

مطالعه‌ی آزمایشگاهی ستون لاغر بتن آرمه‌ی مسلح به میلگردهای مقاومت بالا و مقاومت معمولی تقویت شده با کامپوزیت CFRP

مسعود نوروزعلیایی^۱، داود مستوفی نژاد^۲

۱- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- دکتری سازه، عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط: m.nowrooz@cv.iut.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های متداولی که امروزه در مقاوم سازی سازه‌های بتن آرمه از آن استفاده می‌شود، استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌باشد. تقویت ستون‌ها به عنوان یکی از ارکان اصلی سازه‌ها که بار محوری را به صورت خالص یا به همراه لنگر خمشی منتقل می‌کنند، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. ستونی که تحت بار محوری و لنگر خمشی قرار گرفته باشد، از خود تغییر مکان جانبی بروز می‌دهد؛ این تغییر مکان جانبی در هر قسمت از طول ستون، یک خروج از مرکزیت برای بار محوری وارد شده در انتهای ستون محسوب می‌شود که حاصل ضرب بار محوری در تغییر مکان جانبی مذکور سبب ایجاد لنگر ثانویه‌ای می‌شود. اثر این لنگر با لنگر اولیه‌ای که بر ستون اثر می‌کرده است جمع شده و اثرات بحرانی‌تری را در ستون به وجود می‌آورد. با وجود آن که در عمل ستون‌های بتنی اغلب تحت بار دارای خروج از مرکزیت بوده و ممکن است در معرض ناپایداری ناشی از اثرات لاغری باشند، بر روی رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی لاغر محصور شده با FRP، مطالعات آزمایشگاهی کم‌تری نسبت به ستون‌های کوتاه تقویت شده با آن انجام شده است. هر چند مطالعات موجود مبین افزایش مقاومت ستون با تقویت آن به وسیله‌ی FRP می‌باشند، اما اثر تقویتی FRP بر روی ستون تحت بارگذاری محوری - خمشی (P-M)، با افزایش لاغری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر از ظرفیت FRP به طور کامل استفاده نشده و ستون در معرض ناپایداری و کمانش قرار می‌گیرد؛ در نتیجه اثرات لاغری می‌تواند مانع از دستیابی ستون به حداکثر ظرفیت خود شوند. هدف از تحقیق حاضر، بررسی رفتار ستون‌های لاغر تقویت شده با کامپوزیت FRP با تکنیک شیارزنی بوده تا اثرات ناشی از لاغری که در سایر روش‌های تقویت مشاهده می‌شود، کاهش یابد. به منظور دست‌یابی به اهداف مورد نظر در تحقیق حاضر، تعداد ۶ عدد نمونه‌ی بتن آرمه‌ی دایروی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر (با نسبت لاغری ۲۷/۷) تحت بار با خروج از مرکزیت ثابت ۶۰ میلی‌متر مورد آزمایش قرار گرفتند. نیمی از نمونه‌ها مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و نیمی دیگر مسلح به میلگرد مقاومت بالا می‌باشند. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی، افزایش باربری بیش‌تری نسبت به نمونه‌های تقویت شده به روش EBR به دست می‌دهند. این میزان افزایش ظرفیت باربری در نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی و EBR نسبت به نمونه‌ی شاهد برای گروه مسلح به میلگرد مقاومت معمولی به ترتیب برابر با ۶۳/۱ و ۳۲/۳ درصد و برای گروه مسلح به میلگرد مقاومت بالا به ترتیب برابر با ۶۰/۸ و ۲۵/۱ درصد می‌باشد. همچنین لاغری بر ظرفیت باربری ستون‌های تقویت شده به روش شیارزنی، در هر دو نوع نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و بالا، به میزان بسیار کم‌تری نسبت به روش تقویت EBR و نمونه‌های بدون تقویت اثر می‌گذارد.

