

Investigating the Finite Elements of Reinforced Concrete Column Reinforcement Under Cyclic Loading Using NSM Method and FRP Wrap in Different Installation Situations

Mahmoudreza Golshan¹, Hamed Yousefinezhad², Babak Mansouri^{*3}, Amirhossein Bazaei⁴

1- 1- Instructor, Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran

2- Master's degree in Civil Engineering, Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Shiraz Branch, Shiraz, Iran

3- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Firoozabad Branch, Meymand center, Islamic Azad University, Meymand, Iran

4- Instructor, Department Of Civil Engineering, Technical And Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

So far, it has been proven that concrete structures have good resistance against incoming forces, but the rebar inside the concrete may be damaged and fail prematurely due to execution or calculation errors. Therefore, it is necessary to take measures after construction to strengthen concrete buildings. It is customary to increase the capacity and durability of the column by planting composite rebar in concrete (NSM method). Therefore, it is important to investigate the effect of simultaneous reinforcement of composite sheet and rebar and to optimize its installation method on concrete columns. In this research, 12 concrete columns were strengthened by rebars and composite sheets with different numbers and modes of installation, which were analyzed in three separate groups and their results were compared. The initial model was adjusted according to the reference article using the finite element method in Abaqus software. Then this model was reinforced with GFRP rebars by NSM method and enclosure with FRP sheet. In this research, the important parameters of retrofitting such as load capacity and seismic durability, energy consumption rate, ductility ratio, hardness reduction rate, behavior coefficient, failure analysis and economic index were investigated. The results of this research showed that, on average, using the NSM method along with the FRP sheet wrap can increase the seismic durability of the column by 30%. Also, the use of 8 NSM rebars significantly increases the seismic durability of the column, but it will cause the behavior of the column to become brittle and cause unexpected and sudden fractures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 April 2023

Revise Date: 03 July 2023

Accept Date: 15 July 2023

Keywords:

Reinforcement of the column

Cyclic loading

Composite materials

NSM rebar

FRP sheet

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392039.3076>

*Corresponding author: Babak Mansouri
Email address: Babak.mansoori@iau.ac.ir

بررسی اجزاء محدود مقاومسازی ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای با استفاده از روش NSM و دورپیچ FRP در حالات نصب مختلف

محمودرضا گلشن^۱، حامد یوسفی نژاد^۲، بابک منصوری^{۳*}، امیرحسین بازایی^۴

۱- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، مرکز میمند، دانشگاه آزاد اسلامی، میمند، ایران

۴- مربی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

تاکنون ثابت شده که سازه‌های بتنی از مقاومت مناسبی در برابر نیروهای وارده برخوردار هستند اما ممکن است میلگرد مدفون در بتن بدلیل خطاهای اجرایی یا محاسباتی دچار زوال و شکست زودهنگام گردد. بنابراین لازم است تا برای تقویت ساختمان‌های بتنی اقدامات بعد از ساخت انجام شود. امروزه مرسوم است که با استفاده از کاشت میلگرد کامپوزیت در بتن (روش NSM)، میزان ظرفیت و دوام ستون را افزایش دهند. لذا بررسی اثر تقویت همزمان ورق و میلگرد کامپوزیت و بهینه‌یابی روش نصب آن بر روی ستون‌های بتنی دارای اهمیت می‌باشد. در این تحقیق تعداد ۱۲ ستون بتنی بوسیله میلگرد و ورق کامپوزیت با تعداد و حالت‌های مختلف تقویت شدند که طی سه گروه مجزا تحلیل و نتایج آن‌ها با هم مقایسه گردید. مدل اولیه مطابق با مقاله مرجع به روش اجزا محدود در نرم افزار آباکوس راستی آزمایی گردید. سپس این مدل با تعداد مختلف میلگردهای GFRP به روش NSM و شیوه‌های نصب مختلف با ورق FRP تقویت شدند. در این تحقیق پارامترهای مهم مقاومسازی مانند میزان ظرفیت باربری و دوام لرزه‌ای، میزان استهلاک انرژی، نسبت شکل‌پذیری، میزان سختی، ضریب رفتار، بررسی آسیب‌های پلاستیک و شاخص اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که بطور میانگین استفاده از روش NSM به همراه دورپیچ ورق FRP می‌تواند تا ۳۰٪ دوام لرزه‌ای ستون را افزایش دهد. همچنین استفاده از ۸ میلگرد NSM دوام لرزه‌ای ستون را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد اما باعث تُرد شدن رفتار ستون خواهد شد.

کلمات کلیدی: مقاومسازی ستون، بارگذاری چرخه‌ای، مصالح کامپوزیت، میلگرد NSM، ورق FRP.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392039.3076	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.392039.3076	۱۴۰۳/۰۱/۳۱	۱۴۰۲/۰۴/۲۴	۱۴۰۲/۰۴/۲۴	۱۴۰۲/۰۴/۱۲	۱۴۰۲/۰۱/۱۸
بابک منصوری				*نویسنده مسئول:		
Babak.mansoori@iau.ac.ir				پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

کشور ایران بر روی گسل‌های متعدد و بزرگی قرار دارد که پیوسته در معرض وقوع زلزله‌های بزرگ و کوچک بسیاری می‌باشد و در عمده موارد باعث خسارات مالی و جانی بسیاری می‌شود. از طرفی بسیاری از موارد مانند عدم بروزرسانی دانش نسبت به زمان ساخت، تغییرات آیین‌نامه‌ها، عدم اجرای صحیح و اشکالات طراحی یا اجرایی باعث ایجاد مشکلاتی در سازه می‌شود که نیاز به مقاوم‌سازی با استفاده از مصالح و روش‌های مختلف ایجاد می‌شود. در برخی مواقع با گذشت زمان، اجزای ساختمان دوام خود را مانند پایداری، مقاومت و استحکام از دست می‌دهند و امکان خدمت‌رسانی ساختمان کاهش می‌یابد [۱]. از طرفی ممکن است میلگردهای فولادی در برابر تغییرات آب و هوایی و شرایط جوی ناپایدار، دچار خوردگی شوند. در اینصورت سازه بتن مسلح دچار زوال گردیده که برای تقویت آن باید اقدامات موثری صورت گیرد. بنابراین مقاوم‌سازی سازه و بهسازی لرزه‌ای یک روش موثر است که با صرف هزینه‌ی معقول و مدت زمان کوتاه بجای تخریب سازه، آن را در برابر نیروهای وارده‌ی جانبی و لرزه‌ای (زلزله) تقویت می‌کند [۲].

یکی از مهم‌ترین اجزای باربر و اصلی در هر سازه‌ای، ستون‌های آن می‌باشد که ایجاد هرگونه نقص و یا اشکال در آن باعث اختلال در عملکرد سازه می‌شود. ستون‌های یک ساختمان جهت تحمل فشارهای وارده در راستای قائم طراحی می‌شوند بنابراین اگر نیروهای جانبی مانند زلزله به ساختمان وارد شوند و ستون مقاومت لازم را نداشته باشد دچار کمناش موضعی و گسیختگی خواهند شد [۳]. در مورد ستون‌های ضعیف اکثر مشکلات مربوط به کاهش مقاومت و سختی ستون‌ها قبل از شکل‌پذیری نهایی است. یکی از این شرایط وجود طبقه‌ی نرم در ساختمان است. طبقه‌ی نرم طبقه‌ای است که هنگام حذف تیغه‌ها و دیوارهای یک طبقه از ساختمان شکل می‌گیرد و سبب می‌شود طبقات پایینی سختی بسیار کمتری نسبت به طبقات بالایی داشته باشند. طبقات نرم بدلیل عدم یکنواختی موجود در طبقات بالا در برابر بارهای جانبی مقاومت لازم را ندارند و عملکرد ضعیفی از خود نشان می‌دهند [۴]. لذا باید اطمینان داشت که ستون‌های یک ساختمان از مقاومت کافی برخوردار باشند تا از آسیب به ساختمان جلوگیری شود. از جهتی تخریب ستون بتنی که به هر دلیلی ضعیف شده، غیر اقتصادی است. بنابراین استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی مناسب که از نظر اقتصادی و اجرایی مقرون به صرفه باشد و مقاومت ستون را افزایش دهند اهمیت زیادی دارد.

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای تقویت ستون‌های بتنی وجود دارد که هر یک بسته به شرایط مختلف می‌توانند موثر و کارآمد باشند. یکی از روش‌های کاربردی و سریع استفاده از مصالح کامپوزیت است [۶]. این روش عملکرد ساختمان را در برابر نیروهای جانبی و بسیاری از عوامل دیگر بهبود می‌بخشد. بطور کلی مصالح کامپوزیت حدود ۲۰٪ فولاد وزن دارند اما مقاومت آن‌ها بین ۲ تا ۵ برابر بیشتر از فولاد می‌باشد [۷]. تقویت ستون‌ها با روش نوین مانند مقاوم‌سازی با ورق FRP که نسبت به سایر روش‌ها دارای مزیت‌های زیادی می‌باشد تا حدود زیادی می‌تواند از آسیب و گسیختگی جلوگیری نماید. ورق‌های FRP دارای خصوصیات منحصر بفردی مانند نسبت بالای مقاومت به وزن، دوام مناسب در برابر عوامل شیمیایی محیطی، عدم بروز پدیده خستگی ناشی از افزایش بار، سرعت بالا در اجرا و غیره می‌باشد که باعث شده تا استفاده از آن در تقویت سازه نسبت به سایر روش‌های مقاوم‌سازی افزایش یابد. مراحل اجرای مقاوم‌سازی با ورق FRP سریع‌تر از سایر روش‌های مقاوم‌سازی می‌باشد و به تجهیزات زیادی نیاز ندارد، به همین دلیل بهره‌برداری از ساختمان طی اجرای مقاوم‌سازی با FRP متوقف نمی‌شود. همچنین استفاده از ورق‌های FRP برای تقویت سازه، باعث افزایش ابعاد و اندازه مقاطع نمی‌شود و خللی در فضای معماری بوجود نمی‌آورند. اما مقاوم‌سازی با ورق FRP تا زمانی که سازه تحت بارگذاری و تغییر شکل قرار نگرفته باشد، در معرض تنش قرار نمی‌گیرد و در واقع نقشی در باربری ایفا نمی‌کند. به همین دلیل شیوه نصب و اجرای دقیق مقاوم‌سازی با FRP از اهمیت زیادی برخوردار است [۱، ۳، ۴، ۸].

یکی دیگر از انواع مصالح کامپوزیتی، میلگردهای کامپوزیت هستند که در انواع مختلفی مانند شیشه^۱، بازالت^۲ و کربن^۳ تولید می‌شوند. میلگردهای از جنس الیاف شیشه (GFRP) یکی از اقتصادی‌ترین انواع میلگردهای کامپوزیتی جهت مقاوم‌سازی بشمار می‌آیند [۹].

^۱ GFRP

^۲ BFRP

میلگرد GFRP بدلیل وزن کمی که دارند باعث سبک‌سازی ساختمان و عدم افزایش بار مرده‌ی سازه می‌شوند. ضمن اینکه میلگردهای GFRP دچار خوردگی یا زنگ‌زدگی نمی‌شوند و در نواحی که جریان الکتریکی یا مغناطیستی وجود دارد، استفاده از آن‌ها توصیه می‌شود [۱۰]. به فرآیندی که طی آن میلگردهای کامپوزیتی درون بتن تعبیه می‌شوند عملیات کاشت میلگرد یا روش NSM^۴ گفته می‌شود. روش NSM کاربرد فراوانی در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی دارد و می‌تواند به عنوان راه حلی برای جبران کمبود مقاومت سازه، رفع نواقص ابعاد اجزای سازه (مانند لاغری عضو) یا شیوه‌ای برای الحاق یک عضو جدید مورد استفاده قرار گیرد. اما روش NSM دارای کاستی‌هایی مانند جدا شدن میلگرد کامپوزیت، جداسازی زودرس ناشی از زوال چسب اپوکسی به دلیل شدت نیروی وارده می‌باشد. به همین دلیل استفاده همزمان از روش NSM و ورق FRP برای تقویت سازه توصیه می‌شود [۱۱، ۱۸، ۴۳]. اخیراً مطالعه در این زمینه (ترکیب روش NSM و پوشش سطح با ورق FRP) افزایش یافته و شیوه‌های نصب مختلف برای یافت بهترین حالت نصب در جهت بهینه‌سازی اهمیت دارد.

