین مقاومت فشاری بتن مصرفی در ساخت ستون‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای به ترتیب با قطر داخلی و ارتفاع ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر طبق توصیه ACI-211 [۲۵] تهیه و پس از عمل‌آوری در حوضچه آب در سنین ۷ و ۲۸ روزه آزمایش مقاومت فشاری روی آن‌ها به عمل آمد. هم‌چنین برای افزایش مقاومت فشاری بتن، نسبت آب به سیمان تا مقدار ۰/۴۵ کاهش داده شد. اسلامپ بتن در هنگام ساخت نمونه‌ها ۸۰ میلی‌متر بود. جزئیات طرح اختلاط بتن در ساخت نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

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

سیمان نوع ۲	آب	شن	ماسه	w/c
۳۵۰	۱۷۵/۵	۹۳۲	۹۳۳	۰/۴۵

* ایران- کرج- ماهدشت- سه راه سردرآباد (info@betochem.ir)
*ایران- شیراز بلوار ارم خیابان ۲۲ (info@farassan.org)

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در جدول ۳ ارائه گردیده است. میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه نمونه‌های استوانه‌ای بتن ۳۲/۷ مگاپاسکال به دست آمد.

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

نوع سیمان	نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	میانگین
نوع۲ رامهرمز	۳۲/۷	۳۴/۴	۳۱/۰	۳۲/۷

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها

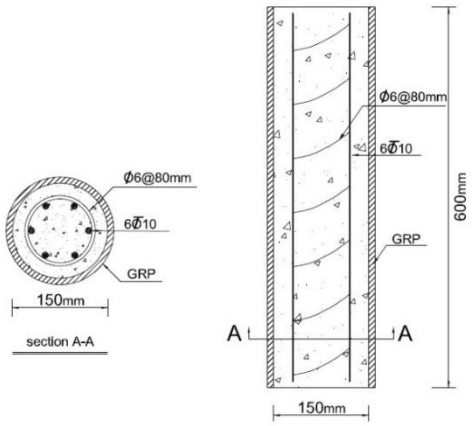
نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر شامل ۱۸عدد ستون بتنی با مقطع دایره‌ای با قطر داخلی و ارتفاع ۱۵۰ و۶۰۰ میلی‌متر بودند، که آزمایش مقاومت فشاری بر روی آنها انجام شد. تمام ستون‌ها از بتن‌مسلح ساخته شدند. ستون‌ها به سه‌گروه ۶ تایی تقسیم گردیده، و هرگروه شامل شش ستون با خروج از مرکزیت صفر، و شش ستون با خروج از مرکزیت۲۰ میلی‌متر و شش ستون با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر بودند، که به‌ترتیب اولین ستون فاقد لایه دورپیچ تقویتی، دومین ستون یک لایه دورپیچ CFRP و سومین ستون دو لایه تقویتی CFRP، چهارمین ستون با غلاف GRP تنها و پنجمین ستون با غلاف GRP و یک لایه دورپیچ CFRP و ششمین ستون با غلاف GRP و دو لایه CFRP دورپیچ شده بودند. ستون‌ها براساس اجزای سازنده نام-گذاری شدند. به‌عنوان مثال برای تمام ستون‌ها از حرف (N)، ستون‌های دارای غلافGRP حرف(G) و ستون‌های دارای دورپیچ CFRP حرف(F) استفاده شد. عدد پس از حرف F نشانگر تعداد لایه‌هایCFRP می‌باشد. در جدول ۴ مشخصات ستون‌ها ارائه گردیده است.

جدول ۴- مشخصات ستون‌های آزمایشگاهی تحقیق

نام نمونه	خروج مرکزیت (mm)	غلاف GRP	دورپیچ CFRP	تعداد لایه CFRP	نام نمونه	خروج مرکزیت (mm)	غلاف GRP	دورپیچ CFRP	تعداد لایه CFRP
N-0	۰	ندارد	ندارد	۰	GN-0	ه	دارد	ندارد	۰
N-20	۲۰	ندارد	ندارد	۰	GN-20	۲۰	دارد	ندارد	۰
N-50	۵۰	ندارد	ندارد	۰	GN-50	۵۰	دارد	ندارد	۰
NF1-0	۰	ندارد	دارد	۱	GNF1-0	۰	دارد	دارد	۱
NF1-20	۲۰	ندارد	دارد	۱	GNF1-20	۲۰	دارد	دارد	۱
NF1-50	۵۰	ندارد	دارد	۱	GNF1-50	۵۰	دارد	دارد	۱
NF2-0	۰	ندارد	دارد	۲	GNF2-0	۰	دارد	دارد	۲
NF2-20	۲۰	ندارد	دارد	۲	GNF2-20	۲۰	دارد	دارد	۲
NF2-50	۵۰	ندارد	دارد	۲	GNF2-50	۵۰	دارد	دارد	۲