کلمات کلیدی: مطالعه آزمایشگاهی، ستون لاغر بتن آرمه، کامپوزیت FRP، تقویت، اثرات ثانویه

(Code B)

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، در کنار ساخت سازه‌های جدید، تقویت و بهسازی سازه‌های موجود و قدیمی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از دلایل نیاز سازه‌ها به تقویت می‌توان به گذشت زمان و فرسوده شدن سازه، خطاهای محاسباتی، ضعف در اجرا، تغییر

کاربری و افزایش بارهای وارده بر ساختمان، تغییر آیین نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی، ضعف آیین نامه‌های قدیمی و تاثیر عوامل مخرب محیطی اشاره نمود [۱-۳].

یکی از روش‌های جدید تقویت که در سال‌های اخیر متداول گشته است، استفاده از کامپوزیت‌های FRP^۱، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن‌ها می‌باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به مقاومت کششی بالا در کنار وزن کم این مواد اشاره کرد. علاوه بر این، مواردی نظیر مقاومت بالا در برابر عوامل محیطی هم‌چون خوردگی، سهولت اجرا و قیمت مناسب در مقایسه با سایر روش‌های تقویت، از مزایای دیگر استفاده از FRP در تقویت سازه‌های بتن آرمه می‌باشند [۴].

ستون مهم‌ترین رکن پایداری سازه است. تقویت ستون‌ها به عنوان یکی از ارکان اصلی سازه‌ها که بار محوری را به صورت خالص یا به همراه لنگر خمشی منتقل می‌کنند، از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. ستونی که تحت بار محوری و لنگر خمشی قرار گرفته باشد، از خود تغییر مکان جانبی بروز می‌دهد؛ این تغییر مکان جانبی خود تحت تاثیر مقدار لنگر خمشی وارده، ابعاد مقطع ستون، مدول الاستیسیته‌ی ستون (سختی ستون)، شرایط انتهایی ستون و شرایط کلی قابی که ستون در آن قرار گرفته است، می‌باشد. این تغییر مکان جانبی در هر قسمت از طول ستون، یک خروج از مرکزیت برای بار محوری وارد شده در انتهای ستون محسوب می‌شود که حاصل ضرب بار محوری در تغییر مکان جانبی مذکور سبب ایجاد لنگر ثانویه‌ای می‌شود. اثر این لنگر با لنگر اولیه‌ای که بر ستون اثر می‌کرده است جمع شده و اثرات بحرانی تری را در ستون به وجود می‌آورد. مجموع لنگر خمشی اولیه و لنگر خمشی ثانویه به همراه بار محوری وارده بر ستون، سبب شکست نهایی ستون می‌شود [۵]. ستون‌ها به دو دسته‌ی ستون کوتاه (چاق) و ستون بلند (لاغر) تقسیم می‌شوند. به طور کلی هنگامی که اثرات لنگر ثانویه بیش از ۵ درصد از مقاومت ستون نمی‌کاهد، آن ستون، ستون کوتاه و در غیر این صورت ستون لاغر نامیده می‌شود [۶]. ستون‌های لاغر به صورت گسترده در سازه‌های بزرگ مانند مجتمع‌های تجاری، پارکینگ‌های طبقاتی، رستوران‌ها، سالن‌های همایش، پل‌های طبقاتی و مونو ریل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. رفتار ستون‌های بلند به مراتب خاص‌تر و پیچیده‌تر از ستون‌های کوتاه بوده و در اثر بارهای وارده، زودتر دچار کمانش و گسیختگی می‌شوند. از راه حل‌های جلوگیری از شکست‌های مذکور، می‌توان به تقویت ستون با استفاده از کامپوزیت FRP با الیاف به کار رفته در جهت طولی اشاره کرد. این کامپوزیت با تحمل قسمتی از تنش فشاری وارد بر ستون، موجب افزایش ظرفیت ستون می‌گردد. با توجه به این که بسیاری از ستون‌های موجود تحت تاثیر ترکیب بار محوری و لنگر خمشی قرار دارند، استفاده از کامپوزیت FRP با الیاف طولی روشی مناسب برای تقویت ستون به نظر می‌رسد.

