

مطالعه‌ی آزمایشگاهی ستون لاغر بتن آرمه با مقاطع دایروی و مربعی تقویت شده با کامپوزیت CFRP با روش شیارزنی تحت بار دارای خروج از مرکزیت

مسعود نوروزعلیایی* (دانشجوی دکتری)

مریم طاهراهبانی (کارشناس ارشد)

داود مستوفی‌نژاد (استاد)

دانشکده‌ی هندیسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

تقویت ستون‌ها به عنوان یکی از ارکان اصلی سازه‌ها از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. در مورد رفتار ستون‌های بتن آرمه‌ی لاغر محصور شده با FRP، مطالعات آزمایشگاهی کمتری نسبت به ستون‌های کوتاه تقویت شده با آن انجام شده است. مطالعات پیشین بیان می‌کنند افزایش مقاومت ستون با تقویت آن به وسیله‌ی FRP است، اما از ظرفیت FRP به طور کامل استفاده نشده و ستون در معرض ناپایداری و کمانش قرار می‌گیرد. هدف تحقیق حاضر، بررسی رفتار ستون‌های لاغر بتن آرمه با مقاطع دایروی و مربعی، تقویت شده با کامپوزیت طولی FRP با روش شیارزنی بوده تا اثرات ناشی از لاغری که در سایر روش‌های تقویت مشاهده می‌شود، کاهش یابد. نتایج حاکی از آن است که نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی، افزایش باربری بیشتری نسبت به نمونه‌های تقویت شده به روش EBR ارائه می‌دهد. افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌های شاهد در مقاطع دایروی به ترتیب برابر با $3/3$ و $1/8$ درصد و در مقاطع مربعی به ترتیب برابر با $9/27$ و $8/68$ درصد است. همچنین نسبت به نمونه‌های شاهد، روش شیارزنی در مقایسه با روش تقویت EBR، لنگرهای ثانویه را به میزان بیشتری کاهش می‌دهد. روش شیارزنی شکل‌پذیری را نسبت به نمونه‌های بدون تقویت و تقویت شده به روش EBR افزایش می‌دهد.

واژگان کلیدی: مطالعه‌ی آزمایشگاهی، ستون لاغر بتن آرمه، اثرات ثانویه، ستون دایروی، ستون مربعی، کامپوزیت FRP، تقویت.

m.nowrooz@cv.iut.ac.ir
m.t.aherirani@cv.iut.ac.ir
dmostofi@cc.iut.ac.ir

۱. مقدمه

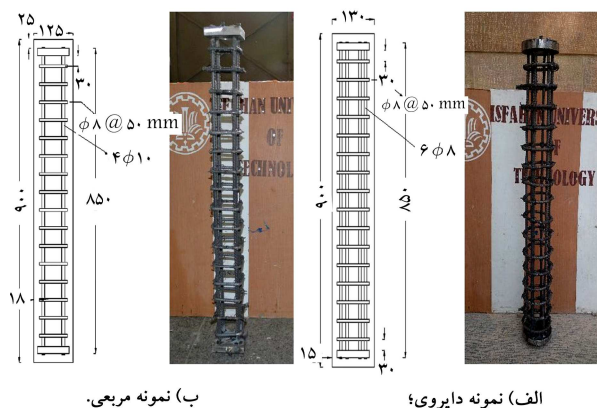
در دهه‌های اخیر، در کنار ساخت سازه‌های جدید، تقویت و بهسازی سازه‌های موجود و قدیمی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. از دلایل نیاز سازه‌ها به تقویت می‌توان به گذشت زمان و فرسوده شدن سازه، خطاهای محاسباتی، ضعف در اجرا، تغییر کاربری و افزایش بارهای وارده بر ساختمان، تغییر آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ساختمانی، ضعف آیین‌نامه‌های قدیمی و تأثیر عوامل مخرب محیطی اشاره کرد.^[۱] یکی از روش‌های جدید تقویت که در سال‌های اخیر متداول شده، استفاده از کامپوزیت‌های (FRP)^۱ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردشان است. از جمله‌ی 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 دیگر مزایای استفاده از FRP در تقویت سازه‌های بتن آرمه است.^[۲] 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 تحت تأثیر مقدار لنگر خمشی وارده، ابعاد مقطع ستون، مدول کشسانی ستون (سختی ستون)، شرایط انتهایی ستون و شرایط کلی قابی است که ستون در آن قرار گرفته است. 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 ثانویه می‌شود. اثر این لنگر با اثر لنگر اولیه بر ستون جمع شده و اثرات بحرانی تری را در ستون به وجود می‌آورد. مجموع لنگر

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۵/۳، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۱/۱، پذیرش ۱۳۹۸/۲/۲۸

DOI:10.24200/J30.2019.51348.2398



شکل ۱. جزییات آرماتورگذاری (ابعاد بر حسب میلی‌متر می‌باشند).

مقطع مربعی با بعد ۱۲۵ میلی‌متر بودند. ارتفاع تمامی نمونه‌ها ۹۰۰ میلی‌متر است. این ابعاد و ارتفاع با توجه به تجهیزات موجود در آزمایشگاه و برای دستیابی به نسبت‌های لاغری بزرگ‌تر از ۲۲ (ستون لاغری) انتخاب شده است. نمونه‌ها مسلح به آرماتور مقاومت معمولی هستند و در تمامی آنها به منظور تأمین مهار مکانیکی مورد نیاز، از صفحه‌های فولادی به ضخامت ۲۰ میلی‌متر استفاده شده است. در نمونه‌های دایروی قطر خارجی و داخلی این صفحات به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۴۰ میلی‌متر بوده و دارای ۶ سوراخ به قطر ۸ میلی‌متر برای عبور میلگردهای طولی هستند. همچنین در نمونه‌های مربعی، بعد این صفحات ۱۰۰ میلی‌متر بوده و در مرکز آن سوراخی به قطر ۵۰ میلی‌متر برای عبور بتن تعبیه شده است. این صفحات همچنین دارای ۴ سوراخ به قطر ۱۰ میلی‌متر برای عبور میلگردهای طولی هستند. در شکل ۱، جزییات میلگردهای نمونه‌ها نشان داده شده است. در هر گروه یک نمونه به عنوان شاهد (Ref) و دو نمونه‌ی دیگر تقویت شده به روش‌های نصب در نزدیکی سطح (EBR)^۲ و شیاری (EBROG)^۳ هستند. نام‌گذاری نمونه‌ها دارای دو قسمت است: در قسمت اول که نشان‌گر نوع مقطع است، نمونه‌های دایروی با علامت C و نمونه‌های مربعی با علامت S نشان داده شده‌اند. قسمت دوم نیز بیان‌گر نوع تقویت به کار رفته در هر نمونه است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

مقاومت فشاری استاندارد ۲۸ روزه نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش، برابر با ۳۵ مگاپاسکال است. الیاف مورد استفاده در این تحقیق یک‌جهته و از نوع کربن (CFRP) است. مشخصات الیاف CFRP مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین برای نصب الیاف FRP روی سطح نمونه‌ها، از رزین اپوکسی دوجزئی با نام تجاری Sika-dur-۳۳۰ تولیدی شرکت سیکای سوییس استفاده شده است. مشخصات رزین و چسب مورد استفاده در آزمایش نیز در جدول ۲ آورده شده است. میلگردهای مصرفی مورد استفاده از نوع مقاومت معمولی A-III با تنش تسلیم ۴۱۷ مگا پاسکال تولید شرکت فولاد کویر اصفهان است.