۳-۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های آزمایشگاهی تحقیق حاضر شامل تعداد ۱۸ عدد ستون بتنی با مقطع دایره‌ای به‌ترتیب با قطر و ارتفاع ۱۵۰ و ۶۰۰ میلی‌متر هستند. هم‌چنین سه نمونه به عنوان ذخیره در نظر گرفته شد که در صورت بروز مشکل در حین انجام آزمایش‌ها، استفاده شوند. میزان میلگرد طولی استفاده شده در همه ستون‌ها برابر ٪ ۲/۷ سطح مقطع ناخالص ستون در نظر گرفته شد، که این مقدار با استفاده از ۶ عدد میلگرد آجدار به قطر ۱۰ میلی‌متر تأمین شده است. برای جلوگیری از تمرکز تنش، این میلگردها در فاصله ۲۰ میلی‌متر مانده به دو انتهای ستون قطع شدند، بنابراین طول در نظر گرفته شده برای میلگردهای طولی ۵۶۰ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین در هر شبکه، میلگرد مارپیچ با گام ۸۰ میلی‌متر و به قطر ۶ میلی‌متر استفاده گردید؛ این گام به صورتی انتخاب شده که محصورشدگی داخلی زیادی توسط خاموت‌ها ایجاد نشود. پوشش بتن روی میلگردها به مقدار ۲۵ میلی‌متر منظور گردید. جهت تأمین پوشش مورد نظر برای میلگردهای طولی و عرضی، از فاصله انداز استفاده شد. تنش تسلیم آرماتورها با استفاده از آزمایش کشش میلگرد تعیین و برای آرماتورهای طولی و عرضی به‌ترتیب برابر ۴۰۰ و ۳۰۰ مگاپاسکال به دست آمد، که در شکل ۱ مقاطع عرضی و طولی ستون نشان داده شده است.



شکل۱ - مقاطع عرضی و طولی ستون‌های تحقیق

سپس سطح داخلی قالب‌ها جهت جداسازی آسان قالب از سطح بتن به روغن آغشته شد و قفسه میلگردها در قالب قرار داده شدند. مرحله بعد ساخت ستون‌ها، تهیه ۹ عدد لوله GRP و ۹ عدد لوله PVC جهت قالب ستون‌های بدون غلاف با مقطع دایره‌ای با قطر داخلی ۱۵۰ وارتفاع ۶۰۰ میلی‌متر بود. شکل ۲ نحوه قرارگیری قفسه میلگردها را درون غلاف‌های GRP و قالب‌های PVC نشان می‌دهد. 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 به طور کامل صاف، تمیز و خشک گردید.

الف- قفسه میلگرد ب- قالب

شکل۲- نحوه قرارگیری قفسه میلگرد در قالب‌ها

چسب اپوکسی مصرفی دوجزئی و متشکل از رزین و سخت‌کننده بوده، که به ترتیب با نسبت ۳ به ۱ ترکیب و به‌مدت حداقل پنج دقیقه با دست مخلوط گردید، و سپس یک لایه نازک از چسب روی سطح استوانه بتنی مالیده شد و لایه دورپیچ CFRP با دقت به دور ستون پیچیده شد. لبه‌های انتهایی دورپیچ CFRP جهت اطمینان از عدم جداشدگی، 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. به‌منظور عمل‌آوری چسب اپوکسی، ستون-ها به مدت ۷ روز در دمای محیط نگهداری شدند. در شکل ۳ ستون‌های تحقیق، بعد از اعمال دورپیچ با CFRP نشان داده شده‌اند. جهت اندازه‌گیری تغییر مکان نمونه‌ها در حین انجام آزمایش مقاومت فشاری ستون‌ها و بررسی نحوه رفتار ستون‌ها و کرنش و تغییر طول نمونه‌ها از جابجایی‌سنج[1]استفاده شد.

[1] Linear Variable Differential Transducer (LVDT)

شکل۳- ستون‌های تحقیق پس از دورپیچی با CFRP

۳-۴- 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 به آدرس اهواز خیابان۱۰کیانپارس آزمایش شدند. آزمایش نمونه‌ها به روش کنترل تغییرمکان و با نرخ $\frac{KN}{S}$ ۱۰ بارگذاری انجام شد[۲۶]. به‌منظور تعیین تغییر مکان طولی ستون‌ها دو عدد جابجایی‌سنج در دو طرف ستون‌ها نصب شد. اطلاعات مربوط به تغییر مکان ستون با استفاده از دو کانال دیتالاگر الکترونیکی[1]متصل به کامپیوتر ثبت شد. هم‌چنین به‌منظور تعیین نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها، بار اعمالی در هر لحظه با استفاده از یک نیروسنج ۵۰۰۰ کیلونیوتنی به طور خودکار ثبت گردید. در هنگام قرار گرفتن ستون‌ها در دستگاه دقت کافی جهت اطمینان از اینکه ستون‌ها در مرکز جک قرار گرفته باشند، انجام شد. در شکل ۴ نحوه نصب دستگاه آزمایش و قرارگیری و بارگذاری و اصلاح نمونه‌ها با گوگرد نمایش داده شده‌است.

الف- جک بتن‌شکن و دیتالاگر ب- نحوه قرارگیری ستون‌بتنی در جک بتن‌شکن ج- اصلاح نمونه

شکل۴- آماده‌سازی و نحوه قرارگیری ستون‌بتنی در جک بتن‌شکن

۴- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۴-۱- ظرفیت نهایی ستون‌ها

هر ستون توسط جک آزمایشگاهی ۵۰۰۰ کیلونیوتنی آزمایشگاه مکانیک خاک اداره کل راه و ترابری استان خوزستان تا لحظه شکست با سرعت بارگذاری $^{kN}/_{S}$ ۱۰ بارگذاری شدند. ظرفیت و تغییرمکان متوسط نهایی ستون‌ها در جدول ۵ ارائه گردیده است.

