

ارزیابی تأثیر تقویت ساختمان های بتن مسلح چند طبقه با FRP بر خواص عملکرد لرزه ای دینامیکی سازه ها

محمد کاظم شربتدار^{۱*}، حکیمه پارسا^۲

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

امروزه تقویت سازه های موجود به منظور افزایش ظرفیت باربری شکل پذیری به وسیله صفحات FRP که مانند میلگردهای عرضی عمل نموده و باعث ایجاد فشار محصور شدگی در بتن و افزایش مقاومت می گردد در کشور ایران متداول شده است. در این پژوهش ساختمان های بتن مسلح تقویت نشده و شده با ورق های CFRP با تعداد طبقات ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه و دهانه های ۱ الی ۵، در نظر گرفته شده اند. با انجام آنالیز استاتیکی خطی و غیرخطی بر روی سازه های بتن مسلح مذکور، تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله شتاب و جابجایی طیفی، میرایی و زمان تناوب مؤثر در نقطه عملکرد سازه، منحنی ظرفیت ناشی از تقویت و اثر تقویت سازه با CFRP همراه با افزایش تعداد طبقات، تعداد دهانه های ساختمان بر سطح عملکرد و رفتار لرزه ای سازه ها بررسی گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که محصورسازی تیر و ستون سازه بتن مسلح با لایه های CFRP موجب افزایش توانایی سازه در جذب و استهلاک انرژی شده و افزایش سختی و شیب اولیه حدود ۱/۵ الی ۲/۵ برابر سازه تقویت نشده بود. تقویت سازه توسط ورق های CFRP باعث افزایش میزان شتاب طیفی و کاهش جابجایی طیفی و میزان میرایی و زمان تناوب مؤثر شده که نتیجتاً منجر به افزایش ظرفیت بار لرزه ای قاب مقاوم می گردد. ضمناً، اثر تقویت سازه با CFRP در سازه ۳ طبقه ۴ دهانه مطلوب ترین عملکرد را از نظر سختی و شتاب طیفی بیشتر و جابجایی طیفی و زمان تناوب مؤثر کمتر ایجاد کرده، از طرفی بهترین رفتار را از نظر میرایی و جذب انرژی به ازای تقویت، سازه ی ۱۰ طبقه ۴ دهانه نشان می دهد.

کلمات کلیدی: مقاومت سازی با CFRP، عملکرد لرزه ای، منحنی ظرفیت، شتاب طیفی، جابجایی طیفی، میرایی مؤثر

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/jsce.2017.97090.1312	doi: 10.22065/jsce.2017.97090.1312	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
		۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۰/۰۴	۱۳۹۶/۱۰/۰۴	۱۳۹۶/۰۹/۲۸	۱۳۹۶/۰۶/۱۰
				*نویسنده مسئول:		محمد کاظم شربتدار
				پست الکترونیکی:		msharbatdar@seman.ac.ir

The Evaluation of Strengthening Effect Reinforced Concrete Structures with FRP on Seismic Dynamic Performance of the Structures

Mohammad Kazem Sharbatdar^{1*}, Hakime Parsa²

1- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Nowadays, Strengthening of existing structures was conducted by FRP wrapping in Iran in order to increase capacity and ductility particularly for columns resulting in an increase in the strength of concrete and improve structure behaviour. In this study, RC strengthened (with FRP) and un-strengthened buildings with 3, 5, 10 & 15 stories and 1 to 5 bay were considered. By performing linear and non-linear static analyses, seismic parameters such as acceleration and spectral displacement, damping and effective period of structure in performance points and capacity curves were discussed. The results indicated that the confinement of beams and columns of RC structures with CFRP sheets will improve the absorption and dissipation energy of structure and the stiffness and initial gradient of retrofitted structure with CFRP were about 1.5 to 2.5 times of those of original un-strengthened structure. And also via strengthening of structure with CFRP sheets, the spectral acceleration was increased and the spectral displacement, damping ratio and effective period were decreased, resulting in increasing seismic loading capacity. However, the structure retrofitted by CFRP with 3-stories, 4 bays showed the best performance in the term of stiffness, more spectral acceleration and spectral displacement and less effective period, but in the term of damping and energy absorption the best performance was for the structure with 10-stories, 4 bays.

ARTICLE INFO

Received: 01/09/2017

Revised: 19/12/2017

Accepted: 25/12/2017

Keywords:

Strengthening with CFRP,
Seismic performance,
Capacity curve,
Spectral acceleration,
Spectral displacement,
Effective damping.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2017.97090.1312

*Corresponding author: Mohammad Kazem Sharbatdar

Email address: msharbatdar@seman.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه تقویت و بهسازی سازه‌های موجود بخش اعظم فعالیت‌های ساختمانی را به ویژه در کشورهای پیشرفته تشکیل می‌دهد. وجود ضعف اولیه در طراحی و اجرا، خطاهای محاسباتی، تغییر کاربری برخی سازه‌ها و افزایش بارهای وارده و همچنین کاهش سطح عملکرد سازه‌های بتن مسلح به علت گذشت زمان و زوال بتن از دلایل نیاز به بهسازی و تقویت سازه‌های بتن مسلح می‌باشند [1]. روش‌های مختلفی جهت مقاوم‌سازی سازه‌های بتن مسلح وجود دارد که در این بین استفاده از پوشش FRP یکی از بهترین و مؤثرترین روش‌ها است [2]. FRP ها مصالحی سبک با دوام و مقاوم هستند که امروزه به راحتی در دسترس مهندسين قرار گرفته اند. ضخامت نسبتاً نازک ورق‌های FRP کاربرد آن‌ها را بسیار ساده نموده و قابلیت اعمال بر روی اکثر سطوح را امکان‌پذیر می‌نماید. بیشتر پژوهش‌ها و کاربردهای ورق‌های FRP در مهندسی عمران در طی بیست سال گذشته محدود به تقویت و تعمیر سازه‌های بتنی یا بنایی بوده و با توجه به عمر کوتاه آن مطالعات بر روی دوام و عملکرد دراز مدت سیستم‌های تقویت شده با FRP در جریان است [3]. سیستم‌های FRP به صورت پوشش‌های بیرونی و به منظور افزایش مقاومت و بهسازی سازه‌های بتنی موجود از اواسط دهه ۱۹۸۰ تاکنون در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد [4].

با توجه به مطالب بیان شده، بررسی عملکرد لرزه‌ای و رفتار غیرالاستیک ساختمان‌های تقویت شده با FRP امری ضروری است. اکثر قریب به اتفاق سازه‌های متداول در هنگام زلزله وارد ناحیه غیرخطی شده و از خود رفتار غیرارتجاعی نشان می‌دهند، لذا با استفاده از روش‌های مرسوم و سنتی آیین‌نامه‌ها که بر پایه تحلیل‌های خطی استوار است، نمی‌توان کنترلی بر رفتار سازه‌ها پس از ورود به ناحیه غیرارتجاعی داشت. به جهت نقص آیین‌نامه‌های رایج طرح ساختمان‌ها از نظر پیش‌بینی عملکرد سازه در برابر زلزله در چند سال اخیر روش طراحی بر اساس عملکرد مورد توجه پژوهشگران و آیین‌نامه‌های جدید قرار گرفته است. در این روش رفتار سازه و آسیب‌های وارده به آن تحت بارهای جانبی تا لحظه شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد و طراح می‌تواند با انتخاب اهداف عملکردی مناسب، با توجه به کاربری و نیازهای ساختمان، از طریق تعیین ظرفیت تغییرشکل و میزان آسیب وارده، آن را طرح نماید [5]. همچنین با توجه به خسارات و تلفات ناشی از زلزله در کشورهای زلزله خیز، لزوم طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله امری انکارناپذیر است. برای طرح یک ساختمان در مقابل زلزله لازم است اطلاعاتی جامع و کامل از رفتار آن در مقابل نیروهای ناشی از زلزله در دست باشد. باید دانست که رعایت ضوابط و مقررات مندرج در آیین‌نامه‌ها تضمین‌کننده‌ی مقاوم شدن کامل ساختمان‌ها در برابر نیروهای ناشی از زلزله نیست. به همین جهت باید رفتار سازه‌ها را به طور کلی و به دقت مورد توجه قرار داد [6]. خواص دینامیکی از جمله پیرو ارتعاشی سازه، میزان میرایی مؤثر سازه و سطح عملکرد لرزه‌ای بیانگر واقعی رفتار لرزه‌ای سازه هستند. هدف اصلی طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد قادر ساختن مهندسان برای طراحی سازه‌هایی است که عملکردشان قابل پیش‌بینی است در واقع وارد کردن کارفرما در انتخاب میزان آسیب‌پذیری ساختمان در سطوح مختلف زمین‌لرزه است [7]. در یک تحقیق آزمایشگاهی لودوویسو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [8] جهت بهبود رفتار لرزه‌ای قاب بتن مسلح، با تقویت ستون و اتصالات یک قاب سه طبقه با الیاف پلیمری شیشه‌ای GFRP به بررسی عملکرد لرزه‌ای این قاب به صورت آزمایشگاهی و تحلیلی با آنالیز پوش‌آور در نرم‌افزار SAP2000 پرداختند. این پژوهش با آزمایش در مقیاس کامل سازه بتن مسلح مقاوم با FRP بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه را ارائه داده و مورد بحث قرار می‌دهد که با تحلیل این قاب پارامترهای رفتار لرزه‌ای آن از جمله سطح عملکرد، ماکزیمم برش و تغییرمکان، انرژی جذب شده و منحنی ظرفیت سازه استخراج می‌شوند. با بحث و بررسی این نتیجه یافت می‌شود که اثربخشی روش FRP در بهبود عملکرد کلی سازه بتن مسلح از لحاظ ظرفیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مؤثر است و همچنین ظرفیت تغییرشکل آن توسط افزایش شکل‌پذیری با محصور کردن ستون با FRP بهبود یافته است. پژوهش‌های عددی غیرخطی استاتیکی و دینامیکی نیز در زمینه ارزیابی رفتار و عملکرد قاب‌های سازه‌های فولادی و بتنی که به صورت پارامترهای نقطه عملکرد، توزیع مفاصل پلاستیک، منحنی بارافزون و ضریب رفتار بیان می‌شوند، توسط پژوهشگران متعددی انجام شده است. با توجه به اهمیت بررسی رفتار المان‌های بتن مسلح تقویت شده با FRP در سازه‌های بتنی پژوهشگران بسیاری در این زمینه تحقیق و بررسی نموده‌اند. قدیری راد و همکاران در سال ۱۳۹۱ [9] تأثیر محصورشدگی با دورپیچ FRP بر منحنی اندرکنش نیروی محوری-لنگر خمشی ستون بتن مسلح را مورد بررسی قرار داده‌اند که مشخص شده است افزایش نسبت خروج از محوریت، ظرفیت باربری نهایی ستون‌های محصورشده با دورپیچ‌های FRP را به میزان بیشتری نسبت به ستون‌های دورپیچ نشده کاهش می‌دهد. جهت بررسی تأثیر پارامترهای آرماتورهای کششی، مقاومت فشاری بتن، ضخامت FRP (تعداد لایه-

ها)، نوع و جنس کامپوزیت، جهت و راستای الیاف، طول FRP، چیدمان لایه‌ها، صفحات تقویتی جانبی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با مواد کامپوزیتی FRP، قاسمی و همکارانش [10] با استفاده از روش المان محدود دریافتند که افزایش طول FRP تأثیر چندانی بر روی بار تسلیم و خیز در بار تسلیم سازه نداشته و فقط بار نهایی سازه را بیشتر کرده و رفتار سازه را نرم‌تر می‌کند. همچنین به منظور بررسی برخی از این پارامترها بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح مقاوم با CFRP، ۱۶ تیر را با نرم افزار ANSYS مدل کرده و تنش گسیختگی و خیز وسط تیرها را مورد مقایسه قرار داده‌اند [11].