مینگل و همکاران (مقاله مرجع) در سال ۲۰۱۹ اقدام به مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با تعداد مختلف ورق FRP به روش آزمایشگاهی و اجزاء محدود پرداختند. در این تحقیق با ۱ الی ۴ لایه ورق FRP، تلاش گردید تا ضعف ستون ناشی از کاهش میلگردهای عرضی در برابر بارهای جانبی و لرزه‌ای تقویت گردد. بدین ترتیب در ابتدا یک مدل ستون بتن مسلح به روش آزمایشگاهی تحت بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی قرار گرفت. سپس نتایج مدل آزمایشگاهی با نرم‌افزار آباکوس صحت‌سنجی گردید و پس از آن به روش اجزاء محدود ستون با چند لایه ورق FRP تقویت شد. نتایج بخش آزمایشگاهی این تحقیق نشان داد که نیمه تحتانی ستون به دلیل ضعف میلگردهای عرضی (خاموت) تحت اثر نیروی جانبی دچار شکست مفصلی می‌گردد. نتایج بخش نرم‌افزاری این تحقیق نشان داد که استفاده از ۱ الی ۳ لایه ورق FRP، میزان مقاومت جانبی (دوام لرزه‌ای)، شکل‌پذیری، و میزان استهلاک انرژی لرزه‌ای افزایش می‌یابد. اما نصب ۴ لایه ورق FRP، نه تنها تغییر محسوسی در مقاومت جانبی یا استهلاک انرژی ایجاد نمی‌کند، بلکه باعث کاهش نسبت شکل‌پذیری ستون در برابر نیروهای جانبی خواهد شد. همچنین در نتایج این تحقیق گزارش شد که مقاوم‌سازی با ورق FRP می‌تواند نقش موثری در تقویت ستون بتنی داشته باشد، بطوریکه باعث افزایش شکل‌پذیری ستون خواهد شد [۷]. باروس‌ج و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون بتنی تقویت شده با ورق‌های CFRP پرداختند. در این تحقیق ورق‌های CFRP به شیوه منقطع دور ستون متصل شد. نتایج این تحقیق نشان داد که ورق‌های CFRP به تنهایی اثر چندانی روی میزان استهلاک انرژی لرزه‌ای ستون‌ها نخواهند داشت [۸]. دینگ‌م و همکاران در سال ۲۰۱۸ به بررسی اثر استفاده همزمان از میلگرد کامپوزیت و ورق BFRP بر روی ستون‌های بتن مسلح پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان از ورق BFRP و میلگرد کامپوزیت ظرفیت خمشی ستون بتن مسلح را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [۹]. روکسینگ‌ک و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی رفتار ستون‌های بتن مسلح با مقطع مستطیلی و دایره‌ای تقویت شده با میلگرد کامپوزیت به روش NSM پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان افزایش مقاومت و شکل‌پذیری ستون تقویت شده تا حد زیادی به هندسه مقطع آن بستگی دارد. همچنین روش NSM می‌تواند تا ۳۵٪ میزان ظرفیت باربری جانبی ستون را افزایش دهد [۱۱]. ونکات‌د و همکاران در سال ۲۰۱۷ به تاثیر مقاوم‌سازی ستون بتن مسلح با استفاده از ورق‌های FRP پرداختند. در این تحقیق سه متغیر شامل نوع ورق FRP (شامل جهت الیاف)، شیوه نصب و تعداد لایه‌های صفحات FRP در نظر گرفته شد. در این تحقیق هفت مدل ستون به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار انسیس طراحی شد و تحت بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که تعیین محل و شیوه نصب ورق FRP در طرح تقویتی، اثر بسزایی روی تقویت ستون خواهند داشت. همچنین نوع الیاف FRP (دو جهته بودن) و پس از آن، تعداد لایه‌های ورق FRP به ترتیب در میزان مقاومت ستون و جلوگیری از گسیختگی زودرس تاثیرگذار خواهند بود. در نتایج این تحقیق گزارش شد که نصب ورق FRP به شیوه نصب یک در میان (منقطع) روی بدنه ستون بتنی می‌تواند تا ۳۵٪ میزان دوام لرزه‌ای و تا ۲۳٪ میزان شکل‌پذیری ستون را افزایش دهد [۱۲]. ترفیلوه‌د و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی رفتار ستون بتن مسلح تقویت شده با میلگرد کامپوزیت و مقایسه با ورق FRP به روش آزمایشگاهی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از میلگرد کامپوزیت نسبت به ورق FRP اثر بیشتری در تقویت ستون دارند [۲۶].

³ CFRP

⁴ Near Surface Mounted

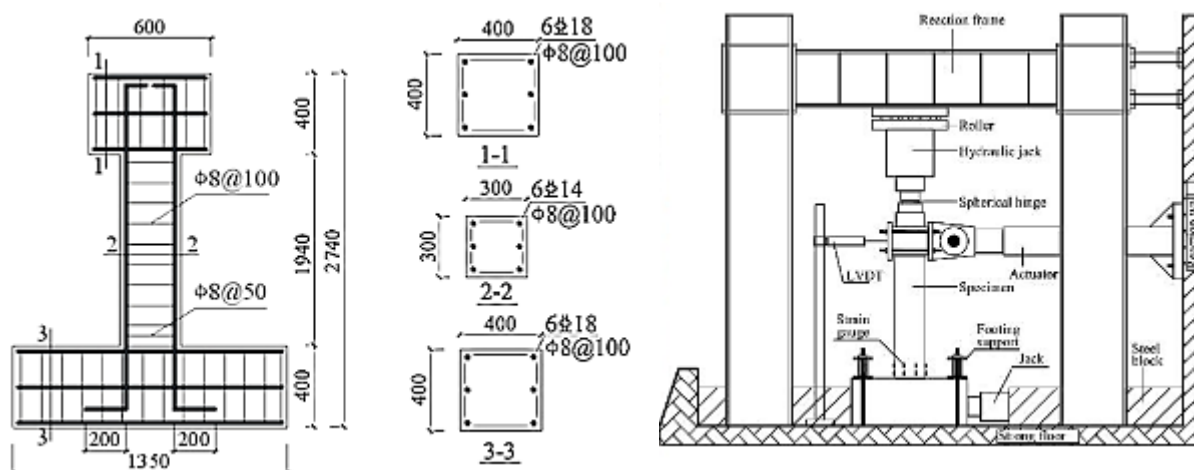
جمع بندی نتایج سایر تحقیقات گذشته نشان می دهد که استفاده از ورق FRP به تنهایی نمی تواند تاثیر زیادی روی دوام لرزه ای ستون بتنی داشته باشد و صرفاً باعث افزایش نسبت شکل پذیری و جلوگیری از گسترش ترک ها خواهد شد. اما استفاده همزمان از میلگرد NSM و دورپیچ FRP می تواند بطور قابل ملاحظه ای دوام لرزه ای ستون بتنی را افزایش دهد. همچنین تعیین محل نصب، شیوه نصب و استفاده از تعداد بهینه میلگرد NSM یا ورق FRP از پارامترهای مهم در اصول مقاوم سازی ستون می باشد [۷-۱۲].

در این تحقیق برای افزایش دوام لرزه ای ستون بتن مسلح بطور همزمان از میلگرد GFRP به روش NSM و ورق FRP به شیوه های مختلف نصب استفاده شد. بنابراین برای ارائه تعداد و شیوه نصب موثر مصالح کامپوزیتی جهت تقویت ستون بتن مسلح، تعداد ۱۲ مدل به روش اجزاء محدود با نرم افزار آباکوس طراحی گردید. در ادامه نسبت به تحلیل و مقایسه ی پارامترهای مهم در انتخاب نوع و روش مقاوم سازی مانند میزان ظرفیت باربری لرزه ای، نسبت شکل پذیری، میزان استهلاک انرژی لرزه ای، ضریب رفتار ستون، بررسی ترک و شکست، میزان سختی ستون و شاخص اقتصادی اقدام گردید.

۲- مدل سازی عددی

۲-۱- مدل مرجع

تحقیق حاضر، ادامه یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی با نرم افزار آباکوس می باشد که توسط مینگ ل و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۷]. مدل مرجع شامل یک ستون بتن مسلح کتیبه دار به طول ۱۹۴۰ میلی متر می باشد که در قسمت تحتانی به فونداسیون متصل شده. طول کل ستون با احتساب کتیبه و فونداسیون به ۲۷۴۰ میلی متر می رسد و بوسیله ۶ میلگرد طولی با قطر ۱۸ میلی متر مسلح شده. در بخش آزمایشگاهی تحقیق مرجع، کتیبه ستون توسط جک هیدرولیکی تحت بارگذاری چرخه ای رفت و برگشتی قرار گرفته. سایر اطلاعات مربوط به مدل مرجع اعم از ابعاد و اندازه، نوع میلگردهای فولادی بکار رفته و فواصل بین آن ها، نحوه اعمال بارگذاری و غیره به شرح شکل شماره ۱ می باشد.

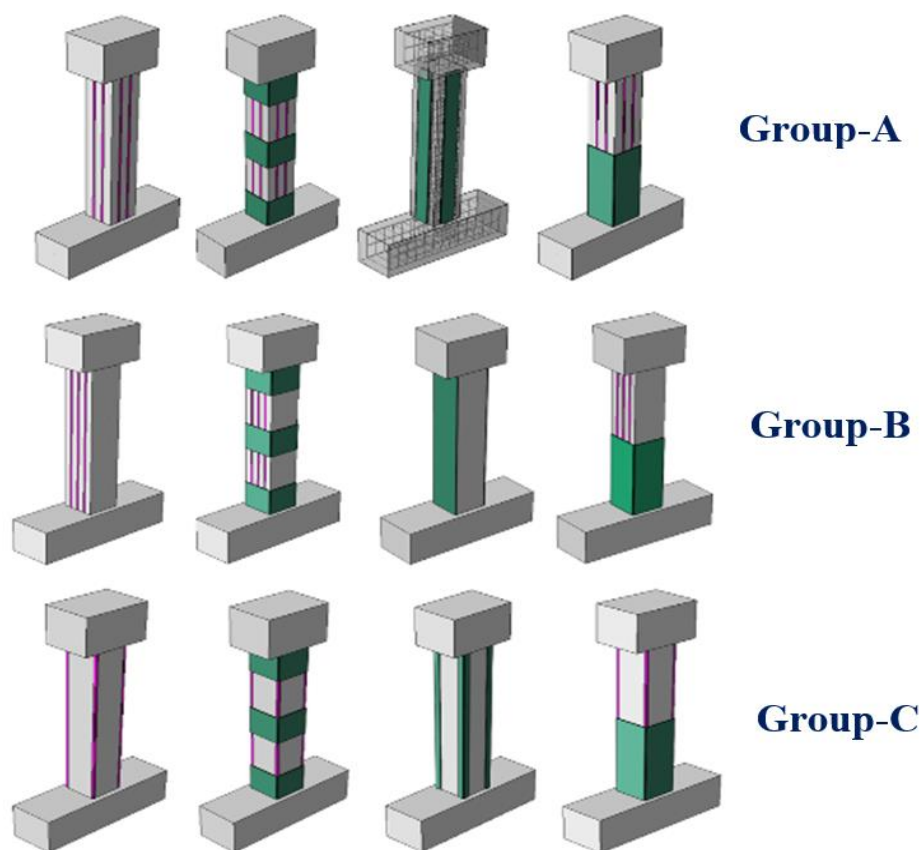


شکل ۱ مشخصات ستون مورد تحقیق در مقاله مرجع [۷]