[1] Electronic data-logger

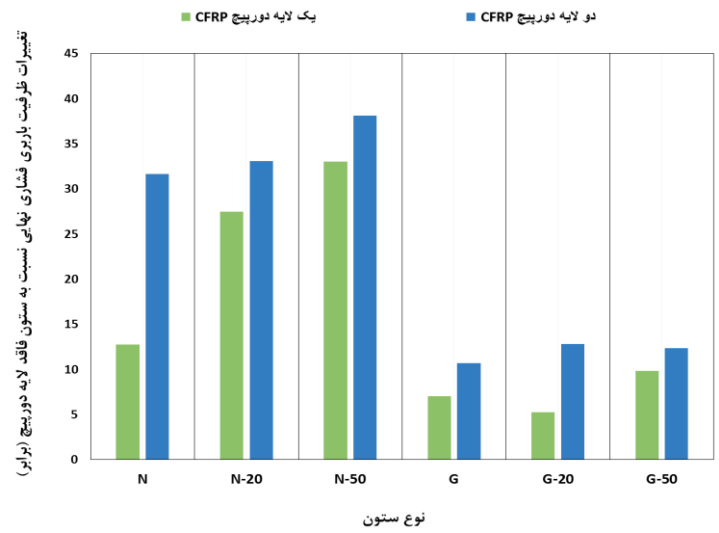
جدول ۵- ظرفیت و تغییرمکان متوسط نهایی ستون‌های تحقیق

ردیف	نام ستون	ظرفیت نهایی (ton)	تغییر مکان متوسط نهایی (mm)	ردیف	نام ستون	ظرفیت نهایی (ton)	تغییر مکان متوسط نهایی (mm)
۱	N-0	۵۴/۶۳	۳/۶۰۲	۱۰	GN-20	۱۸۲/۳۸	۱۶/۷۲۱
۲	NF1-0	۶۱/۶	۴/۴۴۵	۱۱	GNF1-20	۱۹۱/۹۴	۱۷/۵۵۷
۳	NF2-0	۷۱/۹۲	۴/۷۱۵	۱۲	GNF2-20	۲۰۵/۸	۱۸/۴۳۵
۴	GN-0	۲۱۵/۷	۱۴/۰۶۰	۱۳	N-50	۴۱/۱۲	۸/۷۷۷
۵	GNF1-0	۲۳۰/۹۲	۱۵/۴۶۶	۱۴	NF1-50	۵۴/۶۹	۱۱/۸۸۰
۶	GNF2-0	۲۳۸/۵۱	۱۶/۳۰۰	۱۵	NF2-50	۵۶/۷۹	۱۴/۲۰۰
۷	N-20	۴۵/۱۴	۶/۶۸۰	۱۶	GN-50	۱۵۵/۷	۱۹/۵۲۱
۸	NF1-20	۵۷/۵۳	۷/۳۴۸	۱۷	GNF1-50	۱۷۰/۹۸	۲۰/۳۰۲
۹	NF2-20	۶۰/۰۸	۸/۰۸۳	۱۸	GNF2-50	۱۷۴/۹	۲۱/۵۲۰

همان‌گونه که در جدول ۵ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت صفر و فاقد غلاف GRP استفاده از یک لایه و دولایه دورپیچ CFRP به‌ترتیب باعث افزایش ٪۱۲/۷ و ٪۳۱/۶ شد. در ستون‌های دارای غلاف با استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به‌ترتیب باعث افزایش ٪۷ و ٪۱۰/۵ در ظرفیت فشاری ستون گردید. مشخص شد که اثر دورپیچ دولایه در ستون‌های بدون غلاف بسیار زیاد و در ستون‌های دارای غلافGRP کم اثر است. لذا در حضور (با وجود) GRP استفاده از CFRP اقتصادی نبود و توصیه نمی‌گردد.

در حالت مشابه در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر و فاقد غلاف استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش ٪۲۷/۴ و ٪۳۳ شد. در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر و دارای غلاف GRP استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به ترتیب باعث افزایش ٪۴/۹ و ٪۱۲/۸، در ظرفیت فشاری ستون گردید.

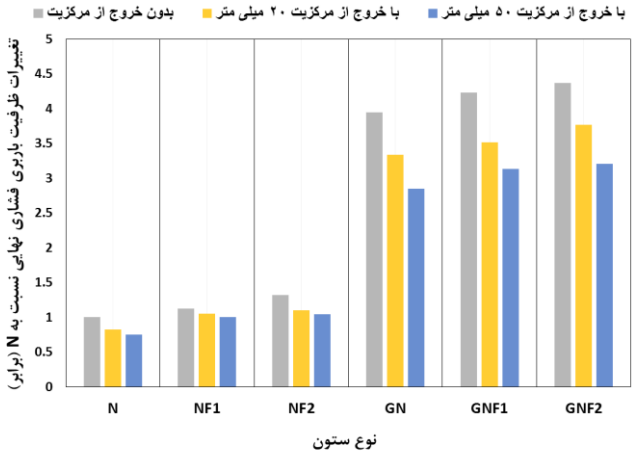
در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر و فاقد غلاف استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ به ترتیب باعث افزایش ٪۳۳ و ٪۳۸ شد. در ستون‌های بتنی دارای غلاف استفاده از یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب باعث افزایش ٪۹/۶ و ٪۱۲/۳در ظرفیت فشاری ستون شد.



