Modares Civil Engineering Journal

Volume 26, Issue 1, 2026, 41-51

DOI: 10.48311/mcej.2025.99115.0

The effect of successive near-field earthquakes on concrete special moment frames equipped with viscous dampers

Amirhossein Barjasteh[1], Fereshteh Emami [2*], Armin Aziminejhad [3]

1. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
3. Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Today, earthquakes are one of the important topics in the seismic design of structures in engineering communities. In seismic areas, in addition to the main earthquake, a series of foreshocks or aftershocks with different intensities usually occur, which occur with a short time interval or a few days and months after the main earthquake. According to past experiences, aftershocks often occur suddenly after the main earthquake and due to static and dynamic stresses during the earthquake process. Successive earthquakes are one of the important topics in the seismic design of structures, which has not been included even in new regulations. Therefore, the study of structures under successive earthquakes and the reinforcement of structures under these earthquakes is inevitable. Therefore, in this study, structures with a concrete special moment frame system with a number of floors of 7, 12 and 20 floors have been considered. SAP2000 software was used to analyze the structures and nonlinear time history analysis was performed for the structures under 7 near-fault earthquake records. The seismic behavior of these structures under single and consecutive earthquakes, without dampers and with the addition of viscous dampers, was investigated, and results such as base shear, roof permanent displacement, relative floor displacement (drift), plastic joint formation process, and hysteresis curve were investigated in all structures with and without viscous dampers under single and consecutive earthquakes. These values were higher in consecutive artificial earthquakes than in single earthquakes, and a greater reduction was created in the corresponding values when the damper was used. The reduction in base shear in single earthquakes was 28% on average and 15% in consecutive earthquakes, which indicated the effect of using viscous dampers. Also, considering that consecutive earthquakes were more intense, this percentage of reduction was lower. Also, according to the results of the permanent displacement of the roof, the reduction in permanent displacement of the roof under single earthquakes was 19.33% and 14% for consecutive earthquakes. The use of dampers has reduced the residual relative displacement between floors, which is greater under single seismic scenarios than in the consecutive case. According to the results obtained, it was determined that there is no direct relationship between the height of the frame and the effect of the seismic sequence phenomenon on the increase in relative displacement between floors. Finally, the results of the sensitivity analysis also showed that the number of frame openings has an effect on the relative displacement of floors in 7-story frames, and with its increase, a decrease in relative displacement is observed in the lower floors (1 to 3) and an increase in relative displacement of floors in the upper floors (4 to 7). This phenomenon has been observed for both single and consecutive earthquake conditions. As a general and final conclusion of this research, it can be said that the response of the structure in the case of a seismic sequence phenomenon is more critical than a single earthquake, and for this reason, the effects of successive earthquakes should be considered in seismic design codes.

Review History

Received: Nov 12, 2024

Revised: Mar 15, 2025

Accepted: Nov 8, 2025

Keywords

Seismic Sequence

Near Fault Area

Concrete Bending Frame

Viscose Damper

* Corresponding Author Email: f-emami@srbiau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5410-7992

مجله علمی مهندسی عمران مدرس

دوره ۲۶، شماره ۱، سال ۱۴۰۵ - صفحات ۴۱ تا ۵۱

DOI: 10.48311/mcej.2025.99115.0

اثر زلزله‌های متوالی حوزه نزدیک بر قاب‌های خمشی ویژه بتنی مجهز به میراگر ویسکوز

امیرحسین برجسته[۱]، فرشته امامی[۲*]، آرمین عظیمی نژاد[۳]

۱. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۳. گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

چکیده

در مناطق لرزه‌خیز، علاوه بر زلزله اصلی معمولاً یکسری پیش‌لرزه یا پس‌لرزه با شدت‌های متفاوت رخ می‌دهد که با فاصله زمانی کوتاه و یا چند روز و چند ماه بعد از وقوع زلزله اصلی رخ می‌دهند. باتوجه به تجربیات گذشته، پس‌لرزه‌ها اغلب به صورت ناگهانی بعد از زلزله اصلی و به دلیل تنش‌های استاتیکی و دینامیکی در طی فرآیند زلزله رخ خواهند داد. برای مقابله با زلزله از میراگر ویسکوز استفاده شده است که با تشدید رفتار لرزه‌ای سازه‌ها در مقابل زلزله‌های متوالی می‌تواند تا حد مناسبی بهبود بخشد. در این تحقیق سه سازه با تعداد طبقات ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه با سیستم قاب خمشی بتنی ویژه در نظر گرفته شده است و نتایج کلی کاهش برش پایه، تغییر مکان ماندگار بام و تغییر مکان نسبی طبقات (دریفت) در حالت استفاده از میراگر ویسکوز نشان داده شده است. این مقادیر در زلزله‌های متوالی مصنوعی ساخته شده نسبت به زلزله‌های منفرد بیشتر بوده و در حالت استفاده از میراگر کاهش بیشتری در مقادیر مربوطه ایجاد شده است. میزان کاهش برش پایه در زلزله‌های منفرد بطور میانگین ۲۸٪ و در زلزله‌های متوالی ۱۵٪ بوده که نشان از تاثیر استفاده از میراگر ویسکوز داشته و همچنین با توجه به اینکه زلزله‌های متوالی دارای شدت بیشتری بوده‌اند این درصد کاهش کمتر بوده است. همچنین طبق نتایج تغییر مکان ماندگار بام نیز میزان کاهش جابجایی ماندگار بام تحت زلزله‌های منفرد ۱۹/۳۳٪ و برای زلزله‌های متوالی ۱۴٪ بوده است. طبق نتایج مشخص شد که ارتباط مستقیمی میان ارتفاع قاب و میزان اثر پدیده توالی لرزه‌ای بر روی افزایش جابجایی نسبی بین طبقات وجود ندارد. به‌عنوان نتیجه کلی و نهایی این تحقیق می‌توان گفت که پاسخ سازه در حالت پدیده توالی لرزه‌ای نسبت به لرزه منفرد بحرانی‌تر بوده و به همین دلیل باید اثرات زمین‌لرزه‌های متوالی در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای دیده شود.