۲-۲- طرح تقویتی

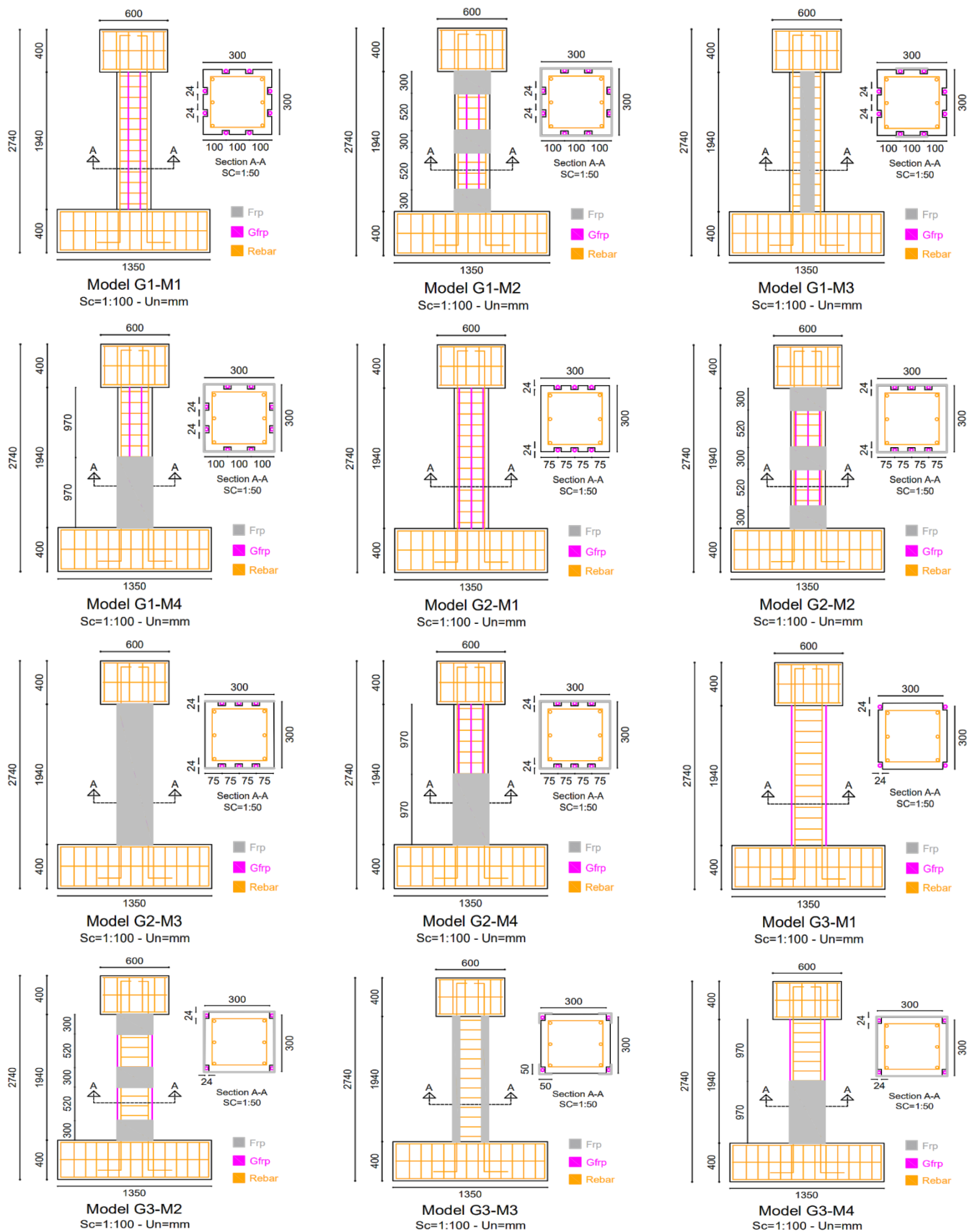
در این تحقیق طرح تقویتی پیشنهادی برای مدل مرجع، با میلگرد GFRP به روش NSM و ورق FRP با شیوه نصب مختلف طی سه گروه تقسیم‌بندی شده است. بطوریکه در گروه اول ستون بتن مسلح توسط ۸ میلگرد NSM، در گروه دوم توسط ۶ میلگرد NSM و در گروه سوم توسط ۴ میلگرد NSM و با شیوه‌های مختلف نصب ورق FRP تقویت شده است. اولین مدل از هر گروه بدون دورپیچ FRP در نظر گرفته شده تا تاثیر محصورشوندگی ورق FRP مشخص شود. دومین مدل از هر گروه توسط سه ورق FRP به شیوه نصب دورپیچ و بصورت منقطع روی بدنه ستون قرار گرفته. سومین مدل از هر گروه توسط یک لایه FRP به شیوه نصب طولی و بصورت سرتاسری پشت میلگردهای NSM قرار گرفته. چهارمین مدل از هر گروه توسط یک لایه FRP به شیوه دورپیچ در نیمه تحتانی ستون قرار گرفته تا باعث جلوگیری از شکست مفصلی ستون گردد. لازم به ذکر است که در هر سه گروه نحوه اتصال ورق FRP بگونه‌ای طراحی شده تا بعنوان کاور پوششی برای میلگرد NSM باشد و از گسیختگی زودرس میلگرد NSM جلوگیری نماید.

میلگردهای NSM با قطر ۱۴ میلیمتر توسط چسب اپوکسی در درون شیارهایی به طول و عرض ۲۴ میلیمتر قرار گرفته‌اند. همچنین در این تحقیق تلاش گردیده تا مدل رفتاری صحیحی از چسب اپوکسی به شیوه اجزاء محدود مدل‌سازی شود تا احتمال گسیختگی زودرس میلگرد GFRP در اثر زوال چسب اپوکسی در محاسبات لحاظ گردد. تفکیک گروه‌بندی طرح‌های تقویتی بر روی ستون بتن مسلح به شرح شکل شماره ۲ می‌باشد.



شکل ۲ طرح‌های تقویت شده در نرم افزار آباکوس

شکل شماره ۳ جزئیات طرح تقویتی برای ستون بتنی در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۳ جزئیات طرح‌های تقویتی برای ستون بتنی

۳- رفتار مصالح

۳-۱- بتن

برای شبیه‌سازی رفتار بتن در نرم افزار آباکوس، باید مدلی ارائه شود تا ترکیبی از رفتار خطی و خرابی پلاستیسیته بتن را نمایش دهد [۱]. مطابق مدل‌سازی مقاله مرجع، برای شبیه‌سازی رفتار بتن در نرم‌افزار آباکوس از روش CDP^۵ استفاده شد. همچنین برای محاسبه معیار رفتار فشاری بتن در نرم‌افزار آباکوس از رابطه اصلاح شده پوپویچ^۶ و برای تعریف رفتار کششی بتن از رابطه بلاری و اچ-سو^۷ استفاده گردید [۷]. بدین ترتیب مقدار پارامتر ویسکوزیته ۰/۰۰۱، مقدار پارامتر مدول الاستیسیته برابر ۲۳/۵ گیگاپاسکال و مقدار ضریب پواسون برابر ۰/۲ و مقاومت فشاری نهایی بتن ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. بر همین اساس پارامترها و خصوصیات رفتار بتن در نرم‌افزار آباکوس مطابق با جدول شماره ۱ وارد شد. لازم به ذکر است که برای مدل‌سازی ستون بتنی در نرم‌افزار آباکوس از حجم توپر (Solid) با قابلیت تغییر شکل غیرخطی (Deformable) استفاده شده است [۷].

جدول ۱ مقادیر عددی جهت تعیین رفتار بتن در نرم‌افزار آباکوس [۷]

نام مصالح	مقاومت	وزن مخصوص		ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
		kg/m ³	kg/m		
بتن	۴۰ MPa	۲۸۰۰	-	۰/۲	۲۳/۵ GPa

۳-۲- میلگرد فولادی

برای مدل‌سازی رفتار فولاد در نرم‌افزار آباکوس رفتار خطی و غیرخطی (الاستیک و پلاستیک) در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی میلگرد فولادی در نرم‌افزار آباکوس از مدل سیمی (Wire) با قابلیت تغییر شکل غیرخطی (Deformable) استفاده شده است. در ادامه مطابق با مدل مقاله مرجع، مدول الاستیسیته فولاد ۲۰۶ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و ضریب پواسون فولاد نیز ۰/۳ در نظر گرفته شد. سایر مقادیر به شرح جدول ۲ مقادیر عددی جهت تعریف رفتار فولاد در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهد [۷].

جدول ۲ مقادیر عددی جهت تعیین رفتار فولاد در نرم‌افزار آباکوس [۷]

نام مصالح	اندازه و مقاومت	وزن مخصوص		ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
		kg/m ³	kg/m		
فولاد	Ø8 Fu=۴۹۶	-	۰/۳۹۵	۰/۳	۲۰ GPa
	Ø14 Fu=۵۹۷	-	۱/۲۱		
	Ø18 Fu=۵۷۱	-	۲/۰۰		

۳-۳- میلگرد کامپوزیت (GFRP)

با توجه به اینکه میلگرد GFRP جزء مصالح تُرد و شکننده محسوب می‌شود، در نرم‌افزار آباکوس نیازی به تعریف رفتار غیرخطی (پلاستیک) نمی‌باشد. بنابراین در این تحقیق رفتار میلگرد GFRP به صورت خطی (الاستیک) و ایزوتروپیک در نظر گرفته شد. برای مدل-

⁵ Concrete Damaged Plasticity⁶ Popovics⁷ Belarbi and Hsu

سازی میلگرد GFRP در نرم افزار آباکوس از مدل سیمی (Wire) استفاده شد. سایر خصوصیات وارده به شرح جدول شماره ۳ در نظر گرفته شد [۱۱].

جدول ۳ مقادیر عددی جهت تعیین رفتار میلگرد GFRP در نرم افزار آباکوس [۱۱]

نام مصالح	اندازه و مقاومت	وزن مخصوص		ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
		kg/m ³	kg/m		
میلگرد GFRP	Ø14 Fu=۹۹۰	-	۰/۴۳۰	۰/۲۶	۵۵ GPa

۳-۴- ورق FRP

ورق‌های FRP در جهات مختلف به ندرت دارای رفتار غیرخطی خواهند بود. بطوریکه میزان آن بقدری ناچیز است که در محاسبات در نظر گرفته نمی‌شود. ورق FRP تا لحظه گسیختگی رفتار خطی (الاستیک) دارد و در مقاومت نهایی خود دچار شکستی ترد می‌شود. در این تحقیق مطابق با مقاله مرجع، از ورق FRP با الیاف دو جهته استفاده شد. در ورق‌های دو جهته، الیاف افقی و عمودی هم راستا می‌باشند، به همین دلیل مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی در الیاف طولی و عرضی، یکسان در نظر گرفته می‌شود. در نرم‌افزار آباکوس برای تعیین مشخصات مصالح FRP در جهات مختلف مطابق با جدول شماره ۴ از مواد ایزوتروپ (Lamina) و برای مدل‌سازی آن از حالت صفحه‌ای (Planer) استفاده شد.

جدول ۴ مقادیر عددی جهت تعیین رفتار ورق FRP در نرم افزار آباکوس [۷]

نام مصالح	مقاومت	وزن مخصوص		ضخامت ورق	مدول الاستیسیته
		kg/m ³	kg/m		
ورق FRP	۴۶۶ MPa	۱۷۸۰	-	۰/۵ mm	۲۳۱ GPa

۳-۵- چسب اپوکسی

برای تعریف رفتار لایه چسب در نرم‌افزار آباکوس نیاز به تعریف بخش الاستیک و پلاستیک و بخش خرابی آن می‌باشد. بطوریکه در ابتدا و هنگام شروع خرابی رفتار چسب به شکل خطی (الاستیک) و پس از آن وارد ناحیه غیرخطی و زوال می‌گردد. بدین جهت در بخش تعریف خصوصیات لایه چسب از المان Cohesive استفاده شد و علاوه بر مقاومت و چگالی، پارامترهای مربوط به آسیب (Maxs Damage) برای آن تعریف گردید. همچنین برای مدل‌سازی چسب اپوکسی در نرم‌افزار آباکوس از حجم توپر (Solid) با قابلیت تغییر شکل غیرخطی (Deformable) استفاده گردید. سایر اطلاعات مربوط به خصوصیات رفتاری چسب اپوکسی مطابق با جدول شماره ۵ می‌باشد [۳].

جدول ۵ مقادیر عددی جهت تعیین رفتار چسب اپوکسی در نرم افزار آباکوس [۳]

نام مصالح	مقاومت	وزن مخصوص		ضریب پواسون	مدول الاستیسیته
		kg/m ³	kg/m		
چسب اپوکسی	۴۰۰ MPa	۱۲۵۰	-	-	۱۸۲ GPa

۴- نوع تماس (اتصالات)

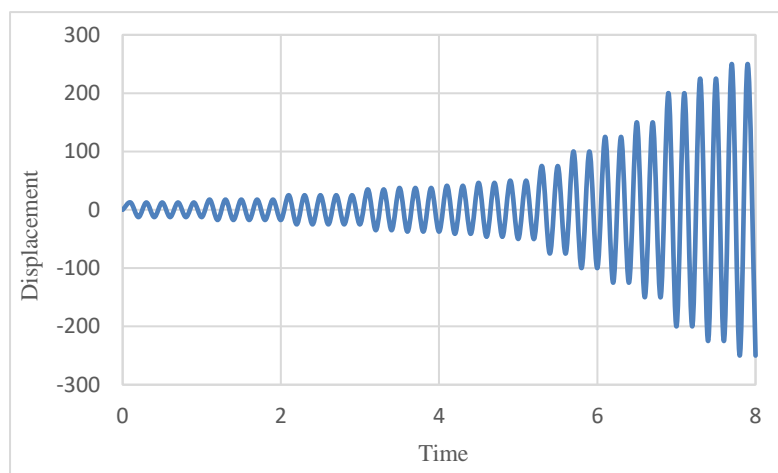
در این تحقیق میلگردهای GFRP درون چسب اپوکسی قرار گرفته و در شیارهایی که روی سطح ستون بتنی ایجاد شده، چسبیده است. بنابراین اندرکنش بین میلگرد GFRP با چسب اپوکسی با قید Embedded Region و اندرکنش بین چسب اپوکسی با سطح بتن با قید Tie ایجاد شده. اتصال ورق FRP به چسب اپوکسی بصورت اصطکاک تعریف شده و سپس به سطح بتن چسبیده شده. اندرکنش بین ورق FRP با چسب اپوکسی بصورت اصطکاک سطح به سطح (Surface To Surface Contact) ایجاد شده. در نهایت میلگردهای فولادی طولی و عرضی مدفون در ستون بتنی با قید Embedded Region تعریف شده تا مانع از جداسازی و لغزندگی میلگرد از بتن گردد [۱۸، ۷].