شکل۵- تاثیر لایه‌های دورپیچ CFRP بر ظرفیت باربری فشاری نهایی ستون‌های تحقیق

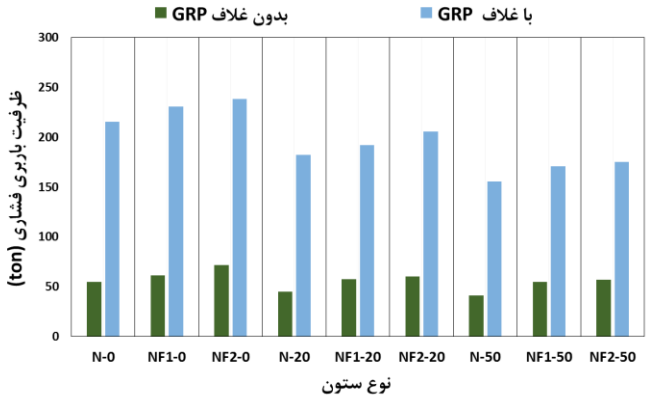
هم‌چنین مشاهده شد که در حالت خروج از مرکزیت صفر اثر غلاف GRP بر ظرفیت باربری فشاری نهایی بدون دورپیچCFRP و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۳۵ و ۳/۷۷ و ۳/۹۸ برابر است، و به‌طور میانگین باعث افزایش ۳/۷ برابری ظرفیت فشاری ستون‌ها شده است، در حالی‌که با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر اثر غلاف بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۴۱ و ۳/۵۵ و ۳/۴۱ برابر بود که به‌طور میانگین باعث افزایش ۳/۶ برابری ظرفیت فشاری شد. این مقادیر در حالت مشابه با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر اثر غلاف GRP بر ظرفیت باربری فشاری نهایی بدون دورپیچ و با یک‌لایه و دولایه دورپیچ به‌ترتیب ۳/۱ و ۳/۱۴ و ۳/۷۸ برابر بود و دارای متوسط ۳/۳ برابر است و می‌توان بیان نمود که نمونه‌های ستون بتنی با غلافGRP به‌طور میانگین سبب افزایش ۳/۵ برابری ظرفیت باربری فشاری نهایی شدند.

افزودن یک‌لایه و دولایه دورپیچ در ستون‌های بتنی فاقد غلاف و با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر به‌ترتیب سبب افزایش ٪۲۷/۳ و ٪۳۲/۹ ظرفیت باربری فشاری شد، در حالی‌که در ستون‌های بتنی دارای غلاف این مقادیر افزایش به‌صورت ٪۵/۲ و ٪۱۲/۹ بود. همچنین با افزودن یک‌لایه و دولایه دورپیچ CFRP در ستون‌های بتنی فاقد غلاف و با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر به‌ترتیب سبب افزایش ٪۳۳ و ٪۳۸ در ظرفیت باربری فشاری نهایی شد، که در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر دارای غلاف به‌ترتیب باعث افزایش ٪۹/۷ و ٪۱۲/۳ ظرفیت باربری فشاری گردید (شکل۶).



شکل۶- تاثیر خروج از مرکزیت بر ظرفیت باربری فشاری نهایی ستون‌های تحقیق

هم‌چنین اثر استفاده از یک‌لایه یا دولایه دورپیچ CFRP با و بدون غلاف GRP تنها و نیز غلاف و یک‌لایه و دولایه دورپیچ CFRP در شکل ۷ نشان داده شده است.

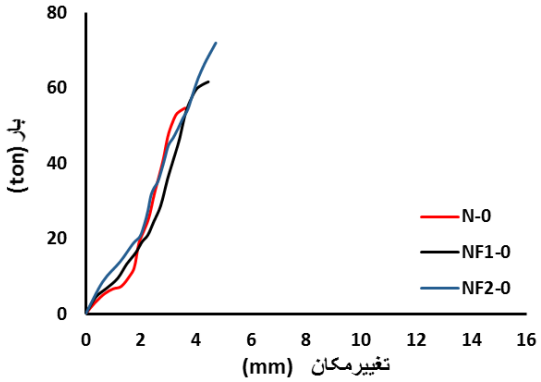


شکل۷- تاثیر استفاده از غلاف GRP بر ظرفیت باربری فشاری ستون‌های تحقیق

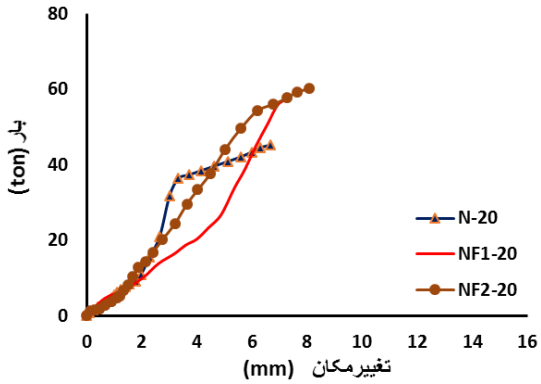
۴-۲- منحنی بار-تغییرمکان ستون‌ها

به‌منظور مقایسه رفتاری ستون‌ها، منحنی بار- تغییرمکان در ستون‌های دارای غلاف و بدون غلاف در شکل‌های ۸ و ۹ برای ستون‌های تحقیق نشان داده شده است. با مشاهده منحنی‌های بار-کرنش ملاحظه می‌شود که با دورپیچ نمودن ستون‌های بتن‌مسلح با مصالح CFRP، تغییرمکان محوری آنها افزایش یافته است. هم‌چنین میزان تحمل فشار در این ستون‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داشته است. بررسی دقیق‌تر منحنی‌های بار-تغییرمکان ستون‌های فاقد غلاف نشان می‌دهد که این منحنی از دو قسمت سخت‌شونده خطی و نرم‌شونده غیرخطی تشکیل شده است.

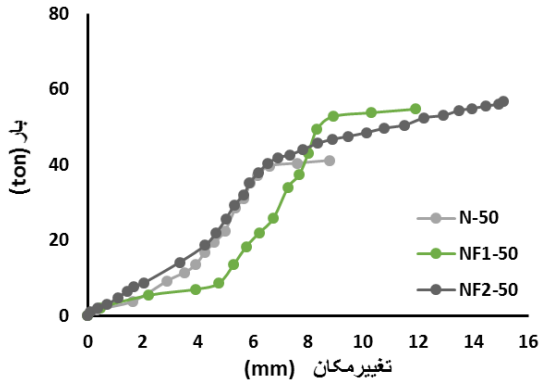
تغییر رفتار ستون ناگهانی بوده و نشان از ایجاد ترک‌های فشاری در بتن و شروع به‌کار دورپیچ CFRP و ادامه روند مقاومت تحت بارهای فشاری می‌باشد. هم‌چنین منحنی‌های بار-تغییرمکان ستون‌های دارای غلاف از دو قسمت خطی و غیرخطی نرم‌شونده تشکیل شده است، ولی تغییر رفتار ستون تدریجی بوده که علت آن را می‌توان در پیوستگی کامل و محصوریت بیشتر غلاف GRP با ستون بتنی دانست. مشاهده گردید که دورپیچ نمودن ستون‌ها با CFRP باعث افزایش سختی ستون وکاهش تغییرمکان محوری می‌شود که می‌توان علت آن را ایجاد محصوریت ناشی از دورپیچCFRP بیان نمود.