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلمات کلیدی

توالی لرزه‌ای

حوزه نزدیک گسل

قاب خمشی بتنی

میراگر ویسکوز

۱- مقدمه

علی‌رغم اهمیت پدیده توالی لرزه‌ای در آیین‌نامه‌های طراحی مانند استاندارد ۲۸۰۰ ایران، ضوابط معینی برای لحاظ نمودن این پدیده درنظر گرفته نشده است. چنانچه فقط زلزله منفرد در طراحی سازه منظور شود و تفاوتی میان عملکرد سازه تحت یک زلزله منفرد و زلزله‌های متوالی وجود نداشته باشد، ممکن است سازه قادر به پاسخگویی نیازهای حاصل از زلزله‌های متوالی نبوده و دچار خسارات بیشتر و حتی فروریزش شود. سازه‌های ساخته شده به دست بشر در مناطق لرزه‌خیز اغلب علاوه بر زلزله اصلی تحت اثر یک سری پیش‌لرزه یا پس‌لرزه با شدت‌های متفاوت (ضعیف تا

* رایانامه نویسنده مسئول: f-emami@srbiau.ac.ir - ORCID: 0000-0002-5410-7992

قوی) قرار می‌گیرند. این زلزله‌های متوالی با فاصله زمانی کوتاه و یا حتی چند روز و تا چند ماه بعد از وقوع زلزله اصلی رخ می‌دهند. با توجه به تجربیات گذشته، پس‌لرزه‌ها اغلب به صورت ناگهانی بعد از زلزله اصلی و به دلیل تنش‌های استاتیکی و دینامیکی در طی فرآیند زلزله رخ خواهند داد. در یک زلزله متوالی طبیعی تعداد زیادی پس‌لرزه بعد از وقوع زلزله اصلی رخ می‌دهد که تحلیل سازه با در نظر گرفتن تمام پس‌لرزه‌ها زمان‌بر بوده و در نتیجه تنها تعدادی پس لرزه با شرایط مشخص و یا فقط بزرگترین پس‌لرزه در نظر گرفته می‌شود [1].

در نظر گرفتن بحث توالی در زمین لرزه‌های تشکیل دهنده یک سناریوی لرزه‌ای منجر به تغییرات چشمگیری در پاسخ و عملکرد سیستم‌های سازه‌ای می‌شود. با این حال در اغلب موارد، موضوع زلزله متوالی در روند تحلیل و طراحی نادیده گرفته می‌شود که علت این امر وجود برخی عدم قطعیت‌ها در شناسایی و شبیه‌سازی این زمین‌لرزه‌ها و اغلب بالا بودن حجم تحلیل‌ها، به ویژه تحلیل‌های غیرخطی می‌باشد [2].

روئیز گارسیا و همکاران (۲۰۱۴) اثر توالی‌های لرزه‌ای بر ساختمان‌های دارای قاب بتن مسلح در مکان‌هایی با خاک سست را مورد مطالعه قرار دادند. از آنجا که تنها دو رکورد واقعی در طول زلزله سال ۱۹۸۵ میلادی مکزیک جمع آوری شده، این تحقیق با استفاده از رکوردهای مصنوعی انجام شد. پاسخ غیرخطی، از لحاظ نیازهای بیشینه و دریفت ماندگار طبقات از چهار ساختمان بتن مسلح با تعداد طبقات ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رابطه دوره تناوب آسیب دیده ساختمان (یعنی دوره تناوب ساختمان پس از زلزله اصلی) به دوره تناوب غالب پس‌لرزه، که محتوای فرکانسی آن اندازه‌گیری شده است، تاثیر قابل توجهی بر پاسخ ساختمان دارد. از دستورالعمل FEMA 365 استفاده شد و تحلیل غیرخطی ساختمان‌ها با استفاده از نرم‌افزار RUAUMOKO انجام شد [3].

وایت[1] و استادینویچ[2] (۲۰۱۴) اثر زلزله‌های متوالی بر پاسخ دیوار برشی بتن مسلح ضخیم را بررسی کردند. یک برنامه شبیه‌سازی ترکیبی از دو نمونه دیوار برشی برای بررسی تغییرات پاسخ دیوارهای ضخیم ناشی از توالی‌های مختلف زلزله استفاده شده است. از نرم‌افزارهای SAP2000 و2013 OpenSees و OpenFresco 2013 برای تحلیل و طراحی سازه‌ها استفاده شده است. نتایج حاصل ازاین شبیه‌سازی‌ها نشان داد که توالی‌های مختلف زلزله‌ای تاثیر قابل توجهی بر پاسخ نیرو- تغییر شکل و حالت شکست بر دیوار برشی بتن مسلح ضخیم دارد. آیین‌نامه مورد استفاده نیز برای طراحی سازه ها ACI 318-08 است [4].

در سال ۲۰۱۵ غفارزاده به ارزیابی تغییر شکل ساختمان‌های بتنی تحت زلزله اصلی و پس-لرزه‌های متوالی زلزله‌ها پرداخت، برای رسیدن به نتایج دقیق از تحلیل تاریخچه زمانی استفاده کرد. برای این منظور دو زلزله بم و ورزقان و پس‌لرزه‌های متوالی آن را بعد از تصحیح شتاب نگاشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار Seismosignal به کمک نرم افزار SAP2000 در ساختمان‌های مدل شده (۳و ۵ و ۱۲طبقه) مورد تحلیل و بررسی قرار داده شد و تغییر مکان‌های دقیق، دریفت طبقات، نیروهای برشی پایه و تشکیل مفاصل پلاستیک در ساختمان‌ها را تحت زلزله اصلی و پس‌لرزه‌ها مورد بررسی قرار گرفت [5].

رینالدین[3] و همکاران (۲۰۱۷) به منظور بررسی تاثیر توالی لرزه‌ای روی سازه‌ها با استفاده از میراگرها با ویژگی رفتاری هیستریک، ابتدا سیستم‌های غیرخطی یک درجه آزادی را در معرض ۱۰ توالی لرزه‌ای ثبت شده موجود قرار دادند. از هر تحلیل، طیف ناکشسان توالی لرزه‌ای برای درجات شکل‌پذیری مختلف و نیاز شکل‌پذیری محاسبه شد و با مقادیر تنها یک رخداد لرزه‌ای مقایسه شد. نرم‌افزار مورد استفاده برای طراحی سازه‌ها SAP2000 بوده و برای تحلیل‌ها از نرم افزار OpenSees استفاده شده است. نتایج نشان داد میراگرهای ویسکوز خطی و غیرخطی می‌توانند شتاب را به طور قابل توجهی در طیف غیرکشسان کاهش دهند [6].

در سال ۲۰۲۳ سان[4] و همکاران زلزله‌های اتفاق افتاده در فوریه ۲۰۲۳ کشور ترکیه را مورد بررسی قرار دادند که برای اکثر زلزله‌های رخ داده، پس‌لرزه‌های بزرگی تا ۹ ساعت پس از وقوع زلزله اصلی نیز ثبت شده است. در این تحقیق سان و همکاران ابتدا مستندسازی مشاهدات ژئوتکنیکی و تکتونیکی آسیب‌های سازه‌ای در شهر دوغان شهیر پرداختند و تاریخچه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده سپس با بررسی آنها و داده‌های زمین لرزه نزدیک

[1] Whyte
[2] Stojadinovic
[3] Rinaldin
[4] Sun

منطقه مورد مطالعه، تقاضای لرزه‌ای سازه‌های منطقه ارائه شد و در انتها پس از گزارش آسیب‌های لرزه‌ای نیاز به بازسازی سازه‌های آسیب دیده از زلزله منطقه به صورت فنی ارائه شد [7].