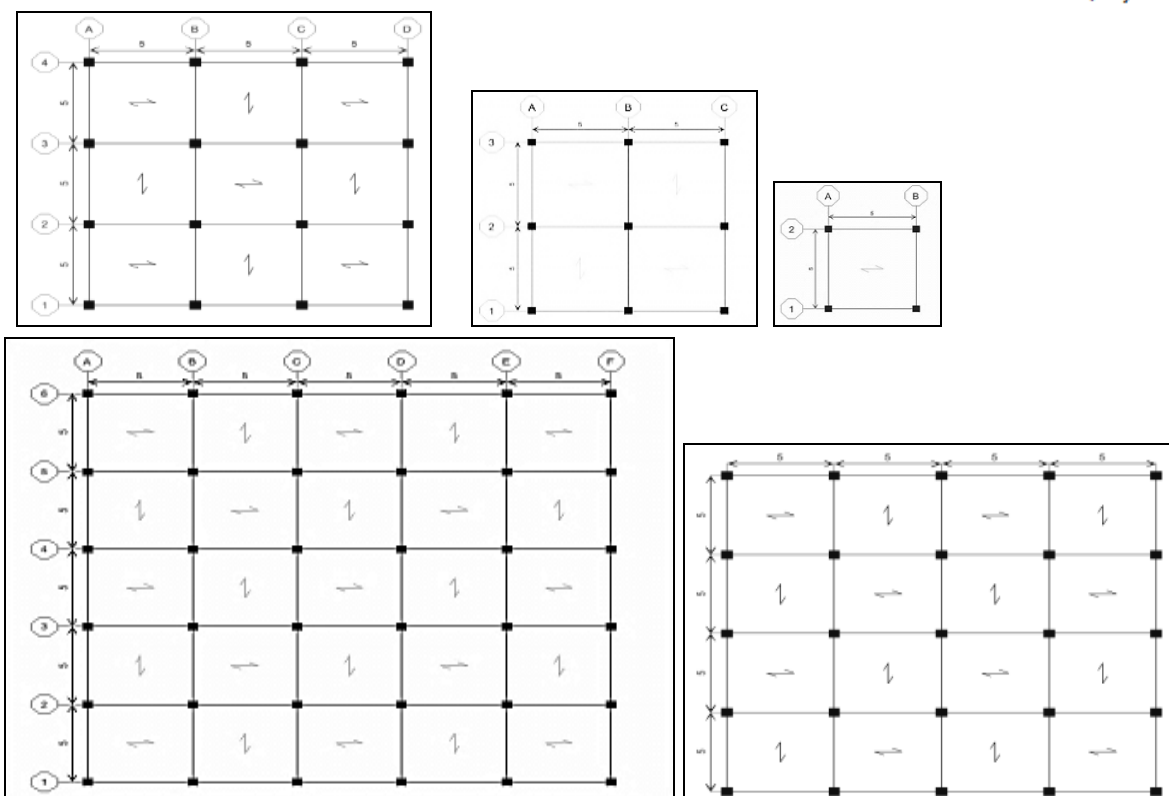
۲- مشخصات نرم‌افزار و مدل‌های مورد استفاده

امروزه نرم‌افزار SAP2000 V16 به عنوان جامع‌ترین، کارآمدترین برنامه عملی جهت انجام تحلیل‌ها و طراحی پروژه‌ها استفاده می‌شود [12]. سازه‌های مورد استفاده در این پژوهش، سازه‌های بتن مسلح تقویت نشده و تقویت شده با CFRP با تعداد طبقات ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ می‌باشند که پلان آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل‌ها دارای قاب‌های ۱ تا ۵ دهانه به طول ۵ متر و ارتفاع طبقات ۳/۲ متر است. ساختمان‌ها دارای سیستم مقاوم در برابر بار جانبی قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط می‌باشند. بارگذاری ثقلی بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان می‌باشد. بارهای وارده به سازه در طراحی در طبقات شامل 600 kg/m^2 بار مرده، 200 kg/m^2 بار زنده، 200 kg/m^2 بار مرده ناشی از پارتیشن‌بندی و 250 kg/m^2 بار دیوار است. اثر کاهش سربار در سازه‌ها لحاظ نشده است. در ضمن در محاسبه جرم طبقات از بار مرده طبقات به اضافه $0/2$ بار زنده آن استفاده شده است. مقاومت مشخصه بتن برابر 250 kg/cm^2 ، ضریب پواسون آن برابر $0/2$ و مدول الاستیسیته برابر با $105 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشند. مقاومت تسلیم فولادهای طولی 4000 kg/cm^2 ، مقاومت نهایی فولادهای طولی 6000 kg/cm^2 ، مقاومت تسلیم فولادهای عرضی 3000 kg/cm^2 ، مقاومت نهایی فولادهای عرضی 5000 kg/cm^2 در نظر گرفته شده است. ضریب پواسون آن برابر $0/3$ و مدول الاستیسیته برابر با $106 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ می‌باشند. همچنین ضخامت ورق CFRP برابر $1/53$ میلی‌متر می‌باشد. تقویت سازه‌های بتنی به صورت محصورنمودن تمام اعضای آن صورت می‌گیرد. برای دورپیچ ستون‌ها و تیرهای بتنی از الیاف CFRP از قابلیت برنامه کمکی Section Designer در نرم‌افزار SAP2000 V16 استفاده شده است. چگالی الیاف CFRP، $10^{-6} \times 10^3 \times 1/53 \text{ kg/cm}^2$ ، مدول الاستیسیته‌ی آن $106 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و ضریب پواسون آن برابر $0/3$ مطابق جدول ۱ می‌باشد. لازم به ذکر است که آرماتورهای مقاطع سازه‌ی تقویت شده نسبت به سازه‌ی اصلی کاهش یافته‌اند.

جدول ۱: خواص مکانیکی ورق‌های CFRP به کار رفته

۲۴۰۰۰	E_x	مدول الاستیسیته (Mpa)
۱۸۵۸۱	E_y	
۱۸۵۸۱	E_z	
۳۹۰۰	σ_x^t	تنش کششی (Mpa)
۵۲/۷	σ_y^t	
۵۲/۷	σ_z^t	
۸۰	σ_x	تنش فشاری (Mpa)
۸۰	σ_y	
۸۰	σ_z	
۱۲۵۷۶	G_{xy}	مدول برشی (Mpa)
۱۲۵۷۶	G_{xz}	
۷۱۴۷	G_{yz}	
۰/۲	θ_{xy}	ضریب پواسون
۰/۲	θ_{xz}	
۰/۲	θ_{yz}	

طراحی لرزه‌ای بر اساس آیین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و سازه در منطقه با لرزه‌خیزی زیاد در شهر سمنان ($A=0.3g$) واقع شده است. نوع خاک II است. مدل‌ها از نظر طبقه‌بندی ساختمان در گروه ۳ با اهمیت متوسط (با کاربری مسکونی) قرار دارند. مدل‌ها با سیستم مقاوم جانبی قاب خمشی بتن مسلح دارای شکل‌پذیری متوسط با $R=5$ می‌باشند. مقدار C ضریب زلزله با استفاده از $C = \frac{ABI}{R}$ و بر اساس A شتاب مبنای طرح، B ضریب بازتاب ساختمان، I ضریب اهمیت ساختمان، R ضریب رفتار ساختمان بدست می‌آیند. توزیع نیروی جانبی در ارتفاع ساختمان بر اساس نیروی برش پایه، ارتفاع و وزن طبقات برابر با $F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n W_j h_j^k} v$ است. در این فرمول مقدار K برابر با $k = \begin{cases} 2.0 & \text{for } T \geq 2.5 \text{ Sec} \\ 1.0 & \text{for } T \leq 0.5 \text{ Sec} \end{cases}$ است.



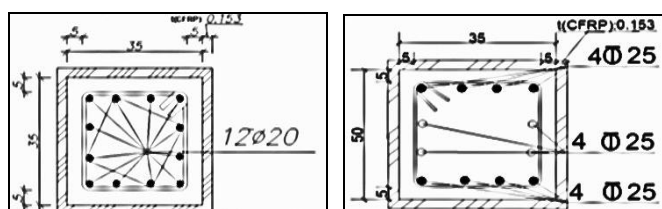
شکل ۱: پلان مدل‌های مورد بررسی

برای مقادیر $0.5 < T < 2.5$ با استفاده از انترپولاسیون خطی K برابر با $k = 0.5T + 0.75$ است [13]. سقف طبقات از نوع تیرچه بلوک و عرض بارگیر ۵ متر است. اتصالات صلب فرض شده و طراحی قاب‌ها با استفاده از نرم افزار SAP2000V16 صورت گرفته است و سعی شده است سازه‌ها تأمین‌کننده محدوده‌ی تغییر مکانی بیان شده در آیین‌نامه لرزه‌ای ۲۸۰۰ باشند. در نرم‌افزار طراحی مقاطع قاب‌های مورد مطالعه از استاندارد کانادا CSA-A23.3-94 استفاده شده است و با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان کنترل شده است. با کنترل آپلیفت در تمامی مدل‌ها دیده می‌شود که در برخی از سازه‌های بلند، بلندشوندگی اتفاق افتاده که نیاز به زدن شمع در پی ساختمان می‌باشد. برای انجام تحلیل $P-\Delta$ نیز از ضریب واحد برای بارهای مرده و زنده استفاده شده است.

در این تحقیق جهت ارزیابی غیرخطی، از ۵۰ مدل سازه‌ای استفاده شده است که مدل‌ها به صورت زیر نامگذاری می‌شوند: M-I-O، که در آن عدد اول از سمت چپ نشان‌دهنده‌ی تعداد طبقات، حرف M معرف سازه معمولی، حرف I مخفف واژه (Intermediate frame) و معرف سازه با سیستم لرزه‌بر قاب خمشی بتنی متوسط، حرف O مخفف واژه (Original) و نشان‌دهنده‌ی سازه‌ی تقویت نشده، R مخفف واژه (Retrofitted) و معرف ساختمان تقویت شده با CFRP و آخرین عدد بیانگر تعداد دهانه سازه می‌باشد که در جدول ۲ معرفی شده‌اند. مشخصات ساختمان‌ها در جداول ۳ تا ۶ و مشخصات مقاطع تیر و ستون در شکل ۲ نشان داده شده است. دستیابی به ظرفیت سازه در آن سوی محدوده الاستیک و تخمین نیازهای لرزه‌ای در سطوح عملکردی پائین مانند ایمنی جانی و جلوگیری از خرابی کلی سازه،

احتیاج به استفاده از تحلیل‌های غیرخطی می‌باشد [14]. تحلیل استاتیکی غیرخطی بوسیله نرم‌افزار SAP2000 v16 انجام شده است. برای بررسی سازه‌های جاری از روش تحلیل استاتیکی فزاینده غیرخطی (Pushover) که در FEMA273 (انجمن ایمنی لرزه‌ای ساختمان) یا ATC-40 [15] و FEMA356 شرح داده شده است، استفاده می‌شود.