الف- منحنی بار- تغییر مکان بدون خروج از مرکزیت

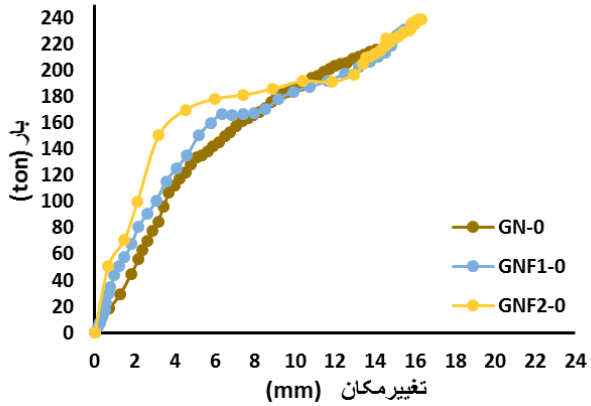


ب- منحنی بار- تغییر مکان با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر

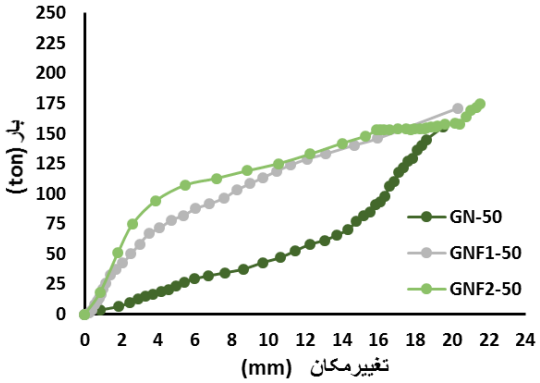


ج- منحنی بار – تغییرمکان با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر

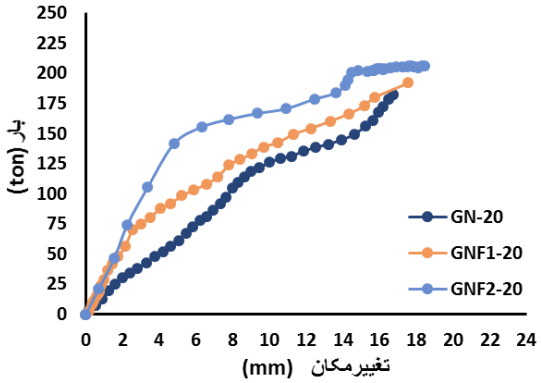
شکل۸- منحنی بار-تغییرمکان محوری ستون‌های فاقد غلاف GRP



الف- منحنی بار – تغییرمکان بدون خروج از مرکزیت



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



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

شکل۹- منحنی بار- تغییرمکان محوری ستون‌های دارای غلاف GRP

۴- ۳- بررسی نحوه گسیختگی ستون‌ها

نحوه گسیختگی ستون‌ها در اشکال ۱۰و۱۱ نشان داده شده است. در ستون‌های فاقد غلافGRP اکثرا گسیختگی به علت کمانش میلگردهای ستون، به صورت موضعی و به تدریج 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 ستون‌های فاقد هرگونه محصوریت، ایجاد ترک‌های فشاری در بتن‌های بالا و پایین ستون و در نهایت جدا شدن قطعاتی از بتن در این قسمت‌ها و کمانش میلگردهای طولی، سبب گسیخته شدن در ستون‌های NF1 با یک‌لایه دورپیچCFRP شد، که گسیختگی در بالای ستون و به‌علت خرد شدن بتن و در نهایت پارگی CFRP اتفاق افتاد. در این ستون‌ها برخلاف ستون‌های قبلی، محصوریت ناشی از دورپیچ CFRP باعث خردشدگی کمتر بتن و گسیخته‌نشدن شبکه میلگردها و افزایش ظرفیت باربری ستون گردید. گسیختگی و تخریب در ستون NF2مشابه ستون محصور شده با یک‌لایهCFRP بود، با این تفاوت که گسیختگی و پارگی CFRP در انتهای پایین ستون‌ها اتفاق افتاد. به طور کلی در ستون‌های فاقد غلاف، گسیختگی به‌صورت تدریجی و نرم اتفاق افتاد. در این ستون‌ها با افزایش فشار و شروع ترک‌های فشاری به‌تدریج انبساط جانبی در بتن ستون اتفاق افتاد.

در ستون‌های دارای CFRP، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زود هنگام گردید و با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورقCFRP دچار پارگی‌شده و درنهایت ستون گسیخته شد.

در ستون‌های دارای غلاف نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های فاقد غلاف بود. در ستون GN گسیختگی به طور کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در نیمه بالایی ستون اتفاق افتاد، در ستون‌های GNF1 گسیختگی مشابه ستون GN بود با این تفاوت که محصوریت بیشتر ناشی از اعمال لایه CFRP باعث گردید تا نمونه ستون کرنش بیشتری تحمل کند، و در نهایت در یک‌سوم میانی با کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ گسیخته شود. در ستون‌های GNF2 نیز گسیختگی مشابه ستون‌های قبلی بود، با این تفاوت که محصوریت بیش‌تر ناشی از اعمال دولایهCFRP باعث گردید تا گسیختگی به صورت کلی در سرتاسر طول ستون با وقوع کمانش میلگردهای طولی و قطع میلگردهای مارپیچ اتفاق افتد. به‌طور کلی علت گسیختگی کامل و آنی ستون‌های دارای غلاف GRP را می‌توان 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 هم‌چنین کمانش میلگردهای طولی و در نهایت گسیختگی ستون شد.