۳. تقویت نمونه‌ها

۳.۱. تقویت نمونه‌های دایروی

نمونه‌های دایروی در هر دو روش EBR و EBROG، در محیط خود با تعداد ۸ ورق FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر و طول ۹۰۰ میلی‌متر در جهت طولی تقویت شده است. در روش EBR ابتدا لایه‌ی ضعیف از پوشش برداشته می‌شود. سپس

خمشی اولیه و لنگر خمشی ثانویه به همراه بار محوری وارده بر ستون، سبب شکست نهایی ستون می‌شود.^[۲] ستون‌ها به دو دسته‌ی ستون‌های کوتاه و 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.^[۵] 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 لاغر به مراتب خاص‌تر و پیچیده‌تر از ستون‌های کوتاه بوده و در اثر بارهای وارده، زودتر دچار کماتش و گسیختگی می‌شوند. یکی از راه‌های جلوگیری از شکست‌های مذکور، تقویت ستون با استفاده از کامپوزیت FRP با الیاف موازی با محور طولی ستون و یا با الیاف مورب و نیز کامپوزیت‌های FRP با الیاف چندجهته است که در این حالت نیز مقاومت و شکل‌پذیری ستون افزایش می‌یابد.^[۲] در ستون‌های تقویت شده با کامپوزیت‌های با الیاف طولی، این کامپوزیت‌ها با تحمل بخشی از فشار وارد بر ستون، ظرفیت ستون را افزایش می‌دهند. علاوه بر این با توجه به این که بیشتر ستون‌های موجود در سازه تحت اثر توأمان بار محوری و لنگر خمشی هستند، با وجود لنگر خمشی در ستون، کارایی کامپوزیت‌های طولی به دلیل قرارگیری بخشی از الیاف تحت تنش‌های کششی افزایش می‌یابد؛^[۶] همچنین با وجود لنگر خمشی در ستون‌ها، تأثیر کامپوزیت‌های حلقوی در عملکرد ستون کاهش می‌یابد.^[۸] مطالعات موجود مبین افزایش مقاومت ستون با تقویت آن به وسیله FRP هستند، اما اثر تقویتی FRP بر 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 کماتش قرار می‌گیرد. در نتیجه اثرات لاغری می‌تواند مانع از دستیابی ستون به بیشینه‌ی ظرفیت خود شود.^[۹-۱۶] یکی از دلایل عدم استفاده‌ی کامل از ظرفیت FRP، عدم اتصال مناسب ورق با سطح بتن است. برای رفع این مشکل، در سال ۲۰۱۰ روش شیاری به عنوان روشی جدید در اتصال ورق FRP به سطح بتن در دانشگاه صنعتی اصفهان معرفی شد.^[۱۷] 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 نیز به تأخیر افتادن یا از بین رفتن پدیده‌ی جدا شدگی ورق FRP از سطح بتن می‌شود.^[۱۸-۲۰] در تحقیق حاضر، برای به تأخیر انداختن یا از بین بردن پدیده‌ی جداشدگی کامپوزیت‌های FRP از سطح بتن در اثر کماتش ستون لاغری (ناشی از اثرات ثانویه)، از روش نوین شیاری استفاده شده است. رفتار ستون‌های لاغری بتن آرمه با مقاطع دایروی و مربعی که با استفاده از روش شیاری توسط کامپوزیت‌های طولی FRP تقویت شده است، تحت بارگذاری بار محوری - لنگر خمشی بررسی می‌شود. شایان ذکر است نسبت لاغری بر اساس رابطه‌ی kl_u/r (آیین‌نامه‌ی ۱۴-۳۱۸-ACI) محاسبه می‌شود که در آن، k ضریب طول مؤثر ستون، l_u طول آزاد ستون و r شعاع ژیراسیون مقطع است. بر این اساس، ستون‌های با مقاطع دایروی دارای نسبت لاغری ۲۸ و مقاطع مربعی دارای نسبت لاغری ۲۵ هستند.

۲. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

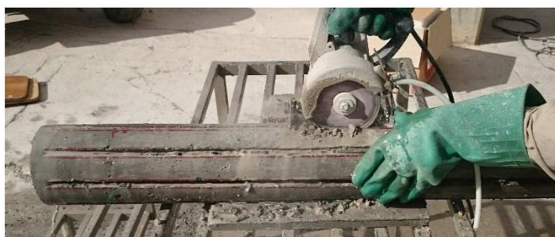
در این تحقیق ۶ نمونه‌ی بتن آرمه‌ی تحت بار با خروج از مرکزیت ثابت ۶۰ میلی‌متر آزمایش شدند. این خروج از مرکزیت بر اساس تجهیزات موجود در آزمایشگاه و به منظور دستیابی به اثرات ثانویه محسوس و قابل مشاهده در ستون انتخاب شده است. گروه اول دارای مقطع دایروی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و گروه دوم دارای

جدول ۱. نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش.

شماره گروه	کد نمونه	نوع تقویت	تعداد لایه‌ی طولی FRP	بعد/ قطر	آرما توری طولی	آرما توری عرضی
گروه اول	C-Ref	شاهد	۰			خاموت دایروی،
	C-EBR	EBR	۱	۱۳۰ میلی‌متر	۶ عدد به قطر ۸ میلی‌متر	میانگرد به قطر ۸ میلی‌متر
	C-EBROG	شیارزنی	۱			
گروه دوم	S-Ref	شاهد	۰			خاموت مربعی،
	S-EBR	EBR	۳	۱۲۵ میلی‌متر	۴ عدد به قطر ۱۰ میلی‌متر	میانگرد به قطر ۸ میلی‌متر
	S-EBROG	شیارزنی	۳			

جدول ۲. مشخصات الیاف CFRP و رزین و چسب مصرفی مورد استفاده در آزمایش.