مدل‌ها در کلیه تحلیل‌های خطی و غیرخطی انجام شده به صورت سه بعدی بوده است. در تحلیل‌های خطی پیش تصادفی ۵٪ در نظر گرفته شده است. در تحلیل استاتیکی غیرخطی دو پارامتر مهم را باید در نظر گرفت: اولین پارامتر سطح عملکرد سازه و دومین مورد سطح خطر است. سطوح عملکرد ساختمان بر مبنای اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تعریف می‌شود. این سطوح عملکرد بر اساس میزان ترک خوردگی یا خرابی اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تعریف می‌شود؛ تا انتخاب سطح عملکرد مناسب توسط طراح یا صاحب ساختمان بیش‌تر قابل‌درک باشد. سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای بر مبنای FEMA-356 و بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای به صورت قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی، آستانه‌ی فروریزش تعریف می‌شود [۱۶]. دومین پارامتری که در این تحلیل مورد توجه قرار می‌گیرد احتمال رویداد سطوح مختلف زلزله است. احتمال رویداد سطوح مختلف زلزله در نظر گرفته شده در FEMA-356 و دستورالعمل بهسازی به صورت سه سطح خطر تعریف شده است [16].



شکل ۲: جزئیات مقاطع تیر و ستون سازه‌ی تقویت شده

جدول ۲: مشخصات مدل‌های تحقیقاتی سازه‌ها

نام مدل	تعداد طبقات ساختمان	تعداد دهانه سازه	نوع سازه به لحاظ تقویت	نام مدل	تعداد طبقات ساختمان	تعداد دهانه سازه	نوع سازه به لحاظ تقویت
10M-I-R1	۱۰	۱	تقویت شده با CFRP	3M-I-O1	۳	۱	تقویت نشده
10M-I-R2	۱۰	۲	تقویت شده با CFRP	3M-I-O2	۳	۲	تقویت نشده
10M-I-R3	۱۰	۳	تقویت شده با CFRP	3M-I-O3	۳	۳	تقویت نشده
10M-I-R4	۱۰	۴	تقویت شده با CFRP	3M-I-O4	۳	۴	تقویت نشده
10M-I-R5	۱۰	۵	تقویت شده با CFRP	3M-I-O5	۳	۵	تقویت نشده
15M-I-O1	۱۵	۱	تقویت نشده	3M-I-R1	۳	۱	تقویت شده با CFRP
15M-I-O2	۱۵	۲	تقویت نشده	3M-I-R2	۳	۲	تقویت شده با CFRP
15M-I-O3	۱۵	۳	تقویت نشده	3M-I-R3	۳	۳	تقویت شده با CFRP
15M-I-O4	۱۵	۴	تقویت نشده	3M-I-R4	۳	۴	تقویت شده با CFRP
15M-I-O5	۱۵	۵	تقویت نشده	3M-I-R5	۳	۵	تقویت شده با CFRP
15M-I-R1	۱۵	۱	تقویت شده با CFRP	5M-I-O1	۵	۱	تقویت نشده
15M-I-R2	۱۵	۲	تقویت شده با CFRP	5M-I-O2	۵	۲	تقویت نشده
15M-I-R3	۱۵	۳	تقویت شده با CFRP	5M-I-O3	۵	۳	تقویت نشده
15M-I-R4	۱۵	۴	تقویت شده با CFRP	5M-I-O4	۵	۴	تقویت نشده
15M-I-R5	۱۵	۵	تقویت شده با CFRP	5M-I-O5	۵	۵	تقویت نشده
10M-I-O1	۱۰	۱	تقویت نشده	5M-I-R1	۵	۱	تقویت شده با CFRP
10M-I-O2	۱۰	۲	تقویت نشده	5M-I-R2	۵	۲	تقویت شده با CFRP
10M-I-O3	۱۰	۳	تقویت نشده	5M-I-R3	۵	۳	تقویت شده با CFRP
10M-I-O4	۱۰	۴	تقویت نشده	5M-I-R4	۵	۴	تقویت شده با CFRP
10M-I-O5	۱۰	۵	تقویت نشده	5M-I-R5	۵	۵	تقویت شده با CFRP

جدول ۳: ابعاد هندسی ساختمان ۳ طبقه

تیر	ستون		مدل ۵ طبقه	
	ابعاد (cm) فولاد	ابعاد (cm)	طبقه	دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	یک دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه چهارم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	دو دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه چهارم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	سه دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه چهارم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	
۵۰#۷۵	۳۲Φ۲۰	۵۰#۵۰	طبقه اول	چهار دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه چهارم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	
۵۰#۷۵	۳۲Φ۲۰	۵۰#۵۰	طبقه اول	پنج دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	پنج دهانه
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه چهارم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	

جدول ۴: ابعاد هندسی و میزان فولاد تیر و ستون ساختمان ۵ طبقه

تیر	ستون		مدل ۳ طبقه	
	ابعاد (cm) فولاد	ابعاد (cm)	طبقه	دهانه
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه اول	یک دهانه
۲۵#۵۰	۲۰Φ۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دوم	
۲۵#۵۰	۲۰Φ۲۰	۳۵#۳۵	طبقه سوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه اول	دو دهانه
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه دوم	
۲۵#۵۰	۲۰Φ۲۰	۳۵#۳۵	طبقه سوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	سه دهانه
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه دوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه سوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	چهار دهانه
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه دوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه سوم	
۴۵#۶۵	۲۸Φ۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	پنج دهانه
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه دوم	
۴۰#۶۰	۲۴Φ۲۰	۴۰#۴۰	طبقه سوم	

جدول ۵: ابعاد هندسی و میزان فولاد تیر و ستون ساختمان ۱۰ طبقه

تیر	ستون		مدل ۱۰ طبقه	
	ابعاد (cm)	فولاد	ابعاد (cm)	فولاد
۴۵#۴۵	۲۸#۲۰	۴۵#۴۵	طبقه اول	یک دهانه
۴۵#۴۵	۲۸#۲۰	۴۵#۴۵	طبقه دوم	
۴۵#۴۵	۲۸#۲۰	۴۵#۴۵	طبقه سوم	
۴۵#۴۵	۲۸#۲۰	۴۵#۴۵	طبقه چهارم	
۴۰#۴۰	۲۴#۲۰	۴۰#۴۰	طبقه پنجم	
۴۰#۴۰	۲۴#۲۰	۴۰#۴۰	طبقه ششم	
۴۰#۴۰	۲۴#۲۰	۴۰#۴۰	طبقه هفتم	
۴۰#۴۰	۲۴#۲۰	۴۰#۴۰	طبقه هشتم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه نهم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دهم	
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه اول	دو دهانه
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه دوم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه سوم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه چهارم	
۴۵#۴۵	۲۴#۲۵	۴۵#۴۵	طبقه پنجم	
۴۵#۴۵	۲۴#۲۵	۴۵#۴۵	طبقه ششم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هفتم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هشتم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه نهم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دهم	
۶۰#۶۰	۳۶#۲۵	۶۰#۶۰	طبقه اول	سه دهانه
۶۰#۶۰	۳۶#۲۵	۶۰#۶۰	طبقه دوم	

تیر	ستون		مدل ۱۰ طبقه	
	ابعاد (cm)	فولاد	ابعاد (cm)	فولاد
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه سوم	سه دهانه
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه چهارم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه پنجم	
۴۵#۴۵	۲۴#۲۵	۴۵#۴۵	طبقه ششم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هفتم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هشتم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه نهم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دهم	
۶۵#۹۰	۴۰#۲۵	۶۵#۶۵	طبقه اول	
۶۵#۹۰	۴۰#۲۵	۶۵#۶۵	طبقه دوم	
۶۰#۶۰	۳۶#۲۵	۶۰#۶۰	طبقه سوم	چهار دهانه
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه چهارم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه پنجم	
۴۵#۴۵	۲۴#۲۵	۴۵#۴۵	طبقه ششم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هفتم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه هشتم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه نهم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دهم	
۶۵#۹۰	۴۰#۲۵	۶۵#۶۵	طبقه اول	
۶۵#۹۰	۴۰#۲۵	۶۵#۶۵	طبقه دوم	
۶۰#۶۰	۳۶#۲۵	۶۰#۶۰	طبقه سوم	پنج دهانه
۶۰#۶۰	۳۶#۲۵	۶۰#۶۰	طبقه چهارم	
۵۵#۸۰	۳۲#۲۵	۵۵#۵۵	طبقه پنجم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه ششم	
۵۰#۷۵	۲۸#۲۵	۵۰#۵۰	طبقه هفتم	
۴۵#۴۵	۲۴#۲۵	۴۵#۴۵	طبقه هشتم	
۴۰#۴۰	۲۰#۲۵	۴۰#۴۰	طبقه نهم	
۳۵#۳۵	۲۰#۲۰	۳۵#۳۵	طبقه دهم	

جدول ۶: ابعاد هندسی و میزان فولاد تیر و ستون ساختمان ۱۵ طبقه

تیر	ستون		مدل ۱۵ طبقه	
	ابعاد (cm)	فولاد	ابعاد (cm)	فولاد
۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه اول	یک دهانه
۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه دوم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه سوم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه چهارم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه پنجم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه ششم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه هفتم	
۳۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۳۵۰۴۵	طبقه هشتم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه نهم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه دهم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه یازدهم	
۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه دوازدهم	
۳۵۰۳۵	۲۰۰۲۰	۳۵۰۳۵	طبقه سیزدهم	
۳۵۰۳۵	۲۰۰۲۰	۳۵۰۳۵	طبقه چهاردهم	
۳۵۰۳۵	۲۰۰۲۰	۳۵۰۳۵	طبقه پانزدهم	
۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه اول	دو دهانه
۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه دوم	
۶۰۰۹۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه سوم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه چهارم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه پنجم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه ششم	
۵۵۰۸۰	۳۶۰۲۰	۵۵۰۵۵	طبقه هفتم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه هشتم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه نهم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه دهم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه یازدهم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه دوازدهم	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه سیزدهم	
۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه چهاردهم	
۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه پانزدهم	