۵- مش بندی

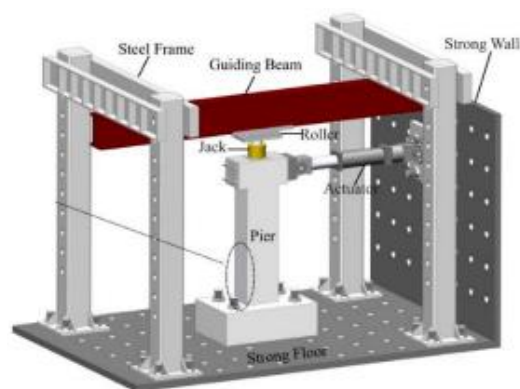
روش حل در نرم افزار آباکوس بر پایه اصول اجزاء محدود و تقسیم مدل به المان‌های کوچکتر می‌باشد که هرکدام از این المان‌های کوچک شده، مش^۸ نامیده می‌شود. بدین منظور نرم‌افزار قادر است تا نسبت تنش و کرنش را در هر کدام از مش‌ها تحلیل کرده و مسئله را حل نماید [۳]. در این تحقیق برای مش‌بندی بتن از گروه 3D Stress حالت C3D8R، برای مش‌بندی میلگردهای فولادی و GFRP از گروه Beam و حالت B31، برای مش‌بندی ورق FRP از گروه Shell حالت S4R و برای مش‌بندی چسب اپوکسی از گروه Cohesive حالت COH3D8 استفاده شده. در ادامه برای مش‌ریزی بتن و فولاد از روش Structure، برای چسب اپوکسی روش Hex و برای ورق و میلگرد کامپوزیت از روش Quad استفاده گردید [۱۸، ۷].

۶- بارگذاری و تحلیل

در این تحقیق از تحلیل استاتیکی غیرخطی^۹ برای استخراج منحنی هیستریزس^{۱۰} مدل‌ها استفاده شد. همچنین روش بارگذاری جانبی در تمامی مدل‌ها مطابق با مدل مرجع و شکل شماره ۴ بصورت جابجایی-زمان لحاظ گردید [۷]. این بارگذاری شبیه‌ساز اثر زلزله بر روی ستون می‌باشد. در این بارگذاری، نیروی جانبی بصورت منظم در واحد زمانی متناوب افزایش می‌یابد و باعث جابجایی سازه می‌شود. این افزایش نیرو تا جایی ادامه می‌یابد که اولین مفصل پلاستیک در سازه بوجود آید و پس از آن سازه تخریب می‌شود [۱]. در بارگذاری چرخه‌ای در ابتدا مقاومت به دلیل رفتار سخت شوندهگی افزایش یافته اما در نهایت، سختی (شیب منحنی) و مقاومت در اثر رفتار نرم‌شوندگی کاهش می‌یابد و اصطلاحاً منحنی‌های هیستریزس نسبت به حالت اولیه اندکی تغییر می‌کنند. تفاوت منحنی‌های هیستریزس در بارگذاری چرخه‌ای ناشی از همین مورد یعنی زوال سختی و مقاومت می‌باشد. لازم به ذکر است که با متصل کردن انتهای هر چرخه رفت و برگشتی در منحنی هیستریزس نیز می‌توان منحنی پوش‌آور^{۱۱} آن را رسم نمود [۴۳].



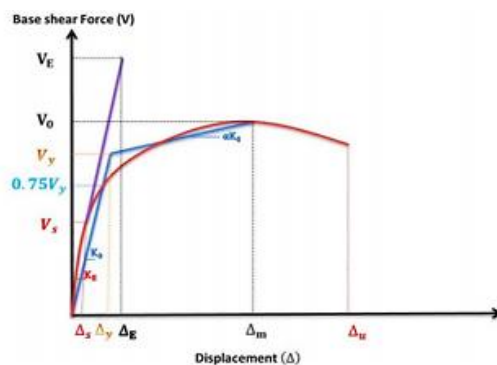
ب) الگوی بارگذاری رفت و برگشتی اعمال شده بر روی مدل [۷]



الف) نحوه اعمال بارگذاری روی ستون [۹]

۷- ضریب رفتار

بطور کلی نسبت تغییر شکل نهایی سازه نسبت به تغییر شکل لحظه تسلیم سازه را ضریب رفتار می‌گویند. همچنین ظرفیت تغییر شکل غیرارتجاعی در سازه‌ها با کمک ضریب شکل‌پذیری بیان می‌گردد. مسلم است که هرچه عدد ضریب شکل‌پذیری یک سازه (R) بزرگتر باشد، میزان جذب انرژی بالاتر بوده [۳۱]. هنگامی که یکی از اعضای سازه به حد تسلیم می‌رسد با تشکیل مفصل پلاستیک به تدریج سختی سازه با کاهش درجه نامعینی استاتیکی کاهش می‌یابد 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 می‌شود تا جایی که سازه از نظر استاتیکی ناپایدار شده و دیگر توان تحمل بار جانبی اضافی را نداشته باشد. به میزان مقاومت اضافه‌ای که سازه بعد تشکیل اولین مفصل پلاستیک تا مرحله‌ی ناپایداری از خود نشان می‌دهد ضریب اضافه مقاومت (Ω) نامیده می‌شود [۴۲]. بنابراین برای محاسبه ضریب رفتار ستون‌های تقویت شده در این تحقیق ابتدا منحنی پوش‌آور به روش پریستلی و پائولی^{۱۲} دو خطی شده و سپس ضریب رفتار با روش چوپرا^{۱۳} محاسبه گردیده. برای محاسبه ضریب رفتار باید 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 شکل‌پذیری (μ) را مطابق با شکل شماره ۶ از منحنی پوش‌آور استخراج شود و سپس با استفاده از روابط شماره ۱ تا ۴ ضریب رفتار محاسبه گردد [۱].



شکل ۵ مکان‌گزینی پارامترهای موثر جهت دوخطی کردن نمودار پوش‌آور [۹]

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (۱)$$

$$R_s = \frac{V_0}{V_s} \quad (۲)$$

$$\Omega = \frac{V_y}{V_d} \quad (۳)$$

$$R = R_s R_\mu \quad (۴)$$

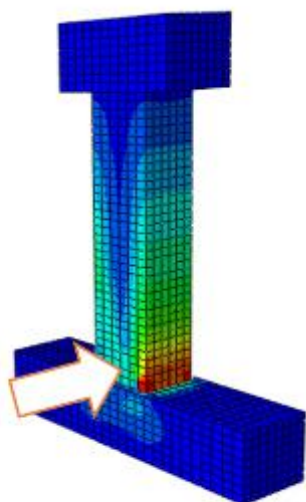
۸- صحت‌سنجی نتایج

با عنایت به مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس مشخص گردید که انطباق خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی برقرار می‌باشد. میزان اختلاف اندکی که در نتایج بوجود آمده است ناشی از غیر قابل پیش‌بینی بودن دقیق رفتار بتن در محدوده‌ی پلاستیک می‌باشد [۳]. با مقایسه نتایج بدست آمده از روش عددی با روش آزمایشگاهی نیز مشخص گردید که ستون بتنی دچار شکست مفصلی به همراه

¹² Priestley & Paulay

¹³ Chopra

ترک‌های خمشی در سطوح میانی گردیده است. نتایج مربوط به صحت سنجی نتایج و میزان اختلاف آن به شرح جدول و شکل شماره ۷ می‌باشد.



شکل ب) نوع شکست مفصلی در نرم افزار آباکوس

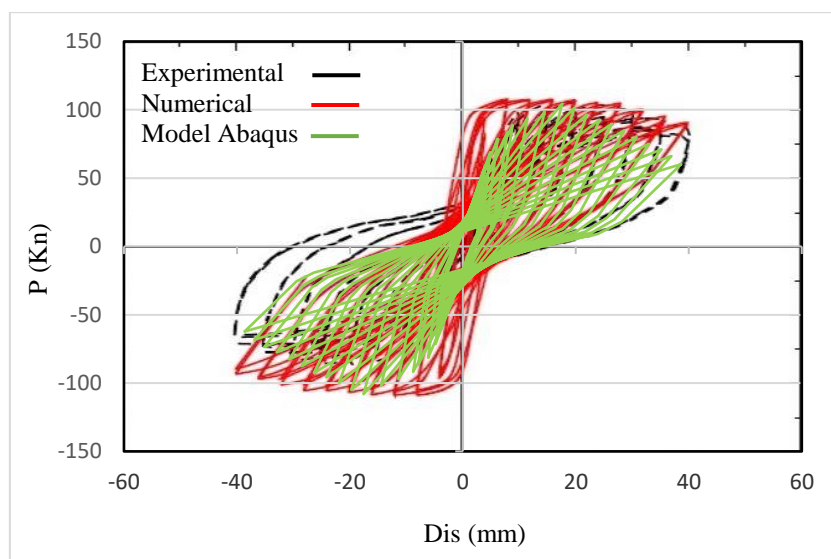


شکل الف) نوع شکست مفصلی ستون در آزمایشگاه

شکل ۶ مقایسه نواحی ترک و آسیب مدل آزمایشگاهی، مدل سازی عددی مرجع و مدل سازی عددی بدست آمده در این تحقیق [۷]

جدول ۶ مقایسه پارامترهای عددی مستخرج از نمودار پوش آور و میزان اختلاف آن با داده‌های مقاله مرجع [۷]

شکل پذیری	نقطه خرابی		نقطه ماکزیمم		نقطه عملکرد		نام مدل	
	μ_r	$\Delta f / \text{mm}$	Failure Point / kN	$\Delta p / \text{mm}$	Peak Point / kN	$\Delta y / \text{mm}$		Yeild Point / kN
۵/۵۲		۳۶/۳	۱۰۵/۲	۱۰/۷	۱۱۸/۴	۶/۱	۱۰۵/۲	Reference
		-۳۵/۴	-۱۰۶/۷	-۱۰/۹	-۱۱۵/۷	-۶/۵	-۱۰۷/۴	
۴/۵۷		۳۳/۱	۹۹/۱	۹/۵	۱۱۰/۹	۷/۵	۱۰۳/۱	Control Column
		-۳۱/۲	-۱۰۲/۲	-۹/۵	-۱۱۱/۲	-۶/۵	-۱۰۴/۵	
-		%۴	%۱۵	%۲	%۸	%۱۰	%۷	میزان اختلاف



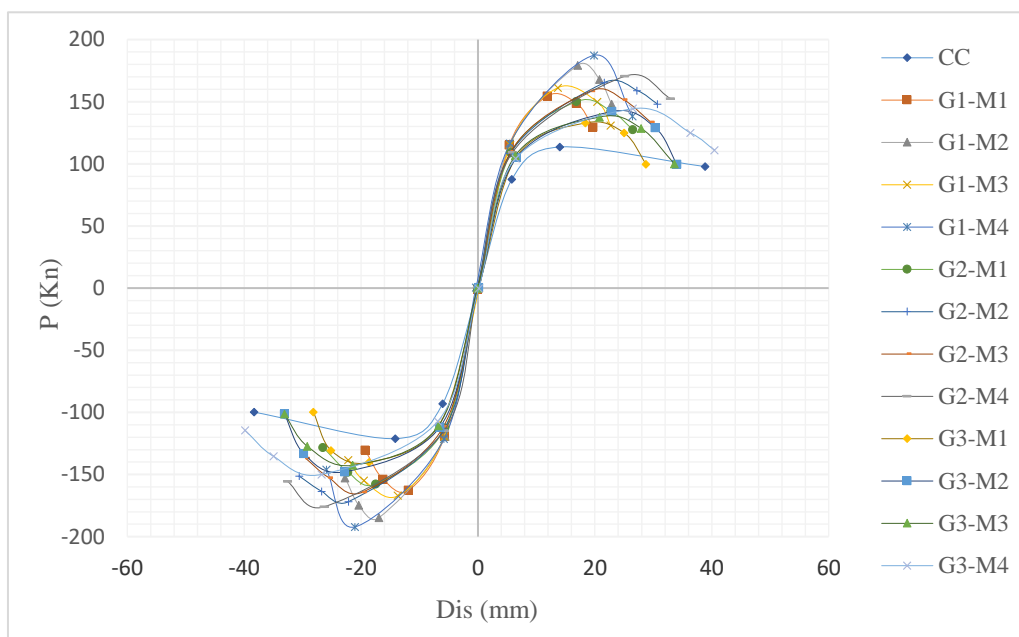
شکل ۷ هم‌پوشانی و مقایسه منحنی هیستریزس مدل این تحقیق با مدل‌های آزمایشگاهی و مدل عددی مرجع [۷]