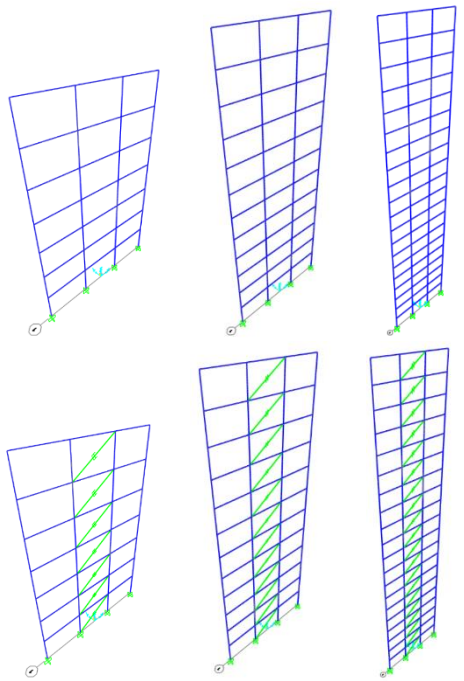
در سال ۲۰۲۴ هاینزل[1] و همکارانش رویکرد مدلسازی جدیدی برای زلزله‌های متوالی بنام ETASI ارائه شدند. این رویکرد مدسازی رویکردی پیشرفته برای مدلسازی دسته‌بندی زلزله‌های کوتاه‌مدت است و برای پیش‌بینی پس‌لرزه‌های کوتاه‌مدت ارجحیت دارد. با این حال، به دلیل تغییرپذیری زیاد توالی‌های مختلف زلزله، پارامترهای مدل باید برای پیش‌بینی دقیق با لرزه‌خیزی محلی تنظیم شوند. چنین تنظیمی بر اساس اولین پس‌لرزه‌ها به دلیل ناقص بودن مشخصات زلزله پس از یک زلزله اصلی با مشکل مواجه می‌شود، که می‌توان آن را با یک کور منبع شبکه‌های لرزه‌نگاری پس از هر زلزله توضیح داد، که در طی آن رویدادهای کوچکتر با بزرگی‌های کمتر قابل تشخیص نیستند. در این مطالعه این مدل برای دو زلزله دارای توالی‌های لرزه‌ای جنوب شرقی ترکیه با بزرگای ۷/۷ و ۷/۶ ریشتر اعمال و مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از این مدل برای پیشبینی پس‌لرزه‌ها بسیار مناسب بوده و نواقص کاتالوگ زلزله را به خوبی برازش داده است و تعداد و بزرگای پس‌لرزه به خوبی پیشبینی کرده است [8].

با توجه به اینکه موضوع زلزله‌های متوالی مطابق استانداردهای طراحی مورد توجه قرار نمی‌گیرد پس تاثیر آنها روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها دیده نمی‌شود، از این رو بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های رایج تحت زلزله‌های متوالی و راهکارهای کاهش اثر این پدیده لرزه‌ای ضروری به نظر می رسد پس استفاده از میراگر ویسکوز و بررسی آن در زلزله‌های منفرد متوالی قاب‌های خمشی بتنی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۱. پارامترهای لرزه‌ای و بارهای وارد بر تیرها

Table 1. Seismic parameters and loads on frames

A=0.35	design based acceleration
Residential	User type
I=1.0	Importance factor
R_u=7.5	Reduction factor
C_d=5.5	Displacement amplification factor
II	Soil type
3000 kg/m	dead load on the beam
1250 kg/m	live load on the beam



شکل ۱. مدل‌های مورد استفاده تحقیق

Fig. 1. Models used in the research

۲- مدلسازی و روش تحقیق

در این تحقیق قاب های خمشی بتنی ویژه ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه به صورت ۲ بعدی مورد ارزیابی قرار داده شدند. بر اساس پهنه‌بندی لرزه‌ای کشور ایران، در این تحقیق فرض بر این است که قاب‌های مورد نظر واقع در منطقه با خطر نسبی خیلی زیاد می‌باشند. با توجه به وضع موجود قاب‌های ساختمانی رایج در سطح کشور بارهای وارد بر تیرها و همچنین پارامترهای لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتنی ویژه، در جدول (۱) نشان داده شده است. رفتار سازه‌ها تحت اثر زلزله‌های منفرد و متوالی با و بدون میراگر ویسکوز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۱) نیز مدل‌های مورد استفاده برای تحقیق نیز آورده شده است.

۲-۱- مصالح و مقاطع مورد استفاده

مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۲) و منحنی مندر بتن محصور شده و منحنی تنش – کرنش فولاد برای میلگرد مصرفی نیز در شکل (۲) آورده شده است. برای تعیین مقاطع اولیه قاب‌ها از تحلیل استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی استفاده شده است که براساس بررسی نسبت نیرو به ظرفیت و کنترل ضابطه تیر ضعیف –ستون قوی و کنترل‌های آئین‌نامه ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و اعمال ضوابط مبحث ششم و نهم مقررات ملی ساختمان در

[1] Hainzl

جداول (۳ تا ۵) آورده شده است. لازم به ذکر در طراحی مقاطع حتی الامکان سعی شده است مقاطع به صورت بهینه طراحی گردیده و نسبت نیرو به ظرفیت آنها (DCR) عمدتاً در بازه ۰/۷ الی ۱ قرار گرفته است.

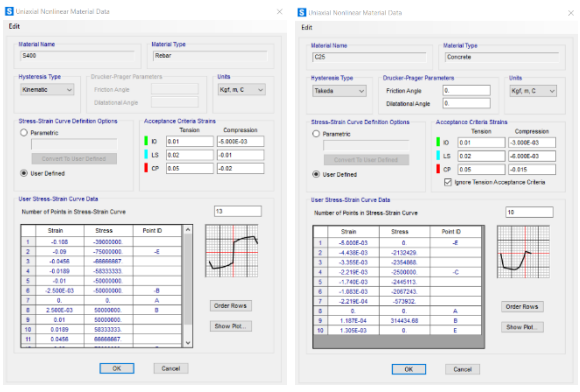
۲-۲- معرفی شتاب‌نگاشت‌ها

به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی هفت شتاب‌نگاشت از زلزله‌های نزدیک گسل سایت PEER انتخاب و برای ایجاد زلزله‌های متوالی استفاده شده است. طبق جدول زیر زلزله‌های انتخابی برای خاک نوع II که سرعت موج برشی متوسط آنها بین ۳۷۵ تا ۷۵۰ متر بر مجذور ثانیه است و تمامی زلزله‌ها از حوزه نزدیک گسل و همگی فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر با گسل انتخاب شده‌اند [9] و سعی شده است که زلزله‌هایی با شدت بیشتر انتخاب شوند تا آثار خرابی سازه‌ها مشهود باشد (جدول ۶).