تیر	ستون		مدل ۱۵ طبقه		تیر	ستون		مدل ۱۵ طبقه	
	ابعاد (cm)	فولاد	ابعاد (cm)	فولاد		ابعاد (cm)	فولاد	ابعاد (cm)	فولاد
۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه دوازدهم	چهار دهانه	۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه چهاردهم	دو دهانه
۵۰۰۷۵	۲۸۰۲۵	۵۰۰۵۰	طبقه سیزدهم		۳۵۰۳۵	۲۰۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه پانزدهم	
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه چهاردهم		۷۵۰۷۵	۴۴۰۲۸	۷۵۰۷۵	طبقه اول	
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه پانزدهم		۷۵۰۹۵	۴۴۰۲۸	۷۵۰۷۵	طبقه دوم	
۹۰۰۱۰۰	۵۲۰۲۸	۹۰۰۴۰	طبقه اول	۷۵۰۹۵	۴۴۰۲۸	۷۵۰۷۵	طبقه سوم		
۸۵۰۱۰۰	۴۸۰۲۸	۸۵۰۳۵	طبقه دوم	۷۰۰۹۵	۴۰۰۲۸	۷۰۰۷۰	طبقه چهارم		
۸۰۰۹۵	۴۸۰۲۵	۸۰۰۳۰	طبقه سوم	۶۵۰۹۰	۳۶۰۲۸	۶۵۰۶۵	طبقه پنجم		
۷۵۰۹۵	۴۴۰۲۵	۷۵۰۲۵	طبقه چهارم	۶۵۰۹۰	۳۶۰۲۸	۶۵۰۶۵	طبقه ششم		
۷۰۰۹۵	۴۰۰۲۵	۷۰۰۲۰	طبقه پنجم	۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه هفتم		
۶۵۰۹۰	۴۰۰۲۵	۶۵۰۶۵	طبقه ششم	۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه نهم		
۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه هفتم	۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه دهم		
۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه هشتم	۵۰۰۷۵	۲۸۰۲۵	۵۰۰۵۰	طبقه یازدهم		
۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه نهم	۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه دوازدهم		
۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه دهم	۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه سیزدهم		
۵۰۰۷۵	۲۸۰۲۵	۵۰۰۵۰	طبقه یازدهم	۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه چهاردهم		
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه دوازدهم	۳۵۰۳۵	۱۶۰۲۵	۳۵۰۳۵	طبقه پانزدهم		
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه سیزدهم	۹۰۰۱۰۰	۵۲۰۲۸	۹۰۰۴۰	طبقه اول		
۴۵۰۶۵	۲۴۰۲۵	۴۵۰۴۵	طبقه چهاردهم	۸۵۰۱۰۰	۴۸۰۲۸	۸۵۰۳۵	طبقه دوم		
۴۰۰۶۰	۲۰۰۲۵	۴۰۰۴۰	طبقه پانزدهم	۸۰۰۹۵	۴۴۰۲۸	۸۰۰۳۰	طبقه سوم		
				۸۰۰۹۵	۴۴۰۲۸	۸۰۰۳۰	طبقه چهارم		
				۷۵۰۹۵	۴۰۰۲۸	۷۵۰۷۵	طبقه پنجم		
				۷۰۰۹۵	۳۶۰۲۸	۷۰۰۷۰	طبقه ششم		
				۶۵۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۵۰۶۵	طبقه هفتم		
				۶۵۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۵۰۶۵	طبقه هشتم		
				۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه نهم		
				۶۰۰۹۰	۳۶۰۲۵	۶۰۰۶۰	طبقه دهم		
				۵۵۰۸۰	۳۲۰۲۵	۵۵۰۵۵	طبقه یازدهم		

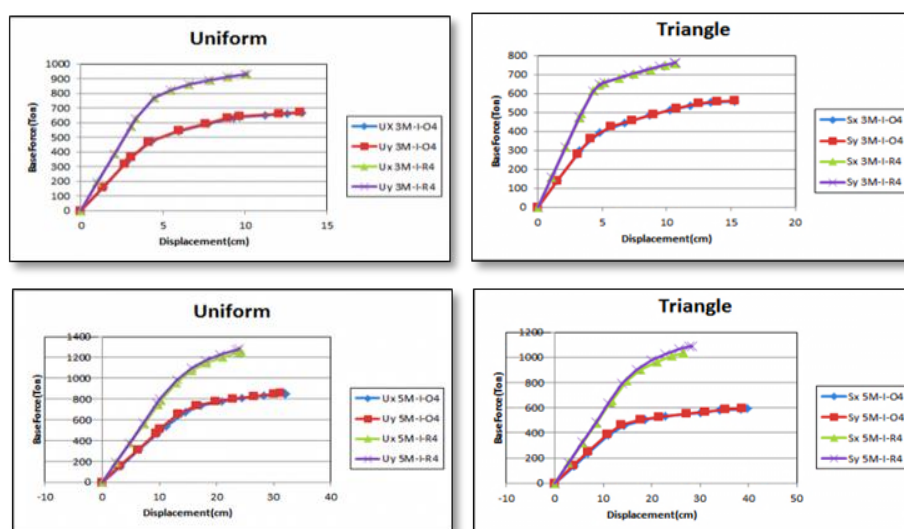
۳- ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها

در این قسمت به بررسی مدل‌ها در سطح کلی می‌پردازیم که این شامل ارائه منحنی‌های ظرفیت سازه و تغییرمکان هدف و نقطه عملکرد و میرایی و زمان تناوب در نقطه عملکرد است.

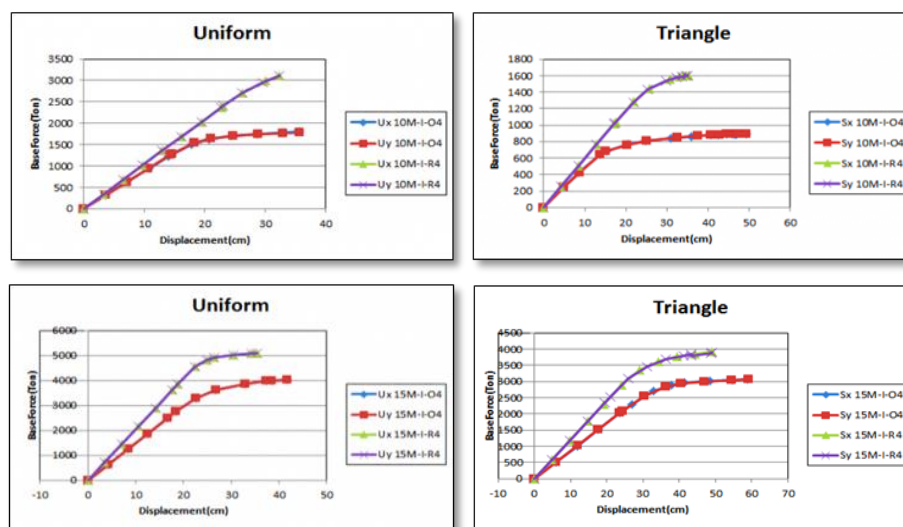
۳-۱- بررسی منحنی ظرفیت مدل‌ها

به منظور ارزیابی سازه برای سطح عملکرد خاص بایستی منحنی ظرفیت سازه یعنی رابطه‌ی بین برش پایه و تغییرمکان جانبی بام توسط روش تحلیل استاتیکی غیرخطی از مقدار صفر تا تغییرمکانی معادل ۱۵۰٪ تغییرمکان هدف بر اساس FEMA-356 و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای تعیین گردد. بعنوان نمونه منحنی‌های ظرفیت ساختمان‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با ۴ دهانه ۵ متری تقویت نشده و شده با FRP در دو حالت بارگذاری یکنواخت و مثلثی در شکل ۳ رسم شده‌اند.

در یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که بیشینه‌ی میزان جذب انرژی و سختی اولیه منحنی ظرفیت در دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی در سازه‌های مقاوم با CFRP رخ می‌دهد. درصد افزایش سختی اولیه‌ی منحنی ظرفیت در سازه‌ی مقاوم ۳ طبقه نسبت به سازه‌ی اصلی به ازای بارگذاری مثلثی ۱۳۹/۸۳ درصد و در بارگذاری یکنواخت ۱۰۳/۳۶ درصد می‌باشد. در حالت توزیع بار مثلثی با کاهش جذب انرژی به ازای تقویت سازه‌ی ۳ طبقه با CFRP برابر با ۶/۶۸ درصد روبرو هستیم ولی در توزیع بار یکنواخت بیشترین میزان این فاکتور متعلق به سازه‌ی تقویت شده با CFRP می‌باشد که سازه‌ی تقویت شده ۲/۳۷ درصد جذب انرژی بالاتری را نسبت به سازه‌ی تقویت نشده از خود نشان می‌دهد. حداکثر درصد افزایش سختی در هر دو بارگذاری مثلثی و یکنواخت به ازای تقویت سازه‌ی ۵ طبقه با CFRP برابر ۷۴/۲۴٪ می‌باشد. در تمامی حالات سختی اولیه و برش پایه بارگذاری یکنواخت در سازه‌های مقاوم بیشتر از بارگذاری مثلثی در سازه‌های تقویت نشده است و بیشترین تغییرمکان هدف متعلق به بارگذاری مثلثی سازه‌های تقویت نشده است. هم‌چنین منحنی ظرفیت مدل‌ها در دو جهت X و Y برای دو بارگذاری مثلثی و یکنواخت تقریباً با یکدیگر یکسان و بر هم منطبق می‌باشند. به دلیل کاهش درصد تغییرات میزان جذب انرژی به ازای تقویت سازه در مدل ۳ طبقه می‌توان بیان داشت که، در سازه‌ی ۳ طبقه تقویت سازه با CFRP تأثیر زیادی نداشته و جذب و استهلاک انرژی آن کاهش می‌یابد. با توجه به این که سطح زیر منحنی پوش‌آور بیان‌گر مقدار انرژی مستهلک‌شده در سازه است، بنابراین هر چه مساحت زیر این سطح بزرگ‌تر باشد، سازه توانایی بیشتری در جذب و استهلاک انرژی خواهد داشت. تقویت سازه با CFRP در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با توجه به سطح زیر منحنی ظرفیت بیشتر قابلیت استهلاک انرژی بیشتری را دارا می‌باشد.



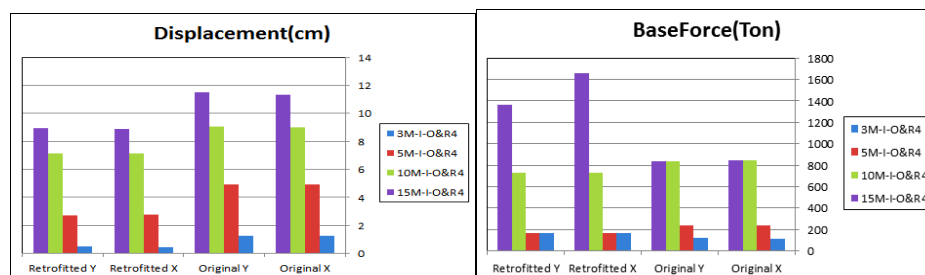
شکل ۳: منحنی ظرفیت ساختمان‌های تقویت نشده و مقاوم با توزیع بارهای جانبی مثلثی و یکنواخت



ادامه شکل ۳:

۳-۲- مقایسه برش پایه و تغییر مکان هدف بین دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی

تفاوت تغییر مکان هدف و برش پایه بین دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی در سازه مقاوم با CFRP و تقویت نشده در شکل ۴ نشان داده شده است که نتایج مختلفی حاصل می‌گردد. با افزایش تعداد طبقات، تفاوت تغییر مکان هدف و تفاوت ظرفیت برش پایه بین دو حالت بارگذاری مثلثی و یکنواخت به طور تقریبی افزایش یافته است. اگر قیاسی بین حالات تقویت نشده و مقاوم با CFRP انجام گیرد، در تمام موارد غیر از ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه بیشترین تفاوت ظرفیت برش پایه بین دو حالت بارگذاری یکنواخت و مثلثی در مدل‌هایی است که با CFRP تقویت شده است و در تمام موارد بیشترین تفاوت تغییر مکان هدف بین دو حالت بارگذاری یکنواخت و مثلثی در مدل‌هایی است که تقویت نشده است.



