

Comparison of seismic performance of short and high-rise buildings of irregular reinforced concrete equipped with seismic isolators under near-field earthquakes

Seyed Fathollah Sajedi^{1*}, Jamil Haghghat²

1-Professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2-MSc in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Higher Education Institute of Jihad University, Khuzestan Province, Ahvaz, Iran

Received: 29 October 2023 Revised: 21 December 2023 Accepted: 22 June 2024

Research paper

Abstract

3D RC's of 5 and 12 stories, with a special bending frame lateral load-bearing system and shear wall in regular states, and separate and simultaneous irregularities in plan and height, were investigated. After designing the models with ETABS 2015, a pendulum friction isolator was designed at their base level, and the seismic behavior in clamped and isolated states at the base was investigated under 7 near-field accelerometer records with nonlinear THDA. The research novelty is the simultaneous investigation of the effects of irregularity, seismic isolator, and horizontal and vertical components of the nearby fault on the performance of buildings with OpenSEES 2.5.0. The models had lateral displacement like a rigid body. The maximum floor drift ratio in long models was reduced more than in short models. In the isolated long models, along X and Y axes, were (79.1-88.3)% and (7.66-83.8)%, and in short models, (75-89)% and (50-82.5)%, respectively. The reduction of the base shear with respect to the clamped state was (63-88)% in short isolated and (47-77)% in long models. The biggest difference in energy absorption (EA) of the isolated short models than the fixed state, related to the model with simultaneous irregularity in plan and height, along the X axis, was 135 kJ, while it was 200 kJ in the long irregular model with 18.36% reduction in plan level along x-axis. The EA of other isolated long models was lower than the clamped mode; therefore, the use of pendulum friction isolator in long models in the area near the fault is not recommended.

Keywords: Seismic performance, Isolator, Near field, Drift, Energy absorption

*Corresponding Author Seyed Fathollah Sajedi

Sajedi, S. F., Haghghat, J. Comparison of seismic performance of short and high-rise buildings of irregular reinforced concrete equipped with seismic isolators under near-field earthquakes. *Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024; 9(1): 1-18. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2024.422963.1349>

2538-5828/ © 2024 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

مقایسه عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های کوتاه و بلندمرتبه بتن مسلح نامنظم مجهز به جداساز لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه نزدیک

سیدفتح اله ساجدی^۱، جمیل حقیقت

استاد گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، گروه عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی استان خوزستان، اهواز، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: sajedi@iauhvaz.ac.ir sajedi.ac@gmail.com

تاریخ دریافت: ۰۸/۱۴۰۲/۰۷، تاریخ بازنگری: ۳۰/۰۹/۱۴۰۲، تاریخ پذیرش: ۰۲/۰۴/۱۴۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ساختمان‌های سه‌بعدی بتن مسلح ۵ و ۱۲ طبقه کوتاه و بلندمرتبه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه و دیوار برشی در حالات منظم و نامنظمی‌های مجزا و همزمان در پلان و ارتفاع، با کاربری مسکونی در تهران بر خاک نوع II بررسی شدند. پس از طراحی مدل‌ها با نرم‌افزار ETABS 2015، در تراز پایه آن‌ها جداساز اصطکاکی آونگی طراحی شد و رفتار لرزه‌ای مدل‌ها در حالات گیردار و جداسازی‌شده در پایه، تحت ۷ رکورد شتابنگاشت حوزه نزدیک با تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی بررسی شدند. نوآوری پژوهش، بررسی همزمان اثرات نامنظمی، جداساز لرزه‌ای و مؤلفه‌های افقی و قائم گسل نزدیک بر عملکرد ساختمان‌ها با نرم‌افزار OpenSEES 2.5.0 می‌باشد. با وجود جداساز، مدل‌های مذکور مانند جسم صلب جابجایی جانبی داشتند. بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات در مدل‌های بلند نسبت به مدل‌های کوتاه، کاهش بیشتری داشتند. در مدل‌های بلند گیردار جداسازی‌شده، در امتداد محورهای X و Y به ترتیب % (۷۹/۱-۸۸/۳) و % (۶۶/۷-۸۳/۸) و در مدل‌های کوتاه % (۷۵-۸۹) و % (۵۰-۸۲/۵) بود. کاهش برش پایه نسبت به حالت گیردار، در مدل‌های کوتاه جداسازی‌شده % (۶۳-۸۸) و در مدل‌های بلند % (۴۷-۷۷) بود. بیشترین اختلاف جذب انرژی مدل‌های کوتاه جداسازی‌شده نسبت به حالت گیردار، مربوط به مدل با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع، در امتداد محور X به میزان ۱۳۵ kJ بود؛ این مقدار در مدل بلند نامنظم با % ۱۸/۳۶ کاهش در سطح پلان در امتداد محور X، ۲۰۰ kJ بود. جذب انرژی دیگر مدل‌های بلند جداسازی‌شده نسبت به حالت گیردار کمتر بود؛ بنابراین، کاربرد جداساز اصطکاکی آونگی در مدل‌های بلند در حوزه نزدیک گسل توصیه نمی‌شود.