جدول ۲. مشخصات مصالح میلگردها و مصالح بتن

Table 2. Specifications of longitudinal rebar materials (S400)&(S340)

Quantity (concrete)	Quantity (S400)	Quantity (S340)	Unit	Specifications
2500	7850	7850	kgf/m^3	Special weight
26500	200000	200000	MPa	Modulus of elasticity
0.15	0.3	0.3	---	Poisson's ratio
-----	0.000012	0.000012	$1/^{\circ}C$	Thermal coefficient of expansion
-----	400	340	MPa	Yielding strength
-----	600	500	MPa	Ultimate strength
25	-----	-----	MPa	Compressive strength of concrete



شکل ۲. منحنی مندر بتن و تنش – کرنش فولاد

Fig. 2. Concrete Mander and steel stress-strain curve

جدول ۳. مقاطع ستون‌های سازه ۷ طبقه

Table (3) Sections of 7-story structure

Beam	Column		Story
Section dimensions	Reinforcement	Section dimensions	
50X40	12Ø20	45X45	1-3
45X30	12Ø20	40X40	4-7

جدول (۴) مقاطع ستون‌های سازه ۱۲ طبقه

Table 4. Sections of 12-story structure

Beam	Column		Story
Section dimensions	Reinforcement	Section dimensions	
50X40	12Ø20	55X55	1-4
50X40	12Ø20	50X50	5-6
40X30	12Ø20	50X50	7-8
40X30	20Ø20	40X40	9-12

جدول (۵) مقاطع ستون‌های سازه ۲۰ طبقه

Table 5. Sections of 20-story structure

Beam	Column		Story
Section dimensions	Reinforcement	Section dimensions	
60X50	28Ø25	65X65	1-5
55X45	20Ø25	60X60	6-10
50X40	16Ø20	55X55	11-15
40X30	12Ø20	45X45	16-20

جدول ۶. مشخصات ۷ زلزله نزدیک گسل

Table 6. Properties of 7 earthquakes near faults

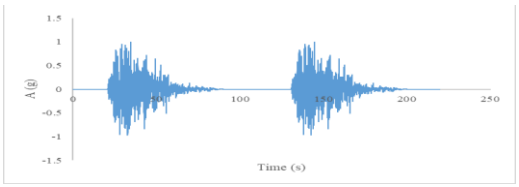
Scaling factor			Focal distance	Magnitude	PGA	Station	Date	Name
20st	12st	7st						
6.23	6.09	3.46	3.2	7.6	0.289	TCU076	1999	ChiChi Taiwan
4.05	3.96	2.248	9.58	6.2	0.445	Cholame - Shandon Array #5	1966	Parkfield
6.1	5.96	3.389	2.65	7.1	0.295	IRIGM 487	1999	Duzce, Turkey
3.55	3.47	1.972	11.94	6.8	0.507	Joetsu Kakizakiku Kakizaki	2007	Chuetsu-oki, Japan
5.28	5.16	2.932	5.38	6.3	0.341	L'Aquila-Parking	2009	L'Aquila, Italy
7	6.85	3.891	11.4	5.4	0.257	Livermore-Fagundas Ranch	1980	Livermore-02
7.23	7.15	4.016	6.45	6.2	0.249	Kalamata (bsmt)	1986	Kalamata, Greece-01

۲-۳- زلزله‌های متوالی

برای در نظر گرفتن توالی لرزه‌ای در این تحقیق مطابق توصیه گارسیا و همکاران [3] از روش ساخت توالی لرزه‌ای مصنوعی و تکرار زلزله استفاده شده است که بدین منظور فاصله زمانی ۲۰ ثانیه برای مابین دو زلزله در نظر گرفته شده است و در انتهای زلزله نیز به منظور ارتعاش آزاد سازه مدت زمان ۲۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل (۳) نمونه‌ای از توالی لرزه‌ای برای زلزله

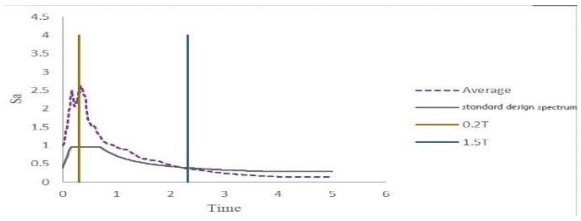
Chi Chi نشان داده شده است. تمامی زلزله‌ها با استفاده از ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم مقیاس شده‌اند که نمودار طیف میانگین زلزله‌ها و مقایسه آن با طیف طرح استاندارد در شکل‌های (۴ تا ۶) به ترتیب برای سازه‌های ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه آورده شده است.

برای تعیین رفتار خطی و غیر خطی، دو مدل خطی کلوین و مدل غیر خطی ماکسول ارائه شده است که به ترتیب در آنها میراگر و فنر به صورت موازی و سری عمل می‌نمایند. در شکل (۷) مدل میراگر خطی و غیر خطی ارائه شده در نرم‌افزار ارائه شده است.



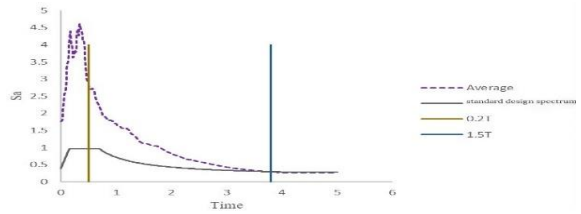
شکل ۳. توالی لرزه‌ای مربوط به زلزله ChiChi

Fig. 3. Seismic sequence of the ChiChi earthquake



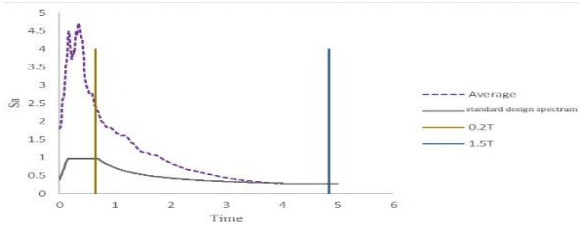
شکل ۴. طیف بازتاب میانگین زلزله‌ها و طیف طرح استاندارد سازه ۷ طبقه

Fig. 4. The average response spectrum of earthquakes and the standard design spectrum of the 7-story structure