هر چند مطالعات موجود مبین افزایش مقاومت ستون با تقویت آن به وسیله‌ی FRP می‌باشند، اما اثر تقویتی FRP بر روی ستون تحت بارگذاری محوری - خمشی (P-M)، با افزایش لاغری کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر از ظرفیت FRP به طور کامل استفاده نشده و ستون در معرض ناپایداری و کمانش قرار می‌گیرد؛ در نتیجه اثرات لاغری می‌توانند مانع از دستیابی ستون به حداکثر ظرفیت خود شوند [۷ و ۸].

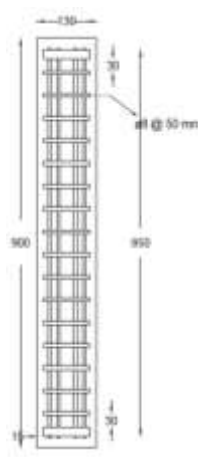
یکی از دلایل عدم استفاده‌ی کامل از ظرفیت FRP، عدم اتصال مناسب ورق با سطح بتن می‌باشد. جهت رفع این مشکل، در سال ۲۰۱۰ مستوفی‌نژاد و محمودآبادی روش شیار زنی را به عنوان روشی جدید در اتصال ورق FRP به سطح بتن در دانشگاه صنعتی اصفهان ابداع کردند [۹]. در این روش ایجاد شیارهای با عمق و طول مورد نظر، سبب انتقال مناسب تنش‌ها بین بتن و ورق شده و این امر سبب افزایش استفاده از ظرفیت ورق FRP و هم‌چنین به تأخیر افتادن یا از بین رفتن پدیده‌ی جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن می‌شود.

در تحقیق حاضر رفتار ستون‌های لاغر بتن آرمه (با نسبت لاغری ۲۷/۷ مطابق با آیین نامه‌ی ACI-318) که با استفاده از روش شیار زنی توسط کامپوزیت‌های FRP تقویت شده اند، تحت بارگذاری بار محوری - لنگر خمشی بررسی می‌گردد.

¹ Fiber Reinforced Polymers

۲. مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی

در این تحقیق تعداد ۶ عدد نمونه‌ی بتن آرمه‌ی دایروی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر تحت بار با خروج از مرکزیت ثابت ۶۰ میلی‌متر آزمایش شدند. نیمی از نمونه‌ها مسلح به میلگرد مقاومت معمولی (گروه اول) و نیمی از نمونه‌ها مسلح به میلگرد مقاومت بالا (گروه دوم) می‌باشند. در تمامی نمونه‌ها به جهت تأمین وصله‌ی مکانیکی مورد نیاز، از صفحه‌های فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است؛ قطر خارجی و داخلی این صفحات به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۴۰ میلی‌متر بوده و دارای ۶ سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر جهت عبور میلگردهای طولی می‌باشند. در شکل ۱، مشخصات هندسی و جزییات میلگردگذاری نشان داده شده است. در هر گروه یک نمونه به عنوان شاهد، و دو نمونه‌ی دیگر تقویت شده به روش‌های ^۲EBR و شیارزنی (EBROG) ^۳ می‌باشند. نام گذاری و مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. نام گذاری نمونه‌ها دارای سه قسمت می‌باشد؛ قسمت اول نشانگر نوع میلگردهای به کار رفته می‌باشد؛ میلگردهای مقاومت معمولی به صورت CN و میلگردهای مقاومت بالا به صورت CH نشان داده شده‌اند. قسمت دوم بیانگر طول نمونه‌ی مورد نظر می‌باشد. قسمت سوم بیانگر نوع تقویت به کار رفته می‌باشد. نمونه‌ها در محیط خود با تعداد ۸ ورق FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر و طول ۹۰۰ میلی‌متر در جهت طولی تقویت شده‌اند. شایان ذکر است در نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی از ۸ عدد شیار با طول ۸۶۰ میلی‌متر و عمق و عرض ۱۰ میلی‌متر استفاده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۱- جزییات میلگردگذاری: (الف) نمونه‌ای از قفسه‌های میلگرد مقاومت معمولی و مقاومت بالا؛ (ب) تصویر شماتیک