گسیختگی و تخریب در ستون‌های NF2 مشابه ستون محصورشده با یک‌لایه CFRP بود، با این تفاوت که گسیختگی و پارگی CFRP در انتهای پایین ستون‌ها اتفاق افتاد. به طور کلی در ستون‌های فاقد غلاف GRP، گسیختگی به صورت تدریجی و نرم اتفاق افتاد. در این ستون‌ها با افزایش فشار و شروع ترک‌های فشاری به تدریج انبساط جانبی در بتن ستون اتفاق افتاد. در ستون‌های دارای دوریپیچ، نیروی ناشی از محصوریت باعث جلوگیری از گسیختگی زودهنگام گردید و درنهایت با افزایش نیروی فشاری و رشد ترک‌ها، ورق CFRP دچار پارگی و گسیختگی ستون شد. در ستون‌های دارای غلاف GRP نحوه گسیختگی متفاوت با ستون‌های فاقد غلاف بود.

شکل۱۰- نمایش گسیختگی نهایی ستون‌های فاقد غلاف GRP پس از بارگذاری

شکل۱۱- نمایش گسیختگی نهایی ستون‌های دارای غلاف GRP پس از بارگذاری

۴-۴- بررسی شکل‌پذیری ستون‌ها

شکل‌پذیری در سازه به عنوان خاصیت ذاتی اعضای سازه، نقشی تعیین‌کننده در رفتار مصالح دارد؛ این خاصیت در اعضا باعث می‌شود تا تغییر شکل‌های بزرگ قبل از شکست کامل در مصالح قابل نمایش باشد. عوامل زیادی در شکل‌پذیری سازه‌های بتنی نقش دارد که از آن جمله می‌توان به مقاومت فشاری بتن، مساحت فولاد کششی و مساحت فولاد فشاری اشاره کرد[۲۰].

برای مقایسه شکل‌پذیری ستون‌های بررسی‌شده در این تحقیق، از سطح زیر منحنی‌های بار-تغییرمکان محوری که بیانگر مقدار جذب انرژی توسط سیستم یا به عبارتی مقدار کار انجام شده توسط نیروی خارجی روی سیستم می‌باشد[۲۱]، استفاده شده است. بر این اساس، سطح زیر منحنی بار- تغییرمکان محوری (Eu)، تا نقطه گسیختگی برای ستون‌های آزمایش‌شده با استفاده از منحنی‌های ارائه شده در اشکال ۸ و۹ محاسبه شده و نتایج آن به‌منظور مقایسه بین نمونه‌های مختلف، در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول۶- شکل‌پذیری ستون‌های تحقیق نسبت به ستون N

نام ستون	شکل‌پذیری (Eu) (N.m=J)	شکل‌پذیری ستون نسبت به ستون N	نام ستون	شکل‌پذیری (Eu) (N.m=J)	شکل‌پذیری ستون نسبت به ستون N
N-0	۷۸۱	۱	GN-0	۱۹۵۸۱	۲۵/۰۷
N-20	۱۷۷۵	۲/۲۷	GN-20	۱۶۲۲۶	۲۰/۷۷
N-50	۱۸۲۴	۲/۳۳	GN-50	۱۸۳۵۳	۲۳/۵۰
NF1-0	۱۱۶۲	۱/۴۸	GNF1-0	۲۱۶۸۰	۲۷/۷۶
NF1-20	۲۲۳۳	۲/۸۶	GNF1-20	۲۰۵۲۴	۲۶/۲۸
NF1-50	۳۰۹۱	۳/۹۶	GNF1-50	۱۷۹۹۴	۲۳/۰۴
NF2-0	۱۵۸۷	۲/۰۳	GNF2-0	۲۴۰۵۴	۳۰/۸۰
NF2-20	۲۶۲۱	۳/۳۵	GNF2-20	۲۱۵۹۴	۲۷/۶۵
NF2-50	۵۰۷۲	۶/۵۰	GNF2-50	۱۹۷۵۹	۲۵/۳۰

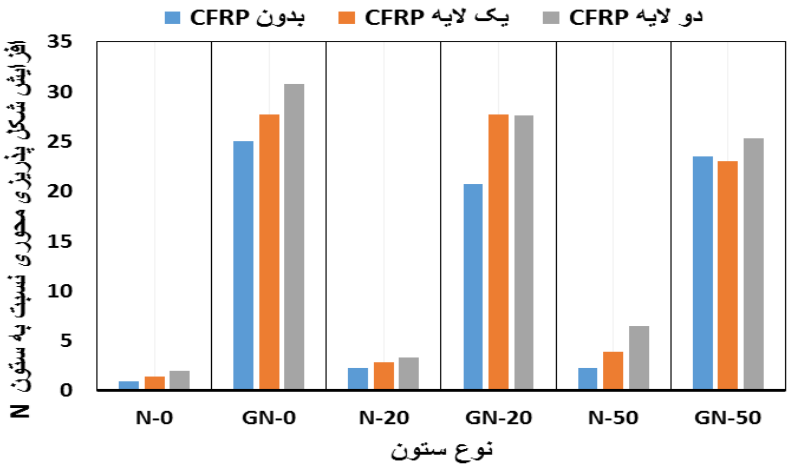
طبق جدول ۶ مشهود است که در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت صفر و فاقد غلاف GRP استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP برای محصور کردن ستون‌های بتنی به‌ترتیب باعث افزایش در شکل‌پذیری به میزان ۱/۴۸ و ۲/۰۳ برابر شد. بنابراین می‌توان بیان نمود که استفاده از غلافGRP تنها جهت محصور کردن ستون بتنی، سبب افزایش ۲۵ برابر در شکل‌پذیری می‌گردد.