کلمات کلیدی: عملکرد لرزه‌ای، جداساز، حوزه نزدیک، جابجایی جانبی، جذب انرژی

مطالعات بر روی زلزله‌های گذشته نشان دادند که خصوصیات زلزله به لحاظ دامنه و محتوای فرکانسی در ساختگاه‌های دور و نزدیک از گسل با هم متفاوت است. امروزه یکی از راه‌های کاهش نیروی زلزله در ساختمان استفاده از جداساز لرزه‌ای می‌باشد. جداسازی ساختمان باعث کاهش نیروهای وارده بر سازه می‌شود. رکوردهای ثبت شده از زلزله‌های اخیر نشان می‌دهند که حرکات نزدیک گسل، ویژگی‌های متفاوتی نسبت به زلزله‌های حوزه دور دارند. در مجموع، بیشتر این ویژگی‌ها در اثر پدیده مهم راست‌پذیری پیش‌رونده^۱ در زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد [۱]. زلزله‌هایی که اخیراً در حوزه نزدیک رخ داده صدمات جبران‌ناپذیری را به سازه‌ها وارد کرده است. از ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک حرکت پالس‌گونه^۲ و داشتن شتابی با محتوای فرکانسی و سرعتی حاوی پالس‌های بلند و جابجایی ماندگار این نوع زلزله‌ها است [۲]. اثرات زلزله‌ها در طبیعت در امتدادهای افقی و عمودی به سازه‌ها وارد می‌شوند که خوشبختانه احتمال وقوع زلزله در امتداد افقی بیش از امتداد عمودی آن‌ها است [۳]. اولین تحقیقات در زمینه جداسازی لرزه‌ای را می‌توان به جان میلن^۳ انگلیسی نسبت داد. [۴]. جداسازی لرزه‌ای در واقع باعث طولانی‌تر شدن دوره تناوب طبیعی سازه می‌شود. این امر با توجه به طیف پاسخ شتاب زلزله، در اغلب مواقع منجر به کاهش احتمال وقوع نیروها و شتاب‌های زیاد در سازه می‌گردد [۵].