۹- یافته‌ها

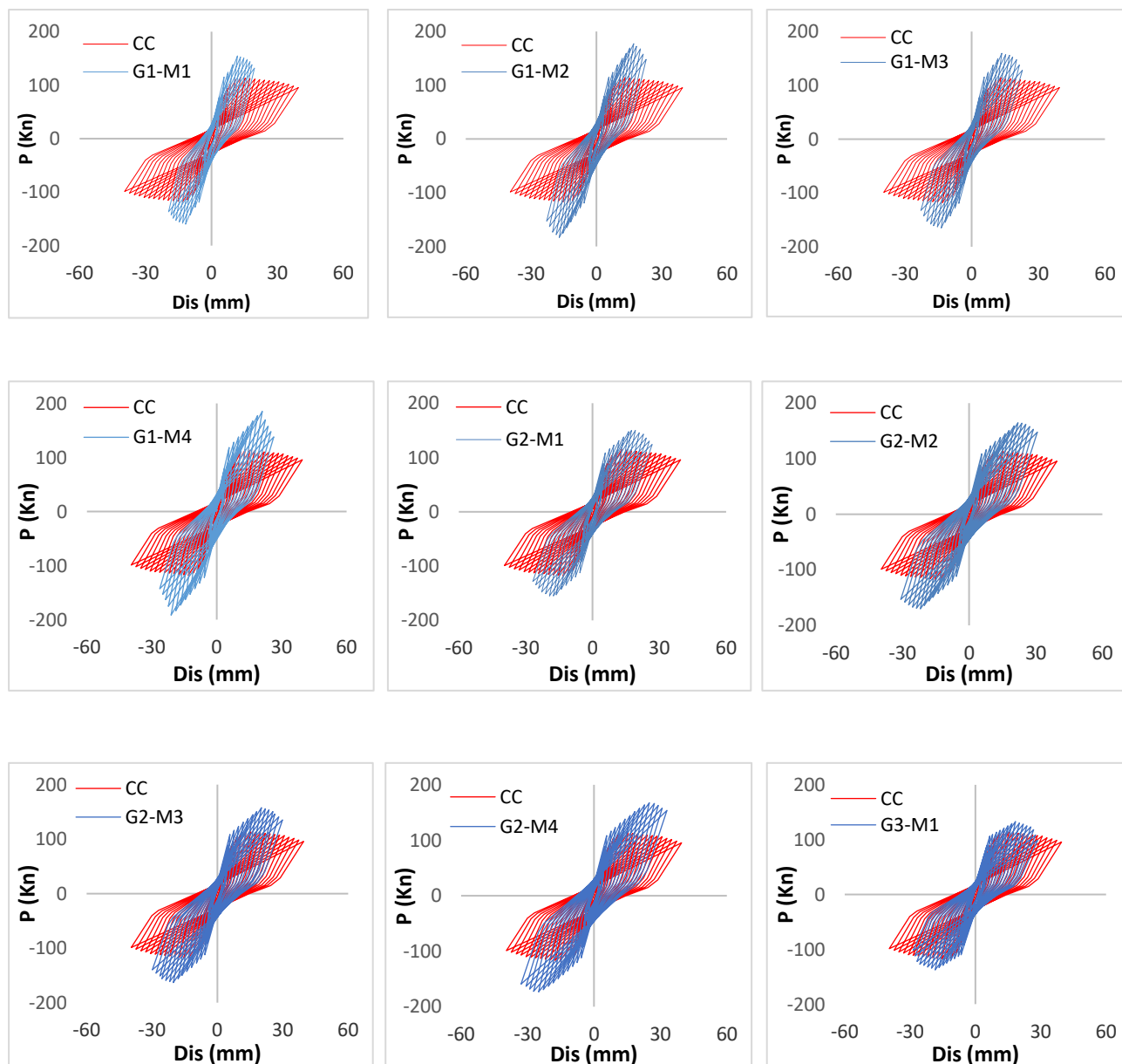
۹-۱- مقاومت لرزه‌ای

منحنی هیستریزس بیانگر میزان ظرفیت باربری و شکل‌پذیری سازه در اثر بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی می‌باشد. بطور کلی اگر حلقه‌های هیستریزس به صورت باریک و کوتاه (لاغر) باشند، یعنی مقاومت و شکل‌پذیری سازه در برابر بار وارده کم است و عبارتی سازه توانایی کمی در جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای خواهد داشت. اما اگر حلقه‌های هیستریزس به صورت پهن و بلند (چاق) باشند، نشانه مقاومت و شکل‌پذیری مناسب سازه است که در اینصورت سازه توانایی بالایی در جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای خواهد داشت [۲۰]. در شکل شماره ۹ منحنی هیستریزس تمامی مدل‌ها پس از اعمال بارگذاری با مدل کنترل مقایسه شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در مدل‌های M1-G1,2,3 (مدل‌های بدون تقویت ورق FRP) به دلیل مقاومت و سختی بالای میلگرد NSM مقاومت جانبی ستون افزایش پیدا کرده ولی رفتار ستون ترد شده. بنابراین در این حالت احتمال جداشدگی زودرس میلگرد NSM در اثر زوال چسب اپوکسی افزایش پیدا می‌کند. اما در مدل‌های دوم تا چهارم هر گروه که ستون بتنی با میلگرد NSM و ورق FRP تقویت شده علاوه بر افزایش مقاومت جانبی ستون نیز میزان شکل‌پذیری آن هم بیشتر شده. بنابراین در صورت استفاده از ورق FRP میزان دوام لرزه‌ای ستون بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات انجام شده در سایر مراجع مؤید این موضوع می‌باشد [۱,۳,۴,۹]. قابل ذکر است که شیوه نصب ورق FRP هم از اهمیت زیادی برخوردار است. بطوریکه در مدل M4-G1,2,3 (دورپیچ ورق FRP در نیمه تحتانی ستون) ثابت شد که علاوه بر جلوگیری از جداشدگی زودرس میلگرد NSM، این شیوه باعث جلوگیری از گسترش ترک و به تعویق افتادن شکست مفصلی در پای ستون هم می‌شود.

شکل شماره ۸ منحنی پوش‌آور مدل‌های تقویتی را پس از بارگذاری چرخه‌ای رفت و برگشتی نشان می‌دهد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش تعداد میلگردهای NSM در مقاومت جانبی ستون نیز افزایش می‌یابد. اما بدلیل سختی بالای میلگرد NSM شکل‌پذیری ستون کاهش و سختی آن هم افزایش می‌یابد. همچنین استفاده همزمان از میلگرد NSM و ورق FRP میزان شکل‌پذیری ستون را افزایش می‌دهد و باعث جلوگیری از جداسازی زودرس میلگرد NSM می‌شود. بنابراین نحوه اتصال میلگرد GFRP به سطح بتن و محصورشوندگی آن از اهمیت زیادی برخوردار است. قابل ذکر است که مدل G1-M4 دارای بیشترین مقاومت جانبی به میزان ۱۸۷ کیلو نیوتن که نسبت به مدل کنترل رشد ۴۱٪ را نشان می‌دهد.



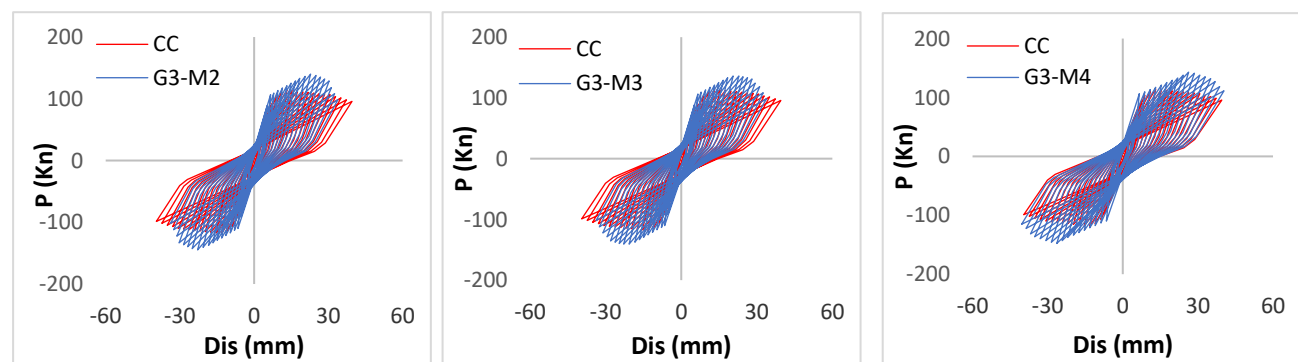
شکل ۸ مقایسه منحنی پوش‌آور ستون‌ها



شکل ۹ مقایسه منحنی هیستریزیس ستون‌های مورد مطالعه

جدول ۷ نتایج بدست آمده و مقایسه عملکرد ستون‌ها

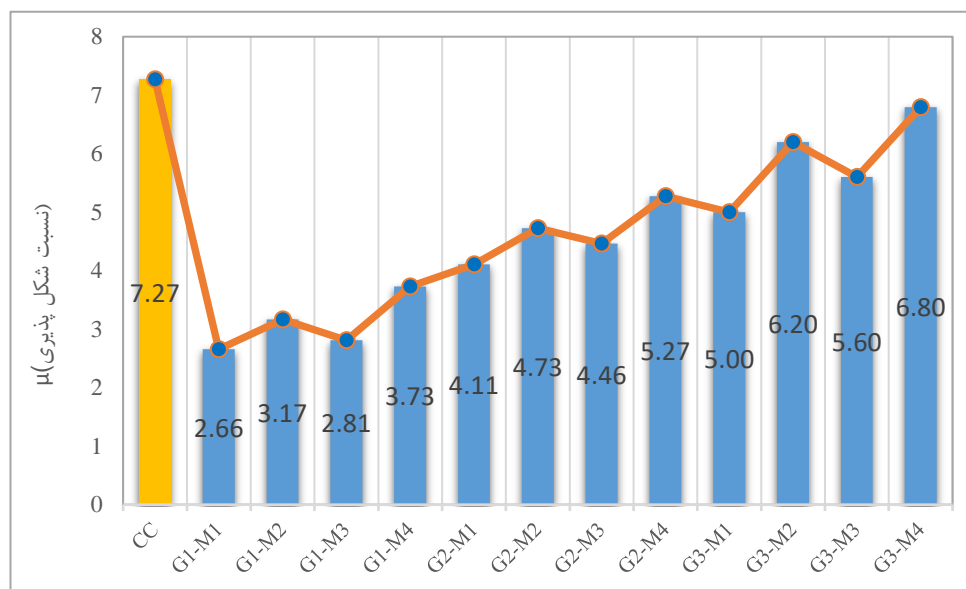
نام مدل	نقطه عملکرد		نقطه ماکزیمم		نقطه خرابی		شکل پذیری	انرژی جذب شده
	Yeild Point / kN	$\Delta y / \text{mm}$	Peak Point / kN	$\Delta m / \text{mm}$	Failure Point / kN	$\Delta f / \text{mm}$		
Control Column	103/1	7/5	110/9	9/5	99/1	33/1	4/57	28466
	-104/5	-6/5	-111/2	-9/5	-102/2	-31/2		
	114/5	5/5	153/5	12/4	151/3	17/2		
G1-M2	114/2	5/5	179/5	17/4	174/6	19/2	3/46	28141
	-116/3	-5/5	-180/6	-16/7	-172/2	-18/9		
G1-M3	117/2	5/5	158/5	13	155/6	18/2	3/28	23816
	-113/1	-5/5	-162/1	-13/2	-157/1	-17.9		
G1-M4	114/6	5/5	186/6	20/5	174/2	22/4	4/03	33138
	-116/2	-5/5	-187/5	-19/7	-170/1	-21/9		
G2-M1	109/5	6	149/2	18/2	146/9	24/2	3/83	29403
	-111/2	-6	-151/3	-16/1	-147/2	-21/8		
G2-M2	112/1	6	166/5	23/1	163/2	27/3	4/35	37261
	-108/5	-6	-164/2	-21	-161/5	-24/9		
G2-M3	111/4	6	155/6	20/3	153/6	26.2	4.18	33813
	-109/5	-6	-157/1	-18/2	-153/4	-24		
G2-M4	110/6	6	172/3	26/2	166/7	30/1	4/85	38505
	-110/2	-6	-168/4	-24/3	-164/3	-28/1		
G3-M1	107/2	6/5	132/2	18/3	130/2	26/3	3/88	27952
	-102/9	-6/5	-130/1	-18	-128/4	-24/2		
G3-M2	107/2	6/5	144/7	24/4	133/2	31.4	4/80	36142
	-102/9	-6/5	-135/8	-22	-127/4	-31		



