

بررسی اثر زوایای الیاف FRP در مقاوم‌سازی تیر ستون‌های بتن مسلح

مصطفی حبیب‌پور

دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، گروه سازه.

جعفر عسگری مارنانی*

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، گروه سازه.

ابوالفضل عرب زاده

دانشیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران و محیط زیست، گروه سازه.

عباس قاسمی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، گروه سازه.

چکیده

مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با کامپوزیت‌های FRP با هدف افزایش توان باربری و شکل‌پذیری آن‌ها صورت می‌پذیرد. یکی از روش‌های رایج در این حالت، محصور نمودن سرتاسری سطح خارجی ستون با لایه‌های FRP است. در تحقیق حاضر به مقاوم‌سازی تحت بار محوری با خروج از محوریت، با لایه‌های FRP پرداخته شده است. نمونه‌ها با مقطع دایره به قطر ۱۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشند. حالت اول بارگذاری با خروج از مرکزیت به اندازه دو برابر شعاع ستون (2R) و حالت دوم به اندازه چهار برابر شعاع ستون (4R). با توجه به خروج از مرکزیت بارگذاری، بخش‌هایی از ستون تحت کشش ناشی از خمش قرار می‌گیرد. بنابراین علاوه بر تقویت در جهت شعاع ستون، نیاز به تقویت طولی عضو نیز می‌باشد. لذا با دو متغیر خروج از مرکزیت بار و جهات الیاف لایه‌های FRP، ۱۰ نمونه نرم‌افزاری در دو گروه (2R و 4R) با استفاده از نرم‌افزار Abaqus مدل‌سازی و تحلیل گردید. جهت اثبات صحت مدل‌سازی ابتدا دو نمونه آزمایشگاهی موجود با نرم‌افزار شبیه‌سازی و نتایج راستی آزمایی شد. نتایج تحقیق نشان داد با افزایش خروج از مرکزیت بار، به تدریج اثرگذاری کامپوزیت‌های طولی بیش از کامپوزیت‌های عرضی در تحمل نیرو و جابجایی افزایش می‌یابد و اثر مقاوم‌سازی به صورت افزایش شکل‌پذیری بیشتر از افزایش تحمل نیرو در ستون نمایان می‌شود. به طوری که در گروه 2R نمونه‌های با کامپوزیت عرضی نسبت به طولی حدود ۱۴ درصد نیرو و ۱۵ درصد جابجایی بیشتری تحمل کرده‌اند. برعکس در گروه 4R اعداد فوق در نمونه‌های با کامپوزیت طولی نسبت به عرضی افزایشی در حدود ۷ و ۳۳۲ درصد داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: ستون بتن مسلح، بارگذاری خارج از مرکز، جهات الیاف در کامپوزیت‌های FRP، مقاوم‌سازی.

* نویسنده مسئول: j_asgari@iauctb.ac.ir

۱- مقدمه

شد [۸]. در این تحقیق دورویکرد اثر اندازه مصالح و اثر اندازه اعضا وجود داشت. از نتایج این تحقیق تأثیر اندازه ستون‌های بتن مسلح در مقاوم‌سازی از نظر اقتصادی بود. همچنین دریافتند هرچه نسبت لاغری ستون بزرگ‌تر باشد، اثرات اندازه در مقاوم‌سازی برجسته‌تر خواهد بود.

حبیب‌پور و فرحید در سال ۲۰۱۶ (۱۳۹۴) تحقیقاتی با موضوع مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت‌های FRP چندجهته تحت بار محوری، با استفاده از نرم‌افزار Abaqus انجام دادند [۱۲]. با در نظر گرفتن متغیرهای جنس الیاف، جهت لایه‌های کامپوزیت و درصد فولاد طولی مقطع ستون، ۱۸ نمونه مدل‌سازی شد. نمونه‌ها با لایه‌های کامپوزیت در جهات مختلف ۰، ۰، ۰ درجه و ۰، ۹۰، ۰، ۹۰ درجه و ۰، ۴۵، -۴۵، ۰ درجه و ۰، ۴۵، -۴۵ درجه نسبت به محور عرضی ستون تقویت شدند. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که شکل‌پذیری ستون‌های تقویت شده به وسیله FRP‌های در جهات ۰ و ۴۵ و -۴۵ درجه قابل توجه بوده و این چیدمان راهکار خوبی برای افزایش شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح است. از طرفی با توجه به محوری بودن بارگذاری هرچه امتداد الیاف لایه‌های کامپوزیت به راستای عرضی ستون نزدیک‌تر باشد اثر مقاوم‌سازی بیشتر است. همچنین دریافتند که افزایش مقاومت با کامپوزیت‌های تحت زوایای ۰ درجه، برای نمونه‌های تقویت شده با CFRP^۱ بالاتر از نمونه‌های تقویت شده با GFRP^۲ بوده، و همینطور افزایش کرنش نهایی محوری در نمونه‌های تقویت شده با GFRP بیشتر از نمونه‌های مشابه تقویت شده با CFRP می‌باشد.

چلاپاندیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از یک تکنیک ترکیبی به بررسی مقاوم‌سازی ستون‌ها با FRP پرداختند [۷]. که در آن اعضای ستون بتن مسلح مربعی کوتاه با استفاده از روش (NSM)^۴ و روش ورقه‌های CFRP برای محصورکنندگی خارجی و همچنین ترکیبی از دوروش، مقاوم‌سازی شدند. نتایج تحقیق نشان داد که روش تقویت ترکیبی کارآمدتر بوده و منجر به افزایش بیشتر مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها، در مقایسه با ستون‌های بتن مسلح فقط تقویت شده با روش NSM و یا فقط محصور شده با CFRP می‌گردد.

یوسف السلوم و همکاران در سال ۲۰۱۸ تحقیقاتی در خصوص اثر

روش پوشش سطح خارجی سازه‌های بتنی با استفاده از الیاف پلیمری مسلح کننده (FRP)^۱ از اواسط دهه ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفت. امروزه پروژه‌هایی که در سرتاسر جهان از این روش استفاده می‌کنند از تعداد محدود در دهه ۱۹۸۰، به هزاران پروژه رسیده است. اعضای سازه‌ای که با سیستم FRP به صورت خارجی قابل پوشش هستند شامل انواع تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارها، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبد‌ها، تونل‌ها، سیلواها، لوله‌ها و خرپاها می‌باشد. سیستم پوشش خارجی با FRP همچنین برای تقویت سازه‌های با مصالح بنایی، چوبی، فولادی و چدنی استفاده شده است. استفاده از این روش جهت مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی در ابتدا از اروپا و کشور ژاپن توسعه یافته است [۲].

استفاده از روش FRP برای مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح اولین بار در دهه ۱۹۸۰ به عنوان یک روش اضافه جهت مقاوم‌سازی در کشور ژاپن مورد استفاده قرار گرفت [۲]. پس از آن به کارگیری کامپوزیت‌های FRP جهت مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح در برابر بارگذاری زلزله و سایر بارها گسترش فراوانی داشته است. همچنین تحقیقات و پژوهش‌های علمی زیادی نیز در این خصوص صورت پذیرفته است.