جدول ۱- نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش

شماره گروه	کد نمونه	نوع تقویت	تعداد لایه طولی
گروه اول	CN-90-R	شاهد	۰
	CN-90-EBR	EBR	۱
	CN-90-EBROG	شیارزنی	۱
گروه دوم	CH-90-R	شاهد	۰
	CH-90-EBR	EBR	۱
	CH-90-EBROG	شیارزنی	۱

^۲ Externally Bonded Reinforcement

^۳ Externally Bonded Reinforcement On Grooves

۳. مشخصات مصالح مصرفی

مقاومت فشاری استاندارد ۲۸ روزهی نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش، برابر با ۳۵ مگا پاسکال می‌باشد. الیاف مورد استفاده در این تحقیق از نوع الیاف یک جهته و از نوع کربن (CFRP) می‌باشند. مشخصات الیاف CFRP مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده‌اند. همچنین جهت نصب الیاف FRP بر روی سطح نمونه‌ها، از رزین اپوکسی دو جزئی با نام تجاری Sikadur-330 تولیدی شرکت سیکای سوییس استفاده شده است. مشخصات رزین و چسب مورد استفاده در آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. همچنین میلگردهای مصرفی مورد استفاده از نوع مقاومت معمولی A-III با تنش تسلیم ۴۱۷ مگا پاسکال و مقاومت بالا A-IV با تنش تسلیم ۵۹۶ مگاپاسکال تولید شرکت فولاد کویر اصفهان می‌باشند.

جدول ۲- مشخصات الیاف CFRP مورد استفاده در آزمایش

نوع ورق	ضخامت (mm)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	کرنش نهایی %
الیاف Sikawrap-300c	۰/۱۶۶	۳۹۰۰	۲۳۰	۱/۵

جدول ۳- مشخصات رزین و چسب مصرفی

نوع چسب	مدول الاستیسیته کششی (MPa)	مدول الاستیسیته خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش نهایی %
Sikadur 330	۴۵۰۰	۳۸۰۰	۳۰	۰/۹

۴. برنامه آزمایش و تجهیزات مورد استفاده

تقویت نمونه‌های EBR و EBROG در یک لایه و به صورت طولی انجام گرفت. در روش EBR ابتدا لایه‌ی ضعیفی از شیرهی بتن برداشته می‌شود. سپس با استفاده از فشار هوا و پارچه‌ی خیس، گرد و غبار ناشی از ساییده شدن بتن از روی سطح پاک می‌شود. سپس با پر کردن حفرات کوچک با رزین، بر روی سطح مورد نظر لایه‌ای نازک از رزین مالیده می‌شود؛ پس از آن ورق FRP مورد نظر بر روی رزین قرار گرفته و به آرامی و با کاردک مخصوص بر روی آن کشیده می‌شود تا رزین از بین الیاف نفوذ کرده و خارج شود. در پایان بر روی FRP لایه‌ای نازک از چسب قرار داده می‌شود. در تقویت نمونه‌ها به روش EBROG، ابتدا با دستگاه شیار زن، شیار با ابعاد مورد نظر بر روی نمونه بتنی ایجاد شده، سپس درون شیارها با استفاده از چسب پر شده و در آخر مشابه با روش EBR، الیاف FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر بر روی آن قرار داده شده و بر روی نمونه‌ها نصب گردیدند؛ به طوری که هر شیار، در وسط لایه FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر قرار گرفت. در هر دو نوع روش تقویت، به منظور جلوگیری از خرد شدگی ناشی از تمرکز تنش در دو انتهای نمونه‌ها، از نوارهای FRP با عرض ۵۰ میلی‌متر و به صورت حلقوی استفاده گردید. سپس نمونه‌ها پس از ۷ روز عمل‌آوری و رسیدن چسب به مقاومت نهایی، با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن، تحت بارگذاری فشاری با خروج از مرکزیت ثابت قرار گرفتند.