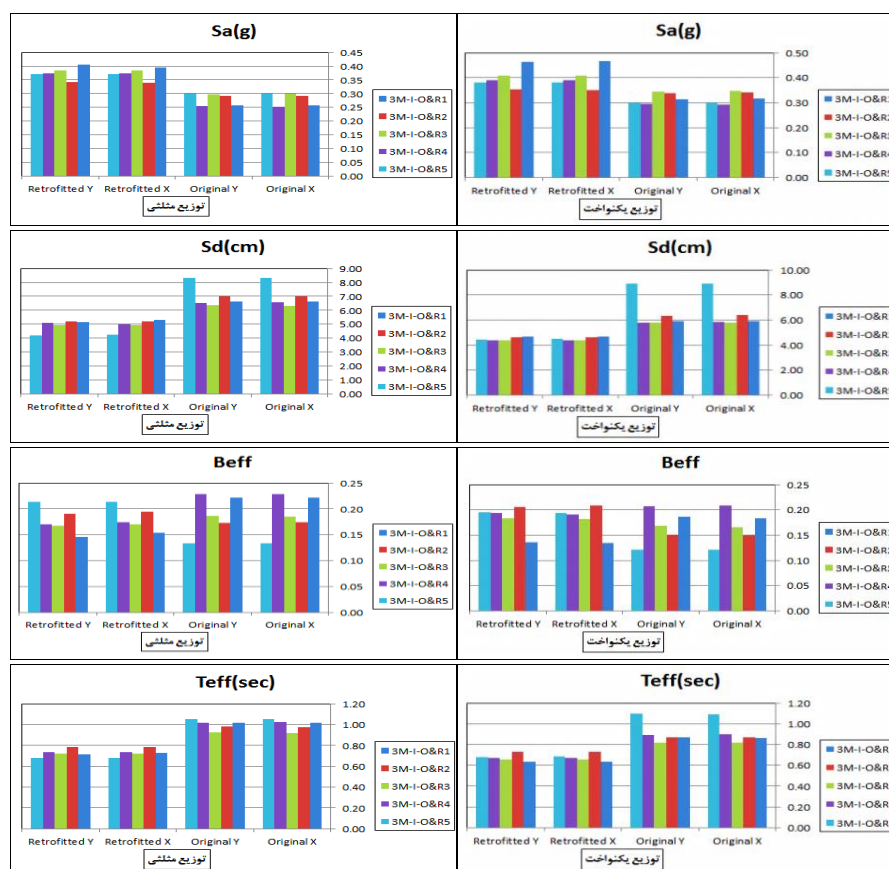
شکل ۴: تفاوت برش پایه و تغییر مکان هدف طبقات به ازای آنالیز پوش آور بین دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی

۳-۳- بررسی پارامترهای نقطه عملکرد سازه‌های اصلی و مقاوم

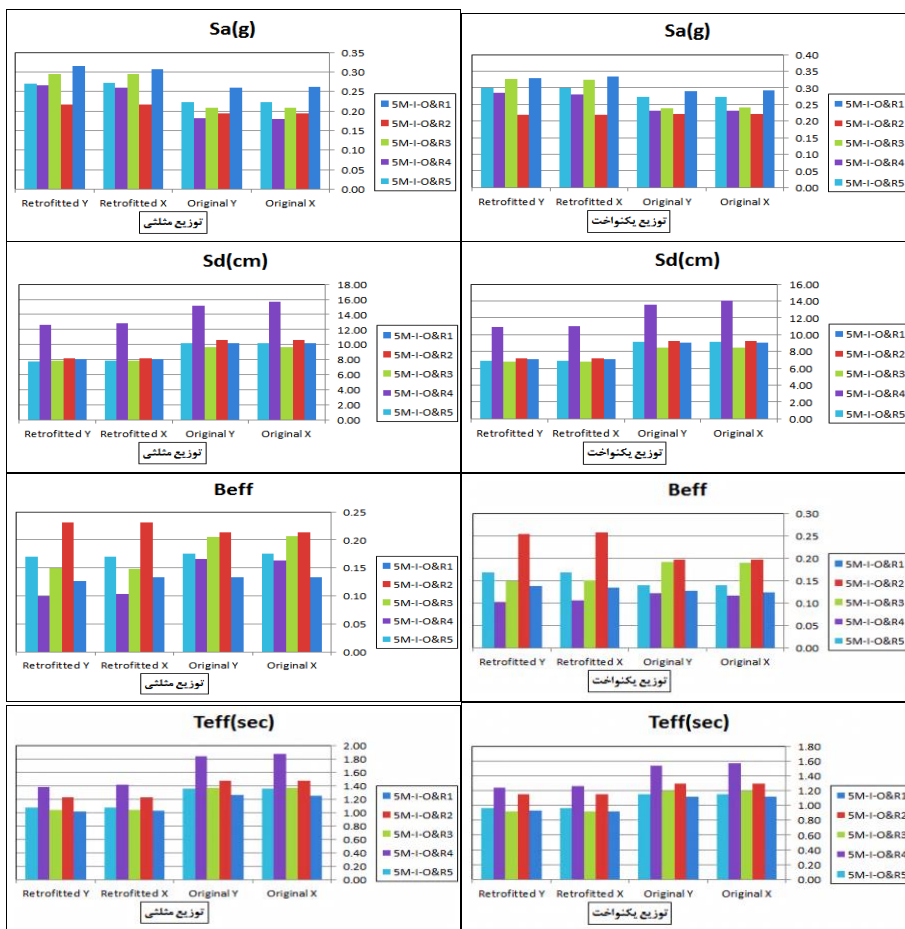
از فاکتورهای اساسی در طراحی براساس عملکرد و بهسازی سازه‌ها تعیین نقطه عملکرد سازه می‌باشد. با توجه به روش‌های شرح داده شده، منحنی ظرفیت و منحنی تقاضای سازه با میرایی ۰.۵٪ برای مدل مورد نظر رسم شده و سپس منحنی‌ها به فرمت ADRS منتقل و در یک دستگاه مختصات یکسان رسم می‌شوند. در این پژوهش نقطه عملکرد و چهار پارامتر جابجایی و شتاب طیفی و میرایی و زمان تناوب مؤثر در این نقطه برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با تعداد دهانه‌های ۱ تا ۵ محاسبه و مورد مقایسه قرار می‌گیرند که در اشکال ۵ الی ۸ نشان داده شده‌اند. شکل ۵ نشان دهنده این موضوع است که در مدل‌های ۳ طبقه با تقویت سازه توسط ورق‌های CFRP در هر دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی و در بارگذاری هر دو جهت X و Y میزان شتاب طیفی افزایش و جابجایی طیفی کاهش می‌یابد و

بارگذاری یکنواخت بیشترین میزان شتاب طیفی را در تمام حالات ایجاد می‌کند در حالی که بیشترین مقدار جابجایی طیفی به غیر از مدل ۵ دهانه در بارگذاری مثلثی ایجاد می‌شود. هم‌چنین در سازه‌های ۳ طبقه میزان میرایی مؤثر در اثر تقویت سازه با CFRP در بارگذاری مثلثی به غیر از مدل‌های ۲ و ۵ دهانه و در بارگذاری یکنواخت به غیر از مدل‌های ۲، ۳ و ۵ دهانه رو به کاهش است. هم‌چنین در تمامی موارد به جز سازه‌های ۲ و ۳ و ۴ دهانه مقاوم با CFRP میزان این پارامتر در توزیع بار مثلثی بیش از یکنواخت می‌باشد. اگر قیاسی بین مقادیر زمان تناوب مؤثر در سازه‌های اصلی و مقاوم داشته باشیم، مشخص می‌شود که در هر دو نوع توزیع بار جانبی مقدار زمان تناوب مؤثر با تقویت سازه کاهش می‌یابد در حالی که میزان این پارامتر در تمام مدل‌ها به غیر از مدل ۵ دهانه در بارگذاری مثلثی نسبت به بارگذاری یکنواخت بیشتر می‌باشد.

شکل ۶ بیانگر این مسئله است که در سازه‌های ۵ طبقه همانند مدل‌های ۳ طبقه با تقویت سازه توسط ورق‌های CFRP در هر دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی و در دو جهت X و Y میزان شتاب طیفی افزایش و جابجایی طیفی کاهش می‌یابد و بیشترین میزان شتاب طیفی در تمام حالات در بارگذاری یکنواخت ایجاد می‌شود در حالی که بیشترین مقدار جابجایی طیفی را بارگذاری مثلثی در تمام حالات ایجاد می‌شود. هم‌چنین بارگذاری مثلثی میزان میرایی مؤثر بیشتری را نسبت به بارگذاری یکنواخت در مدل‌های ۵ طبقه به غیر از مدل ۲ و ۳ و ۴ دهانه ایجاد می‌کند. تقویت سازه با ورق‌های CFRP موجب کاهش میزان میرایی مؤثر در بارگذاری مثلثی به غیر از مدل ۲ دهانه و در بارگذاری مثلثی به جز مدل‌های ۱ و ۲ و ۵ دهانه می‌شود. به مانند سازه‌ی ۳ طبقه مقاوم شدن سازه با CFRP باعث کاهش در میزان زمان تناوب مؤثر می‌شود و بیشترین میزان این عامل در بارگذاری مثلثی رخ می‌دهد.

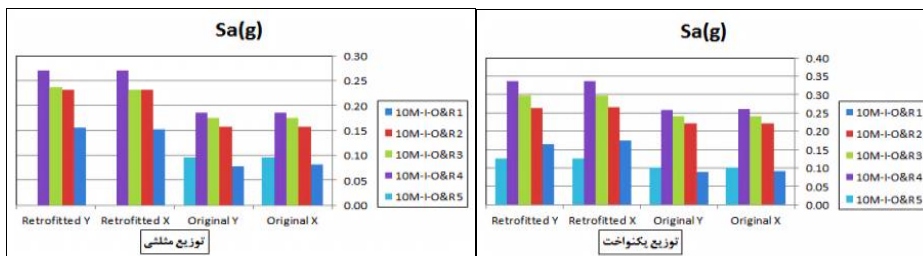


شکل ۵: شتاب و جابجایی طیفی و میرایی و زمان تناوب مؤثر در نقطه‌ی عملکرد سازه‌ی ۳ طبقه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