در یک مقایسه دیگر در خصوص تاثیر خروج از مرکزیت بر روی شکل‌پذیری ستون‌های ساخته شده بدون غلاف GRP و دورپیچ CFRP، با خروج از مرکزیت ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر در ستون‌ها به ترتیب سبب افزایش ۲/۲۷ و ۲/۳۳ شد، هم‌چنین استفاده از غلاف GRP باعث افزایش ۲۰/۷۷ و ۲۳/۵۰ برابر در ستون‌های با خروج از مرکزیت ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر گردیده است.

در ستون‌های فاقد غلاف GRP با خروج از مرکزیت ۲۰ میلی‌متر استفاده از یک لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به‌ترتیب باعث افزایش شکل-پذیری محوری به‌میزان ۲/۸۶ و ۳/۳۵ برابر نسبت به ستون‌های فاقد دورپیچ و بدون خروج از مرکزیت شده است. در حالت مشابه (فاقد غلاف GRP) در ستون‌های بتنی با خروج از مرکزیت ۵۰ میلی‌متر استفاده از یک‌لایه و دو لایه دورپیچ CFRP به‌ترتیب باعث افزایش شکل-پذیری محوری به‌میزان ۳/۹۶ و ۶/۵۰ برابری گردید.

هم‌چنین مشاهده شد که در حالت خروج از مرکزیت‌های صفر، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر اثر غلاف GRP بر افزایش شکل‌پذیری محوری در ستون-های بتنی با یک لایه دورپیچ CFRP به ترتیب ۲۷/۷۶، ۲۶/۲۸ و ۲۳/۰۴ برابر افزایش نسبت به ستون‌های فاقد غلاف و دورپیچ CFRP با خروج از مرکزیت صفر شده است.

در مقایسه‌ای دیگر درباره تاثیر دولایه دورپیچ CFRP بر روی شکل‌پذیری ستون‌های ساخته شده با غلاف GRP، در حالت خروج از مرکزیت‌های صفر، ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر مشاهده گردید که شکل‌پذیری محوری در ستون‌های بتنی به ترتیب ۳۰/۸، ۲۷/۶۵ و ۲۵/۳۰ برابری نسبت به ستون‌های فاقد غلاف GRP و دورپیچ CFRP با خروج از مرکزیت صفر شده است. در شکل ۱۲ نتایج شکل‌پذیری محوری ستون-های تحقیق نشان داده شده است.



شکل۱۲- نتایج شکل‌پذیری محوری ستون‌های تحقیق نسبت به ستون N

۵- نتایج

نتیجه کلی این پژوهش معرفی یک نوع جدید از ستون‌های بتن‌مسلح مرکب دارای غلافGRP و الیاف پلیمریCFRP می‌باشد. نتایج نشان داد که این غلاف می‌تواند در اجرای ساختمان‌های جدید استفاده شود، هم‌چنین الیاف پلیمری CFRP می‌توانند به منظور تقویت ستون‌های بتنی موجود که به دلیل استفاده از ویرایش‌های گذشته آیین‌نامه‌های طراحی و یا به دلایل اجرایی‌دچار ضعف هستند، برای افزایش ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری استفاده شوند.

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۱- استفاده از GRP به عنوان قالب و غلاف تقویتی ستون‌های بتن‌مسلح باعث افزایش ظرفیت فشاری به طور قابل ملاحظه-ای گردید، به-گونه‌ای که مقاومت فشاری در ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف، حداقل دو برابر بیشتر بوده است.

۲- تقویت ستون‌های بتن‌مسلح با دورپیچ CFRP سبب افزایش ظرفیت فشاری ستون‌های بتن‌مسلح می‌شود. به‌طور میانگین استفاده از یک‌لایه و دولایه دورپیچ در ستون‌های فاقد غلاف GRP به میزان ٪۶۱ و ٪۳۷ و در ستون‌های دارای غلاف GRP به میزان ٪۸/۵ و ٪۶۶/۵ ظرفیت فشاری ستون افزایش می‌یابد. این نتایج نشان داد که تاثیر تقویت دورپیچ در ستون‌های دارای غلاف کمتر بود.

۳- افزایش تعداد لایه‌های دورپیچ CFRP موجب افزایش تحمل نیروی فشاری گردید، به‌طوری‌که میانگین افزایش ظرفیت ناشی از کاربرد یک‌لایه و دولایه CFRP نسبت به ستون‌های مشابه فاقد دورپیچ در ستون‌های با بتن معمولی به ترتیب ٪۶۹/۵ و ٪۹۶/۵ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که تاثیر دورپیچ بر ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیشتر است.

۴- کرنش نهایی طولی ستون‌های بتن‌مسلح با دورپیچ CFRP در مقایسه با ستون‌های فاقد دورپیچ بیشتر است. به طوری‌که استفاده از یک-لایه و دولایه الیاف باعث افزایش تغییر مکان نهایی در ستون‌ها به ترتیب به میزان ٪۶۵/۵ و ٪ ۱۱/۵ گردید. این نتیجه بیانگر این است که تاثیر دورپیچ بر ستون‌های ساخته شده از بتن معمولی بیشتر می باشد.

۵- استفاده از غلاف GRP باعث افزایش تغییرشکل نهایی ستون‌های بتن‌مسلح به مقدار زیادی شده به‌گونه‌ای که میانگین افزایش تغیر-شکل طولی در ستون‌های دارای غلاف نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف ٪۳۹۹ بوده است. این نتیجه بیان می‌کند که تاثیر استفاده از غلاف GRP بر تغییرشکل‌نهایی ستون‌های ساخته شده بیشتر است.