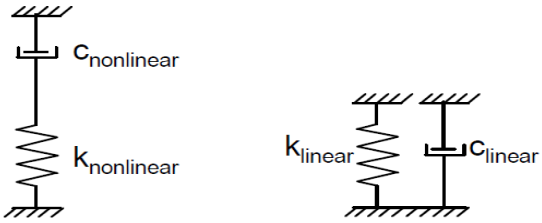
شکل ۵. طیف بازتاب میانگین زلزله‌ها و طیف طرح استاندارد سازه ۱۲ طبقه

Fig. 5. The average response spectrum of earthquakes and the standard design spectrum of the 12-story structure



شکل ۶. طیف بازتاب میانگین زلزله‌ها و طیف طرح استاندارد سازه ۲۰ طبقه

Fig. 6. The average response spectrum of earthquakes and the standard design spectrum of the 20-story structure

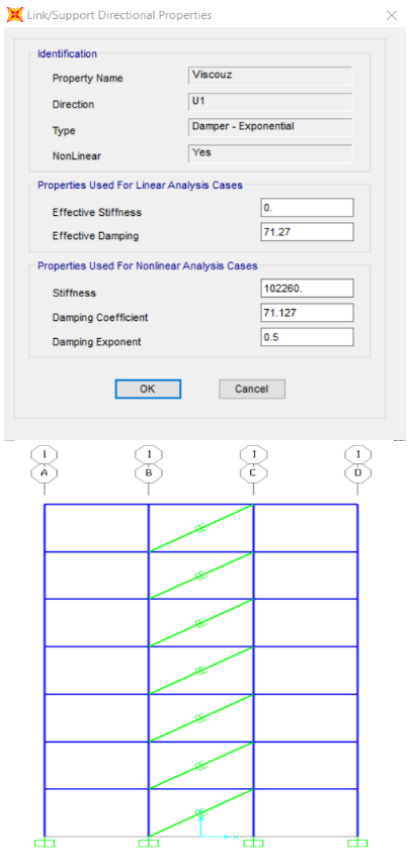


شکل ۷. مدل میراگر ویسکوز خطی و غیر خطی

Fig. 7. Linear and nonlinear damping models

۲-۴- مشخصات میراگر ویسکوز

در این تحقیق از مدل غیرخطی ماکسول (سری) برای مدلسازی میراگر ویسکوز در نرم‌افزار SAP2000 استفاده شده است. ضریب α که نشانگر ضریب توان سرعت بوده برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است [10]. برای مدلسازی میراگر ویسکوز در این تحقیق از مدل میراگر قطری در دهانه میانی استفاده شده است که در نرم‌افزار به صورت لینک و حالت مهاربند قطری مطابق شکل (۸) به عنوان نمونه برای سازه ۷ طبقه آورده شده است. مشخصات خطی و غیر خطی میراگر مورد استفاده نیز نشان داده شده است.

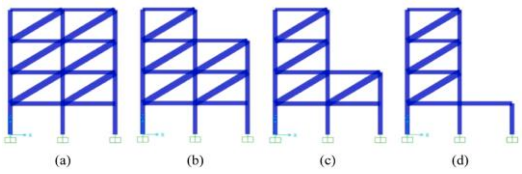


شکل ۸. مشخصات و موقعیت میراگرهای ویسکوز

Fig. 8. Specifications and location of viscous dampers

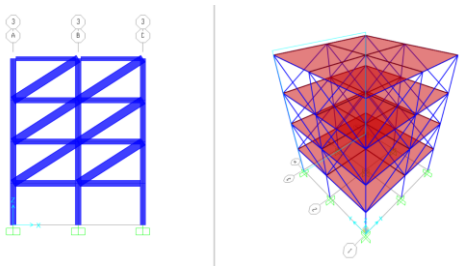
۲-۵- درستی‌آزمایی

دراین تحقیق به منظور درستی‌آزمایی از مرجع [11] استفاده شده و رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتنی تحت توالی لرزه‌ای در نرم‌افزار SAP2000 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور قاب خمشی متوسط RC چهار طبقه متوسط شامل دو دهانه ۵ متری و ارتفاع طبقات ۳/۲ متری واقع در شهر وارانگال، ایالت تلانگانا، هند درنظر گرفته شده است. این سازه در ساختگاه IS 1983:1:2016 (معیارهای طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله) در منطقه لرزه‌ای III با مشخصات خاک قرار دارد. مدل سازه برای نیروهای ثقلی و نیروی زلزله مربوط به منطقه لرزه‌ای منطقه III (با ضریب منطقه ۰/۱۶) با مشخصات خاک متوسط مورد تحلیل قرار گرفته است و پیکربندی‌های مختلف سازه در شکل (۹) نشان داده شده است. برای مدلسازی و ارزیابی نتایج از شکل (a) در شکل (۹) استفاده شده است و مدلسازی آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. به تیرها و ستون‌ها مفاصل پلاستیک در دو انتهای آنها توسط مشخصات FEMA356 اعمال شده است [12]. برای مدل رفتاری بتن از رفتار Mander و برای آرماتورها از رفتار Park استفاده شده است. بار مرده کفسازی برابر ۳/۷۵ کیلونیوتن بر متر مربع و بار زنده برابر ۳ کیلونیوتن بر متر مربع اعمال شده است. از رکورد زلزله Chalfant Valley برای ارزیابی نتایج استفاده شده است که زلزله متوالی ساخته شده برای این رکورد در شکل (۱۱) نشان داده شده است و فاصله زمانی بین رکورد زلزله برابر ۱۰۰ ثانیه می‌باشد.



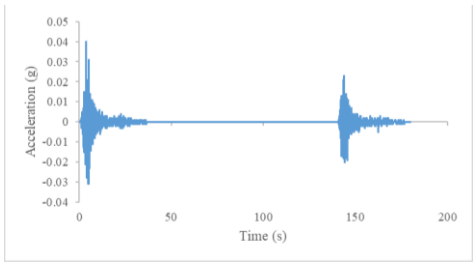
شکل ۹. پیکربندی‌های مختلف سازه [۱۱]

Fig. 9. Different structural configuration [11]