الیاف/چسب	ضخامت (mm)	مقاومت کششی نهایی (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	کرنش نهایی (%)
الیاف ۳۰°C Sikawrap	۰٫۱۶۶	۳۹۰۰	۲۳۰	۱٫۵
رزین ۳۳°C Sikadur	-	۳۰	۴٫۵	۰٫۹

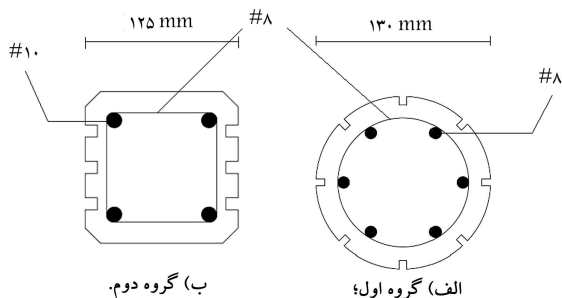


شکل ۲. تقویت به روش EBR.

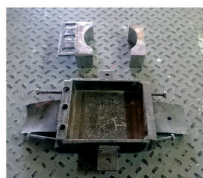
با استفاده از فشار هوا و پارچه‌ی خیس، گرد و غبار ناشی از ساییده شدن بتن از روی سطح پاک می‌شود. سپس با پرکردن حفرات کوچک با رزین، لایه‌ی نازک از رزین روی سطح مورد نظر مالیده می‌شود؛ پس از آن ورق FRP مورد نظر روی رزین قرار گرفته و به آرامی و با کاربرد مخصوص روی آن کشیده می‌شود تا رزین از بین الیاف نفوذ کرده و خارج شود. در پایان لایه‌ی نازک از چسب روی FRP قرار داده می‌شود (شکل ۲).

در روش شیارزنی، ابتدا با دستگاه شیارزن، شیار با ابعاد مورد نظر روی نمونه‌ی بتنی ایجاد شده، سپس درون شیارها با استفاده از چسب پر شده و در آخر مشابه روش EBR، الیاف FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر روی آن قرار داده شده و روی نمونه‌ها نصب شدند به طوری که هر شیار، در وسط لایه‌ی FRP به عرض ۵۱ میلی‌متر قرار گرفت شکل ۳. 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 شکل ۴ الف. در تمامی نمونه‌های این گروه، به منظور جلوگیری از خردشدگی ناشی از تمرکز تنش در دو انتهای نمونه‌ها، از نوارهای FRP به صورت حلقوی استفاده شد. عرض این نوارها برای نمونه‌های دایروی ۵۰ میلی‌متر است. سپس نمونه‌ها به مدت ۷ روز برای رسیدن چسب به مقاومت نهایی، عمل‌آوری شدند.

شکل ۳. تقویت به روش EBROG.



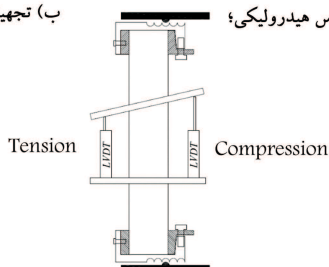
شکل ۴. الگوی شیارزنی.



ب) تجهیزات بارگذاری؛



الف) دستگاه پرس هیدرولیکی؛



ج) قرارگیری نمونه در کلاهک بارگذاری و نحوه اعمال بارگذاری به صورت شماتیک.

شکل ۵. نحوه اعمال بار با خروج از مرکزیت و تجهیزات مورد استفاده.

۲.۳. تقویت نمونه‌های مربعی

نمونه‌های مربعی، روی دو وجه از وجوه موازی نمونه به روش‌های EBR و EBROG با شش لایه ورق FRP تقویت شدند. بدین منظور روی هر وجه از دو وجه در نظر گرفته شده، سه لایه ورق FRP نصب می‌شود. در روش نصب EBR، ابتدا با کاردک لایه‌ی نازک و یکنواختی از رزین روی نمونه مالیده می‌شود. سپس ورق FRP روی رزین قرار می‌گیرد. پس از اطمینان از اتصال کامل و یکنواخت ورق FRP به سطح بتن، لایه‌ی دیگری از رزین روی ورق مالیده می‌شود تا الیاف به طور کامل به رزین آغشته شوند. در ادامه ورق‌های تقویتی دوم و سوم نیز به صورت مشابه، به ترتیب روی ورق تقویتی اول و دوم چسبانده می‌شود. در روش نصب EBROG، پس از ایجاد سه شیار با طول ۸۶۰ میلی‌متر و عرض و عمق ۱۰ میلی‌متر در هریک از وجوه فشاری و کششی شکل ۴ ب، ابتدا داخل شیارها به طور کامل با رزین پر شده، سطح بتن اطراف شیار به لایه‌ی نازکی از رزین آغشته می‌شود و سپس ورق FRP روی شیار و بتن اطراف آن قرار می‌گیرد. بعد از آن لایه‌ی از چسب، برای آغشته شدن کامل الیاف با رزین روی ورق مالیده می‌شود. لایه‌های دوم و سوم نیز مشابه همین روند، به ترتیب روی لایه‌ی اول چسبانده می‌شوند. در این گروه نیز، به منظور جلوگیری از خردشدگی ناشی از تمرکز تنش در دو انتهای نمونه‌ها، از نوارهای FRP به صورت حلقوی استفاده شد. عرض این نوارها برای نمونه‌های مربعی ۱۰۰ میلی‌متر است.

۴. برنامه‌ی آزمایش و تجهیزات مورد استفاده

در پژوهش حاضر، برای اعمال بار با خروج از مرکزیت روی ستون‌های بتن آرمه و ثبت نتایج حاصل، از دستگاه پرس با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن، نیروسنج، ورق و کلاهک مخصوص بارگذاری خارج از محور استفاده شد. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز جک فشاری با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلو نیوتن مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌های مورد نظر با استفاده از دستگاه جک هیدرولیکی تا لحظه‌ی نهایی شکست تحت بارگذاری قرار گرفتند. بارگذاری این نمونه‌ها به صورت کنترل تغییر مکان و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه برای حرکت فک دستگاه انجام شد. جک هیدرولیکی در قسمت پایینی دستگاه قرار دارد و با تزریق روغن به داخل آن، بار از پایین به بالا اعمال می‌شود شکل ۵ الف برای اعمال خروج از مرکزیت روی نمونه، از کلاهک‌هایی مطابق شکل ۵ ب استفاده می‌شود. تغییر شکل محوری ستون‌ها توسط دو عدد جابه‌جایی‌سنج (LVDT) قائم با بیشینه تغییر مکان قابل اندازه‌گیری ۶۰ میلی‌متر که در دو طرف نمونه قرار گرفتند تعیین شد. یکی از این دو LVDT در وجه کششی و دیگری در وجه فشاری نصب شده و تغییر شکل و کرنش محوری در این دو وجه به دست می‌آید. برای نصب جابه‌جایی‌سنج‌های مربوط به تغییر مکان محوری، از دو قاب فولادی استفاده می‌شود شکل ۵ ج. با توجه به ابعاد LVDT و موقعیت قرارگیری این قاب‌ها، تغییر مکان اندازه‌گیری شده مربوط به یک سوم میانی نمونه است.