۵. مشاهدات آزمایشگاهی

نمونه‌های مورد نظر با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی تا لحظه نهایی شکست تحت بارگذاری قرار گرفتند. جک هیدرولیکی در قسمت پایینی دستگاه قرار داشته و با تزریق روغن به داخل آن، بار را از پایین به بالا اعمال می‌کند. سرعت بارگذاری دستگاه در حین آزمایش، ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید. در شکل ۲، مود گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش نشان داده شده است. جهت اندازه‌گیری تغییر مکان محوری وجوه فشاری و کششی نمونه‌های تحت بار خارج از محور، از

جا به جایی سنج‌هایی با حداکثر تغییر مکان قابل اندازه‌گیری ۶۰ میلی‌متر و با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر، در یک سوم میانی ارتفاع ستون استفاده شده است.



(ج)



(ب)



(الف)



(و)



(ه)



(د)

شکل ۲- مود گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش؛ الف) CN-90-R؛ ب) CN-90-EBR؛ ج) CN-90-EBROG؛ د) CH-90-R؛
ه) CH-90-EBR؛ و) CH-90-EBROG

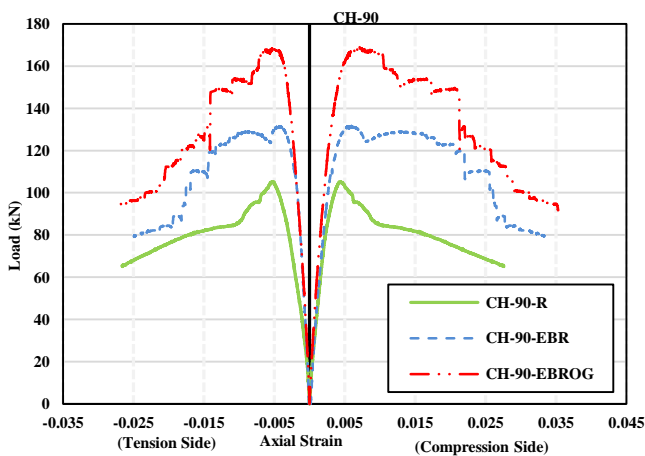
مقادیر حداکثر ظرفیت باربری و کرنش محوری به دست آمده از نمودار بار - کرنش هر یک از نمونه‌ها به همراه مقادیر تغییر مکان جانبی و لنگرهای اولیه و ثانویه در جدول ۴ آورده شده است. همچنین نمودارهای بار - کرنش محوری گروه‌های اول و دوم در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

میزان ظرفیت باربری نمونه‌های CN-90-R، CN-90-EBR و CN-90-EBROG به ترتیب برابر با ۹۰/۵۴، ۱۱۹/۷۷، و ۱۴۷/۷۱ کیلو نیوتن می‌باشد. درصد افزایش باربری نمونه‌های CN-90-EBR و CN-90-EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر ۳۲/۳ و ۶۳/۱ می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی تقویت شده به روش EBROG افزایش باربری بیش‌تری در مقایسه با نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR نشان می‌دهد.

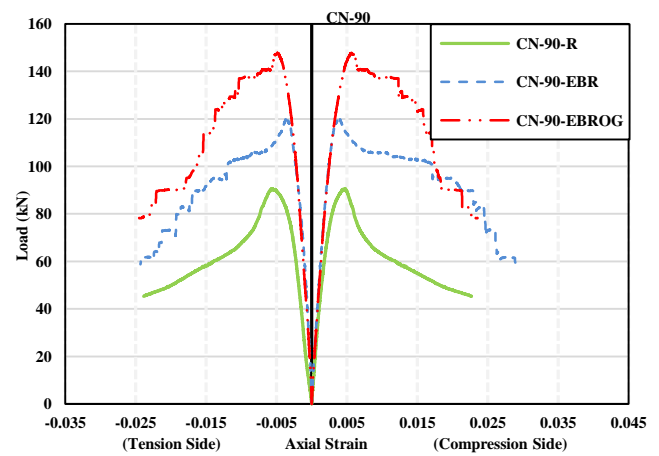
مطابق جدول ۴، کرنش نمونه‌های CN-90-R، CN-90-EBR و CN-90-EBROG در وجه فشاری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۰۲، ۰/۰۰۴۲۲ و ۰/۰۰۵۹۵، در وجه کششی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۳۸۴، ۰/۰۰۵۹۱ و ۰/۰۰۵۰۱ می‌باشند. مشاهده می‌شود نمونه‌های شاهد و EBROG دارای کرنش‌های نزدیک به یک دیگر بوده، اما از کرنش نمونه‌ی EBR بیش‌تر می‌باشند.