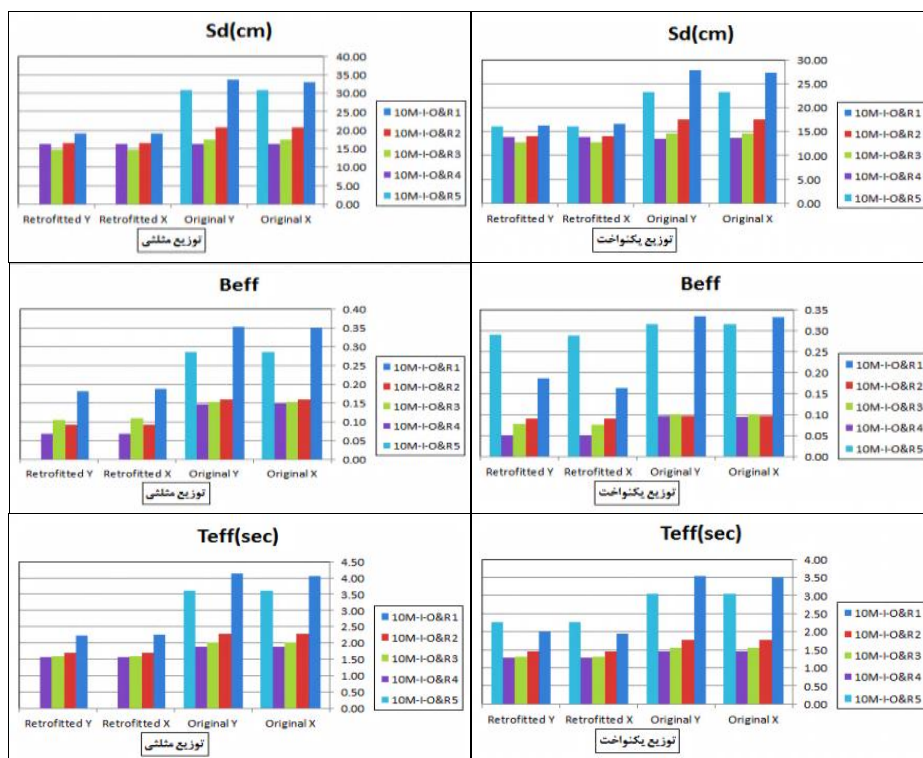


شکل ۶: شتاب و جابجایی طیفی و میرایی و زمان تناوب مؤثر در نقطه عملکرد سازه‌ی ۵ طبقه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

شکل ۷ نشان‌دهنده‌ی این موضوع می‌باشد که میزان شتاب و جابجایی طیفی در نقطه‌ی عملکرد سازه‌ی ۱۰ طبقه هنگامی که اعضای سازه با CFRP تقویت می‌شوند، به ترتیب افزایش و کاهش یافته و مقدار شتاب طیفی در توزیع بار یکنواخت بیشتر از توزیع مثلثی است ولی میزان جابجایی طیفی در بارگذاری مثلثی بیشتر است. بیشترین میزان شتاب طیفی در تمامی حالات متعلق به مدل ۴ دهانه است و بیشترین میزان جابجایی طیفی به مدل ۱ دهانه تعلق دارد. همان‌طور که در شکل ۷ مشهود است، میزان میرایی و زمان تناوب مؤثر در تمامی حالات سازه‌ی ۱۰ طبقه با مقاوم شدن سازه کاهش یافته و میزان این دو پارامتر در اکثر موارد در بارگذاری مثلثی بیشتر از توزیع بار یکنواخت است.

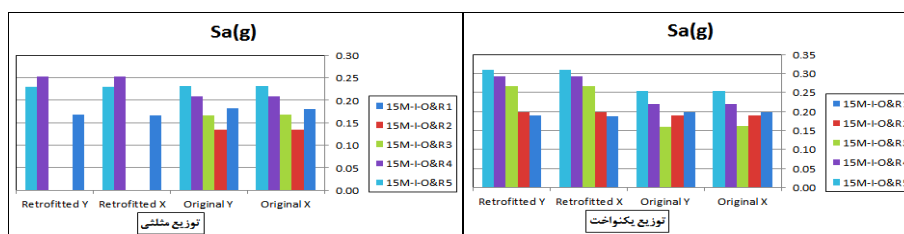


شکل ۷: شتاب و جابجایی طیفی و میرایی و زمان تناوب مؤثر در نقطه‌ی عملکرد سازه‌ی ۱۰ طبقه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

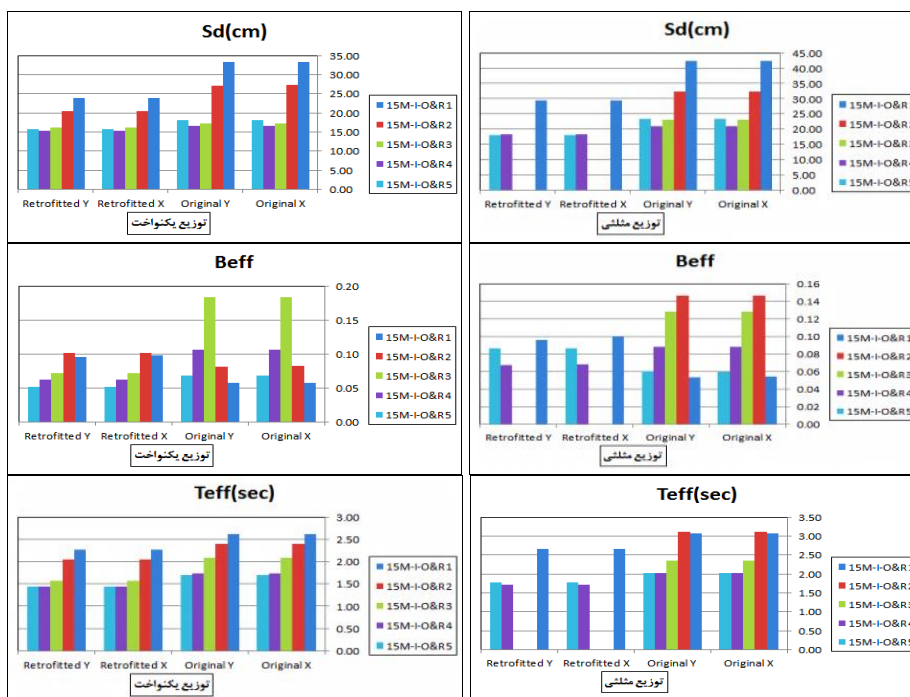


ادامه شکل ۷:

شکل ۸ نشان می‌دهد که در مدل‌های ۱۵ طبقه با تقویت سازه توسط ورق‌های CFRP در هر دو بارگذاری یکنواخت و مثلثی میزان شتاب طیفی به غیر از مدل ۱ دهانه افزایش و جابجایی طیفی در تمامی مدل‌ها کاهش می‌یابد و بارگذاری یکنواخت بیشترین میزان شتاب طیفی را در تمام حالات به غیر از مدل ۳ دهانه ایجاد می‌کند در حالی که بیشترین مقدار جابجایی طیفی در تمام موارد در بارگذاری مثلثی ایجاد می‌شود. در توزیع مثلثی و در سازه‌های مقاوم ۲ و ۳ دهانه منحنی تقاضا با منحنی ظرفیت برخورد نکرده و سازه هیچ نقطه عملکردی را دارا نمی‌باشد در واقع این ممکن است به دلیل تعداد لایه‌های ناکافی CFRP باشد که بایستی لایه‌های ورق CFRP ضخیم‌تر گردد و تقویت سازه افزایش یابد. در ساختمان ۱۵ طبقه میزان میرایی مؤثر در نقطه عملکرد در توزیع بار مثلثی به جز مدل‌های ۱ و ۵ دهانه و در توزیع یکنواخت به غیر از مدل‌های ۱ و ۲ دهانه با تقویت سازه توسط لایه‌های CFRP کاهش یافته ولی میزان پیروید مؤثر در تمامی حالات با مقاوم شدن سازه کاهش می‌یابد. بارگذاری مثلثی در سازه‌ی تقویت شده با میرایی بیشتری و در تمام موارد با زمان تناوب مؤثر بیشتری مواجه بوده در حالی که در مدل‌های اصلی به غیر از سازه‌ی ۲ دهانه این میرایی در بارگذاری یکنواخت مقدار بیشتری را ایجاد می‌کند.



شکل ۸: شتاب و جابجایی طیفی و میرایی و زمان تناوب مؤثر در نقطه‌ی عملکرد سازه‌ی ۱۵ طبقه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی

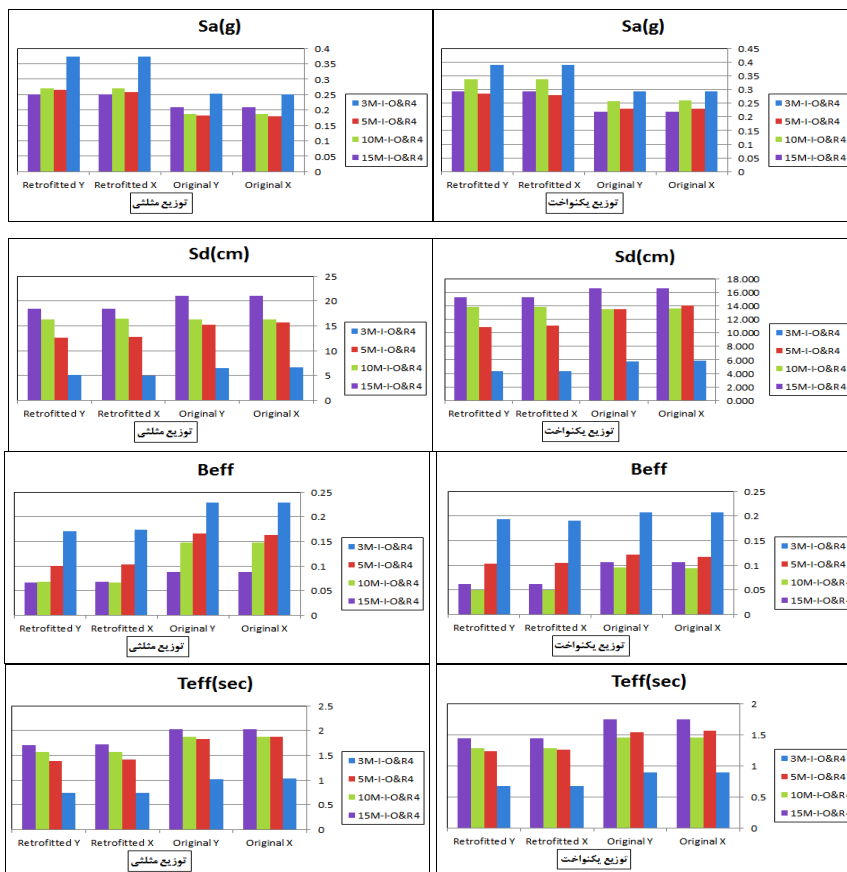


ادامه شکل ۸:

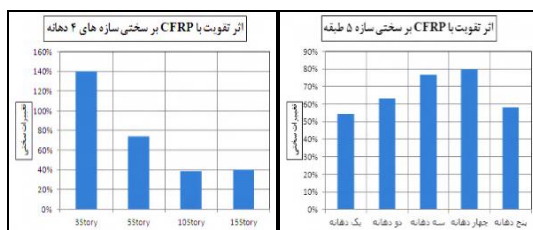
با مقایسه‌ی میزان پارامترهای نقطه عملکرد در طبقات و دهانه‌های مختلف به این نتیجه می‌رسیم که در مدل‌های با تعداد طبقات ۳ و ۵، مدل ۱ دهانه بیشینه‌ی شتاب طیفی را ایجاد می‌کند و در سازه‌های ۵ و ۱۵ طبقه در بارگذاری مثلثی بیشینه‌ی میرایی مؤثر در مدل ۲ دهانه رخ می‌دهد. در ساختمان‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه مدل ۱ دهانه با بیشینه‌ی جابجایی طیفی مواجه شده است و در بارگذاری مثلثی، در مدل ۴ دهانه حداکثر شتاب طیفی رخ می‌دهد و در بارگذاری یکنواخت مدل ۱ دهانه با بیشینه‌ی زمان تناوب مؤثر مواجه بوده است. سازه‌های ۱۵ طبقه ۴ دهانه بیشترین میزان جابجایی طیفی و زمان تناوب مؤثر نقطه عملکرد مطابق شکل ۹ را به خود اختصاص داده اند از طرفی بیشینه‌ی میزان شتاب طیفی و میرایی مؤثر متعلق به سازه‌های ۳ طبقه ۴ دهانه می‌باشد. با افزایش طبقات از ۳ طبقه به ۱۵ طبقه در تمامی موارد میزان جابجایی طیفی و در اکثر موارد میزان پیوند مؤثر افزایش می‌یابد ولی میزان میرایی مؤثر کاهش می‌یابد.