سودار و نووال^۴ به بررسی لرزه‌ای سازه جداسازی شده پایه درحالات متقارن و نامتقارن پرداختند. نتایج نشان داد که با جداسازی سازه نامتقارن نسبت به سازه متقارن، پارامترهای نسبت جابجایی نسبی^۵ و شتاب طبقات با کاهش بیشتری روبرو شدند [۶]. مازا و همکاران^۶ رفتار لرزه‌ای یک قاب ساختمانی ۶ طبقه بتن مسلح با میانقاب‌های پرکننده را مطابق آیین‌نامه ایتالیا در ناحیه خطر متوسط بررسی کردند. سپس توسط جداساز پایه الاستومری و تکیه‌گاه‌های لغزشی^۷، در ناحیه خطر زیاد آن را مقاوم‌سازی نمودند. سه مدل ساختمانی با میانقاب‌های بنایی غیرسازه‌ای، میانقاب سرتاسری با توزیع منظم میانقاب‌ها و توزیع نامنظم میانقاب‌های بنایی، در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که توزیع منظم میانقاب‌های بنایی، باعث عملکرد مناسب سیستم‌های جداساز پایه و میانقاب‌های بنایی با توزیع نامنظم، باعث شکل‌گیری طبقات نرم و خسارت سنگین در سازه‌های جداسازی شده پایه در زلزله‌های نزدیک گسل شد [۷]. پروان و همکاران^۸ به بررسی ۳ نوع سازه جداسازی شده ۶ طبقه نامتقارن L شکل پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم جداساز مقادیر برش پایه و نسبت جابجایی نسبی طبقات را بیش از ۷۰٪ کاهش داده است [۸]. صفاری و همکاران به بررسی عملکرد سازه‌های مرکب بتنی- فولادی ۴، ۷ و ۱۰ طبقه با و بدون سیستم جداساز لرزه‌ای تحت زلزله‌های حوزه نزدیک پرداختند. بررسی نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع سازه‌ها تغییرات برش پایه کمتر می‌شود [۹]. نوروزی‌نژاد فرسنگی (۲۰۱۴۰) چندین مدل تحلیلی از سازه‌های غیرشکل‌پذیر جداسازی شده در پایه را در نواحی دور و نزدیک گسل بررسی کرد. سیستم‌های جداساز لرزه‌ای تحت مطالعه شامل دو مدل جداساز لاستیکی هسته سربی و پاندول اصطکاکی بوده است. نتایج بیانگر عملکرد مناسب این سیستم‌ها تحت تاثیر زلزله‌های دور از گسل بود، هرچند در نواحی نزدیک گسل عملکرد آن‌ها به‌طور قابل توجهی کاهش پیدا کرده است [۱۰]. باندیوپادیای

¹ Forward Directivity

² Pulse-Type

³ John Milne

⁴ Suthar and Noval

⁵ Drift Ratio

⁶ Mazza et al.

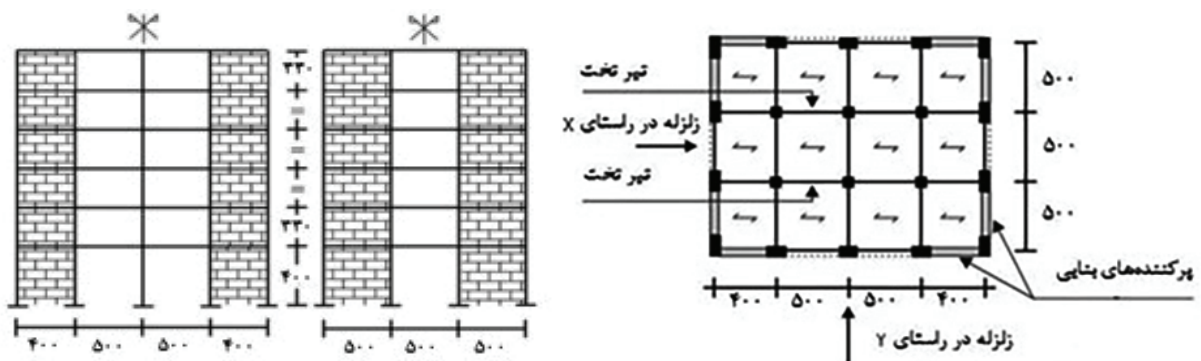
⁷ Sliding Bearing

⁸ Irwan et al.