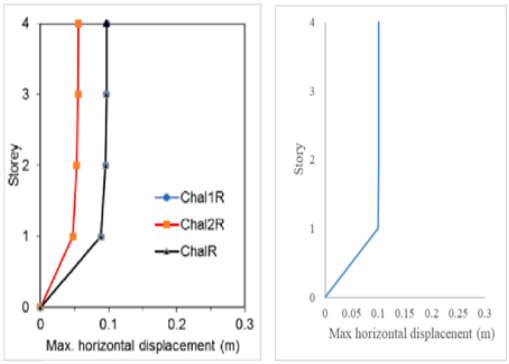
شکل ۱۰. مدل ساخته شده در نرم‌افزار

Fig. 10. Model made in software



شکل ۱۱. زلزله متوالی مربوط به زلزله Chalfant Valley

Fig. 11. sequence earthquakes related to the Chalfant Valley earthquake



شکل ۱۲. بیشترین تغییر مکان جانبی

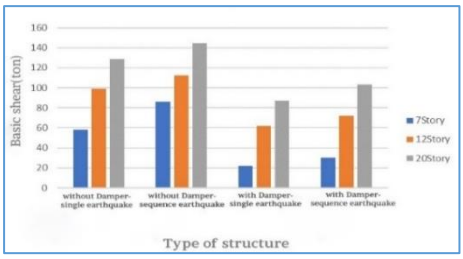
Fig. 12. Maximum lateral displacement

نتایج حاصل شده در این تحقیق و مرجع [11] در شکل (۱۲) نشان داده شده است نمودار آبی مربوط به تحقیق حاضر و نمودار مشکی مربوط به مقاله مرجع مربوط به زلزله متوالی بوده است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد بیشترین تغییر مکان طبقه تحت زلزله Chalfant Valley بسیار نزدیک هم بوده و نمودار قرمز رنگ نیز مربوط به زلزله منفرد در مقاله مرجع می‌باشد که مورد بررسی این تحقیق نبوده است و فقط توالی لرزه‌ای مورد بررسی و درستی‌آزمایی قرار گرفته است.

۳- بررسی نتایج

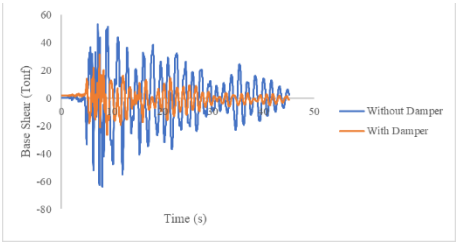
۳-۱- برش پایه

نمودار میانگین برش پایه سازه‌ها تحت ۷ رکورد حوزه نزدیک گسل در شکل (۱۳) نشان داده شده است. این نمودارها میانگین برش سازه‌ها را در حالت با و بدون میراگر ویسکوز و تحت زلزله‌های منفرد و متوالی مقایسه می‌کند. مطابق نتایج مشاهده می‌شود که برش پایه در حالت با میراگر هم در زلزله‌های منفرد هم در زلزله‌های متوالی کاهش یافته است که در زلزله‌های منفرد این کاهش برابر ۶۲/۳۸٪ بوده و بیشترین کاهش در سازه ۷ طبقه بوده



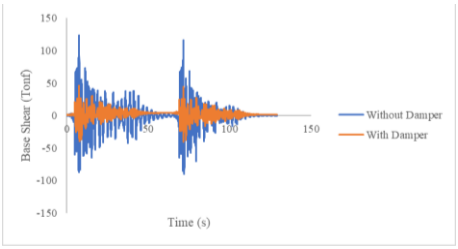
شکل ۱۳. نمودار مقایسه برش پایه

Fig. 13. Basic shear comparison chart



شکل ۱۴. نمودار تاریخچه زمانی برش پایه تحت زلزله منفرد Parkfield

Fig. 14. Time history diagram of base shear under the Parkfield single earthquake



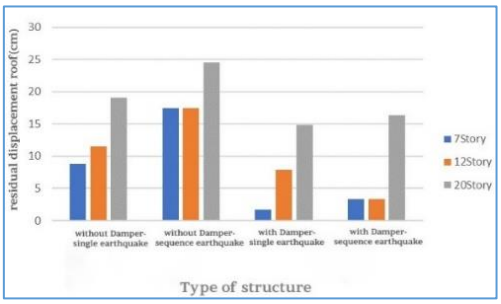
شکل ۱۵. نمودار تاریخچه زمانی برش پایه تحت زلزله متوالی Parkfield

Fig. 15. Time history diagram of base shear under the Parkfield sequence earthquake

است و در زلزله‌های متوالی نیز این کاهش برابر ۶۴/۷۷٪ می‌باشد که بیشترین کاهش در سازه ۷ طبقه بوده است. میزان کاهش برش پایه در سازه ۱۲ طبقه در حالت با میراگر به نسبت سازه بدون میراگر تحت زلزله‌های منفرد ۳۷/۴۷٪ و تحت زلزله‌های متوالی ۳۵/۹۲٪ بوده و در سازه ۲۰ طبقه ۳۲/۲۶٪ برای زلزله‌های منفرد و ۲۸/۸۶٪ تحت زلزله‌های متوالی می‌باشد. در اشکال (۱۴ و ۱۵) نیز نمودار تاریخچه برش پایه سازه ۷ طبقه تحت زلزله Parkfield نشان داده شده است که در این اشکال تاثیر استفاده از میراگر مشاهده می‌شود.

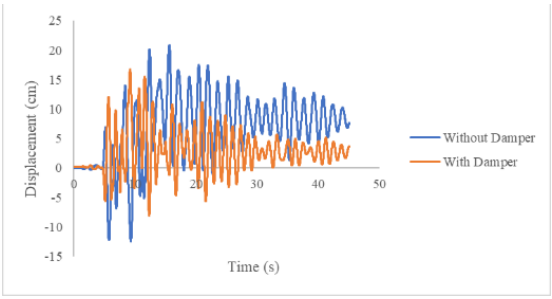
۳-۲- تاریخچه جابه‌جایی ماندگار

نمودار مقایسه تاریخچه جابجایی ماندگار بام سازه‌ها در شکل (۱۶) نشان داده شده است. مطابق نتایج مشاهده می‌شود با افزایش تعداد طبقات تاریخچه جابه‌جایی ماندگار افزایش یافته است و در زلزله‌های متوالی نیز تاریخچه جابه‌جایی ماندگار در کمترین حالت ۱۹/۵ درصد و در بیشترین حالت ۵۱ درصد افزایش داشته است. مطابق نتایج مشاهده می‌شود که در سازه ۷ طبقه میزان کاهش جابه‌جایی ماندگار بام تحت زلزله‌های منفرد برابر ۸۰/۲۷٪ و تحت زلزله‌های متوالی برابر ۸۰/۹٪ می‌باشد. این میزان کاهش در سازه ۱۲ طبقه تحت زلزله‌های منفرد برابر ۳۱/۰۹٪ و تحت زلزله‌های متوالی برابر ۸۰/۹٪ و در سازه ۲۰ طبقه نیز تحت زلزله‌های منفرد برابر ۲۱/۹۱٪ و تحت زلزله‌های متوالی برابر ۳۳/۱۱٪ می‌باشد. در اشکال (۱۷ و ۱۸) نیز نمودار تاریخچه جابه‌جایی ماندگار بام سازه ۷ طبقه تحت زلزله Parkfield نشان داده شده است که در این اشکال تاثیر استفاده از میراگر مشاهده می‌شود.



