

بررسی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با میلگرد و صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری رفت و برگشت

احسان امیری

گروه مهندسی عمران، واحد استهبان، دانشگاه آزاد اسلامی، استهبان، ایران

محمد رضا برادران*

گروه مهندسی عمران، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران

m.baradaran@iauf.ac.ir

تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۱

چکیده:

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌های بتنی وجود دارد که هر یک بسته به شرایط مختلف می‌توانند کارآمد باشند. یکی از روش‌های کاربردی در این زمینه استفاده از مصالح کامپوزیت است. مصالح کامپوزیت دارای مزایای متعددی مانند سهولت در اجرا، دسترسی آسان، هزینه نسبتاً پایین و وزن کم می‌باشند. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهند مصالح کامپوزیت باعث بهبود عملکرد ستون‌های بتن مسلح می‌شوند. در تحقیق حاضر یک ستون بتن مسلح که تحت اثر بارهای رفت و برگشتی جانبی قرار گرفته، با استفاده از میلگرد GFRP و الیاف FRP تقویت شده است. کلیه مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای بر اساس دستورالعمل ATC24 قرار گرفته‌اند. سپس منحنی‌های پوش‌آور حاصل از تحلیل و ضریب رفتار و نسبت شکل‌پذیری آن‌ها محاسبه گردیده است. در مقاله حاضر میزان ظرفیت باربری جانبی، میزان استهلاک انرژی جذب شده، نسبت شکل‌پذیری، میزان کاهش سختی و مود شکست‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه مدل‌های مورد بررسی با نرم افزار Abaqus 2016 مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از میلگرد GFRP به همراه دورپیچ FRP در محل نزدیک به مفصل پلاستیک ستون تا ۵۳٪ مقاومت جانبی را در مقایسه با مدل معمولی افزایش و میزان شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد. همچنین استفاده از میلگردهای تقویتی NSM به تنهایی، حداکثر باعث افزایش ۳٪ ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح می‌گردد. اما ترکیب میلگردهای تقویتی NSM به همراه محصور شدگی با الیاف FRP می‌تواند حداکثر تا ۲۶٪ ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح را افزایش دهد.

کلید واژگان: مقاوم‌سازی، ستون بتنی، میلگرد GFRP، الیاف FRP، روش NSM.

۱- مقدمه

کشور ایران در منطقه‌ای زلزله خیز واقع شده است. از این رو توجه به امر مقاوم‌سازی ساختمان‌ها، تأسیسات مهم و شریان‌های حیاتی بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۱]. دلایل بسیاری می‌تواند میزان مقاومت سازه را در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله تحت تاثیر قرار دهد. بسیاری از موارد عدم بروز رسانی دانش نسبت به زمان، تغییرات آیین‌نامه‌ها، عدم اجرای صحیح و اشکالات طراحی باعث رخداد پدیده‌هایی شده است که ناچار به مقاوم‌سازی با استفاده از مصالح و روش‌های مختلف می‌شویم. همچنین اجزاء ساختمان با گذشت زمان قابلیت‌های اصلی خود را مانند پایداری، مقاومت و استحکام را از دست می‌دهند و امکان خدمت رسانی ساختمان بعد از گذشت زمان کاهش می‌یابد [۲]. از دیگر عوامل بروز خسارت ساختمان در هنگام زلزله وجود طبقه نرم می‌باشد. ساختمان‌هایی که دارای دهانه‌های آزاد در طبقات پایینی (پیلوت و پارکینگ) هستند، در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله بسیار آسیب پذیر می‌باشند. در واقع، هر اندازه که طبقه نرم ساختمان استحکام کمتر و یا انعطاف پذیری بیشتری داشته باشد تغییر شکل بیشتری در آن به وجود می‌آید [۳]. بنابراین باید توجه ویژه‌ای به ستون‌های یک ساختمان داشت تا از مقاومت کافی برخوردار باشند و از آسیب کلی به ساختمان جلوگیری شود.

مهم‌ترین عضو باربر و اصلی هر سازه‌ای ستون‌های آن می‌باشد که رخداد هرگونه نقص و یا اشکال در آن‌ها باعث خلل در ادامه عملکرد سازه می‌گردد. ستون‌های یک ساختمان جهت تحمل فشارهای وارده در راستای نیروی محوری طراحی می‌شوند از این رو اگر نیروهایی در راستای افق مانند زلزله به ساختمان وارد شوند و ستون مقاومت لازم را نداشته باشد امکان پیدایش خیز در ستون‌ها وجود دارد. از جهتی تخریب ستون بتنی که به هر دلیل دچار ضعف گردیده، غیر اقتصادی و زمان‌بر می‌باشد. در مورد ستون‌های ضعیف اکثر مشکلات مربوط به کاهش مقاومت و سختی ستون‌ها قبل از ایجاد افزایش شکل‌پذیری است. بنابراین جهت جلوگیری از تخریب باید روش‌های مقاوم‌سازی و مناسب که از نظر اقتصادی و اجرایی مقرون به صرفه باشد و عملکرد ستون را بهبود بخشد، اتخاذ نمود.

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تقویت و مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی وجود دارد که هر یک بسته به شرایط مختلف می‌توانند موثر و کارآمد باشند. یکی از روش‌های کاربردی و بسیار مفید در این زمینه استفاده از مصالح کامپوزیت در سازه‌های بتنی است [۴]. تقویت ستون‌ها با روش‌های مختلف

بویژه روش نوینی مانند مقاوم‌سازی با FRP که نسبت به سایر روش‌ها دارای مزیت‌های زیادی می‌باشد تا حدود زیادی می‌تواند از ظهور آسیب و پیشرفت آن جلوگیری کند. امروزه مقاوم‌سازی با FRP بدلیل اجرای سریع و آسان، جایگزین سایر روش‌های مقاوم‌سازی ساختمان شده است [۵]. مراحل اجرای FRP ساده‌تر از سایر روش‌های مقاوم‌سازی می‌باشد و به تجهیزات زیادی نیاز ندارد، به همین دلیل اصولاً کاربری ساختمان طی اجرای مقاوم‌سازی با FRP متوقف نمی‌شود. ضمناً استفاده از FRP در سیستم تقویت سازه سبب افزایش ابعاد ستون نمی‌شود و بنابراین مشکلی در معماری سازه بوجود نمی‌آورد. بهسازی با روش مصالح FRP تا زمانی که سازه بتنی تحت نیروی بار و پدیده‌ی تغییر شکل قرار نگرفته باشند، FRP تحت تنش قرار نمی‌گیرد و در واقع نقشی در باربری ایفا نمی‌کند و حالت انفعالی دارد. برای همین نصب و اجرای دقیق و تخصصی سیستم مقاوم‌سازی المان سازه‌ای با FRP از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است [۵]. الیاف‌های تقویتی FRP بدلیل خواص ویژه آن‌ها مانند نسبت بالای مقاومت به وزن، سختی بالا در برابر عوامل شیمیایی محیطی، آسیب پذیری پایین، عدم بروز خستگی ناشی از افزایش بار و غیره باعث جایگزینی تکنیک مقاوم‌سازی بجای روش‌های سنتی رایج در گذشته می‌گردد. الیاف FRP علی‌رغم داشتن وزنی بسیار ناچیز در حدود ۲۰ درصد وزن فولاد عموماً مقاومتی حدود ۲ الی ۵ برابر آن دارد. الیاف تقویتی FRP باید علاوه بر مقاوم‌سازی سازه سبب بهبود عملکرد سازه نیز گردد که تاکنون تحقیقات نشان داده استفاده از الیاف تقویتی FRP رفتار سازه را نیز طی عملیات مقاوم‌سازی ارتقا داده است. ضمناً اجرای FRP هیچ‌گونه اختلالی در بهره‌برداری از سازه حین مقاوم‌سازی ایجاد نمی‌کند.