و همکاران^۹ پاسخ لرزه‌ای دو سازه بتنی سه طبقه مجاور هم در کشور هند را بررسی کردند. یکی از سازه‌ها دارای جداساز لرزه‌ای و دیگری بر روی خاک بود. نتایج نشان داد که پاسخ شتاب سازه با جداساز حدود چهار برابر بزرگتر از سازه بدون جداساز است [۱۱]. هدف اصلی در این پژوهش، بررسی تأثیر جداساز بر عملکرد ساختمان‌های بتن مسلح نامنظم کوتاه و بلندمرتبه، تحت مؤلفه‌های همزمان افقی و قائم زلزله گسل نزدیک با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر جابجایی طبقات، بیشینه جابجایی نسبی طبقات، نیروی برش پایه ساختمان و منحنی‌های هیستریزس می‌باشد. قابل ذکر است که تعاریف متعددی برای ساختمان بلند وجود دارد. برخی ساختمان‌هایی را که پیوند آن‌ها بیشتر از ۰/۷ ثانیه باشد، ساختمان بلند می‌گویند [۱۲]. تاکنون مطالعات زیادی بر روی ساختمان‌های با جداساز لرزه‌ای انجام شده است. نقطه تمایز این پژوهش، بررسی همزمان سه اثر نامنظمی، جداساز لرزه‌ای و مؤلفه‌های افقی و قائم گسل نزدیک بر عملکرد ساختمان‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار OpenSEES 2.5.0 می‌باشد.

۲- صحت‌سنجی نرم‌افزار

صحت‌سنجی نرم‌افزار با استفاده از مقاله مازا و همکاران (۲۰۱۸) [۷]، با موضوع سیستم‌های جداسازی شده پایه برای مقاوم‌سازی قاب‌های ساختمانی بتن مسلح با طبقه نرم در معرض زلزله‌های نزدیک گسل انجام شد. در این مقاله، ابتدا یک ساختمان ۶ طبقه بتن مسلح مسکونی به صورت پایه گیردار، مطابق آیین‌نامه لرزه‌ای ایتالیا برای ناحیه خطر متوسط، واقع بر خاک نوع C طراحی شد. رفتار لرزه‌ای این سازه، با توزیع یکنواخت پرکننده‌های غیرسازه‌ای در گوشه‌های آن به‌عنوان سازه مینا، مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شد. سپس سازه با پرکننده‌های بنایی در حالات متفاوت با توزیع در کل و یا بخشی از ارتفاع سازه، بررسی گردید. در مرحله بعد با قرار دادن سیستم جداساز الاستومریک و تکیه‌گاه‌های لغزشی در پایه ساختمان، با رعایت الزامات آیین‌نامه ایتالیا در ناحیه خطر زیاد، مقاوم‌سازی گردید. مدل صحت‌سنجی شده در این پژوهش، ساختمان ۶ طبقه با پایه گیردار و توزیع منظم پرکننده‌های بنایی غیرسازه‌ای در کل ارتفاع قاب‌ها، مطابق شکل ۲ می‌باشد. در اشکال ۱ و ۲ ابعاد بر حسب سانتی‌متر می‌باشند. سپس با انتخاب ۷ رکورد زلزله نزدیک گسل تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه انجام شد. در مقاله مذکور از نرم‌افزار SAP2000 و در این پژوهش از نرم‌افزار OpenSEES 2.5.0 برای تحلیل استفاده شد.



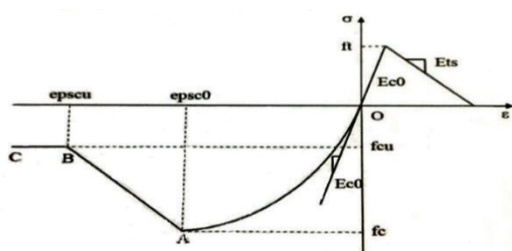
شکل ۱. ساختمان با پایه گیردار مینا [۷] شکل ۲. قاب‌های با پرکننده در کل ارتفاع [۷]

^۹ Bandyopadhyay et al.