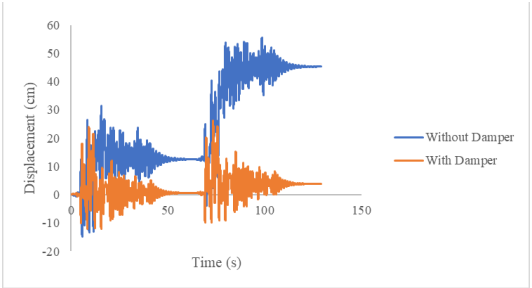
شکل ۱۶. مقادیر میانگین تاریخچه جابه‌جایی ماندگار بام

Fig. 16. Average values of the history residual displacement roof



شکل ۱۷. نمودار تاریخچه زمانی جابه‌جایی ماندگار بام تحت زلزله منفرد Parkfield

Fig. 17. Time history diagram of permanent roof displacement under the Parkfield single earthquake

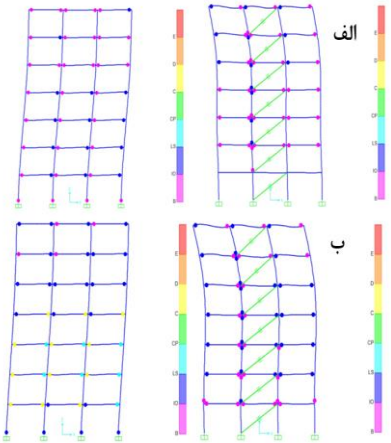


شکل ۱۸. نمودار تاریخچه زمانی جابجایی ماندگار بام تحت زلزله متوالی Parkfield

Fig. 18. Time history diagram of permanent roof displacement under the Parkfield sequence earthquake

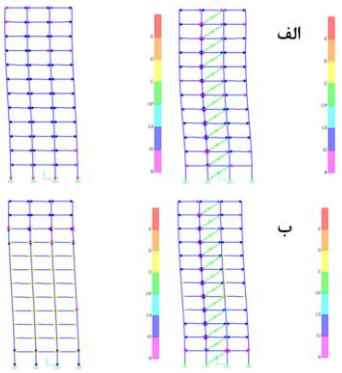
۳-۳- روند تشکیل مفاصل پلاستیک

مطابق نتایج حاصل شده از روند تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای سازه‌های مورد مطالعه مشاهده شد که تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در زلزله‌های متوالی به نسب زلزله‌های منفرد بیشتر بوده و همچنین در سازه‌های با میراگر ویسکوز نیز به نسبت سازه‌های بدون میراگر تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده بیشتر می‌باشد، بدین منظور مفاصل پلاستیک تشکیل شده در آخرین گام تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی تحت زلزله Parkfield برای سازه ۷ طبقه در شرایط فوق‌الذکر در شکل (۱۹)، برای سازه ۱۲ طبقه در شکل (۲۰) و برای سازه ۲۰ طبقه در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



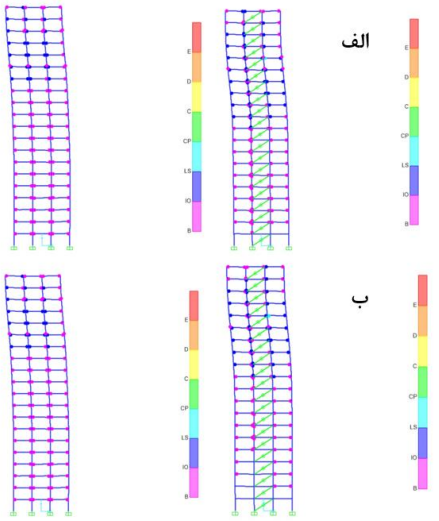
شکل ۱۹. روند تشکیل مفاصل پلاستیک سازه ۷ طبقه؛ الف) زلزله منفرد، ب) زلزله متوالی

Fig. 19. Process of forming plastic joints of a 7-story structure; a) single earthquake, b) Consequence earthquak



شکل ۲۰. روند تشکیل مفاصل پلاستیک سازه ۱۲ طبقه؛ الف) زلزله منفرد، ب) زلزله متوالی

Fig. 20. Process of forming plastic joints of a 12-story structure; a) single earthquake, b) Consequence earthquake



شکل ۲۱. روند تشکیل مفاصل پلاستیک سازه ۲۰ طبقه؛ الف) زلزله منفرد، ب) زلزله متوالی

Fig. 21. Process of forming plastic joints of a 20-story structure; a) single earthquake, b) Consequence earthquake

۴- بحث و بررسی

با توجه به تحقیق انجام گرفته می‌توان اظهار داشت در نظر گرفتن اثر پس‌لرزه‌ها در تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها بسیار مهم بوده و در مطالعه قاب‌های انتخابی این تحقیق مشاهده شد که نتایجی مانند برش پایه، جابه‌جایی و تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه در اثر زلزله‌های متوالی با افزایش روبرو بوده از این لحاظ الزام به اعمال زلزله‌های متوالی در طراحی و ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها امری مهم و غیر قابل اجتناب به نظر می‌رسد. برش پایه قاب ۷ طبقه در حالت استفاده از میراگر از برش پایه در حالت بدون میراگر کمتر می‌باشد این میزان کاهش به‌طور میانگین در حدود ۲۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد. علاوه بر این درصد تغییرات برش پایه تحت سناریوهای متوالی نسبت به سناریوهای منفرد در هر دو حالت با و بدون میراگر در حدود ۷ درصد افزایش داشته که نشان‌دهنده اثر فزاینده پدیده توالی لرزه‌ای بر برش پایه قاب ۷ طبقه می‌باشد. بیشترین جابه‌جایی ماندگار بام در حالت استفاده از میراگر از حالت بدون میراگر کمتر می‌باشد که این امر بیانگر تأثیر مثبت استفاده از میراگرهای ویسکوز در کاهش جابه‌جایی سازه می‌باشد. علاوه بر این درصد تغییرات جابه‌جایی ماندگار بام تحت سناریوهای متوالی نسبت به سناریوهای منفرد افزایش داشته که نشان می‌دهد وقوع توالی لرزه‌ای جابه‌جایی ماندگار بام را افزایش داده است.

از طرفی نیاز به مقاوم سازی سازه و افزایش ظرفیت لرزه‌ای سازه‌ها در اثر این پدیده نیز امری مهم می‌باشد. از این رو در این تحقیق با استفاده میراگر ویسکوز رفتار لرزه‌ای قاب‌های مورد مطالعه در سه رده سازه ۷، ۱۲ و ۲۰ طبقه ارزیابی گردید که مطابق نتایج حاصل شده مشاهده شد استفاده از میرگر ویسکوز در کاهش برش پایه، جابه‌جایی سازه و کاهش تعداد مفاصل پلاستیک سازه‌ها بسیار موثر بوده و اثری مثبت در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها داشته است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته نتایج زیر را می‌توان بیان نمود:

۱- نتایج برش پایه نشان می‌دهد که سازه ۷ طبقه بیشترین میزان کاهش را داشته که در زلزله‌های منفرد این درصد کاهش برابر ۶۲/۳۸٪ و در زلزله‌های متوالی برابر ۶۴/۷۷٪ بوده است که در سازه ۱۲ طبقه این کاهش برای زلزله‌های منفرد و متوالی برابر ۳۷/۴۷٪ و ۳۵/۹۲٪ و در سازه ۲۰ طبقه برابر ۳۲/۲۶٪ و ۲۸/۸۶٪ بوده است.