پروین و جاموال در سال ۲۰۰۶ اثر ضخامت و زاویه الیاف FRP و همچنین مقاومت بتن را در مقاوم‌سازی ستون‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود بررسی کردند [۳]. بارگذاری بر روی اعضا به صورت محوری انجام شد. زاویه کامپوزیت‌های FRP نسبت به محیط نمونه‌ها ۰ و ۱۵ و ۱۵- درجه در نظر گرفته شد. نتایج افزایش قابل توجهی در مقاومت فشاری محوری و شکل‌پذیری در نمونه‌های محصور شده با FRP نسبت به نمونه‌های فاقد تقویت خارجی نشان داد. همچنین افزایش ضخامت کامپوزیت‌ها باعث افزایش مقاومت محوری و شکل‌پذیری ستون‌های بتنی گردید. افزایش باربری محوری در ستون‌های بتنی دورپیچ شده با FRP‌های تحت زاویه صفر درجه، بالاتر بود.

در سال ۲۰۱۶ تحقیقاتی توسط لیوجین و همکاران با هدف بررسی اثر اندازه در ستون‌های بتن مسلح کوتاه که تحت بارگذاری خارج از مرکز قرار داشتند، به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام

^۱- Glass Fiber Reinforced Polymer

^۴- Near Surface Mounted

^۱- Fiber Reinforced Polymer

^۲- Carbon Fiber Reinforced Polymer

در سال ۲۰۲۱ علی، رضا و عامر رافیکو تحقیقاتی به صورت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری در خصوص مقاوم‌سازی ستون‌های بتن بازیافتی، با استفاده از FRP انجام دادند [۱۰]. نتایج بدست آمده از تحقیق نشان داد که شکل‌پذیری ستون‌های مقاوم‌سازی شده با FRP بیش از ستون‌های بتن مسلح می‌باشد. بتن بازیافتی توان باربری مناسبی از خود نشان داد. به طوری که با محصور کردن پیرامون ستون‌ها می‌توانند برای ساخت اعضای سازه‌ای کاربرد داشته باشند.

ژانگ ژیان‌لی و همکاران در سال ۲۰۲۱ مطالعاتی در خصوص ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت FRP تحت بار انفجار انجام دادند [۱۱]. ایشان با توجه به هزینه و محدودیت در انجام آزمایشات انفجار، حالتی از برنامه اجزای محدود جهت مدل‌سازی ستون‌های تحت بارگذاری انفجار ارائه دادند. نتایج نشان داد انطباق خوبی بین آزمایشگاه و مدل‌سازی‌ها وجود دارد به طوری که می‌توان از این مدل نرم‌افزاری جهت شبیه‌سازی ستون‌های مقاوم‌سازی شده با FRP تحت بارگذاری انفجار استفاده نمود.

با بررسی مطالعات گذشته مشخص می‌گردد غالب تحقیقات انجام شده در زمینه مقاوم‌سازی ستون‌ها، با استفاده از کامپوزیت‌های FRP در راستای محور عرضی ستون می‌باشد. همچنین غالباً بارگذاری به صورت محوری بر نمونه‌ها اعمال می‌گردد. البته در برخی موارد استفاده توأمان از کامپوزیت‌های طولی و عرضی نیز بررسی گردیده است ولیکن در خصوص ستون بتن مسلح تقویت شده با کامپوزیت‌های FRP در جهات متغیر و تحت بارخارج از محور تحقیقات نادری انجام شده است.

متغیرهای تحقیق زاویه الیاف FRP نسبت به محور عرضی ستون، و میزان خروج از مرکزیت بار می‌باشد. با افزایش خروج از مرکزیت بار، لنگر وارد شده بر عضو افزایش یافته و رفتار ستون به رفتار تیر نزدیک می‌شود و لذا اثرگذاری کامپوزیت‌ها با الیاف در راستای طول ستون افزایش می‌یابد، بنابراین یکی از اهداف این پژوهش ارائه جهت مناسب الیاف FRP برای تقویت ستون‌ها، در هر حالت از خروج از مرکزیت بار می‌باشد.

۲- معرفی ستون‌های بتن مسلح جهت مدل‌سازی

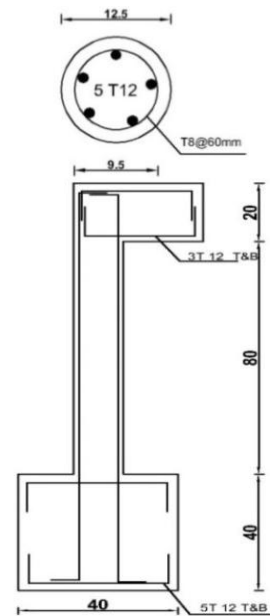
ستون‌های مورد استفاده در این تحقیق دارای مقطع دایره با قطر ۱۲۵ و ارتفاع خالص ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشند. که با استفاده از ۵ عدد

مقاوم‌سازی ستون‌های لاغر با FRP، در بارگذاری فشاری خارج از محور انجام دادند [۴]. در اولین طرح تقویت، یک لایه ورق کربن (CFRP) در راستای محور عرضی عضو به ستون‌ها متصل شد. در طرح تقویت دیگر، در ابتدا دو لایه ورق CFRP که جهت الیاف آن در راستای عمود بر محور عرضی ستون بود، به نمونه‌ها متصل گردید. سپس یک لایه از ورق CFRP با الیاف در راستای عرضی به صورت سرتاسری، روی دو لایه قبلی به ستون اضافه شد. نتایج اصلی حاصل از این مطالعه مشخص کرد که الیاف عرضی CFRP نه تنها تغییر شکل ستون‌های بتن مسلح را در جهت عرضی محدود می‌کند بلکه موجب پشتیبانی جانبی از CFRP طولی نیز می‌گردد، که در نتیجه باعث افزایش باربری ستون می‌شود. الیاف طولی نیز در هنگام خمش نمونه‌ها با رفتار کششی خود باعث افزایش باربری ستون می‌گردد.

در سال ۲۰۱۸ زنگ و همکاران مطالعات آزمایشگاهی در زمینه مقاوم‌سازی ستون‌های بتن مسلح مقیاس بزرگ با FRP تحت بارگذاری محوری انجام دادند [۵]. ضخامت کامپوزیت FRP، مقاومت فولاد و بتن و شعاع انحنای کنج نمونه‌ها، متغیرهای اصلی آزمایش بودند. نتایج تحقیق نشان داد که مقاومت فشاری و کرنش نهایی با افزایش نسبت شعاع انحنای کنج و یا ضخامت ژاکت FRP، افزایش می‌یابد. همچنین مقاومت فشاری بتن در یک ستون بتنی غیرمسلح با ابعاد بزرگ، پایین‌تر از استوانه بتنی استاندارد می‌باشد. جیان لین و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیقات آزمایشگاهی بر روی هشت نمونه ستون بتن مسلح مستطیلی بزرگ مقیاس انجام دادند [۶]. متغیرهای تحقیق عبارت بودند از: خروج از مرکزیت بار، جهت ایجاد خمش در مقطع، و ضخامت FRP. آنها دریافتند که محبوس کردن ستون‌ها با FRP، هم شکل‌پذیری و هم توان باربری ستون‌ها را افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش خروج از مرکزیت بار، نیروی محوری نهایی قابل تحمل نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

نادیم و همکاران در سال ۲۰۲۰ تحقیقاتی را بر روی ستون‌های بتن مسلح مربعی با نسبت‌های لاغری متفاوت انجام دادند [۹]. نمونه‌ها با کامپوزیت FRP بصورت طولی و بست‌های حلقه‌ای تقویت شده و تحت خروج از مرکزیت ۲۵ میلی‌متر، به صورت یکنواخت بارگذاری شدند. آنها دریافتند که اثر بست‌های FRP در ستون‌های لاغر به صورت افزایش شکل‌پذیری و در ستون‌های کوتاه به صورت افزایش مقاومت می‌باشد.