مقاطع تیرها و ستون‌های سازه استفاده شده، مطابق جدول ۱ می‌باشند. مقاومت فشاری بتن مصرفی ۲۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم فولاد ۳۷۵ مگاپاسکال می‌باشند. منحنی رفتاری این مصالح مطابق مدل کنت-پارک^{۱۰} بوده و شکل رفتاری این مصالح مطابق نمودار ۱ است. بار مرده بام ۴/۲ و بار مرده سایر طبقات ۵، هم‌چنین بار زنده در همه طبقات ۲ وزن دیوارهای بنایی پرکننده ۲/۷ در نظر گرفته شده است. در نرم‌افزار OpenSEES، برای معرفی اعضا از مقاطع رشته‌ای^{۱۱} استفاده می‌شود. با استفاده از این دستور تقریباً هر شکل از مقطع را می‌توان ایجاد کرد. تمام المان‌ها بجز تیرهای مدفون در دیوار برشی، با المان DispBeamColumn به صورت غیرخطی بر اساس روابط جابجایی و تیرهای مدفون در دیوار برشی به صورت ارتجاعی و صلب با استفاده از المان ElasticBeamColumn تعریف شدند. مشخصات شتابنگاشت‌های استفاده شده در مقاله صحت‌سنجی و ضریب هم‌پایه‌سازی آن‌ها برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقاطع تیرها و ستون‌های در مقاله صحت‌سنجی [۷]

طبقه	ستون			تیر	
	گوشه	پیرامونی	داخلی	عمیق	تخت
۶	۳۰×۳۰	۳۰×۳۰	۳۰×۳۰	۳۰×۴۵	۴۰×۲۵
۵	۳۰×۳۵	۳۰×۴۰	۴۰×۴۰	۳۰×۴۵	۴۰×۲۵
۴	۳۰×۴۰	۳۰×۵۰	۵۰×۵۰	۳۰×۵۰	۵۰×۲۵
۳	۳۰×۴۰	۳۰×۵۰	۵۰×۵۰	۳۰×۵۵	۵۰×۲۵
۲	۳۰×۵۰	۳۰×۶۰	۶۰×۶۰	۴۰×۶۰	۶۰×۲۵
۱	۳۰×۵۰	۳۰×۶۰	۶۰×۶۰	۴۰×۷۰	۶۰×۲۵



نمودار ۱. شکل رفتاری مصالح مدل کنت-پارک [۱۳]

هدف از تحلیل مدل سازه، تعیین درصد بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات ۱۲ (بیشینه جابجایی نسبی طبقات به ارتفاع طبقات)، و مقایسه با خروجی مقاله صحت‌سنجی می‌باشد. تحلیل سازه با تعداد نقاط انتگرال‌گیری اعضای سازه (n)، در سه حالت ۳ و ۵ و ۷ بررسی گردید. نسبت جابجایی نسبی طبقات سازه با روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، تحت هر کدام از شتابنگاشت‌های مقیاس شده محاسبه شدند، سپس مقادیر متوسط بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات به دست آمد. با بررسی نتایج، مشخص شد که در n برابر ۵، نتایج تحلیل مطابق نمودار ۲ به نتایج مقاله صحت‌سنجی [۷] نزدیکتر بودند.

¹⁰ Kent-Park

¹¹ Fiber Section

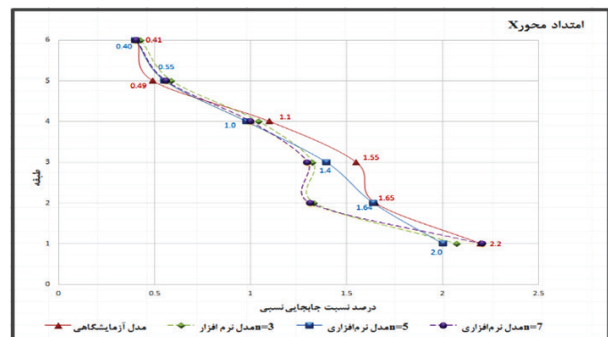
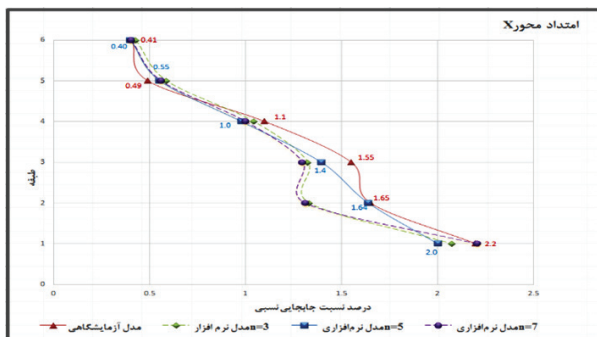
¹² Drift Ratio