۲- تقویت ستون به روش NSM

به فرآیندی که طی آن میلگردها و آرماتورها درون بتن کاشته یا تعبیه می‌شوند عملیات کاشت میلگرد نامیده می‌شود و روشی برای افزایش مقاومت برشی و خمشی عضو بتن مسلح می‌باشد. کاشت میلگرد در سطح بتن (روش NSM) کاربردهای فراوانی در مقاوم‌سازی دارد [۶]. و می‌تواند به عنوان راه حلی برای جبران کمبود مقاومت سازه‌ها، رفع نواقص ابعاد اجزای سازه یا شیوه‌ای برای الحاق یک عضو جدید به کار رود. بدین ترتیب که با برش سطح بتن، شیارهایی روی سطح المان ایجاد می‌شود، بعد از تخلیه شیار از ذرات اضافی و گرد و غبار، تا حدود نیمی از شیار با اپوکسی یا چسب پر می‌شود، سپس مصالح FRP در داخل شیار

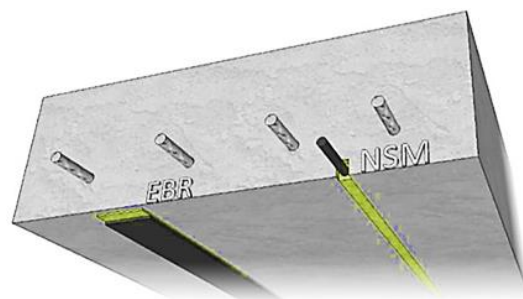
خمشی و شکل پذیری ستون‌ها خواهد شد. اما تاکنون مطالعه جامعی بر روی ترکیبی الیاف FRP با میلگردهای GFRP به روش NSM انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق برای یافتن پاسخ مجهولاتی در استفاده از این روش تقویتی مانند ضریب اضافه مقاومت، نسبت شکل پذیری، ضریب رفتار، میزان استهلاک انرژی تلاش گردید. همچنین جهت نمایش و بررسی شکست زودرس ستون ناشی از زوال چسب اپوکسی از ناحیه اتصال مصالح کامپوزیت و سطح بتن در محاسبات عددی نیز تدابیر لازم بکار گرفته شد تا نتایج بدست آمده به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد نزدیک باشد.

آ. سلیمانی کیا و همکاران در سال ۱۳۹۶ به مطالعه و مدلسازی لایه چسب به منظور پیش بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با الیاف FRP پرداختند. آن‌ها به تاثیر مستقیم افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتنی با ایجاد چند لایه الیاف FRP اشاره داشتند و همچنین اثبات کردند که مدل سازی المان چسب به نسبت قید Tie در آباکوس، اعداد خروجی را به نتیجه‌ی آزمایش نزدیک‌تر می‌کند [۳].

ج. خادمی آنسب و همکاران در سال ۱۳۹۶ به بررسی رفتار و میزان تغییر شکل ستون بتنی مسلح تقویت شده با الیاف FRP با ضخامت و تعداد لایه‌های مختلف به روش اجزا محدود در نرم افزار آباکوس پرداختند. در این تحقیق ثابت شد که استفاده از الیاف FRP در بهسازی و تقویت ستون‌ها می‌تواند میزان ظرفیت باربری سازه را به میزان قابل ملاحظه‌ای دهد اما میزان شکل‌پذیری را بالغ بر ۵۰٪ کاهش می‌دهد. در نتایج این تحقیق اذعان شده که استفاده از الیاف FRP می‌تواند نقش شایانی در کاهش آثار مخرب بارگذاری لرزه‌ای داشته باشد [۴].

ل. مینگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۹ میلادی به بررسی و تقویت ستون کتیبه‌دار بتن مسلح بوسیله الیاف FRP پرداختند. متغیرهای این تحقیق شامل تعداد الیاف FRP و تراکم آرماتورهای عرضی (خاموت) ستون می‌باشد. ابتدا مدل آزمایشگاهی با تراکم متفاوت آرماتور عرضی ساخته و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. سپس نتایج حاصل از آن با مدلسازی عددی به روش اجزا محدود در نرم افزار آباکوس مطابقت داده شد. در ادامه محاسبات عددی این تحقیق نیز به بررسی و تحلیل تقویت این ستون با الیاف FRP در یک تا چهار لایه پرداخته شد. نتایج نشان داد که به تناسب افزایش الیاف FRP از ۱ تا ۳ لایه نیز میزان شکل‌پذیری، جابجایی و میزان

قرار می‌گیرد و سرانجام نیمه دیگر شیار نیز با چسب پر می‌شود تا سطح بتن مسطح گردد. میلگردهای کامپوزیتی FRP همانند الیاف FRP دارای سه مدل میلگردهای شیشه، میلگردهای بازالت و میلگردهای کربن است که میلگردهای الیاف شیشه GFRP از لحاظ هزینه مقرون به صرفه‌تر می‌باشند. میلگرد FRP بدلیل وزن کمتری که دارند سبب سبک‌سازی ساختمان و عدم افزایش بار مرده‌ی سازه می‌شوند. ضمن اینکه میلگردهای FRP از خسارات ناشی از خوردگی و زنگ زدگی جلوگیری می‌کنند و در نواحی که نیاز به عدم وجود مشکلات الکتریکی و مغناطیسی است استفاده از آن‌ها توصیه می‌شود [۷، ۸].



شکل ۱ مقایسه و تفاوت روش NSM و روش EBR [۸]

روش NSM دارای کاستی‌هایی مانند جدا شدن میلگرد FRP، یا چسب اپوکسی به دلیل نداشتن مقاومت و عملکرد مناسب در مقابل نیروهای وارده را ممکن است داشته باشد. به همین دلیل در روش نصب در نزدیکی سطح NSM بصورت همزمان با الیاف FRP پوشش و یا جهت مقرون به صرفه بودن نیز از تکه‌های الیاف FRP در محدوده‌ی بحرانی و حساس نیز استفاده می‌شود. اخیراً مطالعه در این زمینه (ترکیب روش NSM و پوشش سطح آن با الیاف FRP) رو به افزایش است و اهمیت آن در یافتن بهترین حالت نصب در جهت بهینه‌سازی ملموس است. این روش باعث می‌شود ظرفیت باربری خمشی ستون‌ها افزایش پیدا کند اما میزان شکل‌پذیری آن‌ها کاهش می‌یابد [۹].

۳- پیشینه تحقیق

پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از الیاف FRP به روش دورپیچ در تقویت ستون‌های بتنی باعث افزایش ظرفیت باربری

³ Liu Ming

¹ Ameneh Soleymani Kia

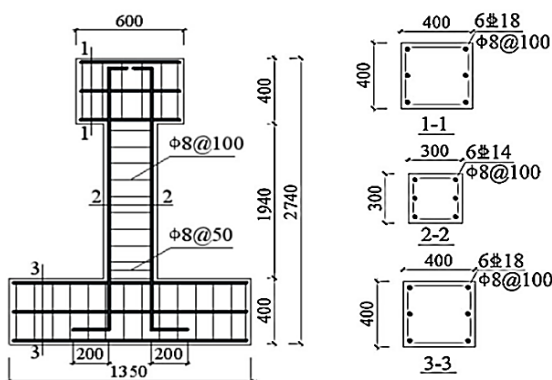
² Javad Khademi

ستون‌های بتن مسلح با ترکیب پیچش در نرم افزار آباکوس پرداخت [۱۴].

۴- روش تحقیق

۴-۱- مشخصات مدل

تحقیق حال حاضر بر اساس یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی صورت گرفته در نرم افزار آباکوس می‌باشد که در دانشگاه ژاؤ-چین در سال ۲۰۱۹ میلادی توسط مینگ^۷ و همکاران صورت گرفته است. [۱۰] مدل تحت مطالعه شامل یک ستون بتنی کتیبه‌دار (دارای سرستون) به ارتفاع کلی ۲۷۴۰ میلی‌متر می‌باشد که متشکل از یک ستون به طول ۱۹۴۰ میلی‌متر با عرض ۳۰۰*۳۰۰ میلی‌متر و همچنین یک سر ستون که دارای ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر و عرض ۴۰۰*۴۰۰ میلی‌متر است. ستون مذکور نیز از قسمت تحتانی به فنداسیون به طول ۴۰۰ و نیز عرض ۴۰۰*۴۰۰ میلی‌متر گیردار است. این ستون بوسیله ۶ میلگرد طولی با قطر ۱۴ میلی‌متر که در دو جهت قرار گرفته اند مسلح شده است. میلگردهای طولی بوسیله خاموت‌های با قطر ۸ میلی‌متر و در میانه بالای ستون در فواصل ۱۰۰ میلی‌متر و نیز در میانه پایین ستون در فواصل ۵۰ میلی‌متر نسبت به یکدیگر جایگذاری شده است. سایر ویژگی‌های مرتبط با ابعاد و اندازه مطابق با تصویر شماره ۲ می‌باشد. مدل مذکور بدون ورق تقویتی می‌باشد و جهت صحت سنجی نتایج با مقاله مرجع مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۲ جزئیات ابعاد و اندازه گذاری ستون مورد مطالعه [۱۰]

اتلاف انرژی ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش ۴ لایه الیاف FRP، نتایج و بهبود مقاومت و رفتار تاثیر چشمگیری نخواهد داشت. همچنین ثابت شد که الیاف FRP نقش موثری در تقویت ستون با ازدیاد فواصل بین خاموت‌ها دارد و می‌تواند عارضه‌های ناشی از این ضعف را جبران نماید. همچنین ثابت شد که تقویت ستون با حداکثر ۳ لایه الیاف FRP بصورت دورپیچ نیز دارای بهینه‌ترین حالت رفتار سازه‌ای و لرزه‌ای می‌باشد [۱۰].