32488	4/36	29/3	134/8	22/2	138/5	6/5	107/1	G3-M3
		-27/4	-127/2	-20/4	-132/4	-6/5	-103/2	
45156	5/44	36/4	144/2	28/3	147/9	6/5	107/2	G3-M4
		-34/3	-139/9	-26/4	-143/2	-6/5	-102/9	

۹-۲- نسبت شکل پذیری

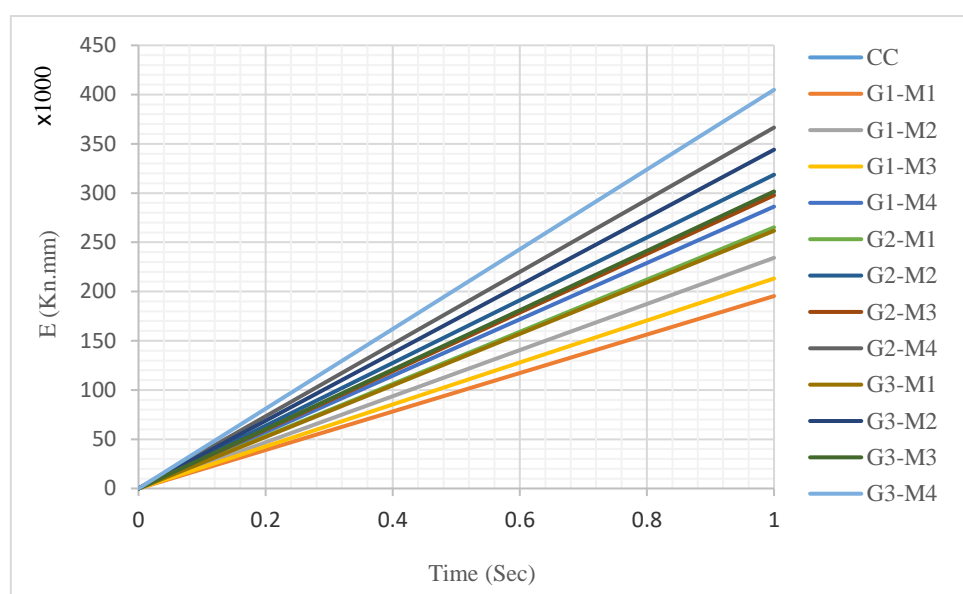
شکل پذیری سازه به خصوصیات و جنس مصالح بکار رفته در سازه ارتباط دارد. میزان شکل پذیری سازه در میزان جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای اهمیت زیادی دارد. نسبت شکل پذیری از رابطه $\mu = \Delta y / \Delta U$ تعیین می‌گردد که Δy تغییر شکل حد جاری شدن و ΔU تغییر شکل نهایی ستون است و معمولاً برابر با تغییر مکان معادل ۸۵٪ حداکثر مقاومت ستون در نظر گرفته می‌شود [۴۰]. نتایج این بخش نشان می‌دهد که در مدل‌هایی که از ورق FRP در طرح تقویتی استفاده شده، نسبت شکل پذیری (μ) در (محدوده‌ی پلاستیسیته) تحت فرکانس‌های بارگذاری چرخه‌ای افزایش می‌یابد. بطوریکه در مدل‌های M4-G1,2,3 بیشترین نسبت شکل پذیری به ترتیب با نسبت ۶/۸۰، ۵/۲۷ و ۳/۷۳ و در مدل‌های M1-G1,2,3 کمترین نسبت شکل پذیری به ترتیب با نسبت ۲/۶۶، ۴/۱۱ و ۵ بدست آمده. با توجه به منحنی پوش‌آور در شکل شماره ۸ مشخص گردید که میلگردهای طولی فولادی فقط در مدل کنترل (Control Column) جاری شده و دارای شکل پذیری بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های مورد مطالعه می‌باشد. لکن در سایر مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM بدلیل سختی بالای GFRP شبکه آرماتور مقاومت جانبی افزایش و شکل پذیری بطور محسوسی کاهش می‌یابد. بطوریکه با افزایش تعداد میلگردهای GFRP رفتار ستون تردتر شده و نسبت شکل پذیری کاهش می‌یابد و عبارتی گسیختگی بدون نشانه (شکست بدون ترک) رخ می‌دهد. اما استفاده از ورق FRP علاوه بر آنکه باعث محصورشوندگی میلگرد NSM می‌شود باعث افزایش شکل پذیری و جلوگیری از باز و بسته شدن متوالی ترک‌های پلاستیک ستون هم خواهد شد. بنابراین ستون‌های تقویت شده با میلگرد NSM و ورق FRP دارای شکل پذیری بیشتری در مقایسه مدل بدون ورق FRP می‌باشند. شکل شماره ۱۰ میزان نسبت شکل پذیری مدل‌های مورد مطالعه را نشان داده و مقایسه می‌کند.



شکل ۱۰ مقایسه نسبت شکل پذیری ستون‌ها در فاز غیر خطی

۳-۹- استهلاک انرژی

میزان استهلاک انرژی یکی از مهم‌ترین معیارهای مقاوم‌سازی در بهسازی لرزه‌ای می‌باشد. میزان انرژی مستهلک شده در هر چرخه رفت و برگشتی معادل مساحت زیر منحنی هیستریزیس در همان چرخه می‌باشد. بنابراین انرژی مستهلک لرزه‌ای تجمعی برابر مجموع انرژی مستهلک شده در تمامی چرخه‌های هیستریزیس سازه می‌باشد [۲۷]. تاکنون ثابت شده که افزایش مقاومت همراه با افزایش شکل‌پذیری، باعث افزایش میزان جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای تجمعی خواهد شد [۳۲]. طبق نتایج بدست آمده مشخص شد که تعداد



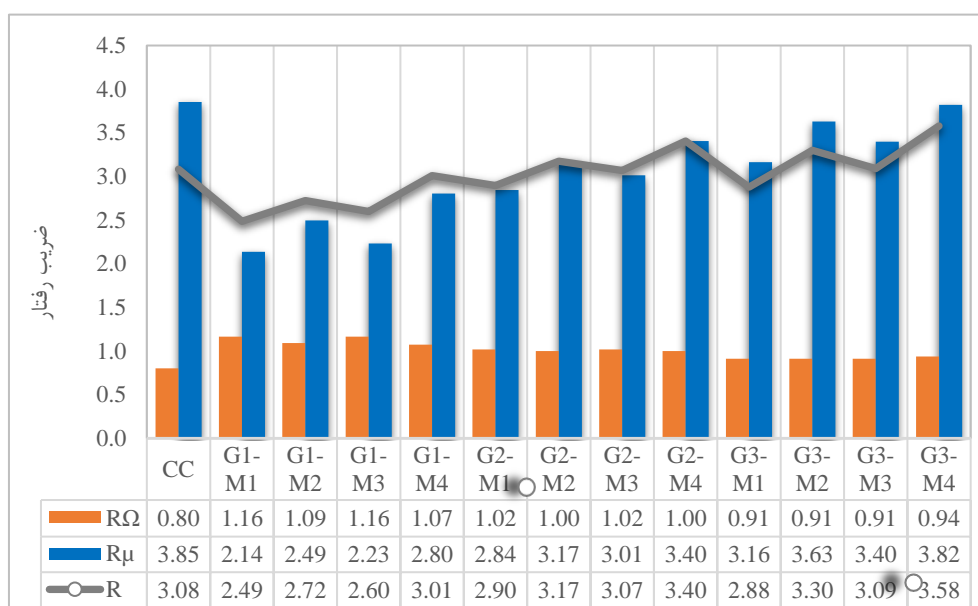
شکل ۱۱ مقایسه میزان انرژی مستهلک شده توسط هر ستون در واحد زمان

میلگردهای NSM و شیوه نصب ورق FRP در میزان جذب و مستهلک نمودن انرژی لرزه‌ای تاثیرگذار است. بطوریکه کاهش سختی ستون با استفاده از تعداد کمتر میلگرد NSM و استفاده از ورق FRP با شیوه نصب دورپیچ (مدل دو و چهارم) باعث بیشترین میزان جذب و مستهلک نمودن انرژی لرزه‌ای در ستون بتنی خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل G3-M4 و پس از آن مدل G2-M4 به ترتیب بیشترین میزان جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای تجمعی را خواهند داشت. نتایج ارائه شده در سایر مراجع [۱۷] نیز مؤید این مطلب است. همچنین در مدل‌های تقویتی با میلگرد NSM بدون ورق FRP میزان جذب و استهلاک انرژی تجمعی لرزه‌ای کمتر از مدل کنترل می‌باشد. شکل شماره ۱۱ میزان انرژی مستهلک شده تجمعی مدل‌های تقویت شده در واحد زمان نشان می‌دهد.

۴-۹- ضریب رفتار

از دیگر عوامل مهم در تحلیل طرح تقویتی سازه، ضریب رفتار است که ارتباط مستقیمی بین مقاومت سازه با نیروی وارده دارد. بطوریکه هرچه ضریب رفتار سازه بزرگتر باشد یعنی کاهش مقاومت سازه در حالت غیرارتجاعی کمتر بوده و سازه رفتار مطلوب‌تری در برابر نیروی وارده خواهد داشت. ضریب رفتار از حاصل ضرب ضرایب شکل‌پذیری و اضافه مقاومت بدست می‌آید [۳۰]. ضریب شکل‌پذیری سازه برابر با نسبت جابجایی نهایی به جابجایی تسلیم سازه می‌باشد. در این تحقیق ضرایب شکل‌پذیری، اضافه مقاومت و رفتار ستون‌های تقویت شده به شرح شکل شماره ۱۲ می‌باشد مطابق با نتایج بدست آمده، میزان ضریب رفتار مدل‌های M4-G1,2,3 (مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM و ورق FRP) به ترتیب برابر با ۳/۰۱ و ۳/۴۰ و ۳/۵۸ است که دارای بزرگترین ضریب رفتار در مقایسه با سایر مدل‌های مورد مطالعه می‌باشند. در حالیکه میزان ضریب رفتار مدل‌های M1-G1,2,3 (مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM) به ترتیب برابر با ۲/۴۹،

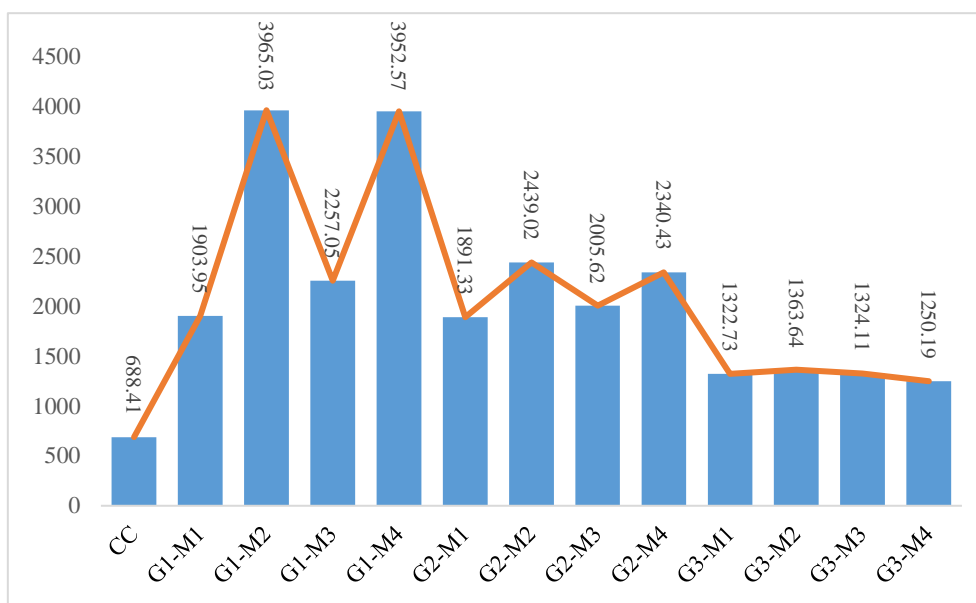
۲/۹۰ و ۲/۸۸ است که دارای کوچکترین ضریب رفتار در مقایسه با سایر مدل‌های مورد مطالعه می‌باشند. همچنین مدل G2-M4 و پس از آن مدل G3-M4 که به ترتیب با شش و چهار میلگرد NSM و ورق FRP به شویبه دورپیچ در قسمت تحتانی ستون تقویت شده از عملکرد بهتری در برابر نیروی لرزه‌ای برخوردار بوده. در حالیکه اما این مهم در ستون‌های دارای سختی بیشتر، دیده نمی‌شود. بطوریکه در مدل‌های گروه اول، تعداد بالای میلگرد NSM باعث گردید تا سختی ستون افزایش یافته و میزان ضریب رفتار آن کاهش یابد.