جدول ۲. مشخصات شتابنگاشت‌های صحت‌سنجی [۷]

زلزله	تاریخ	ایستگاه	*Mw	*PGAH ^۱	*PGAH ^۲	*SF
چی چی	۹۹/۰۹/۲۰	TCU۰۶۸	۷/۳	g ۰/۵۱۲	g ۰/۳۷۱	۰/۶
نورتریج	۹۴/۰۱/۱۷	نیوهال	۶/۷	g ۰/۴۱۹	g ۰/۳۵۷	۰/۹
سپ‌هیل	۸۷/۱۱/۲۴	پارچوت	۶/۴	g ۰/۴۳۲	g ۰/۳۸۴	۰/۳۹
کاپمند	۹۲/۰۴/۲۵	پترولیا	۷/۱	g ۰/۵۸۵	g ۰/۶۶۲	۰/۷
کوبه	۹۵/۰۱/۱۶	تکاتوری	۶/۹	g ۰/۶۱۸	g ۰/۶۷۱	۰/۳۱
طیس	۷۸/۰۹/۱۶	طیس	۷/۷	g ۰/۸۵۴	g ۰/۸۶۲	۰/۵
ارزینقان	۹۲/۰۳/۱۳	ارزینقان	۶/۷	g ۰/۴۹۶	g ۰/۳۸۷	۰/۵

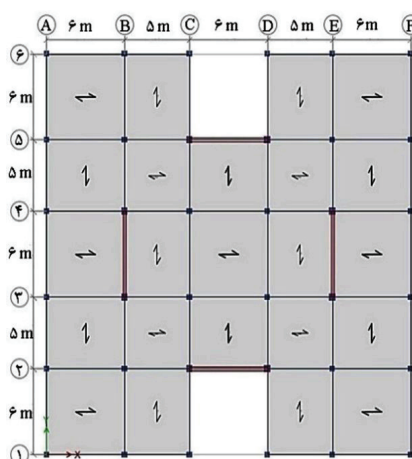
*: بیشینه شتاب افقی زمین در امتداد محور ۱ ** : بیشینه شتاب افقی زمین در امتداد محور ۲ *** : ضریب مقیاس شتابنگاشت‌ها



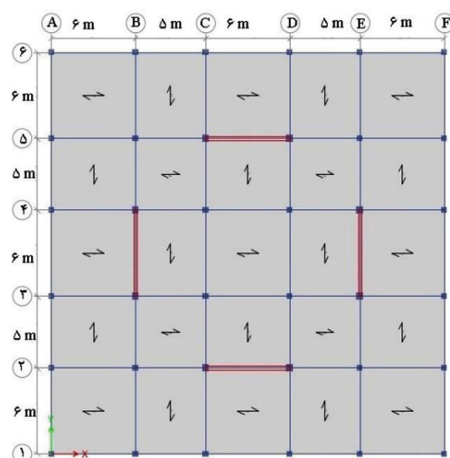
نمودار ۲. حداکثر درصد نسبت جابجایی نسبی طبقات مدل صحت‌سنجی در امتداد‌های X و Y