میلگرد طولی و خاموت‌های منقطع دایره‌ای تسلیح فولادی شده‌اند. شکل (۱) نمای کلی از مشخصات مقطع طولی و عرضی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمای کلی از مقطع طولی و عرضی نمونه‌ها

با توجه به اینکه حداقل تعداد آرماتورهای طولی در مقاطع دایره‌ای با خاموت منقطع ۴ عدد و درصد فولاد طولی مقطع بین ۱ تا ۸ درصد می‌باشد [۱]، بنابراین تعداد ۵ عدد میلگرد با قطر ۱۲ میلی‌متر به عنوان میلگرد طولی و همچنین میلگرد با قطر ۸ میلی‌متر با فواصل ۶۰ میلی‌متر برای تنگ‌های عرضی در نظر گرفته شد. جهت اعمال بار خارج از مرکز، در قسمت فوقانی ستون، تیر طره با عرض ۱۲۵ ارتفاع ۲۰۰ و طول ۵۰۰ میلی‌متر که با ۶ عدد میلگرد قطر ۱۲ میلی‌متر مسلح شده است (۳ عدد بالا و ۳ عدد در پایین مقطع)، قرار داده شد. محل اعمال بار و اندازه گیری جابجایی نقطه p در شکل (۲) می‌باشد. همچنین فونداسیون با ابعاد ۴۰۰×۴۰۰×۴۰۰ میلی‌متر، که با ۱۰ عدد آرماتور به قطر ۱۲ میلی‌متر (۵ عدد در بالا و ۵ عدد در پایین مقطع) مسلح شده است، در قسمت تحتانی ستون اجرا شد. با در نظر گرفتن متغیرهای جهات الیاف FRP و همچنین میزان خروج از مرکزیت بار، ۱۰ نمونه نرم‌افزاری مدل‌سازی گردید که مشخصات آنها در جدول (۱) تشریح شده است. شکل (۲) شمای کلی از نمونه نرم‌افزاری را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات نمونه‌های مدل‌سازی شده

نام اختصاری نمونه‌ها	زاویه الیاف نسبت به عرض ستون (درجه)	میزان خروج از مرکزیت بار (e) (شعاع مقطع)
2RUN	-	۲ برابر
2R-0-0	۰ و ۰	۲ برابر
2R-0-90	۹۰ و ۰	۲ برابر
2R-90-90	۹۰ و ۹۰	۲ برابر
2R-45-45	۴۵ و -۴۵	۲ برابر
4RUN	-	۴ برابر
4R-0-0	۰ و ۰	۴ برابر
4R-0-90	۹۰ و ۰	۴ برابر
4R-90-90	۹۰ و ۹۰	۴ برابر
4R-45-45	۴۵ و -۴۵	۴ برابر

عرضی ستون می‌باشد. برای مثال نمونه 2R-0-90 یعنی ستون بتن مسلح تحت بار گذاری با خروج از مرکزیت به مقدار دو برابر شعاع ستون، که با دولایه FRP با جهات الیاف ۰ و ۹۰ درجه نسبت به محور عرضی ستون تقویت شده است. علاوه بر دولایه کامپوزیت سرتاسری، در بالا و پای ستون یک لایه کامپوزیت اضافه با عرض

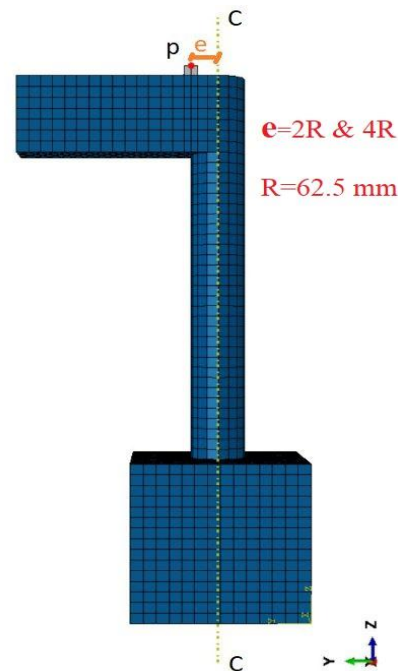
علامت اختصاری UN (unstrengthened) برای ستون‌های بدون تقویت بیان شده است. همچنین حرف R (Radius) به معنی اندازه شعاع مقطع ستون می‌باشد. در نام گذاری نمونه‌ها، عدد قبل از R نشان دهنده میزان خروج از مرکزیت بار و اعداد بعد از آن نیز نمایانگر جهات الیاف هر لایه کامپوزیت نسبت به محور

۳- راستی آزمایشی مدل عددی

برای اثبات صحت مدل سازی ها با نرم افزار Abaqus، از ایجاد مدل نرم افزاری نمونه های یک تحقیق آزمایشگاهی که توسط محققین دیگر انجام گردیده، استفاده شده است [۶]. مقایسه نتایج نمونه های آزمایشگاهی و نمونه های نرم افزاری نشان دهنده صحت مدل سازی ها می باشد. نمونه مورد آزمایش، یک ستون بتن مسلح با مقطع مستطیل به ابعاد 290×435 میلی متر و با ارتفاع 1300 میلی متر می باشد. جهت آرماتور گذاری طولی از 10 عدد میلگرد آجدار سایز 20 استفاده شده است. آرماتورهای عرضی به صورت تنگ و دارای سایز 8 میلی متر می باشند که در ابتدا و انتهای ستون با فاصله 100 میلی متر و در قسمت میانی ستون با فاصله 300 میلی متر از یکدیگر قرار گرفته اند. شکل (۳) مقطع طولی و عرضی نمونه های آزمایشگاهی جهت صحت سنجی مدل سازی نرم افزاری را نشان می دهد.

نمونه اول مورد آزمایش با نام R0Le50 فاقد تقویت خارجی می باشد. نمونه دوم R3Le50 نام گذاری شده است که با استفاده از سه لایه کامپوزیت FRP به ضخامت $0/34$ (جمع ضخامت سه لایه $1/02$) میلی متر تقویت شده است. بار گذاری در هر دو نمونه دارای خروج از مرکزیت در جهت بعد بزرگتر مقطع و به میزان 50 میلی متر می باشد. جدول (۳) مشخصات نمونه های آزمایشگاهی استفاده شده جهت بررسی صحت مدل سازی را نشان می دهد [۶].

10 سانتی متر (به صورت بست) به نمونه ها متصل شده است.