ب. فراهی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-FRP پرداختند. در این تحقیق تعداد ۱۱ ستون بتن مسلح با ابعاد مقطع ۳۵۰*۲۰۰ میلی‌متر و طول ۳۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد. از میان این ستون‌ها، ۳ مدل بدون تقویت و ۴ مدل به وسیله روش NSM-SMA تقویت شدند و نیز ۴ مدل دیگر با میلگردهای GFRP به روش NSM-FRP تقویت شدند. مدل‌ها به صورت دو سر گیردار تحت بارگذاری‌های جانبی استاتیکی و چرخه‌ای قرار گرفتند و عوامل متعددی از جمله مقاومت، میزان جذب انرژی، قابلیت بازیابی تغییر شکل و توانایی بستن عرض ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد ستون‌های بتن مسلح تقویت شده با روش NSM-SMA تحت بار استاتیکی، تغییر مکان و سط دهانه و جذب انرژی بالاتری نسبت به سایر ستون‌ها دارند. همچنین تحت بارگذاری چرخه‌ای، ستون‌های تقویت شده به روش NSM-SMA خسارت کم تری نسبت به سایر ستون‌ها داشتند [۱۱].

ف. تنگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۸ میلادی به بررسی اثر میلگردهای کامپوزیت مدفون در سطح بتن (NSM) جهت افزایش ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح پرداختند. برای این منظور تعداد هفت مدل ستون بتن مسلح با تعداد متفاوت میلگردهای GFRP و ترکیب با دورپیچ FRP نیز بررسی شده است. همچنین بررسی مهار انتهای میلگردهای GFRP در داخل بتن بخشی از متغیرهای این تحقیق می‌باشد. مدل‌های ساخته شده، تحت بارگذاری محوری ثابت و جابجایی جانبی سیکلی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملکرد این روش در ترکیب با دورپیچ FRP باعث افزایش ظرفیت خمشی، افزایش سختی و افزایش میزان انرژی جذب شده توسط ستون‌های بتن مسلح می‌گردد [۱۲]. کاو در سال ۲۰۲۱ به بررسی رفتار

⁶ Zhaw China

⁷ Liu Ming

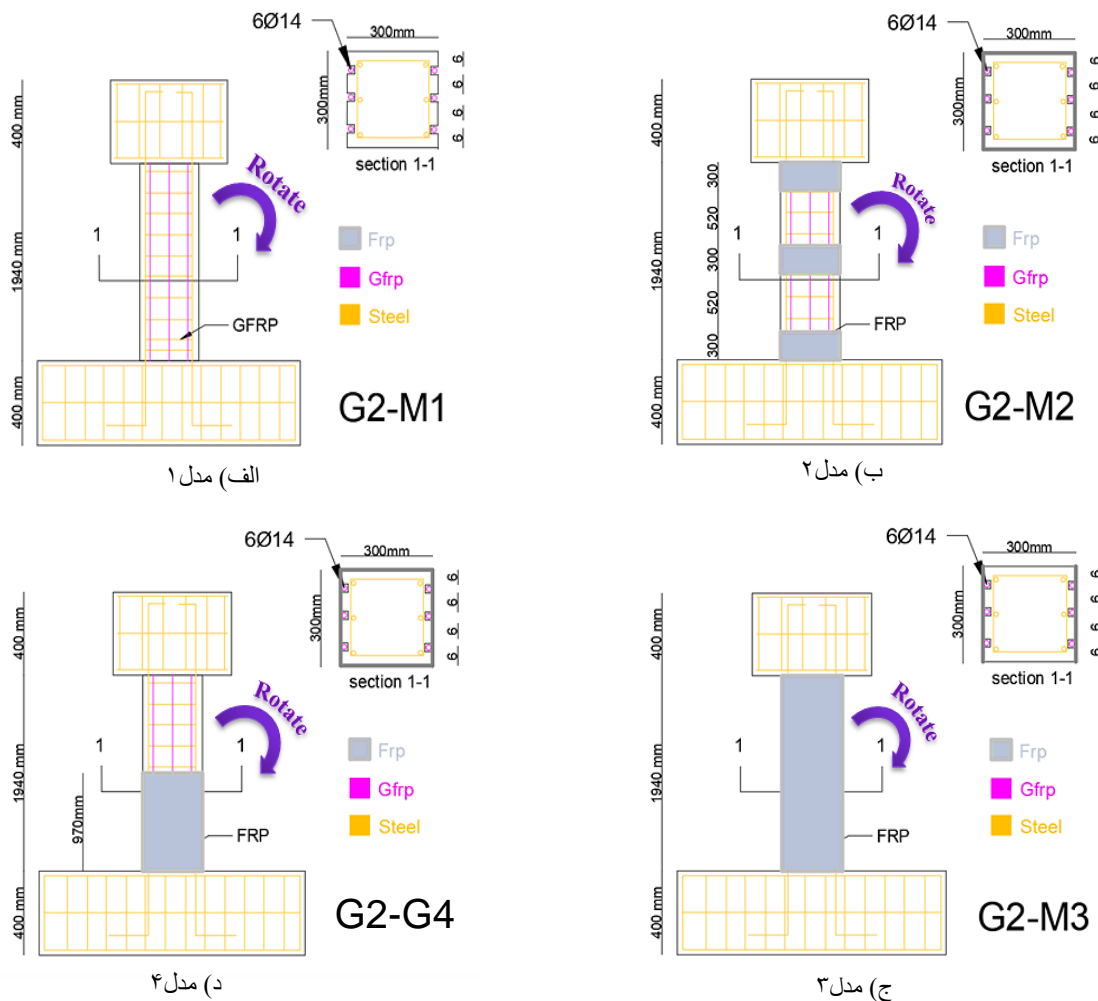
⁴ Behzad Farahi

⁵ Fei Teng

۲-۴- طرح تقویتی

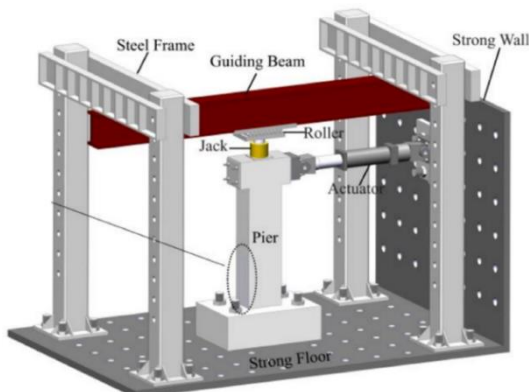
در این تحقیق جهت ادامه مطالعه مقاله مرجع نیز تلاش گردیده تا با مدل سازی در نرم افزار آباکوس و استفاده از میلگردهای FRP به روش NSM و محصورشدگی با الیاف FRP در الگوهای شکلی متفاوت نصب، بدنبال بهینه ترین حالت آن از نظر مقاومت و رفتار سازه ای مورد بررسی قرار گیرد. مدل های عددی مورد بررسی عبارتند از ۴ طرح مقاوم سازی ستون که با توجه به وضعیت محصور شونده گی متفاوت الیاف FRP در متدهای نصب متفاوت تقویت شده اند. همچنین در این تحقیق تلاش گردیده تا مدل رفتاری صحیحی از چسب اپوکسی طراحی شود تا گسیختگی زودرس که ناشی از جداسازی میلگرد FRP از سطح بتن می باشد نیز در نظر گرفته شود و جهت برطرف نمودن این عارضه از روش های متفاوت

بهره گیری گردد. این طرح مقاوم سازی با استفاده از ۶ میلگرد GFRP که در دو وجه ستون قرار گرفته است و در هر جبهه توسط سه میلگرد NSM، طرح ریزی شده است. این طرح تقویتی شامل چهار مدل می باشد که در مدل اول (شکل ۳- الف) تنها به تقویت با میلگرد NSM بسنده شده. میلگردهای GFRP با قطر ۱۴ میلیمتر توسط چسب اپوکسی نیز در درون شیارهایی به طول و عرض ۲۴ میلیمتر قرار گرفته اند. در مدل های دوم تا چهارم شکل (۳- ب الی د) از الیاف های FRP در ابعاد و حالات نصب متفاوت مطابق با شکل شماره ۳ استفاده شده است.

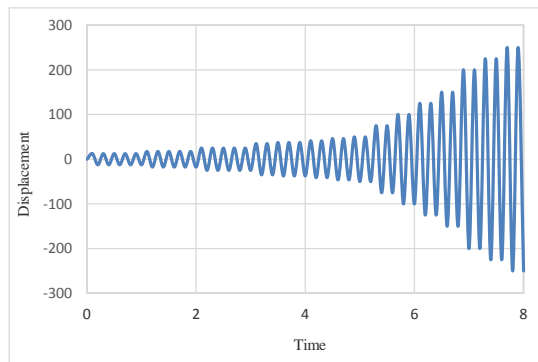


شکل ۳ جزئیات اندازه گذاری و نامگذاری مدل های تقویت شده

جابجایی) آن بصورت منظم افزایش می‌یابد و تا لحظه گسیختگی ستون و ایجاد شکست آن ادامه دارد. نیرو جانبی طی دو سیکل تکرار شونده با ضریب افزون شده تحت اثر شتاب سازه در تناوب زمانی ۰/۱ ثانیه لحاظ گردیده است. همچنین این مدل تحت اثر بار وزنی خود قرار گرفته است (میزان ثقل ۹/۸۱- مفروض است).