جدول ۴ - نتایج حاصل از آزمایش

کد نمونه	ظرفیت باربری حداکثر (kN)	درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد (%)	کرنش محوری در وجه فشاری متناظر با بار حداکثر	کرنش محوری در وجه کششی متناظر با بار حداکثر (mm)	تغییر مکان جانبی (mm)	لنگر اولیه در بار حداکثر (kN.mm)	لنگر ثانویه در بار حداکثر (kN.mm)
CN-90-R	۹۰/۵۴	-	۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۰۵۹۵	۹/۶	۵۴۳۲/۴	۸۶۹/۲
CN-90-EBR	۱۱۹/۷۷	۳۲/۳	۰/۰۰۴۲۲	۰/۰۰۳۸۴	۸	۷۱۸۶/۲	۹۵۸/۲
CN-90-EBROG	۱۴۷/۷۱	۶۳/۱	۰/۰۰۵۹۱	۰/۰۰۵۰۱	۱۱	۸۸۶۲/۴	۱۶۲۴/۸
CH-90-R	۱۰۵/۲	-	۰/۰۰۴۲۹	۰/۰۰۵۱۶	۹/۴	۶۳۱۲	۹۸۸/۸
CH-90-EBR	۱۳۱/۵۸	۲۵/۱	۰/۰۰۵۹۴	۰/۰۰۴۴۶	۱۰/۹	۷۸۹۴/۸	۱۴۳۴/۲
CH-90-EBROG	۱۶۹/۱۵	۶۰/۸	۰/۰۰۷۳۲	۰/۰۰۵۲۵	۱۱	۱۰۱۴۹	۱۸۶۰/۶



(ب)



(الف)

شکل ۳- نمودار بار-کرنش محوری، الف) نمونه‌های گروه اول (مقاومت معمولی)؛ ب) نمونه‌های گروه دوم (مقاومت بالا)

هم‌چنین میزان ظرفیت باربری نمونه‌های CH-90-R، CH-90-EBR و CH-90-EBROG به ترتیب برابر با ۱۰۵/۲، ۱۳۱/۵۸ و ۱۶۹/۱۵ کیلو نیوتن می‌باشد. درصد افزایش باربری نمونه‌های CH-90-EBR و CH-90-EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر ۲۵/۱ و ۶۰/۸ می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این گروه نیز نمونه‌ی تقویت شده به روش EBROG افزایش باربری بیش‌تری در مقایسه با نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR نشان می‌دهد.

مطابق جدول ۴، کرنش نمونه‌های CH-90-R، CH-90-EBR و CH-90-EBROG در وجه فشاری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴۲۹، ۰/۰۰۵۹۴ و ۰/۰۰۷۳۲، در وجه کششی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۱۶، ۰/۰۰۴۴۶ و ۰/۰۰۵۲۵ می‌باشند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کرنش‌های فشاری در نمونه‌های CH-90-EBR و CH-90-EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش

یافته‌اند؛ میزان این افزایش برای نمونه‌ی CH-90-EBROG بیش‌تر می‌باشد. کرنش‌های کششی نیز در نمونه‌های شاهد و CH-90-EBROG مشابه یک دیگر بوده، اما از نمونه‌ی CH-90-EBR بیش‌تر می‌باشند.