شکل ۲- شمای کلی از نمونه نرم افزاری

۱-۲- مشخصات مکانیکی مصالح

در این تحقیق سه مصالح بتن، فولاد به شکل آرماتور و کامپوزیت FRP از جنس کربن (CFRP) استفاده شده است. مشخصات مصالح در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح

اندازه (mm)	مقاومت (MPa)	ضریب پوآسون	ضریب ارتجاعی (MPa)	جرم واحد حجم (gr/cm^3)	
-	مقاومت فشاری = ۳۵	۰/۱۷	$10^5 \times 0/295804$	۲/۵	بتن
طولی = سایز ۱۲	مقاومت تسلیم = ۳۴۰	۰/۳	$2/1 \times 10^5$	۷/۸۵	فولاد
عرضی = سایز ۸	مقاومت نهایی = ۵۰۰	۰/۲۱۶	$2/3 \times 10^5$	۲/۲	CFRP
ضخامت = ۰/۱۱۱	مقاومت کششی = ۴۲۵۰				

جدول ۳- مشخصات نمونه های آزمایشگاهی [۶]

نام نمونه	بعد بزرگ مقطع (mm)	بعد کوچک مقطع (mm)	ضخامت سه لایه FRP	خروج از مرکزیت بار (mm)
فاقد تقویت R0Le50	۴۳۵	۲۹۰	/	۵۰
تقویت شده R3Le50	۴۳۵	۲۹۰	۳	۵۰

۱-۳- مدل سازی عددی نمونه های آزمایشگاهی

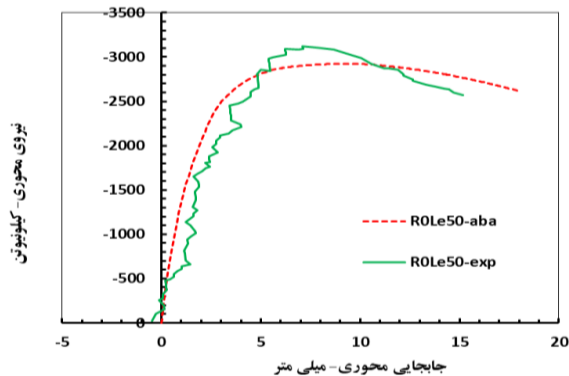
ابتدا نمونه آزمایشگاهی فاقد تقویت (R0Le50)، با استفاده از نرم افزار اجزای محدود Abaqus مدل سازی شد و نتایج آن ثبت گردید. در مرحله بعد بر روی همان نمونه اول، سه لایه تقویت

شکل (۵) منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه فاقد تقویت R0Le50 را در دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌گردد رفتار نمونه از نقطه شروع بارگذاری تا لحظه گسیختگی در هر دو حالت یکسان می‌باشد. نیروی ماکزیمم قابل تحمل نمونه در حالت آزمایشگاهی حدود ۳۱۲۰ کیلونیوتن و در حالت نرم افزاری در حدود ۲۹۵۰ کیلونیوتن می‌باشد. بنابراین اختلاف بین نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم افزاری بسیار کم و در حدود ۶ درصد می‌باشد. همچنین شکل (۶) نیز منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه R3Le50 را در حالت‌های آزمایشگاهی و نرم- افزاری نشان می‌دهد. به علت خروج از مرکزیت اعمال شده و مقاوم سازی عضو با سه لایه کامپوزیت FRP، پیچیدگی مسئله نسبت به نمونه فاقد تقویت بیشتر می‌باشد. رفتار این نمونه نیز در حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری مشابه هم می‌باشد. نیروی ماکزیمم قابل تحمل عضو در آزمایشگاه ۴۱۵۰ کیلونیوتن و در حالت نرم افزاری ۳۹۸۰ کیلونیوتن می‌باشد که اختلاف بین آنها حدود ۵ درصد است.

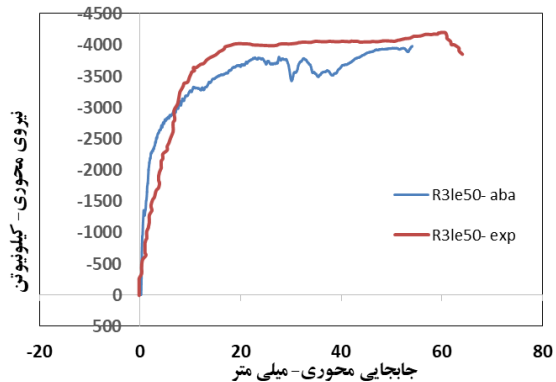
خارجی با کامپوزیت FRP اضافه شد و نمونه نرم افزاری دوم (R3Le50) ایجاد گردید. تمام مشخصات ظاهری نمونه‌های نرم افزاری و همچنین مشخصات مربوط به مصالح و شرایط بارگذاری کاملاً منطبق بر شرایط آزمایشگاهی مدل سازی، تحلیل و اجرا شد.



شکل ۳- جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی جهت راستی آزمایی مدل‌های نرم افزاری [۶]

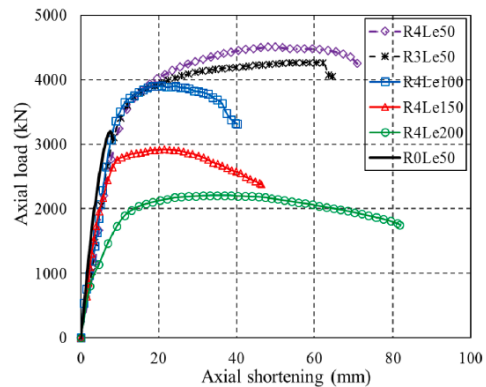


شکل ۵- منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه R0Le50 در دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری



شکل ۶- منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه R3Le50 در دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری

برای اثبات صحت مدل سازی نرم افزاری، مقایسه و انطباق منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم افزاری انجام شد. اعداد مربوط به این منحنی برای هر دو نمونه از نرم افزار استخراج گردید. از طرفی با توجه به شکل (۴) که منحنی‌های مربوط به نمونه‌های آزمایشگاهی را نمایش می‌دهد، اعداد مربوط به محور X و Y این نمونه‌ها با استفاده از نرم افزار plot digitizer استخراج گردید. سپس اعداد نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری هر نمونه بر روی یک نمودار با یکدیگر مقایسه شد.



شکل ۴- منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه‌های آزمایشگاهی موجود [۶]

با بررسی و مقایسه نتایج حاصل از نمونه‌های آزمایشگاهی و نرم-افزاری، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از نرم-افزار Abaqus از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود اختلاف بین نتایج در دو حالت کم بوده که نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی‌ها می‌باشد.

جدول ۴- نتایج مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری و آزمایشگاهی

نام نمونه	f_e (KN)	f_a (KN)	f_e/f_a	d_e (mm)	d_a (mm)	d_e/d_a
R0Le50	۳۱۲۰	۲۹۵۰	۱/۰۶	۱۵/۲	۱۷/۵	۰/۸۷
R3Le50	۴۱۵۰	۳۹۸۰	۱/۰۵	۶۱/۵	۵۴/۷	۱/۱۲

۴- مدل‌سازی عددی نمونه‌های تحقیق

راستای عرضی ستون نزدیک‌تر باشد اثر مقاوم‌سازی بیشتر است [۱۲]. زمانی که بارگذاری خارج از مرکز به نمونه‌ها وارد شود برخلاف بارگذاری محوری، لنگر خمشی نیز در عضو به وجود می‌آید. در نتیجه در قسمت‌هایی از ستون در راستای طولی کشش ایجاد می‌گردد. در این حالت کامپوزیت‌های با راستای غیر از عرض ستون نیز با مقاومت کششی خود در افزایش توان باربری و شکل‌پذیری نمونه‌ها اثرگذار خواهند بود.