شکل ۴ نحوه بارگذاری بر روی ستون [۱۰]



نمودار ۱ چرخه بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده به مدل تحقیق [۱۰]

۴-۵- تحلیل

در این تحقیق برای استخراج نمودار هیستریزس و در ادامه آن منحنی پوش آور از تحلیل استاتیکی غیر خطی استفاده شده است [۱۳]. نتایج این تحلیل جهت ترسیم نمودار هیستریزس برای تحلیل اثرات زلزله بر روی ستون‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در بارگذاری سیکلی در ابتدا مقاومت به دلیل رفتار سخت‌شوندگی افزایش یافته اما در نهایت، سختی (شیب منحنی) و مقاومت در اثر رفتار نرم شونده کاهش می‌یابد و به اصطلاح، منحنی‌های هیستریزس نسبت به حالت اولیه اندکی باریک‌تر می‌شوند [۱۴، ۱۵]. تفاوت منحنی‌های هیستریزس در

۳-۴- خصوصیات مصالح

بتن: بهترین مدل رفتاری برای شبیه سازی بتن در محاسبات عددی، مدلی است که ترکیبی از رفتار خطی و خرابی پلاستیسیته را نمایش دهد. در نرم افزار آباکوس نیز از چنین مدلی برای شبیه سازی رفتار بتن استفاده می‌شود که Concrete Damaged Plasticity (CDP) نام دارد. نرم افزار برای بتن، رفتار پلاستیک (در کشش و فشار) تعریف شده است که می‌توان با وارد کردن پارامترهای مناسب، میزان خرابی برای کشش و فشار را جهت شبیه سازی با مدل آزمایشگاهی وارد نمود. مقاومت فشاری نهایی بتن ۴۰ مگاپاسکال مطابق با مقاله مرجع تعیین شده است [۱۰].

فولاد: برای معرفی آرماتورها از المان‌های سیمی (Wire) سه بعدی با تغییر شکل‌های غیر خطی استفاده شده است. میلگرد GFRP: میلگرد شیشه و رزین به صورت ایزوتروپیک و الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. لذا از آنجا که GFRP مصالح ترد محسوب می‌شود، نیازی به تعریف رفتار غیر خطی ندارد. الیاف FRP: الیاف FRP با مدل (Lamina) طراحی شده است. در این مدل مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی در جهت‌های مختلف الیاف به نرم افزار معرفی می‌شود. از آنجا که FRP مصالح ترد محسوب می‌شود، نیازی به تعریف رفتار پلاستیک یا غیرخطی نمی‌باشد.

جدول ۱ خصوصیات عددی رفتار مصالح [۱۰، ۲]

نام مصالح	مقاومت	وزن مخصوص	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
		kg/m ³		Gpa
بتن	۴۰ Mpa	۲۸۰۰	۰/۲	۲۳/۵
فولاد	Ø8 Fu=۴۹۶	۷۸۵۰	۰/۳	۲۰
	Ø14 Fu=۵۹۷			
	Ø18 Fu=۵۷۱			
میلگرد GFRP	Ø14 Fu=۹۹۰	۲۱۰۰	۰/۲۶	۵۵
الیاف FRP	۴۶۶ Mpa	۱۷۸۰	-	۲۳۱
چسب اپوکسی	۶۲۲	۱۲۵۰	-	۱۸۲

۴-۴- بارگذاری

مدل بارگذاری این ستون بصورت جانبی افزون شده تا لحظه گسیختگی از نوع بار-جابجایی است. بار جانبی وارد بر ستون مورد مطالعه در این تحقیق به صورت رفت و برگشتی در سیکل زمانی منظم می‌باشد. این بار بر اساس الگوی استاندارد ATC-24 و شبیه نیروی وارده ناشی از زلزله است با این تفاوت که زمان و سیکل

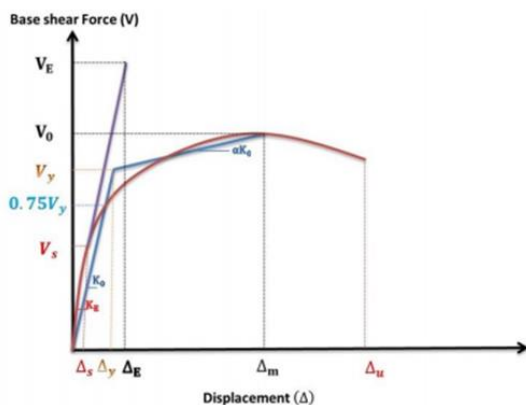
پوش آور به روش پریستلی و پائولی^۸ دو خطی گردیده و سپس با روش چوپرا^۹ ضریب رفتار آن محاسبه می شود. در این روش جهت سهولت در انجام محاسبات ریاضی نیز فرمول نویسی تحت نرم افزار اکسل انجام شده است تا با وارد نمودن مقادیر برش پایه اولین مفصل پلاستیک V_s و تغییر مکان متناظر با آن Δ_s ، برش پایه ماکزیمم V_y و تغییر مکان متناظر با آن Δ_y و نسبت شکل پذیری μ بتوان منحنی پوش آور را دو خطی کرده و مساحت سطح زیر نمودار را محاسبه نمود. بعد از مراحل مذکور ضریب رفتار، نسبت شکل پذیری، سختی اولیه، ظرفیت باربری و اولین مفصل پلاستیک توسط اکسل محاسبه خواهد گردید. [۱]

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (1)$$

$$R = R_S R_\mu \quad (2)$$

$$R_S = \frac{V_0}{V_S} \quad (3)$$

$$\Omega = V_y / V_d \quad (4)$$



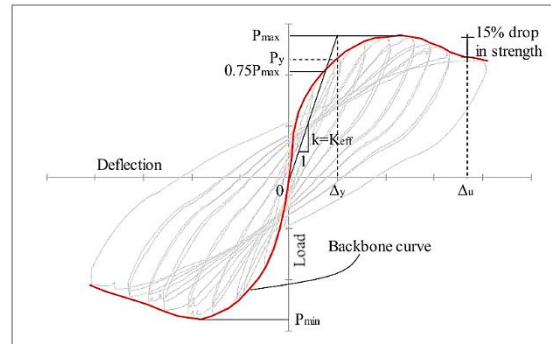
نمودار ۲ مکان گزینی پارامترهای موثر جهت دوخطی کردن نمودار پوش آور [۱۱]

۶- نتایج

۶-۱- صحت سنجی

با توجه به نتایج بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی نیز مشخص گردید که ستون مورد مطالعه دچار شکست مفصلی در پای ستون و ترک‌های خمشی در سطوح میانی گردیده است. همچنین با عنایت به مدلسازی عددی در نرم افزار آباکوس تطابق آن با مدل آزمایشگاهی نیز مشخص شد که انطباق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته. تصویر شماره ۷ به خوبی بیانگر نوع

بارگذاری یکنواخت و سیکی نیز ناشی از همین مورد یعنی زوال سختی و مقاومت می باشد. لازم به ذکر است که با متصل نمودن انتهای هر سیکل رفت و برگشتی در نمودار هیستریزیس نیز می توان منحنی پوش آور آن را رسم نمود. شکل شماره ۵ بیانگر این مساله است.



شکل ۵ نحوه استخراج نمودار پوش آور از منحنی هیستریزیس [۱۳]

۵- ضریب رفتار

یکی از خصوصیات عملکرد سازه که پس از بدست آمدن نمودار تنش- کرنش می توان محاسبه نمود، نسبت شکل پذیری نامیده می شود. شکل پذیری به صورت نسبت کرنش متناظر با حد نهایی، به کرنش متناظر با حد تسلیم تعریف می شود و از رابطه (۱) محاسبه می گردد.