۳-۴- ارزیابی اثر متغیرهای هندسی بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های تقویت‌شده با CFRP

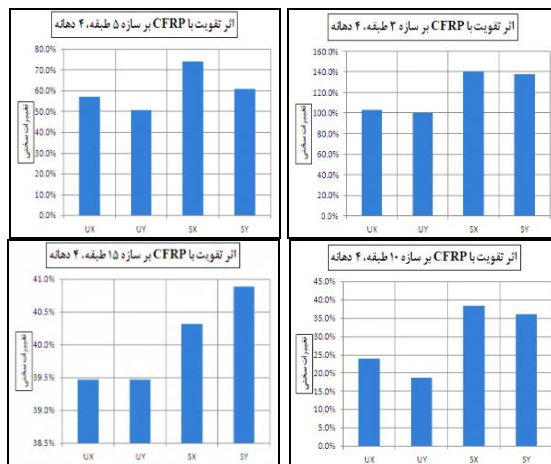
در این قسمت به بررسی اثر متغیرهای هندسی و نوع بارگذاری بر درصد تغییرات پارامترهای رفتار لرزه‌ای از جمله سختی و جذب انرژی و متغیرهای نقطه عملکرد با تقویت سازه توسط CFRP پرداخته می‌شود که نتایج در اشکال ۱۰ تا ۱۳ نشان داده شده اند. با توجه به اشکال ۱۰ و ۱۱ در سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با افزایش طبقات تا ۱۰ طبقه میزان تغییر سختی سازه به ازای تقویت با CFRP کاهش می‌یابد و حداکثر درصد افزایش سختی سازه با مقاوم‌سازی در سازه ۳ طبقه به میزان ۱۳۹/۸۳٪ رخ می‌دهد. در سازه‌ی ۵ طبقه با دهانه‌های ۱ الی ۵، با افزایش تعداد دهانه تا ۴ دهانه درصد افزایش سختی سازه با تقویت افزایش می‌یابد و ماکزیمم میزان افزایش سختی سازه با تقویت در سازه ۵ طبقه با ۴ دهانه برابر ۷۹/۸۲٪ اتفاق می‌افتد. با توجه به اشکال ۱۲ و ۱۳ با افزایش طبقات تا ۱۰ طبقه میزان درصد افزایش جذب انرژی رو به افزایش می‌باشد و در سازه ۳ طبقه با کاهش جذب انرژی به ازای تقویت سازه روبرو هستیم. میزان جذب انرژی با تقویت سازه‌ی ۵ طبقه با تعداد دهانه‌های مختلف افزایش می‌یابد.



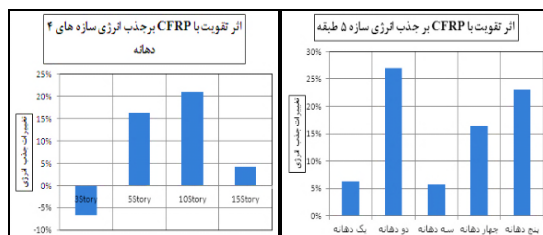
شکل ۹: زمان تناوب مؤثر در نقطه‌ی عملکرد طبقات تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی



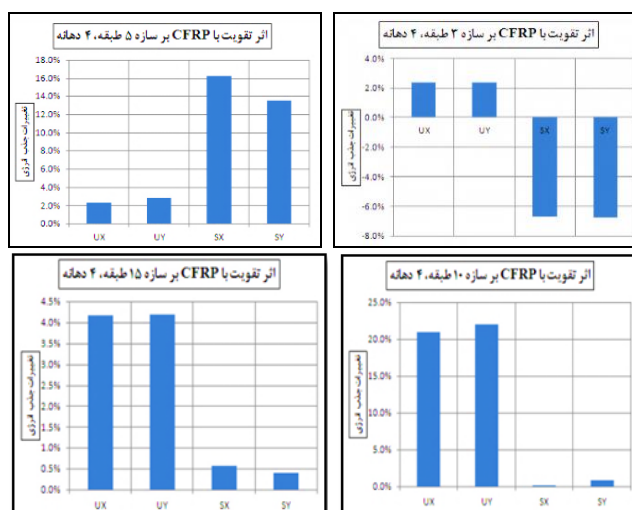
شکل ۱۰: تأثیر تعداد طبقات و دهانه بر سختی سازه



شکل ۱۱: تأثیر نوع بارگذاری بر سختی سازه‌های ۴ دهانه

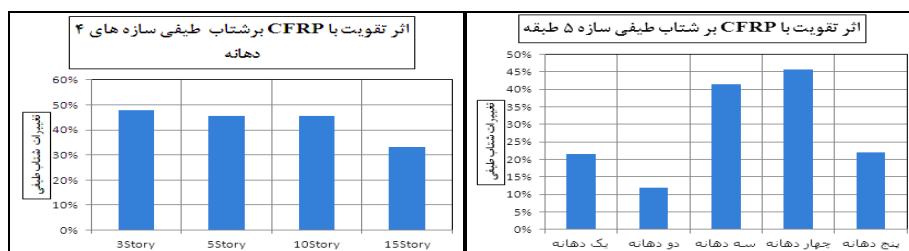


شکل ۱۲: تأثیر تعداد طبقات و دهانه بر جذب انرژی سازه

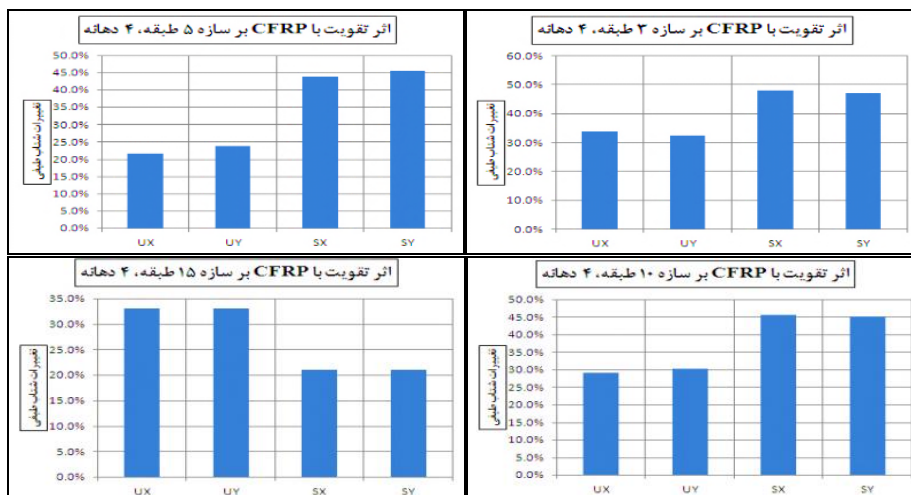


شکل ۱۳: تأثیر نوع بارگذاری بر جذب انرژی سازه‌های ۴ دهانه

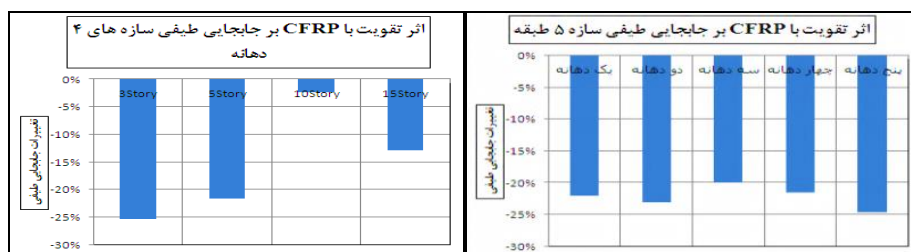
در بررسی تأثیر تعداد طبقات بر میزان افزایش شتاب طیفی به ازای تقویت سازه مطابق شکل و ۱۴ و ۱۵ دیده می‌شود که، با افزایش تعداد طبقات میزان درصد تغییرات شتاب طیفی کاهش یافته و حداکثر این مقدار در سازه ۳ طبقه به میزان $0.2/48\%$ ایجاد می‌شود. هم چنین با افزایش تعداد طبقات تا ۱۰ طبقه درصد کاهش جابجایی طیفی مطابق شکل ۱۶ و ۱۷ همانند درصد تغییرات سختی سازه، روند نزولی داشته و سازه‌ی ۳ طبقه با حداکثر کاهش جابجایی طیفی به میزان $25/35\%$ روبروست. مدل ۵ دهانه ماکزیمم درصد کاهش جابجایی طیفی را به ازای تقویت سازه با CFRP برابر با $24/70\%$ دارا می‌باشد. با افزایش تعداد طبقات از ۳ الی ۱۵ طبقه میزان تغییرات زمان تناوب مؤثر که با تقویت سازه کاهش می‌یابد، مطابق شکل ۱۸ و ۱۹ روند نزولی داشته و بیشینه‌ی آن در سازه‌ی ۳ طبقه برابر با $28/48\%$ رخ می‌دهد. مدل ۴ دهانه در سازه‌ی ۵ طبقه ماکزیمم درصد کاهش زمان تناوب را دارا می‌باشد که مقدار آن برابر $24/83\%$ می‌باشد. با افزایش تعداد طبقات تا ۱۰ طبقه میزان کاهش میرایی مؤثر مطابق شکل ۲۰ و ۲۱ روند صعودی داشته و بیشینه‌ی آن همانند اثر جذب انرژی در سازه ۱۰ طبقه به میزان $54/73\%$ رخ می‌دهد. حداکثر کاهش میرایی مؤثر به ازای مقاوم‌سازی سازه در مدل ۴ دهانه برابر $39/76\%$ ایجاد شده است و مدل ۲ دهانه با افزایش میرایی مؤثر روبرو می‌باشد.