برای نمونه‌های بارگذاری شده تحت خروج از مرکزیتی به اندازه دوبرابر شعاع، ۵ ستون بتن مسلح مدل‌سازی شد. نمونه اول ستون بتن مسلح فاقد هرگونه تقویت خارجی با نام 2RUN می‌باشد. که پس از تحمل نیرویی در حدود ۵۸/۹ کیلونیوتن دچار گسیختگی شده است. سایر نمونه‌های مدل‌سازی شده در این گروه، دارای تقویت خارجی با دولایه کامپوزیت FRP می‌باشند. که جهت الیاف لایه‌های کامپوزیت متغیر است. در نمونه 2R-0-0 الیاف هردولایه FRP در راستای محور عرضی ستون تعبیه شده اند. حداکثر نیروی قابل ستون در این حالت در حدود ۷۹ کیلونیوتن می‌باشد. نمونه 2R-0-90 نیز با دولایه کامپوزیت بصورت سرتاسری تقویت شده است که در این حالت راستای الیاف یکی از کامپوزیت‌ها در جهت عرض ستون و کامپوزیت دیگر عمود بر محور عرضی ستون می‌باشد. نیروی قابل تحمل این نمونه نیز در حدود ۷۶/۴ کیلونیوتن می‌باشد. نمونه 2R-90-90 همان‌طور که از نام آن مشخص می‌باشد، با دو لایه کامپوزیت با الیاف در راستای عمود بر محور عرضی ستون تقویت شده است. نیروی قابل تحمل این نمونه در حدود ۶۹/۴ کیلونیوتن می‌باشد. آخرین نمونه

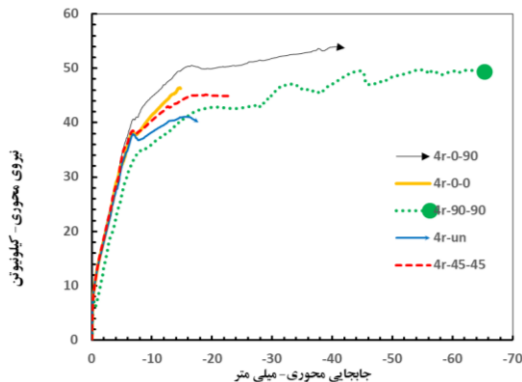
ابتدا نمونه‌های تحقیق با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus ایجاد شدند. سپس مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده به نمونه‌ها اعمال گردید. جهت جلوگیری از تمرکز تنش، حلقه‌ای از کامپوزیت‌های مورد استفاده با پهنای ۱۰۰ میلی‌متر در دو انتهای ستون متصل شد. همچنین جهت اعمال کامل بار در نقاط مورد نظر، یک صفحه فولادی صلب در محل بارگذاری متصل گردید. نحوه بارگذاری به صورت اعمال جابجایی در نقاط دارای خروج از مرکزیت مشخص و به صورت یکنواخت تعریف گردید. در مرحله بعد مش‌بندی و تجزیه و تحلیل نمونه‌ها انجام شد. شکل (۲) شمای کلی از نمونه مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.

در نمونه‌هایی که فاقد تقویت خارجی هستند، معیار انهدام ستون شکستگی بتن می‌باشد. در نمونه‌های تقویت شده با FRP، با توجه به این که FRP به طور کامل و سرتاسری بتن را محصور کرده است، بنابراین مقاومت و کرنش نهایی بتن بسیار افزایش یافته و بتن می‌تواند مقاومت‌های بسیار بالاتر از حد نهایی یا کرنش پلاستیک بالاتر از کرنش ماکزیمم را تحمل کند بدون آن که گسیخته گردد. همین امر برای فولاد هم حاکم خواهد بود و فولادهای طولی و عرضی می‌توانند تنش‌ها و کرنش‌های بالاتر از حد نهایی خود را تحمل کنند [۲]. در این حالت انهدام نمونه‌ها به علت گسیختگی FRP است.

۴-۱- مدل‌سازی نمونه‌های با خروج از مرکزیت 2R

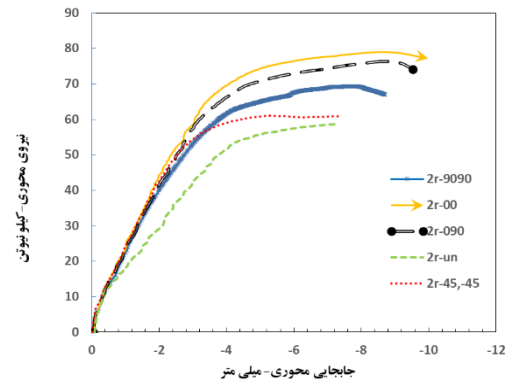
در بارگذاری محوری هرچه امتداد الیاف لایه‌های کامپوزیت به

گردید، ستون 4R-45-45 می باشد. جهات الیاف کامپوزیت ها در این حالت +45 و -45 درجه نسبت به محور عرضی ستون می باشد. حداکثر نیروی قابل تحمل این نمونه نیز 45 کیلونیوتن بود. شکل (8) منحنی های نیرو- تغییر مکان نمونه های با خروج از مرکزیت 4R را نشان می دهد.



شکل 8- منحنی های نیرو- تغییر مکان نمونه های گروه 4R

این گروه 2R-45-45 است که در آن ستون بتن مسلح توسط دو لایه FRP با الیاف در راستای +45 و -45 درجه نسبت به محور عرضی ستون دورپیچ شده است. نیروی قابل تحمل نمونه در این حالت در حدود 61 کیلونیوتن می باشد. شکل (7) منحنی نیرو- تغییر مکان را برای 5 نمونه این گروه نشان می دهد.



شکل 7- منحنی نیرو- تغییر مکان نمونه های گروه 2R

جدول (5) نتایج حاصل از مدل سازی ها را نشان می دهد. این نتایج مربوط به حداکثر نیروی قابل تحمل و همچنین تغییر مکان محوری معادل با نیروی حداکثر برای هر یک از نمونه ها می باشد

جدول 5- نتایج مدل سازی ها

نام نمونه	حداکثر نیروی قابل تحمل (KN)	حداکثر جابجایی محوری قابل تحمل (mm)
2RUN	58/9	7/2
2R-0-0	79	10
2R-0-90	76/4	9/5
2R-90-90	69/4	8/7
2R-45-45	61	7/5
4RUN	41	15/5
4R-0-0	46/3	14/5
4R-0-90	53/9	42
4R-90-90	49/8	65
4R-45-45	45	23

5- تشریح و تفسیر مدل سازی ها

در این بخش با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (5) به بررسی رفتار نمونه های بررسی شده تحت اثر خروج از مرکزیت و جهات مختلف الیاف پرداخته می شود. همانطور که گفته شد در

4-2- مدل سازی نمونه های با خروج از مرکزیت 4R

با افزایش خروج از مرکزیت بار رفتار نمونه ها به رفتار تیر نزدیک می شود به طوری که با ایجاد خمش های بزرگ در نمونه ها، سمت خارج از بار دچار کشش های بزرگتر می گردد. در این حالت نیز 5 نمونه نرم افزاری مدل سازی شد که یک نمونه فاقد تقویت خارجی بوده و 4 نمونه بعدی با دولایه کامپوزیت FRP به صورت سرتاسری دورپیچ شده اند. نمونه 4RUN ستون بتن مسلح فاقد تقویت خارجی می باشد. این ستون پس از تحمل نیروی 41/5 کیلونیوتن دچار گسیختگی شد. نمونه 4r-0-0 که با استفاده دولایه FRP در جهت عرضی ستون تقویت شده است، حداکثر نیروی 46/3 کیلونیوتن را تحمل نموده و با گسیختگی کامپوزیت منهدم گردید.