ظرفیت تغییر شکل غیر ارتجاعی در سازه‌ها به کمک ضریب شکل پذیری بیان می گردد، که عبارت است از تغییر شکل نهایی سازه به تغییر شکل لحظه تسلیم آن و هر چه ضریب شکل پذیری یک سازه (R) بیشتر باشد، میزان جذب انرژی بالاتر بوده و در نتیجه مقدار ضریب رفتار بزرگتر خواهد بود. هنگامی که یکی از اعضای سازه به حد تسلیم می رسد با تشکیل مفصل پلاستیک به تدریج سختی سازه با کاهش درجه نامعینی استاتیکی کاهش می یابد ولی سازه همچنان پایدار است و قادر خواهد بود که در مقابل بارهای جانبی از خود مقاومت نشان دهد. وقتی که نیروی خارجی باز هم افزایش یابد مفاصل بیشتری در سازه ایجاد می شود تا جایی که سازه از نظر استاتیکی ناپایدار شده و دیگر توان تحمل بار جانبی اضافی را نداشته باشد اضافه مقاومت که سازه بعد تشکیل اولین مفصل پلاستیک تا مرحله ی ناپایداری از خود نشان می دهد اضافه مقاومت (Ω) سازه نامیده می شود [۸،۳]. در این تحقیق منحنی

⁸ Priestley & Paulay

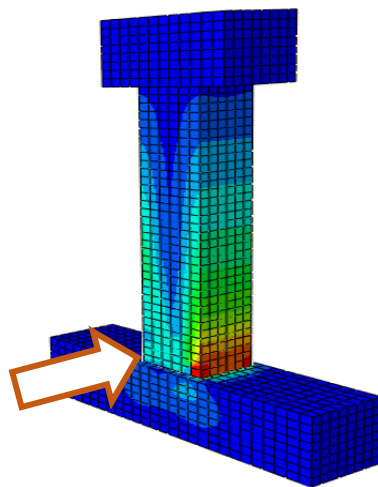
⁹ Chopra

آستانه شکست تلقی می شود (نقطه خرابی)^۲ مشخص گردیده. میزان ظرفیت باربری و تغییر مکان متناظر با آن، بطور میانگین از سیکل رفت و برگشتی در هر چرخه بارگذاری محاسبه شده است.

همچنین میزان μ_r یا نسبت شکل پذیری ستون به استناد از رابطه (۱) محاسبه و تعیین گردیده است.

آسیب در مدل آزمایشگاهی و عددی می باشد. میزان اختلاف اندکی که در نتایج وجود دارد ناشی از عدم پیش بینی دقیق رفتار بتن در محدوده ی پلاستیک می باشد.

در جدول شماره ۲ میزان ظرفیت باربری و تغییر مکان متناظر با آن بر اساس تغییر رفتار ستون مورد بررسی قرار گرفته. تغییر رفتار ستون بر اساس محدوده خطی (نقطه عملکرد)، محدوده غیر خطی یا پلاستیک (نقطه ماکزیمم) و محدوده آسیب که



شکل ب) نوع شکست مفصلی در نرم افزار آباکوس



شکل الف) نوع شکست مفصلی ستون در آزمایشگاه [۷]

شکل ۷ راستی آزمایشی ترک و شکست در مدل آزمایشگاهی و عددی [۷]

جدول ۲ نتایج صحت سنجی مدل کنترل و تطابق پارامترهای عددی [۷]

نام مدل	نقطه عملکرد		نقطه ماکزیمم		نقطه خرابی		شکل پذیری μ_r
	Yeild Point / Kn	$\Delta y / mm$	Peak Point / Kn	$\Delta p / mm$	Failure Point / Kn	$\Delta f / mm$	
Reference	۱۰۵/۲	۶/۱	۱۱۸/۴	۱۰/۷	۱۰۵/۲	۳۶/۳	۵/۵۲
	-۱۰۷/۴	-۶/۵	-۱۱۵/۷	-۱۰/۹	-۱۰۶/۷	-۳۵/۴	
Control Column	۱۰۳/۱	۷/۵	۱۱۰/۹	۹/۵	۹۹/۱	۳۳/۱	۴/۵۷
	-۱۰۴/۵	-۶/۵	-۱۱۱/۲	-۹/۵	-۱۰۲/۲	-۳۱/۲	
درصد اختلاف	۲٪	۱۰٪	۹٪	۱۱٪	۵٪	۱۰٪	-

¹ Failure Point

2

¹ Yeild Point

0

¹ Peak Point

1

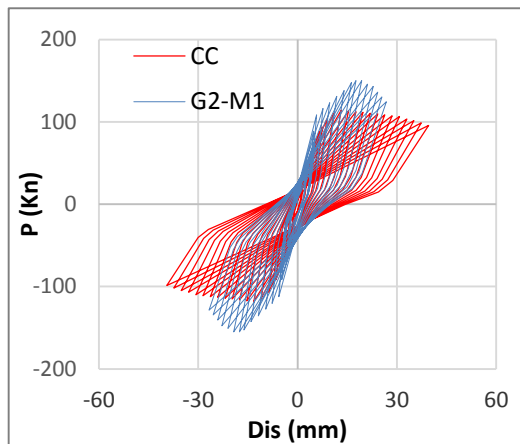
۲-۶- نمودار هیستریزیس

رفتار هیستریزیس سازه‌ها متأثر از میزان ظرفیت باربری و تغییر سیکل‌های پیوسته در مدهای رفت و برگشتی سیستم می‌باشد به گونه‌ای که اگر چرخه‌های هیستریزیس به صورت له شده باشند، نشان دهنده استعداد کم مقاومت در برابر زلزله بوده و سازه توان اندکی از خود برای جذب و اتلاف انرژی بروز می‌دهد و اگر حلقه‌های هیستریزیس به صورت پر حجم باشد، به نشانه استعداد خوب مقاومت در برابر زلزله بوده و سازه ظرفیت زیادی جهت اتلاف انرژی دارد [۱]. در این تحقیق نیز برای بررسی رفتار ستون‌های تقویت شده در برابر بار جانبی نیز منحنی‌های هیستریزیس نیرو - تغییر مکان مطابق با نمودار شماره ۳ رسم گردید. در تصاویر زیر که منحنی هیستریزیس نیروی جانبی جابجایی جانبی مدل‌ها مشاهده می‌گردد، مشخص است که مدل Control در سیکل‌های بارگذاری دچار کاهش سختی می‌شود. هم چنین بعد از رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری

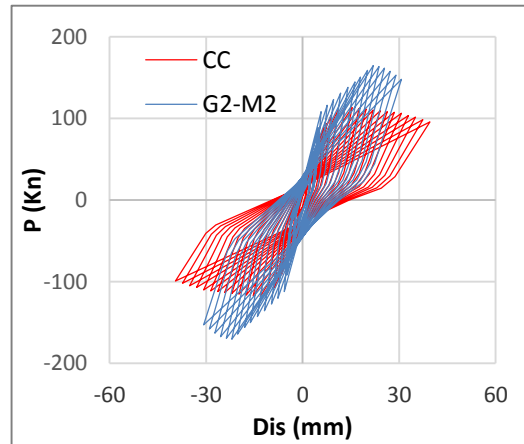
جانبی، مدل با کاهش شدید مقاومت روبرو می‌شود. این پدیده که به له‌شدگی حلقه‌های هیستریزیس مشهور بوده و ناشی از باز و بسته شدن ترک‌ها از حالت باربرداری به بارگذاری می‌باشد. با توجه به منحنی هیستریزیس مدل‌های دور پیچ با الیاف FRP مشخص است که کاهش سختی در این مدل‌ها کم بوده و در نتیجه حلقه‌های هیستریزیس لاغرتر هستند. اما در مدل‌های محصور شده با FRP کاهش مقاومت در حلقه‌های هیستریزیس ناچیز می‌باشد. لذا در صورت استفاده از دور پیچ FRP افزایش مقاومت سیکل‌های بارگذاری قابل تحمل توسط مدل به نحو قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات انجام شده در مراجع [۹، ۷، ۳، ۱] نیز مؤید این موضوع است. با تامل بر روی منحنی هیستریزیس مدل‌های مقاوم سازی شده مشخص است که علرغم استفاده از میلگردهای تقویتی NSM، به علت عدم محصورشوندگی این اجزای تقویتی با سطح بتن نمی‌توان از حداکثر ظرفیت میلگردهای تقویتی استفاده بهره‌برداری نمود.