جابه‌جایی افقی نمونه‌ها نیز با استفاده از روش پردازش تصویر (PIV) در نرم‌افزار MATLAB به دست می‌آید. روشی برای ارزیابی میدان تغییر مکان و میدان کرنش با عکسبرداری متوالی از محیط مورد نظر (سطح FRP یا سطح نمونه‌ی مورد بررسی) است. در این روش سطح نمونه‌ی مورد بررسی باید با لایه‌ی بافت رنگی پوشانده شود. پس از آماده‌سازی سطح، از سطح نمونه در مراحل

شکل ۶. بافت رنگی روی نمونه و عکس‌برداری در زمان آزمایش برای پردازش تصویر.

مختلف بارگذاری عکس‌برداری می‌شود شکل ۶. سپس با المان‌بندی عکس‌ها و تحلیل عکس‌های متوالی، تغییر مکان در هر نقطه و نیز میدان تغییر مکان و کرنش در کل نمونه به دست می‌آید.

برای محاسبه‌ی تغییر مکان جانبی (δ)، قبل از انجام آزمایش وسط ارتفاع نمونه، علامت‌گذاری می‌شود. سپس توسط نرم‌افزار ابتدا نمونه به ابعاد ۱۲۸ × ۱۲۸ پیکسل بچ‌بندی می‌شود. فاصله‌ی هر پیک ۶۴ پیکسل انتخاب می‌شود. سپس مقدار فضای جست‌وجو ۲۰ پیکسل انتخاب می‌شود؛ به این معنی که جست‌وجو در فضای ۱۶۸ × ۱۶۸ پیکسلی انجام می‌شود. سپس در این تحلیل، عکس‌ها سه به سه با یکدیگر مقایسه می‌شود و در نهایت جابه‌جایی تمام پیک‌ها توسط نرم‌افزار به دست می‌آید. سپس با انتخاب نزدیک‌ترین پیک به وسط نمونه، جابه‌جایی مرکز ستون به دست می‌آید. این جابه‌جایی به عنوان تغییر مکان جانبی وسط نمونه شناخته می‌شود.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمایش.

نام نمونه	ظرفیت باربری بیشینه (kN)	درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد (%)	کرنش محوری در وجه		انرژی جذب شده (kN.mm)
			فشاری متناظر با بار بیشینه	کششی متناظر با بار بیشینه	
C-Ref	۹۰/۵۴	-	۰/۰۰۵۰۲	۰/۰۰۵۹۵	۳۹۷/۰
C-EBR	۱۱۹/۷۷	۳۲/۳	۰/۰۰۴۲۲	۰/۰۰۳۸۴	۱۱۶۵/۱
C-EBROG	۱۴۷/۷۱	۶۳/۱	۰/۰۰۵۹۱	۰/۰۰۵۰۱	۱۴۱۳/۶
S-Ref	۱۴۱/۵۱	-	۰/۰۰۴۳۰	۰/۰۰۴۴۶	۴۹۱/۳
S-EBR	۱۸۱/۰۲	۲۷/۹	۰/۰۰۳۱۷	۰/۰۰۲۳۴	۲۱۲/۰
S-EBROG	۲۳۸/۸	۶۸/۸	۰/۰۰۴۴۶	۰/۰۰۲۹۸	۱۰۲۵/۷

۵. مشاهدات آزمایشگاهی

۱.۵. مود گسیختگی نمونه‌ها

مود گسیختگی نمونه‌های گروه اول و دوم در شکل ۷ ارائه شده است. با توجه به تصاویر، تمامی نمونه‌ها در ناحیه‌ی یک سوم میانی دچار گسیختگی و شکست شده‌اند. الف) مود گسیختگی نمونه‌های شاهد: در نمونه‌ی شاهد به صورت متقارن و کلاسیک، ترک‌های خمشی در وجه کششی ایجاد شده و بتن ناحیه‌ی فشاری خرد می‌شود. در شکل‌های ۷ الف و ۷ د، مود گسیختگی نمونه‌های C-Ref و S-Ref نشان داده شده است.

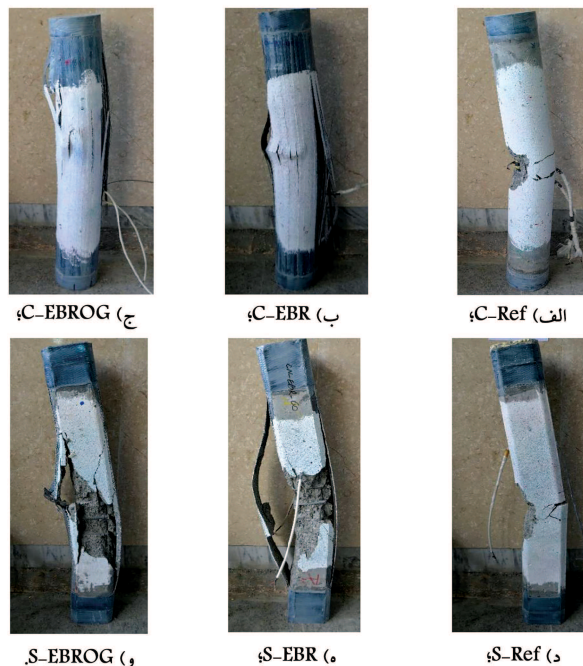
ب) مود گسیختگی نمونه‌های تقویت شده به روش EBR: قبل از رسیدن به بار بیشینه، در ناحیه‌ی فشاری، ورق FRP به همراه لایه‌ی نازکی از بتن روی آن، کمانش می‌کند. در ادامه با افزایش بار، بتن ناحیه‌ی فشاری خرد شده است و کاهش بار مشاهده می‌شود. در ادامه، جداسدگی FRP در ناحیه‌ی کششی رخ می‌دهد؛ در هر مرتبه جداسدگی قسمتی از FRP در ناحیه‌ی کششی، افت ناگهانی بار رخ می‌دهد. مود گسیختگی نمونه‌های C-EBR و S-EBR در شکل‌های ۷ ب و ۷ هـ - نشان داده شده است.