بیشترین نیروی قابل تحمل در این گروه مربوط به نمونه 4R-0-90 و در حدود 53/9 کیلونیوتن می باشد. یکی دیگر از نمونه های این گروه، ستون 4R-90-90 می باشد که با دولایه FRP در راستای عمود بر محور عرضی ستون مقاوم سازی شده است. حداکثر نیروی قابل تحمل در این نمونه در حدود 49/8 کیلونیوتن بود. مشاهده می شود نیروی قابل تحمل نمونه های تقویت شده با کامپوزیت های 90 درجه بیش از نمونه های دورپیچ شده در راستای صفر درجه می باشد. آخرین نمونه ای که در این گروه مدل سازی

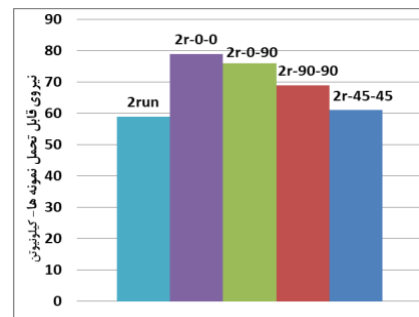
نمونه‌هایی که فاقد تقویت خارجی هستند، انهدام ستون به علت شکستگی بتن می‌باشد. اما در نمونه‌های تقویت شده با FRP، با توجه به این که FRP به طور کامل و سرتاسری بتن را محصور کرده است، انهدام نمونه‌ها به علت گسیختگی FRP می‌باشد. در نمونه‌های گروه 2R، نمونه تقویت شده با کامپوزیت‌های صفر درجه ۳۴ درصد نسبت به حالت بدون تقویت افزایش توان باربری از خود نشان داد. همچنین افزایش توان باربری در نمونه 2R-0-90 برابر با ۳۰ درصد، برای نمونه 2R-90-90 برابر ۱۸ درصد و در نمونه 2R-45-45، ۴ درصد می‌باشد. این بررسی را در نمونه‌های گروه 4R نیز می‌توان داشت. به طوری که افزایش توان باربری نمونه 4R-0-0 نسبت به حالت فاقد تقویت خارجی برابر ۱۲ درصد می‌باشد. این عدد برای نمونه 4R-0-90 عدد ۳۰ درصد و برای نمونه 4R-90-90 عدد ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین برای نمونه 4R-45-45 نیز ۸ درصد افزایش توان باربری ایجاد شده است. بدیهی است در صورت استفاده از کامپوزیت‌های با ضخامت بالاتر، افزایش مقاومت و تغییر شکل نمونه‌های تقویت شده نسبت به حالت فاقد تقویت بیشتر خواهد شد. اشکال (۹) و (۱۰) مقایسه بین نمونه‌های تقویت شده و فاقد تقویت هر گروه را نشان می‌دهد.

جدول ۶- افزایش توان باربری و جابجایی هر نمونه نسبت به حالت فاقد تقویت به ترتیب نمونه‌های با توان باربری بالاتر

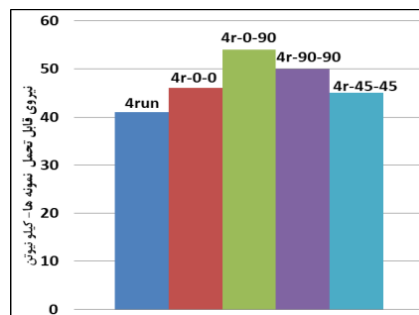
نام نمونه	F (KN)	F/F _{un}	d (mm)	d/d _{un}
نمونه‌های تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت 2R				
2R-0-0	۷۹	۱/۳۴	۱۰	۱/۳۹
2R-0-90	۷۶/۴	۱/۳	۹/۵	۱/۳۲
2R-90-90	۶۹/۴	۱/۱۸	۸/۷	۱/۲۱
2R-45-45	۶۱	۱/۰۴	۷/۵	۱/۰۴
2RUN	F _{un} =۵۸/۹	۱	d _{un} =۷/۲	۱
نمونه‌های تحت بارگذاری با خروج از مرکزیت 4R				
4R-0-90	۵۳/۹	۱/۳	۴۲	۲/۷۱
4R-90-90	۴۹/۸	۱/۲	۶۵	۴/۱۹
4R-0-0	۴۶/۴	۱/۱۲	۱۵	۰/۹۷
4R-45-45	۴۵	۱/۰۸	۲۳	۱/۴۸
4RUN	F _{un} =۴۱/۵	۱	d _{un} =۱۵/۵	۱

در ستون‌های تقویت شده با بیش از یک لایه کامپوزیت FRP، که تحت بارگذاری کاملاً محوری قرار گرفته باشند، مؤثرترین جهات الیاف FRP در راستای محور عرضی ستون است. به طوری

نمونه‌هایی که فاقد تقویت خارجی هستند، انهدام ستون به علت شکستگی بتن می‌باشد. اما در نمونه‌های تقویت شده با FRP، با توجه به این که FRP به طور کامل و سرتاسری بتن را محصور کرده است، انهدام نمونه‌ها به علت گسیختگی FRP می‌باشد. در نمونه‌های گروه 2R، نمونه تقویت شده با کامپوزیت‌های صفر درجه ۳۴ درصد نسبت به حالت بدون تقویت افزایش توان باربری از خود نشان داد. همچنین افزایش توان باربری در نمونه 2R-0-90 برابر با ۳۰ درصد، برای نمونه 2R-90-90 برابر ۱۸ درصد و در نمونه 2R-45-45، ۴ درصد می‌باشد. این بررسی را در نمونه‌های گروه 4R نیز می‌توان داشت. به طوری که افزایش توان باربری نمونه 4R-0-0 نسبت به حالت فاقد تقویت خارجی برابر ۱۲ درصد می‌باشد. این عدد برای نمونه 4R-0-90 عدد ۳۰ درصد و برای نمونه 4R-90-90 عدد ۲۰ درصد می‌باشد. همچنین برای نمونه 4R-45-45 نیز ۸ درصد افزایش توان باربری ایجاد شده است. بدیهی است در صورت استفاده از کامپوزیت‌های با ضخامت بالاتر، افزایش مقاومت و تغییر شکل نمونه‌های تقویت شده نسبت به حالت فاقد تقویت بیشتر خواهد شد. اشکال (۹) و (۱۰) مقایسه بین نمونه‌های تقویت شده و فاقد تقویت هر گروه را نشان می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه‌های 2R