۳- مدل‌سازی

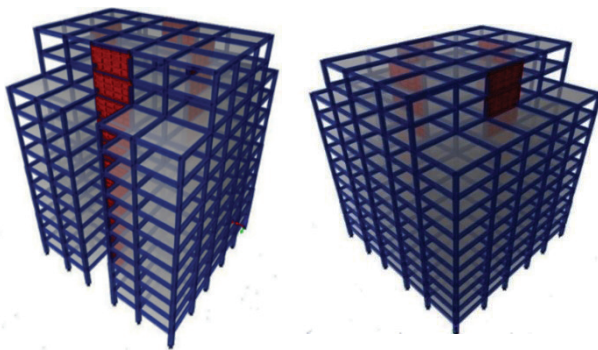
در این پژوهش سازه‌های بتنی سه‌بعدی ۵ و ۱۲ طبقه با سیستم باربر جانبی قاب خمشی ویژه با دیوار برشی، کاربری مسکونی و ارتفاع طبقات برابر با ۳/۱ متر، مطابق اشکال ۳ تا ۷ و اعمال نامنظمی در پلان و ارتفاع به‌صورت جداگانه و همزمان، بررسی شدند.



شکل ۳. پلان سازه منظم



شکل ۴. پلان نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪



	A	B	C	D	E	F
6	←	↓		↓	→	
5	↓	→	↓	→	↓	
4		↓	→	↓		
3	↓	→	↓	→	↓	
2	←	↓		↓	→	

شکل ۵. پلان نامنظم با کاهش سطح پلان به شکل ۶. ساختمان ۱۲ طبقه با نامنظمی شکل ۷. ساختمان ۱۲ طبقه نامنظم

میزان ۱۸/۳۶٪ در ارتفاع در پلان و ارتفاع

۱-۳. نامگذاری مدل‌ها

مدل‌های ساختمانی به فرم کلی زیر نامگذاری می‌شوند. B نماد ساختمان، x تعداد طبقات، PG نامنظمی پلان، y درصد کاهش سطح پلان به پلان منظم، VM نامنظمی جرمی، Z درصد کاهش جرم طبقه، Fix سازه با پایه گیردار، و I جداساز می‌باشد.
 $Bx PG^{13}y VM^{14}z-Fix-I^{15}$

۲-۳. بارگذاری مدل‌ها

بارگذاری ساختمان بر اساس مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان [۱۴] و ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۵] انجام شده است. مقادیر بارها به صورت بار مرده ۵ و بار زنده ۲ برای طبقات، بار مرده ۴/۲ و بار زنده ۱/۵ برای بام و بار برف بام ۱/۰۵ کیلونیوتن بر متر مربع فرض شده‌اند. بار تیغه‌بندی بر واحد سطح در طبقات معادل ۱ و بار دیوارهای پیرامونی ساختمان‌ها ۲/۷ کیلونیوتن بر متر مربع لحاظ شده است. جرم لرزه‌ای ساختمان به صورت مجموع ۱۰۰٪ بار مرده و ۲۰٪ بار زنده در نظر گرفته شد. حداکثر شتاب زمین برابر با ۰/۳۵ (شهر تهران) و خاک نوع II در نظر گرفته شده است. دوره تناوب ساختمان‌های ۱۲ و ۵ طبقه به ترتیب برابر با ۰/۷۵ ثانیه و ۰/۳۹ ثانیه می‌باشد و تنش تسلیم میلگردها برابر ۴۰۰ MPa و مقاومت مشخصه بتن ۳۵ MPa در نظر گرفته شده است. سازه‌ها بر اساس مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [۱۶] به کمک نرم‌افزار ETABS 2015 طراحی شدند. مقاطع ستون‌ها و تیرها، در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

¹³ Plan Geometric Irregularity (PG)

¹⁴ Vertical Mass Irregularity (VM)

¹⁵ Isolated

جدول ۵. ابعاد مقاطع تیر و ستون‌های ساختمان‌های ۱۲ طبقه (میلی‌متر)