۶- بررسی نحوه شکست ستون‌ها نشان داد که اکثر ستون‌ها در اثر کمانش میلگردهای طولی دچار گسیختگی شدند. در ستون‌های فاقد غلاف GRP گسیختگی به صورت موضعی و به تدریج اتفاق افتاد. این در حالی است که در ستون‌های دارای غلاف گسیختگی به طور کامل و به صورت انهدام و با صدای انفجار در کل طول ستون واقع شد، که علت آن را می‌توان در میزان بسیار زیاد محصوریت ایجاد شده ناشی از غلاف دانست.

۷- با افزایش برون‌محوری، ظرفیت فشاری کاهش یافت، به گونه‌ای که میانگین کاهش ظرفیت فشاری تحت بار با خروج از مرکزیت‌های ۲۰ و ۵۰ میلی‌متر در ستون‌های تحقیق نسبت به خروج از مرکزیت صفر به‌ترتیب ٪۱۸ و ٪۳۵ بوده است.

۸- استفاده از غلاف GRP باعث افزایش شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح به مقدار زیادی شده به گونه‌ای که میانگین افزایش شکل‌پذیری در ستون‌های دارای غلاف GRP نسبت به ستون‌های مشابه بدون غلاف ۱۱/۷ برابر بوده است. هم‌چنین کاربرد یک‌لایه و دولایه دورپیچ به-طور میانگین و به‌ترتیب باعث افزایش شکل‌پذیری به میزان ٪۳۰ و ٪۶۵ گردید که این نتیجه نشانگر تاثیر زیاد غلاف بر شکل‌پذیری ستون‌های بتن‌مسلح می‌باشد.

مراجع

[۱] اصفهانی،م.، صالحیان،ح.، "بررسی رفتار ستون‌های بتن‌آرمهٔ تقویت شده با دورپیچ CFRP تحت اثر نیروی برون‌محور" نشریه دانشکده فنی، شماره ۵، صص ۵۶۹-۵۵۹ ، ۱۳۸۴.

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

[3] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., El Echary, H., Mastrapa. J.C, and Pico, O., (1998), Effect of column parameters on FRP-confined concrete, Journal of Composites Science, 2(4): 175–185.

[4] Tan, K.H., Bhowmik, T. and Balendra, T., (2013), Confinement model for FRP-bonded capsule-shaped concrete columns. Engineering Structures, (51): 51–59.

[5] Kumutha, R., Vaidyanathan, R. and Palanichamy, M.S., (2007), Behavior of reinforced concrete rectangular columns strengthened using GFRP. Cement & Concrete Composites, (29): 609–615.

[6] Matsuda, S., M. Hojo, and S. Ochiai, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. 56 (526), 1327-1342, 1990. Trans. Japan Society of Mechanical Engineers, 1990. (56):1327-1342.

[7] Samaan M., Mirmiran, A. and Shahawy, M. (1998)."Model of concrete confined by fiber composite" Journal of Structural Engineering, (9):1025-1031.

[8] Pan, J. L., Xu, T., and Hu, Z. J. (2007). “Experimental investigation of load carrying capacity of the slender reinforced concrete column wrapped with FRP.” Construction and Building Materials, (11):1991–1996.

[9] M.N.S. Hadi, (2006) “Comparative study of eccentrically loaded FRP wrapped columns”, Composite Structures, (74):127-135,
[10] M.N.S. Hadi, (2007), “The behavior of FRP wrapped HSC columns under different eccentric loads”, Composite Structures, (78): 560-566.
[11] J.C. McCormac, R.H. Brown, Design of reinforced concrete 10The Edition, John Wiley & Sons, 2015
[12] M.N.S. Hadi, (2007) “Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading, Composite Structures, (77): 92-96
[13] M. Shahawy, A. Mirmiran, T. Beitelman, (2000) "Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns", Composites Part B: Engineering, (31): 471-480.
[14] T. Ozbakkaloglu, M. Saatcioglu, Seismic performance of high-strength concrete columns cast in stay-in-place FRP formwork, in: Proceedings of 13th world conference on earthquake engineering, 2004.
[15] M.N.S. Hadi, (2009) “Behavior of eccentric loading of FRP confined fiber steel reinforced concrete columns“, Construction and Building Materials, (23): 1102-1108
[16] 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, (15): 337-345.
[17] Y.Kusumawardaningsih, M.N.S. Hadi, (2010) “Comparative behavior of hollow columns confined with FRP composites“, Composite Structures, (93): 198-205.
[18] K. Tan, T. Bhowmik, T. Balendra, (2013) “Confinement model for FRP-bonded capsule-shaped concrete columns“, Engineering Structures, (51): 51-59.
[19] W. Hassan, O. Hodhod, M. Hilal, H. Bahnasaway, Behavior of eccentrically loaded high strength concrete columns jacketed with FRP laminates, Construction and Building Materials, (138): 508-527.
[20] Shafieinia, M., Sajedi, f., (2019)"Evaluation and comparison of GRP and FRP applications on the behavior of RCCs made of NC and HSC", smart structures and systems, (5): 495-506,
[21] ASTM D7565/D7565M-10, Standard test method for determining tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composites used for strengthening of civil structures, United States: ASTM International, 2010.
[22] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber- Reinforced Thermosetting- Resin) Pipe, ASTM Committee D29, 2001.
[23] ASTM D638-02, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM Committee D63, 2002.
[24] ASTM D2996-01, Standard Specification for Filament-Wound Fiberglass (Glass-Fiber-Reinforced Thermosetting-Resin) Pipe, ASTM Committee D29, 2001.
[25] 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
[26] ASTM C39/C39M-03, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM Committee C39, 2003.