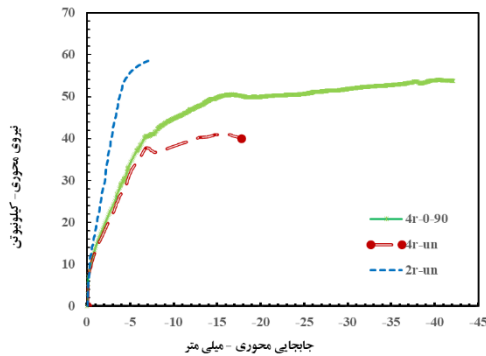


شکل ۱۰- مقایسه حداکثر نیروی قابل تحمل نمونه‌های 4R

از دیگر موضوعات با اهمیت در این تحقیق، مناسبترین زاویه الیاف کامپوزیت FRP جهت افزایش توان باربری نمونه‌ها در هر یک از

مشخص است، آهنگ افزایش توان باربری و تحمل جابجایی در نمونه‌های تقویت شده با الیاف ۹۰ درجه نسبت به صفر درجه، با افزایش خروج از مرکزیت بار، افزایش می‌یابد.

با افزایش خروج از مرکزیت بار، توان باربری محوری نهایی ستون‌ها کاهش می‌یابد [۶]. همانطور که در جدول (۵) و شکل (۱۱) نیز مشخص است، نمونه فاقد تقویت گروه 4R، ۴۱/۵ کیلونیوتن توان باربری دارد که حدود ۱/۴۲ برابر کمتر از نمونه 2RUN می‌باشد. در نمونه‌های گروه 4R بالاترین توان باربری مربوط به نمونه 4R-0-90 با عدد ۵۳/۹ کیلونیوتن است. در حالی که در گروه 2R حتی نمونه فاقد تقویت 2RUN با تحمل بار ۵۸/۹ کیلونیوتن، باربری محوری بالاتری نسبت به 4R-0-90 دارد که نشان دهنده اثر خروج از مرکزیت بار در کاهش توان باربری ستون می‌باشد.



شکل ۱۱- کاهش توان باربری ستون با افزایش خروج از مرکزیت بار

در اشکال (۷) و (۸) و جدول (۶) مشخص می‌باشد که در گروه 4R افزایش جابجایی قابل تحمل نمونه‌ها نسبت به حالت بدون تقویت به ترتیب ۴/۱۹، ۲/۷۱، ۱/۴۸ و ۰/۹۷ برابر می‌باشد. در حالی که در گروه 2R برای این نسبت به ترتیب اعداد ۱/۳۹، ۱/۳۲، ۱/۲۱ و ۱/۰۴ را داریم. در واقع شکل پذیری نمونه‌ها نسبت به حالت فاقد تقویت، در گروه 4R چند برابر بالاتر از گروه 2R می‌باشد. از سوی دیگر افزایش توان باربری نمونه‌های 4R نسبت به حالت بدون تقویت به ترتیب ۱/۳، ۱/۲، ۱/۱۲ و ۱/۰۸ برابر می‌باشد که در گروه 2R برای این نسبت به ترتیب اعداد ۱/۳۴، ۱/۳، ۱/۱۸ و ۱/۰۴ را داریم. در واقع افزایش توان باربری نمونه‌ها نسبت به حالت فاقد تقویت، در گروه 2R بیش از گروه 4R می‌باشد. ولذا می‌توان گفت در خروج از مرکزیت‌های کوچک‌تر اثر مقاوم‌سازی بیشتر بصورت افزایش توان باربری و در خروج از مرکزیت‌های بالاتر

که توان باربری آنها به مقدار قابل توجهی بیش از توان باربری ستون‌های تقویت شده با الیاف عمود بر راستای عرضی نمونه می‌باشد [۱۲]. در حالی که در ستون‌های تحت بار با خروج از مرکزیت دوبرابر شعاع، توان باربری نمونه 2R-0-0 حدود ۱۲ درصد بیش از نمونه 2R-90-90 و حدود ۳ درصد بیش از نمونه 2R-0-90 می‌باشد. در واقع توان باربری نمونه‌های با الیاف صفر درجه بیشتر است. اما اختلاف بین توان باربری در هر سه نمونه نزدیک به هم می‌باشد.

در ستون‌های با بارگذاری خارج از مرکز به اندازه چهار برابر شعاع ستون، نتایج متفاوتی بدست آمده است. به طوری که مشاهده می‌گردد برخلاف نمونه‌های گروه 2R، نمونه 4R-0-0 در حدود ۷ درصد نسبت به نمونه 4R-90-90 و حدود ۱۴ درصد نسبت به نمونه 4R-0-90 توان باربری کمتری دارد. در واقع با افزایش خروج از مرکزیت بار از 2R به 4R به آرامی اثرگذاری FRP‌های با الیاف صفر درجه کاهش و بالعکس کامپوزیت‌های با الیاف ۹۰ درجه افزایش یافت. در این محدوده از خروج از مرکزیت بارگذاری، راهکار مناسب جهت مقاوم‌سازی می‌تواند استفاده از کامپوزیت‌های عمودی و افقی به صورت توأمان باشد. با مقایسه جابجایی محوری قابل تحمل در نمونه‌های گروه 4R و گروه 2R در جدول (۶) نیز نتایج مشابه به دست می‌آید. در گروه 2R تحمل جابجایی نمونه‌های تقویت شده با الیاف صفر درجه بیش از ۹۰ درجه می‌باشد به طوری که بالاترین جابجایی را نمونه 2R-0-0 به میزان ۱۰ میلی‌متر تحمل کرده است. در حالی که این موضوع در گروه 4R کاملاً برعکس است و بالاترین تحمل جابجایی مربوط به نمونه 4R-90-90 به میزان ۶۵ میلی‌متر می‌باشد.

با توجه به موضوع مطرح شده، مشخص گردید که برای مقاوم سازی ستون‌های با خروج از مرکزیت بین صفر تا حدود دوبرابر شعاع، کامپوزیت‌های با الیاف در راستای عرضی ستون اثرگذاری بیشتری دارند. اما در حالت بارگذاری با خروج از مرکزیت بین دوبرابر الی چهار برابر شعاع، استفاده از کامپوزیت‌های طولی و عرضی به صورت توأمان راهکاری مناسب می‌باشد. همچنین برای بارگذاری با خروج از مرکزیت‌های بسیار بزرگ (بیش از چهار برابر شعاع ستون) کامپوزیت‌های در راستای طول ستون موثرتر از کامپوزیت‌های عرضی می‌باشند. زیرا همانطور که در جدول (۶) نیز

گروه 4R کمتر از گروه 2R می‌باشد. و برعکس افزایش شکل-پذیری نمونه‌ها نسبت به حالت فاقد تقویت، در گروه 4t بسیار بیشتر از گروه 2R می‌باشد.

- با افزایش خروج از مرکزیت بارگذاری، توان باربری محوری نمونه‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. به طوری که توان باربری حداقل و حداکثر نمونه‌های گروه 2R در مقایسه با گروه 4R حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است.