جدول ۳ نتایج بدست آمده از نمودار هیستریزیس تمامی مدل‌ها

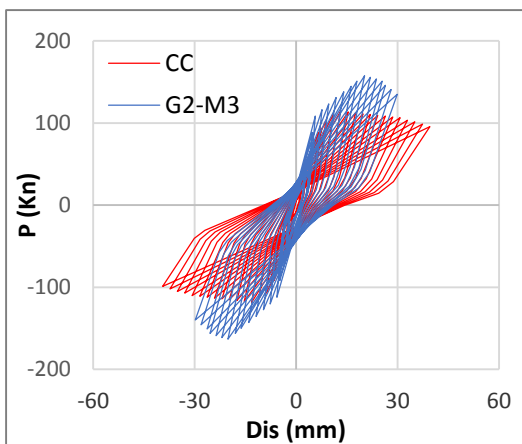
نام مدل	نقطه عملکرد		نقطه ماکزیمم		نقطه خرابی		شکل پذیر	انرژی جذب شده
	Yeild Point / Kn	$\Delta y / \text{mm}$	Peak Point / Kn	$\Delta m / \text{mm}$	Failure Point / Kn	$\Delta f / \text{mm}$	μ	E (Kn.mm)
CC	۱۰۳/۱	۷/۵	۱۱۰/۹	۹/۵	۹۹/۱	۳۳/۱	۴/۵۷	۲۸۴۶۶
	-۱۰۴/۵	-۶/۵	-۱۱۱/۲	-۹/۵	-۱۰۲/۲	-۳۱/۲		
G2-M1	۱۰۹/۵	۶	۱۴۹/۲	۱۸/۲	۱۴۶/۹	۲۴/۲	۳/۸۳	۲۹۴۰۳
	-۱۱۱/۲	-۶	-۱۵۱/۳	-۱۶/۱	-۱۴۷/۲	-۲۱/۸		
G2-M2	۱۱۲/۱	۶	۱۶۶/۵	۲۳/۱	۱۶۳/۲	۲۷/۳	۴/۳۵	۳۷۲۶۱
	-۱۰۸/۵	-۶	-۱۶۴/۲	-۲۱	-۱۶۱/۵	-۲۴/۹		
G2-M3	۱۱۱/۴	۶	۱۵۵/۶	۲۰/۳	۱۵۳/۶	۲۶/۲	۴/۱۸	۳۳۸۱۳
	-۱۰۹/۵	-۶	-۱۵۷/۱	-۱۸/۲	-۱۵۳/۴	-۲۴		
G2-M4	۱۱۰/۶	۶	۱۷۲/۳	۲۶/۲	۱۶۶/۷	۳۰/۱	۴/۸۵	۳۸۵۰۵



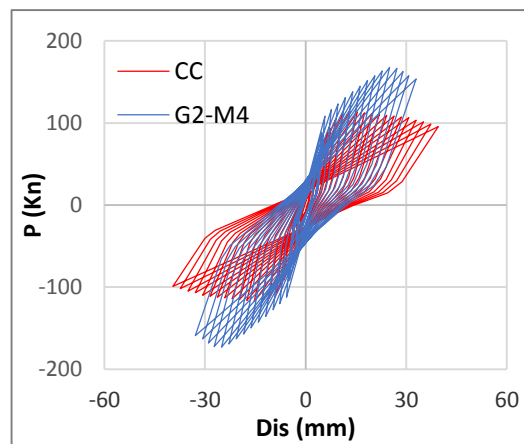
الف) هم پوشانی مدل ۱ با مدل شاهد



ب) هم پوشانی مدل ۲ با مدل شاهد

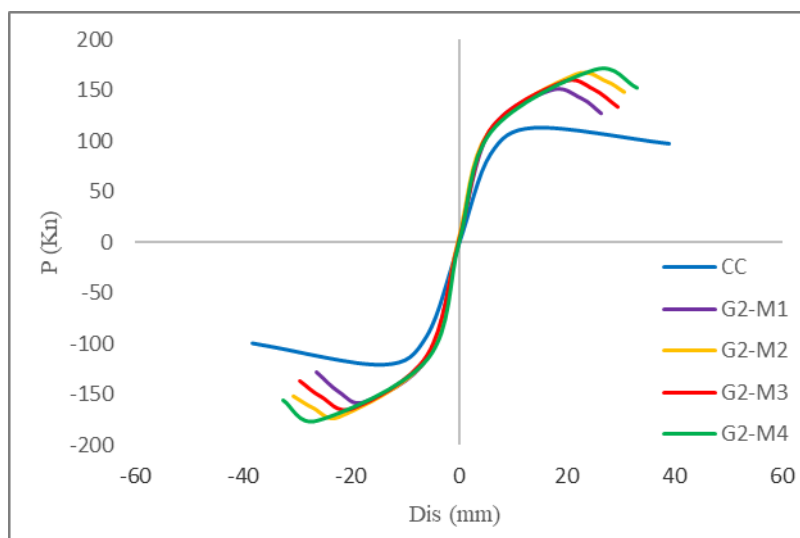


ج) هم پوشانی مدل ۳ با مدل شاهد



د) هم پوشانی مدل ۴ با مدل شاهد

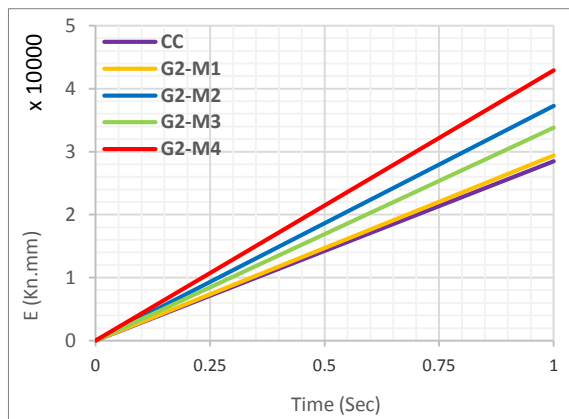
نمودار ۳ منحنی هیستریزیس مدل‌ها و تطابق آن با مدل شاهد



نمودار ۴ نمودار پوش آور رفت و برگشت تمامی مدل‌ها و مقایسه آن‌ها

۵-۶- استهلاک انرژی

استهلاک انرژی یکی از مهم‌ترین پارامترها در رفتار سازه هنگام وقوع زلزله است. انرژی مستهلاک شده در هر سیکل برابر مساحت زیر منحنی هیستریزس در آن سیکل می‌باشد. انرژی مستهلاک شده تجمعی برابر مجموع انرژی مستهلاک شده در تمامی سیکل‌ها می‌باشد [۳]. مقدار انرژی مستهلاک شده تجمعی در واحد زمان معادل مقیاس یک ثانیه در نمودار شماره ۵ ارائه شده است. لذا مشخص است که استفاده از روش محصور شوندگی در تقویت و بهبود رفتار لرزه‌ای ستون‌ها مؤثر است. همچنین مشخص گردید که دورپیچ کردن ستون‌ها با FRP باعث افزایش قابل توجهی در ظرفیت استهلاک انرژی می‌گردد. به طوریکه در مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM، به همراه دورپیچ FRP باعث افزایش انرژی مستهلاک شده ۳۵ درصدی در مقایسه با مدل‌های مقاوم سازی شده با FRP در سطح مشترک می‌گردند. نتایج ارائه شده در مراجع شماره [۵، ۳، ۱] نیز مؤید این مطلب است. هم‌چنین در مدل‌های تقویت شده با میلگرد GFRP بدون الیاف FRP تغییر محسوسی در میزان انرژی جذب و مستهلاک شده مشاهده نمی‌گردد که نشان دهنده عدم تاثیر میلگردهای تقویتی NSM در صورت عدم محصورشدگی با FRP بدلیل گسیختگی زودرس می‌باشد.



نمودار ۵ میزان انرژی مستهلاک شده توسط تمامی مدل‌ها

۶-۶- ضریب رفتار

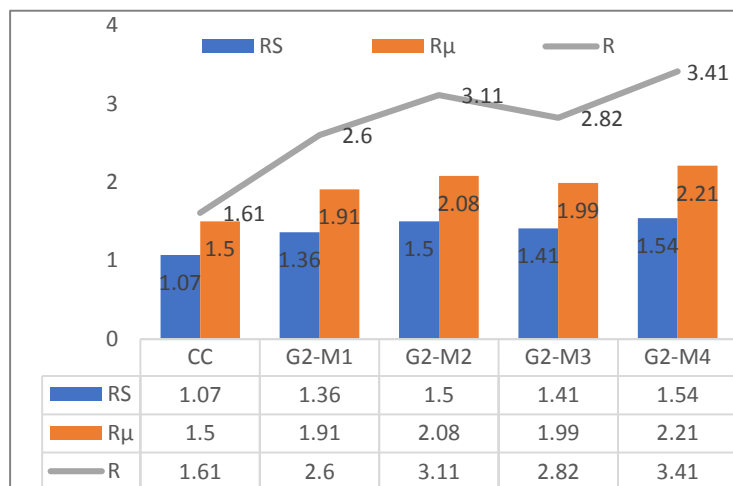
از دیگر عوامل مهم در تحلیل رفتار ستون‌ها، ضریب رفتار آن‌ها است که رابطه نزدیک با مقاومت سازه در مقابل نیروهای زلزله دارد. هر قدر ضریب رفتار سازه بزرگتر و مقاومت آن کاهش کمتری داشته باشد، قدرت مستهلاک نمودن انرژی زلزله در حالت غیرارتجاعی بیشتر بوده و رفتار مطلوب‌تری خواهند داشت [۳]. در این تحقیق نیز شکل‌پذیری ستون‌ها و ضریب رفتار آن‌ها مطابق نمودار شماره ۶ بررسی و آورده شده است.