شکل ۱۲ مقایسه ضرائب اضافه مقاومت، شکل پذیری و رفتار ستون‌ها

۹-۵- سختی ستون

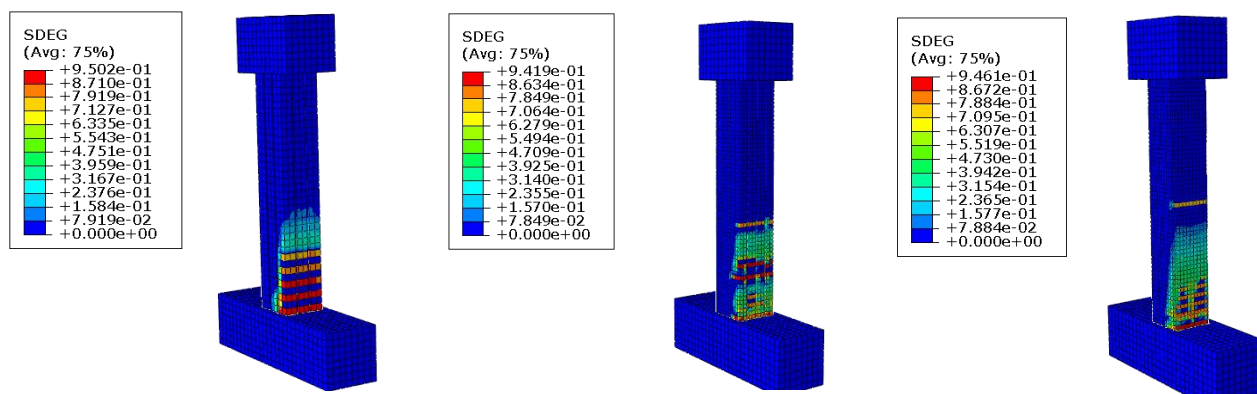
بطور کلی سختی ستون به معنای میزان مقاومت ستون در برابر تغییر شکل است. میزان سختی یکی از عوامل تعیین کننده‌ای است که برای بررسی رفتار سازه‌ها از جمله ستون‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [۳۱]. برای بررسی اثر سختی ستون‌های تقویت شده با در نظر گرفتن شیب منحنی پوش‌آور مدل‌ها در محدوده‌ی ارتجاعی (سختی اولیه یا سختی الاستیک) نسبت به محدوده گسیختگی (سختی ثانویه یا سختی پلاستیک) محاسبه و تخمین زده شد. قابل ذکر است که میزان کاهش سختی نیز از حاصل تفریق سختی اولیه نسبت به سختی ثانویه بدست می‌آید [۱۲]. مطابق با شکل شماره ۱۳ مشخص گردید که با افزایش تعداد میلگرد NSM میزان سختی ستون‌ها، افزایش می‌یابد. همچنین میزان سختی ستون‌ها علاوه بر تعداد و محل جانمایی میلگردهای NSM نیز به شیوه نصب ورق FRP ارتباط خواهد داشت. بطوریکه در مدل‌های G1,2 – M2,3 (مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM و ورق FRP) در مقایسه با مدل‌های G1,2,3-M1 (مدل‌های تقویت شده با میلگرد NSM)، بطور میانگین تا ۵۰٪ کاهش سختی را نشان می‌دهند. در حالیکه میزان کاهش سختی مدل G1,2,3-M4 (تقویت شده با میلگرد NSM و ورق FRP در قسمت فوقانی ستون) کمتر از ۱۰٪ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت در مواردی که نیاز به افزایش سختی ستون است (مواردی از قبیل کنترل اثرات P-Δ برای جلوگیری از آسیب دیدن اجزاء غیرسازه‌ای، حفظ تجهیزات و لوازم حساس در ساختمان‌های خاص و تأمین ایمنی و غیره) می‌توان سختی ستون را با استفاده از میلگردهای GFRP افزایش داد.

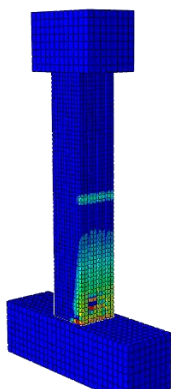
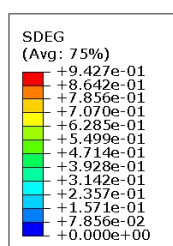


شکل ۱۳ مقایسه میزان کاهش سختی ستون

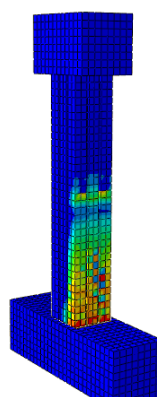
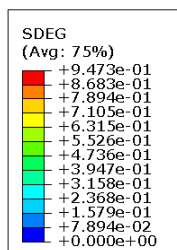
۹-۶- مد شکست

شدت آسیب و میزان ترک خوردگی مدل‌های مورد مطالعه با استفاده از کانتورهای رنگی ایجاد شده روی سطح ستون‌ها در شکل شماره ۱۴ نمایش داده شده. بطوریکه ترک‌های عمیق که در اثر سختی بالا روی سطح بتن ایجاد گردیده با رنگ قرمز و ترک‌های سطحی با رنگ سبز مشخص شده است. طبق نتایج بدست آمده مشخص گردید که مدل M4-G1,2,3 به دلیل محصور شدگی با ورق FRP در قسمت تحتانی ستون، دارای کمترین میزان ترک در سطح و بدنه ستون بوده و گسیختگی آن بصورت شکست مفصلی در پای ستون تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای ایجاد شده. همچنین مدل‌های M1-G1,2,3 به استناد از ضریب رفتار آن‌ها و همچنین شکل شماره (۱۴-الف، ه، ک) ترک و شکست خمشی و برشی بیشتری را نشان می‌دهند و رفتار ترد و سخت‌تری دارند. اکثر مدل‌ها علرغم سختی بیشتر نسبت به مدل کنترل علاوه بر تحمل ترک‌های خمشی نیز در اثر مفصل پلاستیکی ایجاد شده در پای ستون گسیخته می‌شوند. همچنین در گروه اول بدلیل تعداد و نحوه قرارگیری میلگردهای NSM میزان ترک‌های ایجاد شده کاهش یافته است. با عنایت به تحلیل‌های انجام شده نیز می‌توان دریافت که ورق FRP موجب کاهش ترک‌های خمشی روی سطح ستون بتنی شده و با افزایش تعداد ورق FRP می‌توان گسیختگی ستون را به تعویق انداخت.

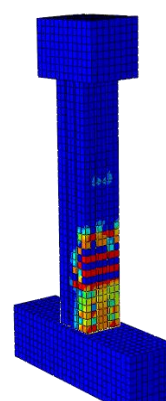
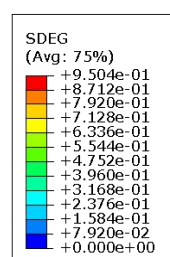




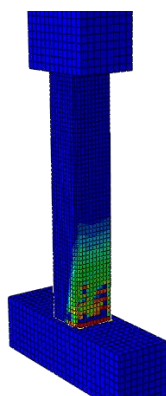
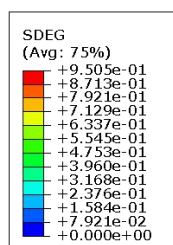
(د) گروه یک، مدل چهار



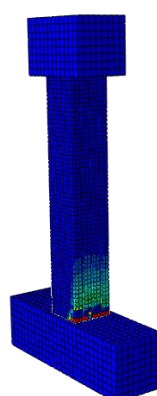
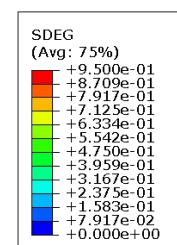
(ه) گروه دو، مدل یک



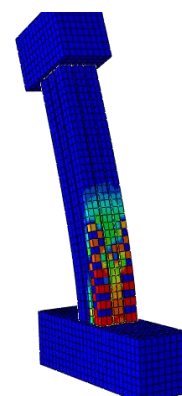
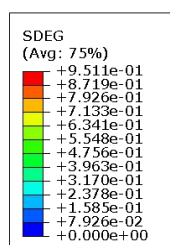
(و) گروه دو، مدل دو



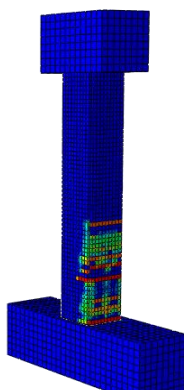
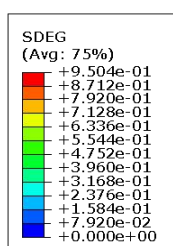
(ز) گروه دو، مدل سه



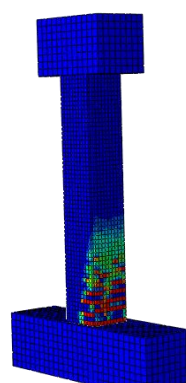
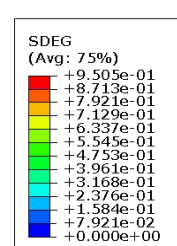
(ط) گروه دو، مدل چهار



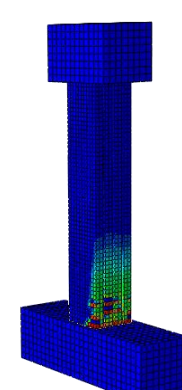
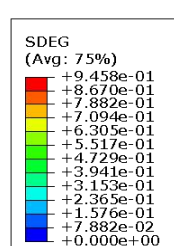
(ک) گروه سه، مدل یک



(گ) گروه سه، مدل دو



(ن) گروه سه، مدل سه



(م) گروه سه، مدل چهار

شکل ۱۴ مُد شکستگی و میزان آسیب پلاستیسیته ستون‌های تقویت شده

۹-۷- شاخص اقتصادی

یکی از پارامترهای مهم و ضروری در مقاوم‌سازی، ارائه طرحی اقتصادی و در عین حال با عملکرد مطلوب می‌باشد. بتن و فولاد مصالحی هستند که به صورت گسترده در ساخت و سازها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزایای هر دو مصالح امروزه به خوبی شناخته شده است. بتن مصالحی با سختی بالا، ارزان قیمت (نسبت به سایر مصالح و مقاومت قابل توجه در برابر آتش سوزی) و فولاد مصالحی با شکل‌پذیری و مقاومت بالا و وزن کم است. اما مصالح کامپوزیت دارای قیمت بالا و نیز دسترسی نسبتاً سخت‌تر نسبت به مصالح بتنی و فولادی می‌باشد [۳۸]. لذا استفاده بهینه از آن‌ها ضمن برآورده نمودن افزایش مقاومت و دوام توام با هزینه اقتصادی از اهمیت بالایی برخوردار است. مطابق شکل شماره ۱۶ شاخص اقتصادی طرح بر اساس هزینه تمام شده در هر طرح تقویتی نسبت به ضریب رفتار، مقاومت جانبی و میزان استهلاک انرژی تجمعی برآورده شده. مطابق با طیف رنگی درج شده، رنگ سبز به معنای اقتصادی‌ترین حالت و رنگ قرمز به معنای غیراقتصادی‌ترین حالت مقاوم‌سازی در این تحقیق می‌باشد. نتایج این بخش نشان می‌دهد که بطور کلی مدل‌های M4-G1,2,3 (طرح تقویتی با میلگرد NSM و ورق FRP در قسمت تحتانی) جز بهینه‌ترین و توجیه‌پذیرترین طرح تقویتی این تحقیق می‌باشد. اما در مقابل آن مدل‌های M3-G1,2,3 (استفاده از ورق FRP در پشت میلگرد NSM) جز غیراقتصادی‌ترین طرح تقویتی این تحقیق می‌باشد. البته قابل ذکر است که در مقاوم‌سازی سازه اولویت با عملکرد سازه‌ای و رفتار لرزه‌ای آن است و شاخص هزینه در اولویت‌های بعدی قرار دارد. لذا این شاخص بعنوان برتری الگوی شکلی خاصی محسوب نمی‌شود و صرفاً جهت مقایسه انجام شده است.