ج) مود گسیختگی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG: در این نمونه‌ها، در زمان وقوع بار بیشینه، FRP کمانش کرده و بتن ناحیه‌ی فشاری خرد می‌شود. همچنین بر روی FRP کمانش کرده در ناحیه‌ی فشاری، رزین داخل شیار و پوشش بتن مشاهده می‌شود. بعد از بار بیشینه، با پارگی FRP در کشش، افت بار بیشتر می‌شود. مود گسیختگی نمونه‌های C-EBROG و S-EBROG در شکل‌های ۷ ج و ۷ و نشان داده شده است.

۲.۵. ظرفیت باربری نمونه‌ها

بیشترین ظرفیت باربری و کرنش محوری هر یک از نمونه‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین نمودارهای بار - کرنش محوری گروه‌های اول و دوم در شکل ۸ نشان داده شده است.

میزان ظرفیت باربری نمونه‌های C-Ref، C-EBR و C-EBROG به ترتیب برابر با ۹۰/۵۴، ۱۱۹/۷۷ و ۱۴۷/۷۱ کیلونیوتن است. درصد افزایش باربری نمونه‌های C-EBR و C-EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر ۳۲/۳ و ۶۳/۱ است. چنان که مشاهده می‌شود، نمونه‌ی تقویت شده به روش EBROG افزایش باربری بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR نشان می‌دهد.

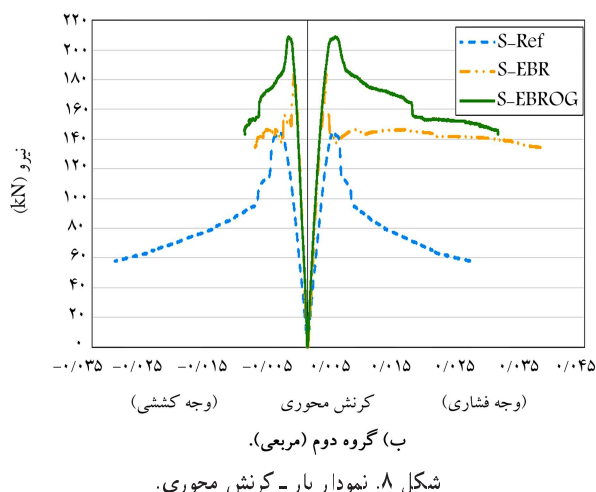
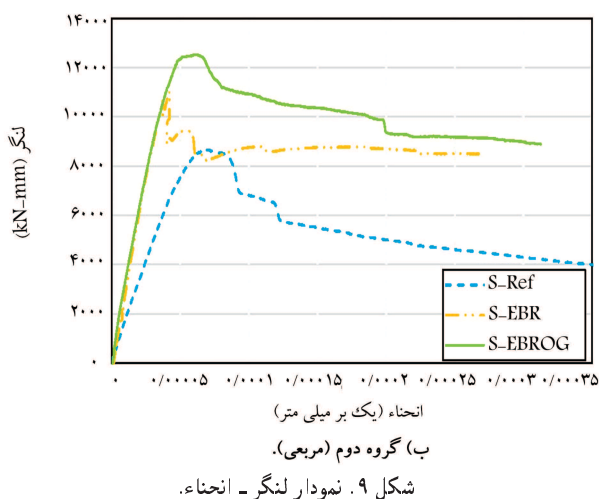
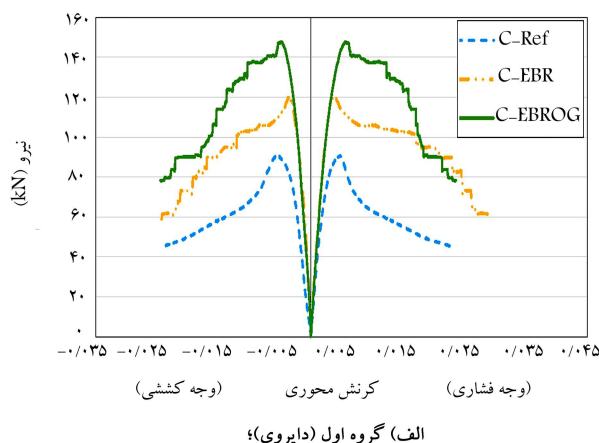
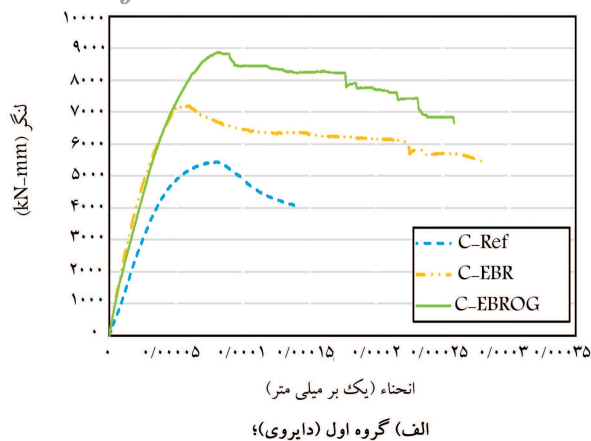


شکل ۷. مود گسیختگی نمونه‌های مورد آزمایش.

مطابق جدول ۳، کرنش نمونه‌های C-Ref، C-EBR و C-EBROG در وجه فشاری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۰۲، ۰/۰۰۴۲۲ و ۰/۰۰۵۹۱ و در وجه کششی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۹۵، ۰/۰۰۳۸۴ و ۰/۰۰۵۰۱ است. مشاهده می‌شود که کرنش نمونه‌های شاهد و EBROG به هم نزدیک است، اما از کرنش نمونه‌ی EBR فاصله دارد.

در نمونه‌های مربعی (گروه دوم)، میزان ظرفیت باربری نمونه‌های S-Ref، S-EBR و S-EBROG به ترتیب برابر با ۱۴۱/۵۱، ۱۸۱/۰۲ و ۲۳۸/۸ کیلونیوتن است. درصد افزایش باربری نمونه‌های S-EBR و S-EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر ۲۷/۹ و ۶۸/۸ است. چنان که مشاهده می‌شود، مشابه گروه اول، نمونه‌ی تقویت شده به روش EBROG افزایش باربری بیشتری در مقایسه با نمونه‌ی تقویت شده به روش EBR دارد.