۷- مراجع

- [1] ACI 318. "Building Code Requirements for Structural Concrete American". Concrete Institute Committee 318, (2019).
- [2] ACI 440.2R. "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures". American Concrete Institute Committee 440, (2017).
- [3] Parvin, Azadeh, S. Jamwal, Aditya. "Performance of externally FRP reinforced columns for changes in angle and thickness of the wrap and concrete strength". Composite Structures, (2006).
- [4] Yousef A. Al, Salloum, Ghaithan S. Al-Amri, Nadeem A. Siddiqui, Aff. M. ASCE, Tarek H. Almusallam, Husain, Abbas. "Effectiveness of CFRP Strengthening in Improving Cyclic Compression Response of Slender RC Columns" University of Texas, (2018).
- [5] J.J. Zeng, G. Lin, J.G. Teng, L.J. Li. "Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under axial compression" Engineering Structures, (2018).
- [6] Guan. Lin, J.J. Zeng, J.G. Teng, L.J. Li. "Behavior of large-scale FRP-confined rectangular RC columns under eccentric compression" Engineering Structures, (2020).
- [7] M. Chellapandian, S. Suriya Prakash, Akanshu Sharma. "Strength and Ductility of Innovative Hybrid NSM Reinforced and FRP Confined Short RC Columns under Axial Compression" Composite Structures, (2017).
- [8] Liu. Jin, Dong. Li, Xiuli. Du, Aizhen. Lu, and Zixing. Ding. "Experimental and Numerical Study on Size Effect in Eccentrically Loaded Stocky RC Columns" New York University, (2016).
- [9] Nadeem Siddiqui, Husain Abbas, Tarek Almusallam, Abobaker Binyahya, Yousef Al-Salloum. "Compression behavior of FRP-strengthened RC square columns of varying slenderness ratios under eccentric loading" King Saud University, (2020).
- [10] Ali Raza, Umer Rafique. "Efficiency of GFRP

اثر مقاوم‌سازی بیشتر بصورت افزایش شکل‌پذیری می‌باشد. با توجه به اینکه با افزایش خروج از مرکزیت بار از 2R تا 4R، نیروها همزمان در راستای طولی و عرضی ستون افزایش یافته و بکارگیری توامان از کامپوزیت‌های طولی و عرضی مورد نیاز می‌باشد، لذا استفاده از نمونه‌های دورپیچ شده توسط کامپوزیت-های ۴۵ درجه جهت تحمل تغییر شکل‌های وارد شده راهکاری مناسب می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

اهم نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر را می‌توان به شرح زیر جمع‌بندی کرد:

- استفاده از کامپوزیت‌های FRP به صورت دورپیچی کامل سطح خارجی ستون‌ها، به شکل قابل توجهی باعث افزایش توان باربری و شکل‌پذیری آنها می‌گردد. به طوری که افزایش توان باربری نمونه‌ها ۴ تا ۳۴ درصد و افزایش شکل‌پذیری ۴ تا ۲۷۱ درصد می‌باشد.

- با افزایش خروج از مرکزیت بار، به تدریج اثرگذاری کامپوزیت‌های عرضی در مقاوم‌سازی، کاهش و برعکس اثرگذاری کامپوزیت‌های طولی افزایش یافته است. به طوری که در گروه 2R نمونه‌های با کامپوزیت صفر درجه نسبت به ۹۰ درجه حدود ۱۴ درصد نیرو و حدود ۱۵ درصد جابجایی بیشتری تحمل کرده‌اند. اما برعکس گروه 4R نمونه‌های ۹۰ درجه نسبت به صفر درجه حدود ۷ درصد نیرو و حدود ۳۳۲ درصد جابجایی بیشتری تحمل کرده‌اند.

- استفاده از کامپوزیت‌های ۴۵ درجه راهکار نسبتاً خوبی جهت افزایش شکل‌پذیری ستون‌ها می‌باشد.

- برای خروج از مرکزیت بار بین صفر تا دوبرابر شعاع ستون استفاده از کامپوزیت صفر درجه، بین دوبرابر شعاع تا چهار برابر شعاع استفاده توامان از کامپوزیت صفر و ۹۰ درجه، و برای خروج از مرکزیت بارگذاری بسیار زیاد (بیش از ۴ برابر شعاع) استفاده از FRP‌های ۹۰ درجه راهکاری مناسب جهت مقاوم‌سازی ستون‌ها می‌باشد.

- با افزایش خروج از مرکزیت بارگذاری از حالت 2R به 4R، اثر مقاوم‌سازی به صورت افزایش توان باربری ستون‌ها کاهش و به صورت افزایش شکل‌پذیری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که افزایش توان باربری نمونه‌ها نسبت به حالت فاقد تقویت، در

bars and hoops in recycled aggregate concrete columns: Experimental and numerical study" composite structures, (2021).

[11] Zhong XianLi, XuejieZhang, YanchaoShi, ChengqingWu, JunLi. "Finite element modeling of FRP retrofitted RC column against blast loading".

[۱۲] حبیب پور، مصطفی، فرحبد. فرهنگ. "مقاوم سازی ستون-

های بتن مسلح با استفاده از کامپوزیت های FRP چند جهته "

تحقیقات بتن دانشگاه گیلان، سال هشتم، شماره دوّم، (۱۳۹۴).

The effects of FRP fiber's elongation angles on strength behavior of RC beam-columns

Mostafa Habibpour

PhD student in Civil Engineering-Structure, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Faculty of Civil Engineering and Land Resources, Department of Structural Engineering.

Jafar Asgari Marnani *

Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Faculty of Civil Engineering and Land Resources, Department of Structure.

Abolfazl Arabzadeh

Associate Professor, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil Engineering and Environment, Department of Structure.

Abbas Ghasemi

Assistant Professor, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Faculty of Civil Engineering and Land Resources, Department of Structure.

Abstract

Strengthening of RC columns using FRP composites is done with the aim of increasing bearing capacity and ductility. One common method in this case is to enclose the entire outer surface of the column with FRP. In this paper, it has been done to strengthen this columns under eccentricity axial load, with the FRP layers. The specimens used have a circular cross-section with a diameter of 125 mm and a height of 800 mm, which are loaded in two cases by eccentricity. First case, the eccentricity is twice the radius of the column (2R) and the second case the eccentricity is four times the radius of the column (4R). Due to the eccentricity of the load, parts of the column are subjected to bending tension. Ten numerical models in two groups (2R and 4R) were analyzed using Abaqus software. In order to verify the accuracy of the modeling, first two existing experimental specimens were simulated with software and then the results were evaluated. The results showed that by increasing the eccentricity of the load, the longitudinal composites are more effected than transverse composites on force bearing and displacements. Also, the fiber has been effected on ductility increasing more than force tolerance in the column. In the 2R group, specimens with transverse composite have been increased about 14% in forcing and 15% in displacement capacities than longitudinal. Conversely, in the 4R group, the above mentioned numbers in samples with longitudinal composite increased by about 7% and 332% relative to transverse.

Keywords: Reinforced concrete column, Eccentric loading, Fiber directions in FRP composites, strengthening.

* Corresponding Author: j_asgari@iauctb.ac.ir