همان‌طور که ذکر شد، لنگر نهایی ستون از مجموع لنگر اولیه و لنگر نهایی مطابق رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید.

$$M_c = P(e + \delta) \quad (1)$$

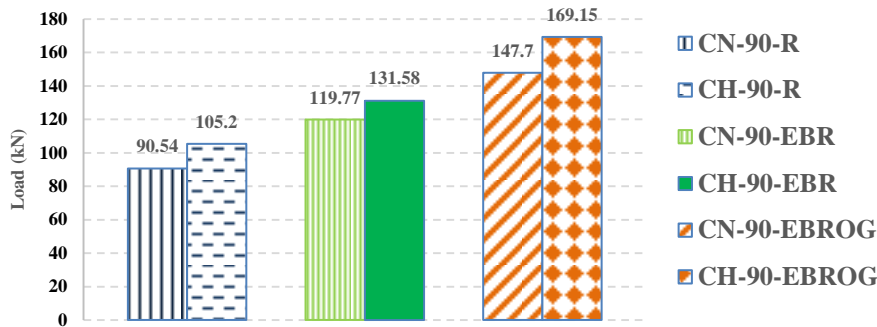
که در آن P بار محوری وارده در دو انتهای ستون، e خروج از مرکزیت اولیه و δ تغییر مکان جانبی ناشی از اثرات ثانویه در وسط ارتفاع ستون می‌باشند. بر طبق رابطه‌ی (۱)، رابطه‌ی لنگر نهایی به صورت غیر خطی می‌باشد. به همین دلیل، همان‌طور که مطابق جدول ۴ مشاهده می‌شود، در نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG، به دلیل افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های EBR، بر طبق رابطه‌ی فوق، تغییر مکان جانبی نیز بیش‌تر خواهد شد و بنا بر این مقایسه‌ی تغییر مکان جانبی در بار حداکثر دو روش EBR و EBROG، منجر به درک درستی نخواهد شد؛ جهت رسیدن به درکی مطلوب، برای هر دو روش تقویت EBR و EBROG، میزان تغییر مکان جانبی در بار یکسان (بار حداکثر نمونه‌های تقویت شده با روش EBR) در جدول ۵ برای گروه‌های اول و دوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک نسبت لاغری خاص و در بار یکسان، نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG، میزان تغییر مکان جانبی کم‌تری نسبت به نمونه‌های تقویت شده با روش EBR از خود نشان می‌دهند. این به این معنی می‌باشد که در ستون‌های لاغر، روش شیارزنی سختی خمشی را افزایش می‌دهد.

جدول ۵- مقادیر تغییر مکان جانبی نمونه‌های EBR و EBROG در بار یکسان برای نمونه‌های گروه اول و دوم

شماره گروه	نام نمونه	مقدار بار (kN)	تغییر مکان جانبی (mm)
گروه اول	CN-90- EBR		۸
(مسلح به میلگرد مقاومت معمولی)	CN-90- EBROG	۱۱۹/۷۷	۶/۹
گروه دوم	CH-90- EBR		۱۰/۹
(مسلح به میلگرد مقاومت بالا)	CH-90- EBROG	۱۳۱/۵۸	۵/۵

مطابق جدول ۴، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد، در نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی به نسبت نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت بالا بیش‌تر است. علت این امر آن است که فولاد مقاومت بالا سبب افزایش ظرفیت خمشی بیش‌تر نمونه نسبت به فولاد مقاومت معمولی می‌شود؛ این در حالی است که استفاده از کامپوزیت در تقویت نمونه‌ها در هر دو نوع نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و مقاومت بالا، سبب افزایش ظرفیت خمشی یکسانی می‌گردد. در نتیجه، به دلیل بیش‌تر بودن ظرفیت خمشی نمونه مسلح به میلگرد مقاومت بالا نسبت به نمونه‌ی مسلح به میلگرد مقاومت معمولی، میزان درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با کامپوزیت FRP نسبت به نمونه‌ی شاهد، در نمونه‌ی مسلح با میلگرد مقاومت بالا کم‌تر از نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی می‌باشد. هم‌چنین، نمودار میله‌ای مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و میلگرد مقاومت بالا در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در حالت استفاده از میلگرد مقاومت بالا، ظرفیت باربری افزایش یافته است.

میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های شاهد و تقویت شده با روش‌های EBR و EBROG، در نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت بالا نسبت به نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی به ترتیب برابر با ۱۶/۲، ۹/۵ و ۱۴/۵ درصد می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان درصد افزایش ظرفیت باربری برای نمونه‌های شاهد و تقویت شده با روش EBROG بیش‌تر از نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR می‌باشد.



شکل ۴ - نمودار میله‌ای مقایسه‌ی ظرفیت باربری نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و مقاومت بالا

۶. نتایج

در این تحقیق به منظور بررسی اثر تقویت FRP طولی بر رفتار ستون بتن آرمه‌ی لاغر دایروی، تعداد ۶ عدد نمونه‌ی دایروی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر (نسبت لاغری ۲۷/۷) مسلح به میلگردهای مقاومت معمولی و مقاومت بالا، تحت بار با خروج از مرکزیت ثابت ۶۰ میلی‌متر آزمایش شدند. نمونه‌ها با دو روش EBR و EBROG و با یک لایه طولی تقویت شدند. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده به شرح زیر می‌باشد:

۱) در نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی، افزایش باربری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب برابر با ۳۲/۳ و ۶۳/۱ درصد می‌باشد. میزان این افزایش در نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت بالا به ترتیب برابر با ۲۵/۱ و ۶۰/۸ درصد می‌باشد.

۲) در یک نسبت لاغری مشخص، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با تکنیک EBROG بیش‌تر از روش EBR در هر دو نوع مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و مقاومت بالا می‌باشد.

۳) میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد در نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی در مقایسه با نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت بالا بیش‌تر است.

۴) افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های شاهد، EBR و EBROG نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت بالا نسبت به نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی، به ترتیب برابر با ۱۶/۲، ۹/۵ و ۱۴/۵ درصد می‌باشد. میزان درصد افزایش باربری نمونه‌های شاهد و EBROG مسلح به میلگرد مقاومت بالا نسبت به میلگرد مقاومت معمولی، از نمونه‌ی EBR بیش‌تر می‌باشند.

۵) در بار یکسان، در هر دو نوع نمونه‌های مسلح به میلگرد مقاومت معمولی و مقاومت بالا، میزان تغییر مکان جانبی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG نسبت به روش EBR کم‌تر می‌باشد؛ در نتیجه در ستون‌های لاغر، میزان لنگر ثانویه و اثرات ناشی از آن نیز در روش شیار زنی کم‌تر می‌باشد. این بدین معنی است که روش EBROG، در ستون‌های لاغر، سختی خمشی را افزایش می‌دهد.

۷. مراجع

[1] ACI Committee 440, ACI 440.2R-08, (2008). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", Farmington Hills, MI, USA.

[۲] فلسفی، ط. " اثر دورپیچ FRP بر روی رفتار ستون‌های بتنی توخالی "، دانشگاه یزد، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، ۱۳۸۸.

- [3] Piekarczyk, J., Piekarczyk, W. and Blazewicz, S., (2011). "Compression Strength of Concrete Cylinders Reinforced with Carbon Fiber Laminate", *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (5), pp. 2365-2369.
- [4] Hollaway, L.C., (2010). "A Review of the Present and Future Utilisation of FRP Composites in the Civil Infrastructure with Reference to their Important in-Service Properties", *Construction and Building Materials*, Vol. 24 (12), pp. 2419-2445.
- [5] مستوفی نژاد، د. (۱۳۹۵). "سازه‌های بتن آرمه - جلد اول"، چاپ چهلم، انتشارات ارکان دانش (اصفهان).
- [6] *American Concrete Institute (ACI)*. (2014). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14)" Reported by ACI Committee 318.
- [7] Mirmiran, A., Shahawy, M., Beitleman, T., (2001). "Slenderness Limit for Hybrid FRP-Concrete Columns", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 5 (1), pp. 26-34.
- [8] Pan, J.L., Xu, T., Hu, Z.J. (2007), "Experimental Investigation of Load Carrying Capacity of the Slender Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP", *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (11), pp. 1991-1996.
- [9] Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E., (2010). "Grooving as Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams", *Journal of Composites for Construction*, Vol. 14 (6), pp. 804-811.