مطابق جدول ۳، کرنش نمونه‌های S-Ref، S-EBR و S-EBROG در وجه فشاری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴۳۰، ۰/۰۰۳۱۷ و ۰/۰۰۴۴۶ و در وجه کششی به ترتیب برابر ۰/۰۰۴۴۶، ۰/۰۰۲۳۴ و ۰/۰۰۲۹۸ است. با توجه به منحنی‌های ارائه شده در شکل ۸، رفتار نمونه‌ی شاهد نرم است



۳.۵. اثرات لنگر ثانویه

همان طور که ذکر شد، لنگر نهایی ستون از مجموع لنگر اولیه و لنگر ثانویه مطابق رابطه‌ی ۱ به دست می‌آید.

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

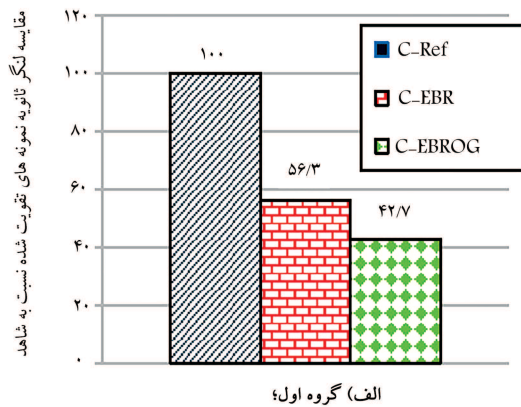
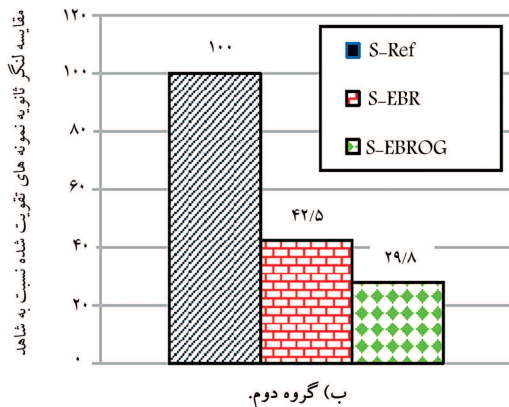
که در آن P بار محوری وارده در دو انتهای ستون، e خروج از مرکزیت اولیه و δ تغییر مکان جانبی ناشی از اثرات ثانویه در وسط ارتفاع ستون است. رابطه‌ی لنگر نهایی به صورت غیر خطی است. در نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG، به دلیل افزایش ظرفیت باربری نسبت به نمونه‌های EBR، طبق رابطه‌ی فوق، تغییر مکان جانبی نیز تحت تأثیر تغییرات بار بوده و بنا بر این مقایسه‌ی تغییر مکان جانبی در بار حداکثر دو روش EBR و EBROG، منجر به درک درستی نخواهد شد. برای رسیدن به درکی مطلوب، برای هر دو روش تقویت EBR و EBROG، میزان تغییر مکان جانبی در بار یکسان (بار بیشینه‌ی نمونه‌های شاهد هر گروه) به همراه مقادیر لنگرهای اولیه و ثانویه در جدول ۴ برای گروه‌های اول و دوم ارائه شده است. چنان 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 به روش EBR از خود نشان می‌دهند؛ این بدان معناست که در ستون‌های لاغر، روش شیازنی سختی خمشی را افزایش می‌دهد. کاهش میزان تغییر مکان جانبی در نمونه‌های تقویت شده، سبب کاهش اثرات ثانویه در نمونه‌ها و در نتیجه کاهش میزان لنگر ثانویه نسبت به نمونه‌ی شاهد می‌شود. این کاهش برای نمونه‌های

در حالی که نمونه‌های تقویت شده از نقطه‌ی شکست آزمایشگاهی برخوردارند. با توجه به منحنی بار - کرنش محوری نمونه‌ی شاهد، این نمونه در وجه فشاری شیب بیشتری نسبت به وجه کششی دارد، در حالی که با تقویت این نمونه با کامپوزیت‌های طولی FRP به روش‌های EBR و EBROG، شیب در وجه کششی این نمونه از وجه فشاری آن بیشتر می‌شود که می‌توان علت آن را مقاومت کششی بالای این کامپوزیت‌ها هنگام قرار گرفتن تحت تنش‌های کششی بیان کرد. در منحنی‌های بار - کرنش محوری نمونه‌های دایروی و مربعی، نمونه‌های شاهد و تقویت شده با روش EBROG تا رسیدن به بار بیشینه، رفتار نرم‌تری را نسبت به نمونه‌ی تقویت شده با روش EBR نشان می‌دهند. به عبارت دیگر در لحظه‌ی باربری بیشینه‌ی نمونه‌ها، نمونه‌ی EBR به صورت ناگهانی دچار شکست می‌شود. با توجه به منحنی مربوط به نمونه‌ی EBR و مشاهدات آزمایش، در لحظه‌ی باربری بیشینه، با جدا شدن ورق‌های FRP موجود در وجه فشاری، نمونه به طور ناگهانی افت بار شدیدی را تجربه می‌کند.

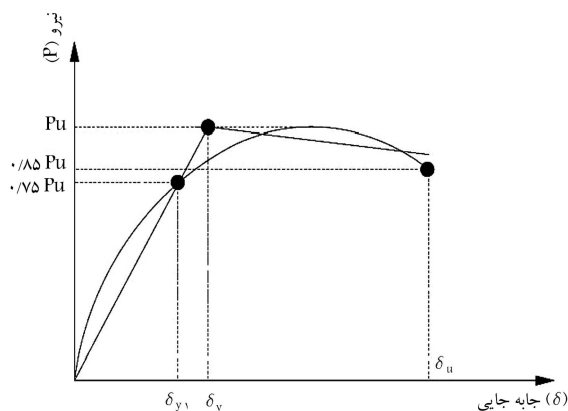
در جدول ۳، مقادیر جذب انرژی نمونه‌های دایروی و مربعی نشان داده شده است. برای محاسبه‌ی این مقادیر برای هر نمونه، از سطح زیر منحنی لنگر - انحناء تا نقطه‌ی ۸۵٪ لنگر بیشینه در شاخه‌ی نزولی، استفاده شده است. در شکل ۹، منحنی‌های لنگر - انحنای نمونه‌های دایروی و مربعی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که میزان جذب انرژی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG نسبت به نمونه‌های شاهد و نمونه‌های تقویت شده به روش EBR، در هر دو نوع ستون دایروی و مربعی بیشتر است.

جدول ۴. مقادیر تغییر مکان جانبی نمونه‌های شاهد، EBR و EBROG در بار یکسان برای نمونه‌های گروه اول و دوم.