۲- نتایج جابه‌جایی ماندگار نشان می‌دهد که سازه ۷ و ۱۲ طبقه بیشترین میزان کاهش را داشته که در زلزله‌های منفرد این درصد کاهش برابر ۸۰/۲۷٪ و در زلزله‌های متوالی برابر ۸۰٪/۹ بوده است که در سازه ۱۲ طبقه این کاهش برای زلزله‌های منفرد و متوالی برابر ۳۱/۰۹٪ و ۸۰/۹٪ و در سازه ۲۰ طبقه برابر ۲۱/۹۱٪ و ۳۳/۱۱٪ بوده است. در این مورد در زلزله‌های متوالی مقدار کاهش جابه‌جایی بیشترین بام در سازه ۷ و ۱۲ طبقه یکسان بوده که دلیل این امر رفتار غیر خطی دقیقاً یکسان این دو سازه در برابر زلزله‌ها بوده و نتایج به صورت میانگین با هم برابر شده‌اند.

۳- در حالت عدم استفاده از میراگر ویسکوز تغییر مکان‌ها در اغلب طبقات از مقدار مجاز فراتر رفته که استفاده از این میراگر باعث بهبود این وضعیت شده است که نشان‌دهنده عملکرد مثبت این نوع میراگرها در کاهش تغییر مکان‌های سازه و نزدیک شدن مقدار آن‌ها به مقدار مجاز آیین‌نامه شده است.

۴- مطابق نتایج حاصل شده برای مفاصل پلاستیک تشکیل شده در سازه‌ها مشاهده شد تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده تحت زلزله‌های متوالی بیشتر از زلزله‌های منفرد بوده و همچنین در سازه‌های با میراگر ویسکوز نیز تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده به نسبت سازه‌های بدون میراگر کمتر بوده است و سطح عملکرد مناسب‌تری نیز در این حالت مشاهده شده است.

۵- با توجه به اینکه سازه ۷ طبقه کمترین تعداد طبقات را در بین سازه‌های مورد مطالعه داشته است از این رو تنش‌های ناشی از زلزله در اعضا و در نهایت تقاضای لرزه‌ای سازه در این سازه کمتر از بقیه سازه‌ها بوده و میراگر عملکرد مناسب‌تری به نسبت سازه‌های ۱۲ و ۲۰ طبقه داشته است که نتایج برش پایه، جابه‌جایی و روند تشکیل مفاصل پلاستیک درستی این موضوع را به اثبات می‌رساند.

۶- پدیده توالی لرزه‌ای، تغییر مکان نسبی بین طبقات را افزایش داده است که این افزایش در حالت استفاده از میراگر کمتر از حالت عدم استفاده از میراگر می‌باشد.

۷- استفاده از میراگر، تغییر مکان نسبی بین طبقات را کاهش داده است که این کاهش تحت شرایط سناریوهای لرزه‌ای منفرد بیشتر از حالت متوالی می‌باشد.

۸- به عنوان نتیجه کلی و نهایی این تحقیق می‌توان گفت که پاسخ سازه در حالت پدیده توالی لرزه‌ای نسبت به لرزه منفرد بحرانی‌تر بوده و به همین دلیل باید آثار زمین‌لرزه‌های متوالی در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای دیده شود.

قدردانی نویسندگان

حمایتی توسط مراکز و دانشگاه‌ها انجام نشده است.

تعارض منافع

موردی گزارش نشده است.

سهم نویسندگان

به ترتیب نویسندگان: ۵۰، ۴۰ و ۱۰ درصد.

منابع مالی

از منابع مالی استفاده نشده است.

References

[1] Banijamali, H., Rajabi, E. and Amiri, G.G., 2023. Damage evaluation of steel moment and buckling restrained braces frames under critical successive earthquakes. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(4), pp.849–872. (In Persian).

[2] Rajabi, E., 2017. *Providing a method to consider the effects of seismic sequencing in building design*. PhD Thesis. Tehran: Iran University of Science and Technology. (In Persian).

[3] Ruiz-García, J., Marín, M.V. and Terán-Gilmore, A., 2014. Effect of seismic sequences in reinforced concrete frame buildings located in soft-soil sites. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 63, pp.56–58.

[4] Whyte, C.A. and Stojadinovic, B., 2014. Effect of ground motion sequence on response of squat reinforced concrete shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 140(8), p.A4014004.

[5] Ghafarzadeh, H., 2015. *Evaluation of deformation values in modern concrete structures under the main earthquake and successive aftershocks*. MSc Thesis. Tabriz: University of Tabriz. (In Persian).

[6] Rinaldin, G., Amadio, C. and Fragiacomo, M., 2017. Effects of seismic sequences on structures with hysteretic or damped dissipative behaviour. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 97, pp.205–215.

[7] Ni, S., Sun, H., Somerville, P., Yuen, D.A., Milliner, C., Wang, H. et al., 2023. Complexities of the Turkey-Syria doublet earthquake sequence. *The Innovation*, 4(3), p.100411.

[8] Hainzl, S., Kumazawa, T. and Ogata, Y., 2024. Aftershock forecasts based on incomplete earthquake catalogues: ETASI model application to the 2023 SE Türkiye earthquake sequence. *Geophysical Journal International*, 236(3), pp.1609–1620.

[9] Abrahamson, N.A. and Somerville, P.G., 1996. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(1B), pp.S93–S99.

[10] Sepehri, A., 2016. *Analysis and design of dampers and seismic isolators based on ASCE 7-10 in Perform 3D, SAP2000 and OpenSees*. Tehran: Azadeh Publications. (In Persian).

[11] Oggu, P. and Gopikrishna, K., 2020. Assessment of three-dimensional RC moment-resisting frames under repeated earthquakes. *Structures*, 26, pp.6–23.

[12] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000. *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)*. Washington, DC: ASCE.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Barjasteh, A., Emami, F. and Aziminejad, A., 2026. The Effect of Near Field Sequence Earthquake on Concrete Special Moment Frames Equipped with Viscous Dampers, *Modares Civil Engineering journal*, 26(1). doi: 10.48311/mcej.2025.99115.0