۳-۶- ظرفیت باربری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مدل‌های دارای دورپیچ FRP میزان مقاومت جانبی بیشتر از سایر مدل‌ها می‌باشد. در مدل‌های G2-M3 و G2-M1 بدلیل عدم محصور شوندگی و زوال چسب اپوکسی، میلگرد تقویتی از سطح بتن جدا گردیده و نهایتاً گسیختگی زودرس رخ می‌دهد. بنابراین علاوه بر اهمیت میلگردهای GFRP نیز نوع اتصال بین میلگردهای تقویتی به سطح بتن و محصور شدگی آن توسط الیاف FRP تاثیر بسزایی در رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری جانبی دارند. قابل ذکر است مدل G1-M4 نیز دارای بیشترین ظرفیت جانبی به میزان ۱۷۰ کیلو نیوتن می‌باشد که در مقایسه با مدل بدون تقویتی رشد ۵۳٪ دارد و مدل G2-M1 دارای حداقل ظرفیت جانبی به میزان ۱۵۰ کیلو نیوتن که در مقایسه با مدل بدون تقویتی رشد ۳۵٪ را نشان می‌دهد.

۴-۶- نسبت شکل پذیری

شکل پذیری نشان دهنده توانایی یک عضو در جذب و استهلاک انرژی در اثر تغییر شکل‌های غیر خطی می‌باشد. نسبت شکل‌پذیری از رابطه $\mu = \Delta_y / \Delta_u$ تعیین می‌گردد که Δ_y تغییر شکل حد جاری شدن عضو می‌باشد و Δ_u تغییر شکل نهایی عضو است که معمولاً برابر با تغییر مکان متناظر با هشتم و پنج درصد مقاومت حداکثری در شاخه نزولی کاهش مقاومت در نظر گرفته می‌شود [۱]. نتایج بدست آمده، نشان می‌دهد که در مدل‌هایی که از الیاف FRP بصورت دورپیچ استفاده شده، نسبت شکل‌پذیری (μ) جانبی در (محدوده ی پلاستیسیته) در سیکل‌های متوالی افزایش می‌یابد و این نشان دهنده آن است که ستون‌های تقویت شده دارای چرخه‌های پایدار هیستریزس و رفتار لرزه‌ای خوب می‌باشند از سوی دیگر عدم تنزل مقاومت و افت سختی در چرخه‌های هیستریزس در اینگونه ستون‌ها بیانگر شکل‌پذیری زیاد و ظرفیت بالای جذب انرژی در این سیستم می‌باشد. در نهایت مدل G2-M4 با نسبت شکل‌پذیری ۴/۸۵ دارای بیشترین ظرفیت شکل‌پذیری در مقایسه با سایر مدل‌ها می‌باشد. با توجه به بررسی نتایج حاصل از منحنی‌های هیستریزس و پوش آور نیز مشخص گردید که میلگردهای فولادی طولی فقط در مدل کنترل (Control Column) جاری شده‌اند لکن در مدل‌های مقاوم‌سازی شده با میلگرد NSM بدلیل رفتار تردشوندگی میلگردهای GFRP نیز شبکه آرماتور فولادی جاری نمی‌شوند و همچنین با افزایش تعداد میلگردهای GFRP در ستون نیز رفتار آن تردتر شده و گسیختگی بدون نشانه و ترک می‌باشد.

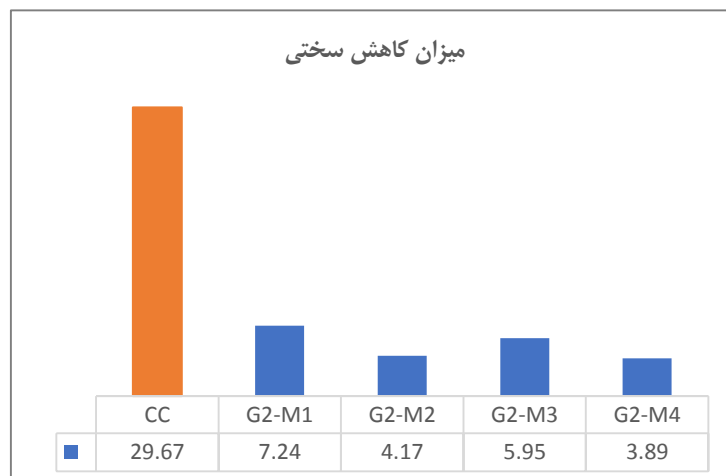


نمودار ۶ میزان ضریب شکل پذیری، ضریب اضافه مقاومت و ضریب رفتار کلیه مدل ها و مقایسه آن ها

بدست آمده است. مطابق با نمودار شماره ۷ همانطور که مشخص است که با افزودن الیاف FRP بصورت دور پیچ نیز میزان کاهش سختی ستون ها، کاهش می یابد. لذا می توان نتیجه گرفت در مواردی که افزایش سختی سازه ضرور باشد مانند کنترل اثرات P-Δ برای جلوگیری از آسیب دیدن اجزاء غیر سازه ای یا حفظ تجهیزات و لوازم حساس در ساختمان های با کاربری های ویژه، می توان با افزایش سختی ستون با این روش به این مهم دست یافت.

۷-۶- سختی ستون

سختی یکی از عوامل تعیین کننده ای است که برای بررسی رفتار سازه ها و از جمله ستون ها مورد استناد و استفاده قرار می گیرد. به استناد از منحنی پوش آور شماره ۴ نیز شیب این نمودار در محدوده ارتجاعی بیانگر سختی اولیه یا سختی الاستیک و در محدوده گسیختگی بیانگر سختی ثانویه یا سختی پلاستیسیته هر یک از ستون ها می باشد. میزان کاهش سختی نیز از حاصل تفریق سختی اولیه نسبت به سختی ثانویه

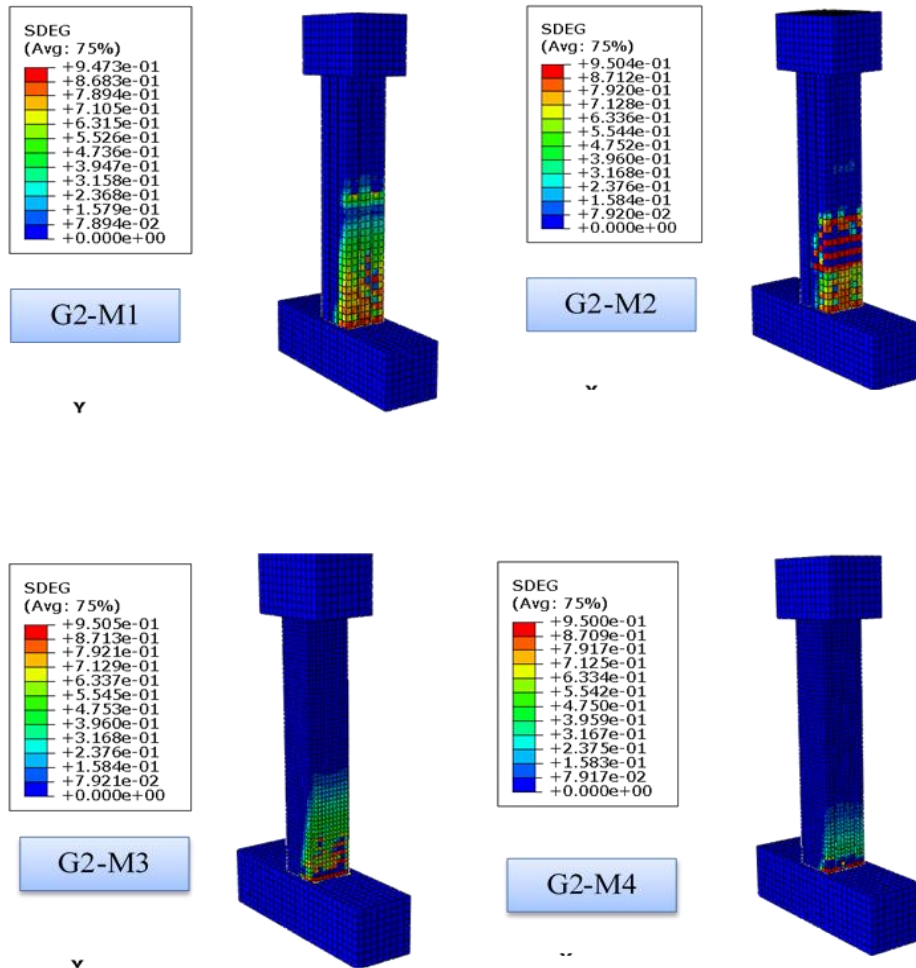


نمودار ۷ میزان کاهش سختی تمامی مدل ها و مقایسه بین آن ها

برشی در سطح بدنه ستون گسترده است و رفتار ترد و سخت تری نیز دارند. اکثر مدل‌ها علرغم سختی بیشتر نسبت به مدل کنترل علاوه بر تحمل ترک‌های خمشی نیز بر اثر مفصل پای ستون گسیخته می‌شوند. با عنایت به تحلیل‌های انجام شده نیز می‌توان دریافت که الیاف FRP موجب کاهش ترک‌های خمشی ایجاد شده بر روی سطوح ستون می‌گردد و با افزایش تعداد الیاف FRP می‌توان شکست ستون را به تعویق انداخت.