شماره گروه	نام نمونه	مقدار بار (kN)	تغییر مکان جانبی (mm)	لنگر اولیه (kN.mm)	لنگر ثانویه (kN.mm)	کاهش لنگر ثانویه نسبت به نمونه شاهد (%)
گروه اول	C-Ref		۹٫۶		۸۶۹٫۲	-
	C-EBR	۹۰٫۵۴	۵٫۴	۵۴۳۲٫۴	۴۸۸٫۹	۴۳٫۷
	C-EBROG (دایروی)		۴٫۱		۳۷۱٫۲	۵۷٫۳
گروه دوم	S-Ref		۹٫۴		۱۳۳۰٫۲	-
	S-EBR	۱۴۱٫۵۱	۴	۸۴۹۰٫۶	۵۶۶	۵۷٫۵
	S-EBROG (مربعی)		۲٫۸		۳۹۶٫۲	۷۰٫۲



شکل ۱۰. کاهش اثرات ثانویه نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد.



شکل ۱۱. نقاط مربوط به تسلیم و لحظه‌ی گسیختگی نهایی با استفاده از نظریه پارک.

برای به دست آوردن نقطه‌ی مربوط به گسیختگی نهایی، نقطه‌ی معادل با ۸۵ درصد بار بیشینه در شاخه‌ی نزولی در نظر گرفته می‌شود.^[۲۲]

برای محاسبه‌ی شاخص شکل‌پذیری، جابه‌جایی محوری نمونه مورد نیاز است. در تحقیقات قبلی، تغییر مکان محوری برای نمونه‌ی تحت بار محوری خالص و تحت بار خارج از محور برابر با میزان فشرده شدن نمونه در اثر جابه‌جایی فک متحرک دستگاه در نظر گرفته شده است.^[۲۲،۲۳]

در تحقیق حاضر به منظور به دست آوردن شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها، از مقادیر ثبت شده توسط جابه‌جایی سنج مکانیکی داخلی دستگاه استفاده شده است.

تقویت شده با روش شیارزنی، بیش‌تر از نمونه‌های تقویت شده با روش EBR است. مطابق جدول ۴، در گروه اول میزان کاهش لنگر ثانویه‌ی نمونه‌های تقویت شده به روش EBR و EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد، به ترتیب برابر با ۴۳٫۷ و ۵۷٫۳ درصد است. همچنین در نمونه‌های گروه دوم، میزان کاهش لنگر ثانویه‌ی نمونه‌های تقویت شده به روش EBR و EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد، به ترتیب برابر با ۵۷٫۵ و ۷۰٫۲ درصد است. میزان کاهش اثرات لنگر ثانویه‌ی نمونه‌های گروه اول و دوم در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۶. شکل‌پذیری نمونه‌ها

شکل‌پذیری یکی از معیارهای مهم در بررسی رفتار عناصر سازه است. در این تحقیق برای محاسبه‌ی شکل‌پذیری، از شاخص شکل‌پذیری تغییر مکانی طبق رابطه‌ی ۲ استفاده می‌شود:

$$\lambda = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (2)$$

δ_u و δ_y به ترتیب تغییر مکان نمونه در لحظه‌ی تسلیم و در لحظه‌ی نهایی هستند. برای محاسبه‌ی شکل‌پذیری طبق رابطه‌ی ۲، به منظور به دست آوردن نقطه‌ی مربوط به تسلیم δ_y مطابق شکل ۱۱ عمل می‌شود. بدین صورت که ابتدا در شاخه‌ی صعودی، نقطه‌ی معادل با ۷۵ درصد بار بیشینه مشخص می‌شود؛ سپس خط مذکور ادامه داده می‌شود تا خط موازی محور تغییر مکان را که از نقطه‌ی بیشینه می‌گذرد قطع کند. تغییر مکان نقطه‌ی تلاقی دو خط برابر با لحظه‌ی تسلیم است.

جدول ۵. پارامترهای مربوط به شکل‌پذیری برای نمونه‌های گروه اول و دوم.

شماره گروه	نام نمونه	تغییر مکان	تغییر مکان	شاخص شکل‌پذیری (λ)
		محوری در لحظه‌ی تسلیم (mm)	محوری در لحظه‌ی نهایی (mm)	
گروه اول (دایروی)	C-Ref	۶٫۷	۸	۱٫۲
	C-EBR	۶٫۴	۱۱	۱٫۷
	C-EBROG	۷٫۶	۱۵٫۲	۲
گروه دوم (مربعی)	S-Ref	۵٫۵	۶٫۵	۱٫۱۸
	S-EBR	۴٫۲	۶٫۷	۱٫۶
	S-EBROG	۴٫۵	۹	۲

افزایش ظرفیت باربری دارند. میزان این افزایش ظرفیت باربری برای نمونه‌های تقویت شده به روش شیارزنی بیش‌تر از روش EBR است؛ افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب برابر با ۳۲٫۳ و ۶۳٫۱ درصد است.

۳) در نمونه‌های با مقطع مربعی، همانند گروه اول، ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده با روش شیارزنی بیشتر از نمونه‌های تقویت شده با روش EBR و نمونه‌های بدون تقویت است؛ افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب برابر با ۲۷٫۹ و ۶۸٫۸ درصد است.

۴) در هر دو نوع نمونه‌های با مقاطع دایروی و مربعی، میزان تغییر مکان جانبی نمونه‌های تقویت شده به روش EBROG نسبت به روش EBR و نمونه‌های شاهد، در بار یکسان کم‌تر است.

۵) در ستون‌های لاغر با مقاطع دایروی و مربعی، به دلیل کم بودن میزان تغییر مکان جانبی در روش شیارزنی، میزان لنگر ثانویه و اثرات ناشی از آن نیز در روش مذکور نسبت به نمونه شاهد و نمونه تقویت شده به روش EBR کم‌تر است. این بدان معناست که روش EBROG، در ستون‌های لاغر، سختی خمشی را افزایش می‌دهد.

۶) میزان کاهش لنگر ثانویه در نمونه‌های تقویت شده به روش EBR و EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد در نمونه‌های دایروی به ترتیب برابر با ۴۳٫۷ و ۵۷٫۳ درصد و در نمونه‌های مربعی به ترتیب برابر با ۵۷٫۵ و ۷۰٫۲ درصد است.

۷) در هر دو گروه اول و دوم، میزان شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد بیشتر است. این افزایش شکل‌پذیری در نمونه‌های تقویت شده با روش EBROG بیشتر از نمونه‌های تقویت شده با روش EBR است. در نمونه‌های دایروی، میزان افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۶۶٫۷ و ۴۱٫۷ درصد است. این مقادیر در نمونه‌های مربعی به ترتیب برابر با ۶۹٫۵ و ۳۵٫۶ درصد است.