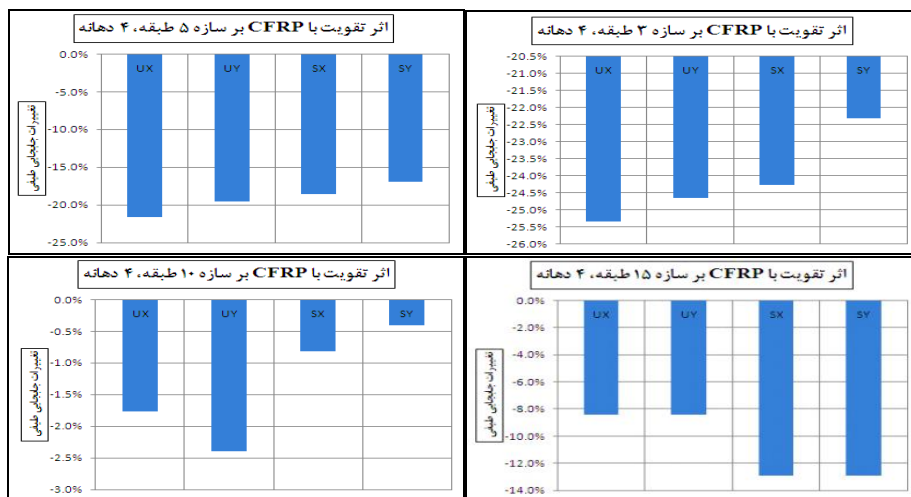
شکل ۱۴: تأثیر تعداد طبقات و دهانه بر شتاب طیفی نقطه عملکرد سازه



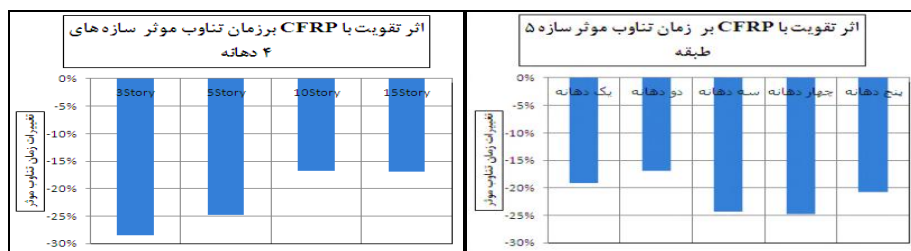
شکل ۱۵: تأثیر نوع بارگذاری بر شتاب طیفی نقطه عملکرد سازه‌های ۴ دهانه



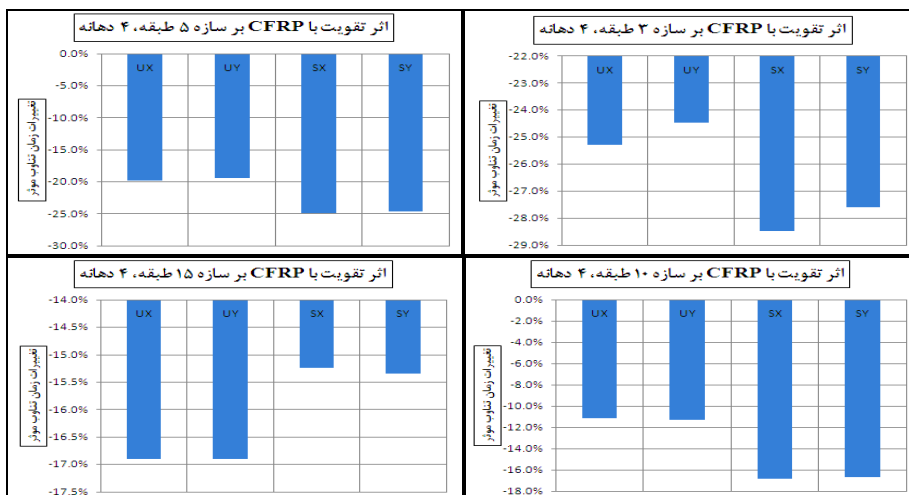
شکل ۱۶: تأثیر تعداد طبقات و دهانه بر جابجایی طیفی نقطه عملکرد سازه



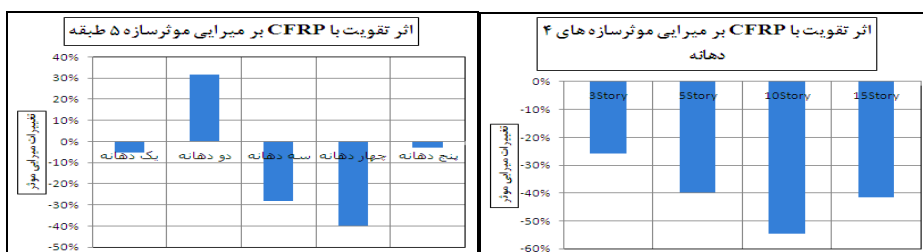
شکل ۱۷: تأثیر نوع بارگذاری بر جابجایی طیفی نقطه عملکرد سازه‌های ۴ دهانه



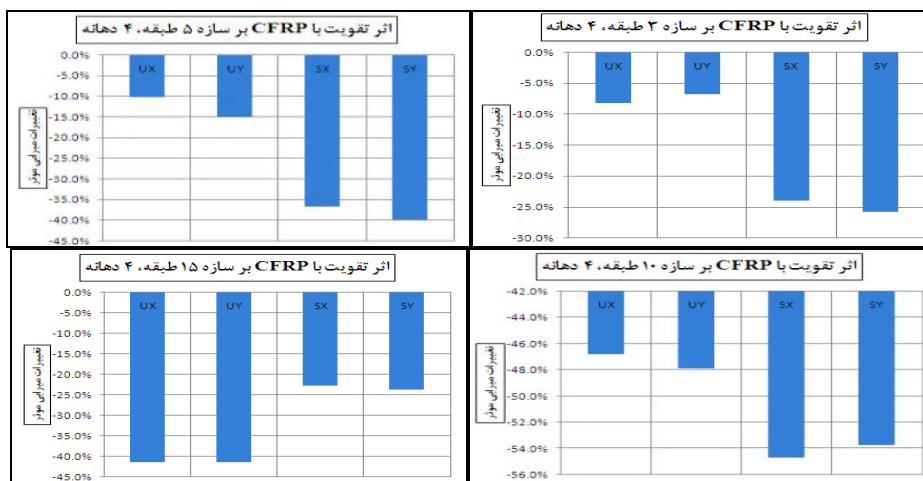
شکل ۱۸: تأثیر تعداد طبقات بر زمان تناوب مؤثر نقطه عملکرد سازه



شکل ۱۹: تأثیر نوع بارگذاری بر زمان تناوب مؤثر نقطه عملکرد سازه‌های ۴ دهانه



شکل ۲۰: تأثیر تعداد طبقات و دهانه بر میرایی مؤثر نقطه عملکرد سازه



شکل ۲۱: تأثیر نوع بارگذاری بر میرایی مؤثر نقطه عملکرد سازه‌های ۴ دهانه

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق بررسی رفتار و پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مقاوم با CFRP و تقویت نشده در سطح کلی، منحنی‌های ظرفیت، نقطه عملکرد و حداکثر تغییر مکان بام، ضریب برش پایه مدل‌ها بررسی شده است.

۱. بیشینه‌ی میزان جذب انرژی و سختی اولیه و ظرفیت برش پایه منحنی ظرفیت در سازه‌های مقاوم با CFRP رخ می‌دهد و بیشترین تغییر مکان جانبی متعلق به مدل‌های تقویت نشده است. تأثیر مقاوم‌سازی در میزان جذب انرژی سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه موجب بهبود عملکرد آن می‌شود ولی در سازه‌ی ۳ طبقه تقویت سازه جذب و استهلاک انرژی آن را کاهش می‌دهد. هم-

- چنین سختی و شیب اولیه‌ی سازه مقاوم بالاتر از سازه‌ی تقویت نشده بوده و سختی اولیه سازه‌ی مقاوم حدود ۱/۵ الی ۲/۵ برابر سازه اصلی می‌باشد.
۲. با افزایش تعداد دهانه‌ها در سازه‌ی ۵ طبقه، سختی اولیه و ظرفیت برش پایه و جذب انرژی در منحنی ظرفیت افزایش یافته است. ماکزیمم افزایش سختی و جذب انرژی به ازای تقویت سازه به ترتیب در مدل‌های ۳ و ۱۰ طبقه و در سازه‌ی ۵ طبقه بیشینه‌ی این مقادیر به ترتیب در مدل ۴ و ۲ دهانه رخ می‌دهد.
۳. با تقویت سازه توسط ورق‌های CFRP میزان شتاب طیفی افزایش می‌یابد که افزایش در ظرفیت بار لرزه‌ای برای قاب مقاوم را ایجاد می‌کند و جابجایی طیفی، میرایی و زمان تناوب مؤثر کاهش یافته که این کاهش نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت در برابر بار جانبی غیرالاستیک و افزایش سختی سازه می‌باشد.
۴. با افزایش تعداد طبقات میزان تغییرات پارامترهای شتاب و جابجایی طیفی و زمان تناوب مؤثر با مقاوم‌سازی کاهش یافته و ماکزیمم این تغییرات در سازه‌ی ۳ طبقه رخ می‌دهد. بیشینه‌ی کاهش میرایی مؤثر در مدل ۱۰ طبقه ایجاد شده که با افزایش تعداد طبقات تا ۱۰ طبقه این کاهش روند صعودی داشته است. مدل ۴ دهانه حداکثر میزان تغییرات میرایی و زمان تناوب مؤثر و شتاب طیفی و مدل ۵ دهانه بیشترین میزان تغییر جابجایی طیفی را ایجاد می‌کند.
۵. با افزایش طبقات از ۳ به ۱۵ طبقه میزان جابجایی طیفی و پیوند مؤثر افزایش ولی میزان میرایی مؤثر کاهش می‌یابد که هر چه سازه کوتاه‌مرتبه‌تر باشد، از نظر عملکرد لرزه‌ای رفتار مطلوب‌تری از خود نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Sheikh, Sh. Yau, G. (2002). Seismic Behaviour of Concrete Columns Confined With Steel and Fibre Reinforced Polymers. *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 1, pp 72-80.
- [2] Shooshtari, A., Bayat, M. (1389). Investigation of ductility and seismic behaviour of RC with confined members with FRP. *Fifth National Civil Engineering Conference* (In Persian).
- [3] Tavakolizade, M.R., Ghods, A.S. (1391). *Review of design code ACI 440.2R-08* (In Persian).
- [4] *Publication No. 345*. (1385). Guideline for Design Specification of strengthening of RC building with FRP. Management and planning Organization (In Persian).
- [5] Eghbali, A. A. (1383). *Evaluation of seismic performance of RC buildings designed based on 2800 code*. MS Thesis, Yazd University (In Persian).
- [6] Kahrizi, M. (1391). *Investigation of ductility of seismic resistant RC building*. MS Thesis, Razi University (In Persian).
- [7] Farughi, R. (1388). *Guideline of seismic strengthening of structures*. Sima-Danesh Press (In Persian).
- [8] Ludovico, M.D., Prota, A., Manfredi, G., Cosenza, E. (2007). *Seismic strengthening of an under-designed RC structure with FRP*. Department of Structural Engineering, University of Naples Federico II, 80125 Naples, Italy, Published online 24 in Wiley Inter Science.
- [9] Ghadirad, H., Kazemi, H.R., Tavakolizade, M.R. (1391). The effect of confinement with FRP on force-moment interaction curves of RC columns. *Fourth National concrete conference* (In Persian).
- [10] Shahriari Ahmadi, A. (1388). *Numerical analysis of flexural behavior of RC beams strengthened with FRP*. MS Thesis, Sistan-Baluchestan University (In Persian).
- [11] Saber Tanha, S., Naseri, H.R., Ghalheno, M. (1388). Investigation of effective parameters on shear of beams strengthened with CFRP using F.E method. *8 th International conference of civil engineering*. Shiraz University (In Persian).
- [12] Khastu, M. (1390). *Investigation of vertical component of earthquake in near fault on seismic performance of RC buildings*. MS thesis, Semnan University (In Persian).
- [13] *Design code 2800*. (1395). Fourth version, Building and housing Research center (In Persian).
- [14] *Publication No. 361*. (1388). Guideline for seismic strengthening of RC building. Management and planning Organization (In Persian).
- [15] *Applied Technology Council*. (1996). Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. *ATC-40 Report*, Redwood City, California.
- [16] Taghinezhad, R. (1392). *Design and strengthening of structures based on performance level with push-over analysis, SAP2000-ETABS*. Nashr Press, Third Version (In Persian).