نام مدل	شاخص اقتصادی بر اساس حداکثر مقاومت	شاخص اقتصادی بر اساس ضریب رفتار	شاخص اقتصادی بر اساس استهلاک انرژی
G1-M1	24.29	16.95	17.42
G1-M2	34.31	21.52	21.95
G1-M3	32.07	21.69	21.59
G1-M4	34.03	19.77	19.21
G2-M1	18.70	10.81	9.56
G2-M2	31.69	16.85	14.06
G2-M3	34.72	19.25	16.05
G2-M4	31.87	15.92	14.10
G3-M1	14.28	7.64	6.70
G3-M2	30.68	14.74	11.91
G3-M3	26.72	13.26	11.14
G3-M4	30.86	13.82	9.95

■ اقتصادی‌ترین حالت ■ گرانترین حالت

شکل ۱۶ شاخص اقتصادی نسبت به پارامترهای متفاوت

۱۰- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق مقایسه و ارائه طرح تقویتی ستون بتن مسلح با مصالح کامپوزیت در الگوهای مختلف شکلی تحت بارگذاری چرخه‌ای بود. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاوم‌سازی با مصالح کامپوزیت یک الگوی مناسب جهت افزایش ظرفیت باربری جانبی در ستون‌های بتنی می‌باشد. برخی از مهم‌ترین نتایج بدست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- استفاده از میلگرد GFRP در تقویت ستون بتنی باعث افزایش مقاومت جانبی، افزایش سختی ستون، کاهش شکل‌پذیری و کاهش میزان استهلاک انرژی لرزه‌ای خواهد شد. بطوریکه استفاده از حداقل چهار میلگرد GFRP به تنهایی می‌تواند تا ۱۵٪ مقاومت جانبی ستون را افزایش دهد.

۲- استفاده از ورق FRP با شیوه‌های نصب متفاوت در تقویت ستون با میلگرد NSM می‌تواند میزان مقاومت جانبی و شکل‌پذیری ستون بتنی را افزایش دهد.

۳- استفاده از میلگرد NSM و ورق FRP به شیوه نصب دورپیچ (Model2,4) باعث جلوگیری از گسیختگی زودرس ناشی از زوال چسب اپوکسی می‌گردد. همچنین استفاده از ورق FRP در قسمت تحتانی ستون (Model4) باعث جلوگیری از گسترش ترک‌های پلاستیسیته روی سطح ستون خواهد شد.

۴- استفاده از میلگرد NSM به تنهایی میزان سختی را افزایش داده و رفتار ستون را ترد می‌کند و باعث گسیختگی بدون نشانه (بدون ترک پلاستیسیته) خواهد شد.

۵- ارزیابی کلی شاخص‌های مورد مطالعه در این تحقیق نشان داد که طرح تقویتی M2,4-G2 (مدل دو و چهار از گروه دوم) جزء بهترین و موثرترین روش تقویتی با مصالح کامپوزیت می‌باشد.

پیشنهادات

بعنوان ادامه تحقیق پیشنهاد می‌شود به بررسی تاثیر حرارت ناشی از آتش‌سوزی بر روی مصالح کامپوزیتی مانند ورق FRP و چسب اپوکسی پرداخته شود. همچنین تاثیر نمونه‌های مختلف ورق FRP مانند تک جهته یا انواع ورق شیشه، کربن و غیره مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

قدردانی فراوان از موسسه آموزشی "ماهرشو...!" شهر شیراز جهت همکاری و کوشش‌های موثر که جهت ثمربخش بودن این تحقیق مبذول داشتند.

منابع

- [1] Esfand.S, Danesh, Fakhreddin. (2019). Flexural strengthening of reinforced concrete columns using composite rebars buried in the surface. Amirkabir Engineering Journal, 51(1), 101-110.
- [2] Abbasi.P, Moradi, Taleb, Pournaba, M, Mirrezaei, Zandi. (2021). Studying the bending-shear behavior of concrete beams and comparing the laboratory results with the predictions of different regulations. Structural-Earthquake Analysis, 18(1), 27-38.
- [3] Varastepour, Soleimanikia. (2014). Adhesive layer modeling to predict early failure in concrete beams reinforced with CFRP plates. Concrete Research, 7(1), 113-127.

- [4] Yasser Modi, Mousavi, Esfahani. (2017). Reinforcement of reinforced concrete columns by the method of installation near the surface and winding with fiber reinforced polymers. *Modares Civil Engineering*, 17.
- [5] Goledari, Kodkhodayan, Mehran, & Hadidi Mod. (2014). Analytical, numerical and experimental investigation of the energy absorption of the graded honeycomb structure under plate loading with low speed. *Technical Engineering*, Modares, 14.
- [6] Amiri, E, Baradaran, M. (1400). Investigating the behavior of reinforced concrete column reinforced with rebar and composite plates under reciprocating loading. *Structural Analysis - Earthquake*, 18(4), 1-16. Doi: 10.30495/civil.2022.687805.
- [7] .Ming, L., Shiping, Y., Wenjie, C. (2019). Seismic behaviour of TRC-strengthened RC columns under different constraint conditions. *Science and Engineering of Composite Materials*, 26(1), 360-378.
- [8] Barous, g., gergely, j. (2019). Seismic retrofit of reinforced concrete beam-column t-joints in bridge piers with frp composite jackets. Sp-258: seismic strengthening of concrete buildings using frp composites (in cd-rom), 1-18.
- [9] Ding, M., El-Salakawy, E. (2018). The simultaneous effect of using rebar and spiral fibers made of basalt in increasing the capacity of concrete columns. *Journal of Composites for Construction*, 21(4), 04016117.
- [10] Zhiang.A., Shen, D., Yang, Q., Cao, X., Liu, C., & Kang, J. (2018). Rehabilitation of seismic-damaged reinforced concrete beam-column joints with different corrosion rates using basalt fiber-reinforced polymer sheets. *Composite Structures*, 289, 115397.
- [11] Ruxing.K., Kim, J. C., Choi, K. K. (2017). Investigating the behavior of columns reinforced by FRP rebar by NSM method with rectangular and circular sections. *Engineering Structures*, 134, 217-235.
- [12] Venkat.D., Jain, S., Suriya Prakash, S., Sharma, A. (2017). Reinforcement and behavior of reinforced concrete columns using FRP sheets. *Fibers*, 7(10), 90.
- [13] Zhang, J., Cai, R., Li, C., Liu, X. (2020). Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with high-strength steel bars. *Engineering Structures*, 218, 110861.
- [14] Li, Y., Yin, S., Dai, J., Liu, M. (2020). Numerical investigation on the influences of different factors on the seismic performance of TRC-strengthened RC columns. *Journal of Building Engineering*, 30, 101245.
- [15] Li, J., Gong, J., Wang, L. (2009). Seismic behavior of corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened using combined carbon fiber-reinforced polymer and steel jacket. *Construction and Building materials*, 23(7), 2653-2663.
- [16] Ning, C. L., Wang, L., Du, W. (2019). A practical approach to predict the hysteresis loop of reinforced concrete columns failing in different modes. *Construction and Building Materials*, 218, 644-656.
- [17] Ouyang, L. J., Gao, W. Y., Zhen, B., Lu, Z. D. (2017). Seismic retrofit of square reinforced concrete columns using basalt and carbon fiber-reinforced polymer sheets: A comparative study. *Composite Structures*, 162, 294-307.
- [18] Saqan, E. I., Rasheed, H. A., Alkhrdaji, T. (2018). Evaluation of the seismic performance of reinforced concrete frames strengthened with CFRP fabric and NSM bars. *Composite Structures*, 184, 839-847.
- [19] Tang, Y. C., Li, L. J., Feng, W. X., Liu, F., Liao, B. (2017). Seismic performance of recycled aggregate concrete-filled steel tube columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 112-124.
- [20] Teng, F., Qiu, W. L., Pan, S. S., Hu, H. S. (2020). Experimental study on seismic performance of precast segmental concrete columns after seawater freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 260, 120482.
- [21] Xue, J., Zhang, X., Ke, X., Ma, L. (2019). Seismic resistance capacity of steel reinforced high-strength concrete columns with rectangular spiral stirrups. *Construction and Building Materials*, 229, 116880.
- [22] Zhou, C., Chen, Z., & Cai, L. (2021). Seismic performance of angle-steel reinforced concrete columns confined with spiral reinforcement. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106380.
- [23] Ghannam, M., Metwally, I. M. (2020, June). Numerical investigation for the behaviour of stiffened circular concrete filled double tube columns. In *Structures* (Vol. 25, pp. 901-919). Elsevier.
- [24] Raza, A., Rafique, U. (2021). Efficiency of GFRP bars and hoops in recycled aggregate concrete columns: Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 255, 112986.
- [25] Atea, R. S. (2019). A case study on concrete column strength improvement with different steel fibers and polypropylene fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6106-6114.
- [26] Truffle.D. Salman, H. M., Al-Sherrawi, M. H. (2019). Finite element modeling of a reinforced concrete column strengthened with steel jacket. *Civil Engineering Journal*, 4(5), 916-925.

- [27] Kartheek, T., Das, T. V. (2020). 3D modelling and analysis of encased steel-concrete composite column using ABAQUS. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1545-1554.
- [28] Kaish, A. B. M. A., Alam, M. R., Jamil, M., Zain, M. F. M., & Wahed, M. A. (2012). Improved ferrocement jacketing for restrengthening of square RC short column. *Construction and building materials*, 36, 228-237.
- [29] Cao, X., Wu, L., Li, Z. (2020). Behaviour of steel-reinforced concrete columns under combined torsion based on ABAQUS FEA. *Engineering Structures*, 209, 109980.
- [30] Belal, M. F., Mohamed, H. M., Morad, S. A. (2015). Behavior of reinforced concrete columns strengthened by steel jacket. *HBRC journal*, 11(2), 201-212.
- [31] Ali, M. A., & El-Salakawy, E. (2016). Seismic performance of GFRP-reinforced concrete rectangular columns. *Journal of Composites for Construction*, 20(3), 04015074.
- [32] Esmailnia Omran, M., Mollaei, S. (2017). Investigation of axial strengthened reinforced concrete columns under lateral blast loading. *Shock and Vibration*, 2017.
- [33] Kim, C. G., Park, H. G., Eom, T. S. (2019). Cyclic load test and shear strength degradation model for columns with limited ductility tie details. *Journal of Structural Engineering*, 145(2), 04018249.
- [34] Kabir, M. Z., Shafei, E. (2012). Plasticity modeling of FRP-confined circular reinforced concrete columns subjected to eccentric axial loading. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3497-3506.
- [35] Feng, B., Xiong, F., Liu, B., Chen, J., Zhang, Y. (2016). Shear performance of horizontal joints in short precast concrete columns with sleeve grouted connections under cyclic loading. *Plos one*, 11(11), e0165988.
- [36] Hwang, H. J., Eom, T. S., Park, H. G., Lee, S. H. (2016). Axial load and cyclic lateral load tests for composite columns with steel angles. *Journal of Structural Engineering*, 142(5), 04016001.
- [37] Guo, Z., Ye, M., Chen, Y., Chen, X. (2020). Experimental study on compressive behavior of concrete-filled GFRP tubular stub columns after being subjected to acid corrosion. *Composite Structures*, 250, 112630.
- [38] Xu, C. X., Peng, S., Deng, J., Wan, C. (2018). Study on seismic behavior of encased steel jacket-strengthened earthquake-damaged composite steel-concrete columns. *Journal of Building Engineering*, 17, 154-166.
- [39] Xu, G., Wu, B., Jia, D., Xu, X., Yang, G. (2018). Quasi-static tests of RC columns under variable axial forces and rotations. *Engineering Structures*, 162, 60-71.
- [40] Xiong, G. J., Wu, X. Y., Li, F. F., Yan, Z. (2011). Load carrying capacity and ductility of circular concrete columns confined by ferrocement including steel bars. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2263-2268.
- [41] Su, J., Wang, J., Li, Z., Liang, X. (2019). Effect of reinforcement grade and concrete strength on seismic performance of reinforced concrete bridge piers. *Engineering Structures*, 198, 109512.
- [42] Roudsari, S. S., Hamoush, S. A., Soleimani, S. M., Madandoust, R. (2019). Evaluation of large-size reinforced concrete columns strengthened for axial load using fiber reinforced polymers. *Engineering Structures*, 178, 680-693.
- [43] Noroozieh, E., & Mansouri, A. (2019). Lateral strength and ductility of reinforced concrete columns strengthened with NSM FRP rebars and FRP jacket. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 11(2), 195-209.