بدین ترتیب که بار محوری وارده بر روی محور قائم و جابه‌جایی ثبت شده توسط LVDT داخلی دستگاه بر روی محور افقی ترسیم می‌شوند. سپس مطابق شکل ۱۱ مقادیر δ_{ix} و δ_{iy} محاسبه شده و مطابق نظریه‌ی پارک، شاخص شکل‌پذیری محاسبه می‌شود.

نتایج شکل‌پذیری گروه‌های اول و دوم در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو گروه اول و دوم میزان شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد بیشتر است. این میزان افزایش شکل‌پذیری برای نمونه‌های تقویت شده با روش EBROG بیشتر از نمونه‌های تقویت شده با روش EBR است. در نمونه‌های دایروی، میزان افزایش شکل‌پذیری نمونه‌های EBR و EBROG نسبت به نمونه‌ی شاهد به ترتیب برابر با ۶۶٫۷ و ۴۱٫۷ درصد است. این مقادیر در نمونه‌های مربعی به ترتیب برابر با ۶۹٫۵ و ۳۵٫۶ درصد است.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی اثر تقویت FRP طولی بر رفتار ستون بتن آرمه‌ی لاغر با مقاطع دایروی و مربعی، تعداد ۶ عدد نمونه‌ی مسلح به آرماتورهای مقاومت معمولی تحت بار با خروج از مرکزیت ثابت ۶۰ میلی‌متر آزمایش شد. نیمی از نمونه‌ها با مقطع دایروی با قطر ۱۳۰ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر (نسبت لاغری ۲٫۸) و نیمی دیگر با مقطع مربعی با بعد ۱۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۹۰۰ میلی‌متر (نسبت لاغری ۲٫۵) بودند. نمونه‌ها با دو روش EBR و EBROG به صورت طولی تقویت شدند. نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده عبارت است از:

- در یک نسبت لاغری مشخص، میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه‌ی شاهد، با روش EBROG بیش‌تر از روش EBR در هر دو نوع مقاطع دایروی و مربعی است.
- در نمونه‌های با مقطع دایروی، نمونه‌های تقویت شده، نسبت به نمونه‌ی شاهد

3. externally bonded reinforcement on grooves

پانویس‌ها

1. fiber reinforced polymers
2. externally bonded reinforcement

(References) منابع

1. ACI Committee 440, ACI 440.2R-08, "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures", *Farmington Hills, MI, USA* (2008).
2. Piekarczyk, J., Piekarczyk, W., and Blazewicz, S., "Compression strength of concrete cylinders reinforced with carbon fiber laminate", *Construction and Building Materials*, **25**, pp. 2365-2369 (2011).
3. Holloway, L.C., "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*, **24**(12), pp. 2419-2445 (2010).
4. Mostofinejad, D., *Reinforced Concrete Structures - Volume I*, Arkan Danesh Publication, 40th Ed, pp.568-572 (2016)
5. American Concrete Institute (ACI). "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* (2014).
6. Chaallal, O. and Shahawy, M., "Performance of fiber-reinforced polymer-wrapped reinforced concrete column under combined axial-flexural loading", *Structural Journal*, **97**, pp. 659-668 (2000).
7. Hadi, M. N. S., "Behaviour of FRP strengthened concrete columns under eccentric compression loading", *Composite Structures*, **77**, pp. 92-96 (2007).
8. Parvin, A. and Wang, W., "Behavior of FRP jacketed concrete columns under eccentric loading", *Journal of Composites for Construction*, **5**, pp. 146-152 (2001).
9. Mirmiran, A., Shahawy, M. and Beitleman, T., "Slenderness limit for hybrid FRP-concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, **5**(1), pp. 26-34 (2001).
10. Pan, J.L., Xu, T., and Hu, Z.J. "Experimental investigation of load carrying capacity of the slender reinforced concrete columns wrapped with FRP", *Construction and Building Materials*, **21**(11), pp. 1991-1996 (2007).
11. Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M. and et al. "Effect of column parameters on FRP-confined concrete", *Journal of Composites for Construction*, **2**(4), pp. 175-185 (1998).
12. Choi, S., Lee, M., and Lee, S.W. "Mechanical behavior of slender concrete-filled fiber reinforced polymer columns", *Journal of the Korea Concrete Institute*, **16**(4), pp. 565-572 (2004).
13. Fitzwilliam, J. and Bisby, L.A. "Slenderness effects on circular CFRP confined reinforced concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, **14**(3), pp. 280-288 (2010).
14. El-Hacha, R. and Abdelrahman, K. "Slenderness effect of circular concrete specimens confined with SFRP sheets", *Composites Part B: Engineering*, **44**(1), pp. 152-166 (2013).
15. Gajdosova, K., and Bilcik, J. "Full-scale testing of CFRP-strengthened slender reinforced concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, **17**(2), pp. 239-248 (2013).
16. Siddiqui, N.A., Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A. and et al. "Experimental investigation of slender circular RC columns strengthened with FRP composites", *Construction and Building Materials*, **69**(0), pp. 323-334 (2014).
17. Mostofinejad, D., and Mahmoudabadi, E., "Grooving as alternative method of surface preparation to postpone debonding of FRP laminates in concrete beams", *Journal of Composites for Construction*, **14**(6), pp. 804-811 (2010).
18. Hosseini, A., and Mostofinejad, D., "Experimental investigation into bond behavior of CFRP sheets attached to concrete using EBR and EBROG techniques," *Journal of Composites: Part B*, **51**, pp. 130-139 (2013).
19. Mostofinejad, D., and Moshiri, N., "Compressive strength of CFRP composites used for strengthening of RC columns: Comparative evaluation of EBR and grooving methods." *Journal of Composites for Construction*, **19**(5), 04014079 (2014).
20. Mostofinejad, D., and Torabian, A., "Experimental study of circular RC columns strengthened with longitudinal CFRP composites under eccentric loading: comparative evaluation of EBR and EBROG methods." *Journal of Composites for Construction*, **20**(2), 04015055 (2015).
21. Mostofinejad, D., and Akhlaghi, A., "Experimental investigation of the efficacy of EBROG method in seismic rehabilitation of deficient reinforced concrete beam-column joints using CFRP sheets." *Journal of Composites for Construction*, **21**(4), 04016116 (2016).
22. Park, R., "Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **22**(3), pp. 155-166 (1989).
23. Hadi, M. N. S., "Behaviour of eccentric loading of FRP confined fibre steel reinforced concrete columns", *Construction and Building Materials*, **23**(2), pp. 1102-1108 (2009).
24. Yazici, V. and Hadi, M. N. S., "Axial load-bending moment diagrams of carbon FRP wrapped hollow core reinforced concrete columns", *Journal of Composites for Construction*, **13**(4), pp. 262-268 (2009).