۸-۶- مُد شکست

با تامل بر روی مُدهای شکست مدل‌ها، مطابق با شکل شماره ۸ محرز شد که مدل G2-M4 به دلیل محصور شدگی با الیاف FRP در پای ستون، دارای کمترین میزان ترک در سطح بتن بوده و گسیختگی آن‌ها بر اثر شکست مفصلی پای ستون در اثر ازدیاد بار وارده ایجاد شده است. مدل G2-M1 که بدون الیاف FRP می‌باشند نیز به استناد از ضریب رفتار آن‌ها و همچنین شکل شماره ۸ نشان می‌دهد که ترک و شکست خمشی و



شکل ۸ مُد شکست کلیه مدل‌ها و مقایسه بین آن‌ها

۷- نتیجه گیری

۱- استفاده از میلگردهای FRP تقویتی به روش NSM باعث افزایش ظرفیت باربری جانبی تا حداکثر ۵۳٪ و بهبود ظرفیت خمشی ستون‌های بتن مسلح می‌گردد.

۲- نتایج طرح‌های مقاوم سازی در هر چهار مدل نشان می‌دهد که محصور شدگی با دورپیچ FRP به دلیل جلوگیری از کماتش میلگرد در کشش دارای نتایج بهتری نسبت به مدل‌های بدون الیاف FRP و یا محصور شدگی در راستای طولی میلگرد GFRP می‌باشد.

۳- استفاده از میلگردهای تقویتی NSM به تنهایی، حداکثر باعث افزایش ۳٪ ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح می‌گردد. اما ترکیب میلگردهای تقویتی NSM به همراه محصور شدگی با الیاف FRP می‌تواند حداکثر تا ۲۶٪ ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در ستون‌های بتن مسلح را افزایش دهد.

۴- به استناد از نمودارهای هیستریزس بدست آمده از نتایج این تحقیق محرز شد که پس از بارگذاری و باربردارهای متوالی خرابی ستون با تسلیم و گسیختگی مصالح کامپوزیت شروع می‌شود که این نوع خرابی به صورت ترد و شکننده می‌باشد و این امر نقش بسزایی در کاهش ضریب ایمنی جانی ساکنین ساختمان دارد.

۵- در تمامی مدل‌ها سختی بیشتر نسبت به مدل کنترل و افزایش ترک‌های خمشی نیز بر اثر مفصل پلاستیک در پای ستون گسیخته می‌شوند. لذا با عنایت به تحلیل‌های انجام شده نیز می‌توان دریافت که الیاف FRP موجب کاهش ترک‌های خمشی ایجاد شده بر روی سطوح ستون می‌گردد و با پوشش ناحیه بحرانی با الیاف FRP می‌توان شکست ستون را به تعویق انداخت.

۶- طرح تقویتی در تمامی ستون‌های مورد بررسی در این تحقیق باعث افزایش سختی اولیه و ثانویه نسبت به مدل کنترلی می‌شوند اما کمترین کاهش ضریب سخت شونده در مدل‌هایی است که با دورپیچ FRP محصور شده‌اند.

۸- منابع

[1] اسفندی سرافراز م. دانش ف. مقاوم‌سازی خمشی ستون‌های بتن مسلح با استفاده از میلگردهای کامپوزیتی مدفون در سطح. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. ۱۳۹۸: ۵۱ (۱): ۱۰۱-۱۱۰.

[2] مجیدی نیا ز. مهدی زاده ک. صادقی ع. بررسی عوامل موثر بر شکل پذیری ستون تقویت شده با ورق فولادی تحت بارگذاری چرخه ای. فصلنامه آنالیز سازه و زلزله. ۱۳۹۹: ۱۷ (۱): ۶۹-۵۵.

[3] سلیمانی کیا آ. وارسته پور ح. مدل سازی لایه چسب به منظور پیش‌بینی شکست زودرس در تیرهای بتنی تقویت شده با صفحات FRP. پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران: ۱۳۹۲؛ تهران، ایران.

[4] ساجدی، س ف. ذوالفقای حموله م. دالوند ا. بررسی ظرفیت، گسیختگی و شکل‌پذیری ستون‌های بتن مسلح با پوسته GRP و بدون کاربرد CFRP تحت بار خارج از مرکز. نشریه علمی پژوهشی انجمن مهندسی سازه ایران. انتشار آنلاین آبان ۱۴۰۰.

[5] رادمنش س. آقامجیدی ر. بهینه‌سازی تیر مسلح بتنی تقویت شده با میلگرد و ورق FRP در متدهای نصب مختلف به روش اجزاء محدود. نشریه عمران و پروژه. ۱۴۰۰: ۳ (۲۲): ۴۷-۳۲.

[6] محمد جعفری صادقی، علیرضا، میرزا محمدی، عباس، افشین، حسن. مقاوم‌سازی تیرهای بتن‌آرمه با CFRP پیش‌تئیده به روش نصب در نزدیک سطح. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز. انتشار آنلاین بهمن ۱۳۹۹.

- [7] Zhang Y, Elsayed M, Zhang LV, Nehdi ML. Flexural behavior of reinforced concrete T-section beams strengthened by NSM FRP bars. *Engineering Structures*. 2021;233: 111922.
- [8] Barris C, Sala P, Gómez J, Torres L. Flexural behaviour of FRP reinforced concrete beams strengthened with NSM CFRP strips. *Composite Structures*. 2020; 241: 112059.
- [9] Perera R, Gil A, Torres L, Barris C. Diagnosis of NSM FRP reinforcement in concrete by using

- mixed-effects models and EMI approach. *Composite Structures*. 2021; 273: 114322.
- [10] Ming L, Shiping Y, Wenjie C. Seismic behaviour of TRC-strengthened RC columns under different constraint conditions. *Jiangsu Key Laboratory of Environmental Impact and Structural Safety in Engineering, China University of Mining and Technology*, 2019; Xuzhou, China.
- [11] Farahi B, Noroozieh E, Mansouri A. Lateral strength and ductility of reinforced concrete columns strengthened with NSM FRP rebars and FRP jacket. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. 2019; 195–209.
- [12] Xu G, Wu B, Jia D, Xu X, Yang G. Quasi-static tests of RC columns under variable axial forces and rotations. *Engineering Structures*. 2018; 162: 60-71.
- [13] Ghannam M, Metwally E. Numerical investigation for the behaviour of stiffened circular concrete filled double tube columns. *Structures*. 2020; 25: 901-919.
- [14] Cao C. Behaviour of steel-reinforced concrete columns under combined torsion based on ABAQUS FEA. *Engineering Structures*. 2020; 209:109980.
-

Investigation of The Behavior of Reinforced Concrete Columns with Rebars and Composite Plates for Different Installation Modes under Reciprocating Loading

Ehsan Amiri

Department Of Civil Engineering, Estahban Branch, Islamic Azad University, Estahban, Iran

* Mohammad Reza Baradaran

Department Of Civil Engineering, Meymand Center, Islamic Azad University, Meymand, Iran

M.Baradaran@iauf.ac.ir

Abstract

There are currently various methods for reinforcing concrete columns, each of which can be effective depending on different conditions. One of the practical methods in this field is the use of composite materials. The composite materials have several advantages such as ease of execution, easy access, relatively low cost, and light weight. In the present study, using the laboratory results, a reinforced concrete column that has been affected by lateral reciprocating loads has been reinforced by GFRP rebar and FRP fibers. All models are subjected to cyclic reciprocating loading according to the ATC24 instruction. Then, the cover curves obtained from the analysis were double-linearized, and their coefficient of behavior and ductility ratio were calculated. In the present paper, the lateral bearing capacity, the amount of absorbed energy dissipation, the ductility ratio, the amount of hardness reduction, and the failure mode of the models have been investigated. All studied models are modeled with Abaqus2016 software. The results of this research present that the apply of GFRP rebar with FRP torsion at a location close to the plastic joint of the column increases the lateral strength by 53% compared to the conventional model and reduces the ductility. Furthermore, the use of NSM reinforcement rebars alone, increases the absorption capacity and energy dissipation in reinforced concrete columns by a maximum of 3%. However, the combination of NSM reinforcement bars along with enclosures with FRP fibers can increase the energy absorption and dissipation capacity of the reinforced concrete columns by up to 26%.

Keywords: Reinforcement, Concrete Column, GFRP Rebar, FRP Sheet, NSM Method.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).