ابعاد تیرهای ساختمان	ابعاد ستون‌های طبقات ۷ تا ۱۲	ابعاد ستون‌های طبقات ۴ تا ۶	ابعاد ستون‌های طبقات ۱ تا ۳	ابعاد ستون‌های دیوارهای برشی	مدل‌های ۱۲ طبقه
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۵۰×۴۵۰	۵۵۰×۵۵۰	۸۰۰×۸۰۰	B12-FIX
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۵۰×۴۵۰	۵۵۰×۵۵۰	۸۰۰×۸۰۰	B12 PG9.18-FIX
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۵۰×۴۵۰	۶۰۰×۶۰۰	۸۰۰×۸۰۰	B12 PG18.36-FIX
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۵۰×۴۵۰	۶۰۰×۶۰۰	۸۰۰×۸۰۰	B12 VM42.8-FIX
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۵۰×۴۵۰	۶۰۰×۶۰۰	۸۰۰×۸۰۰	B12 PG9.18 VM42.8-FIX

جدول ۶. ابعاد مقاطع تیر و ستون‌های ساختمان‌های ۵ طبقه

ابعاد تیرها	ابعاد ستون‌های طبقات ۴ و ۵	ابعاد ستون‌های طبقات ۱ تا ۳	ابعاد ستون‌های دیوارهای برشی	ابعاد ستون‌های ۵ طبقه	تیرهای امتداد محورهای B و E، بین محورهای ۱-۲ و ۵-۶
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۵۰۰×۵۰۰	B5-FIX	۴۰۰×۴۰۰
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۵۰۰×۵۰۰	B5 PG9.18-FIX	۵۰۰×۵۰۰
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۵۰۰×۵۰۰	B5 PG18.36-FIX	۴۰۰×۴۰۰
۴۰۰×۴۰۰	۳۵۰×۳۵۰	۴۰۰×۴۰۰	۵۰۰×۵۰۰	B5 VM42.8-FIX	۴۰۰×۴۰۰
۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۴۰۰×۴۰۰	۵۰۰×۵۰۰	B5 PG9.18 VM42.8-FIX	۴۰۰×۴۰۰

۳-۳. انتخاب شتابنگاشت‌ها

برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی، ۷ رکورد شتابنگاشت از سایت مرکز مطالعات مهندسی زلزله برای خاک نوع II و پهنه نزدیک گسل، مطابق جدول ۷ انتخاب شدند. با نرم‌افزار سیزموسیگنال شتابنگاشت‌های زلزله فراخوانی و براساس ضوابط ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقیاس شده‌اند [۱۵]. ضریب مقیاس ساختمان‌های ۱۲ طبقه ۰/۵۶۴ و ضریب مقیاس ساختمان‌های ۵ طبقه ۰/۴۳۴ به دست آمد.

جدول ۷. مشخصات شتابنگاشت‌های پژوهش

نام زلزله	زمان وقوع	ایستگاه	بزرگی	فاصله تا گسل
بم	۲۰۰۳	بم	۶/۶	۰/۱۰۵
کوبه	۱۹۹۵	نیشی‌آکاشی	۶/۹	۷/۰۸
چی‌چی	۱۹۹۹	TCU078	۶/۳	۵/۷۲
نورتریج	۱۹۹۴	سیم‌والی	۶/۶۹	۰
پارکفیلد	۲۰۰۴	پارکفیلد - گولدن‌هیل	۶	۴/۶۶
لاکوئیل	۲۰۰۹	لاکوئیل	۶/۳	۰
لوما پریتا	۱۹۸۹	بران	۶/۹۳	۳/۸۵

۳-۴. جداساز آونگی اصطکاکی

برای جداسازی ساختمان‌ها، زیر هر ستون یک جداساز اصطکاکی آونگی به کار گرفته شده است. مطابق شکل شماره ۸ نیروی بازگرداننده در این نوع از جداسازها توسط جاذبه زمین و وزن سازه تأمین می‌شود. بخش داخلی این جداساز از یک سطح مقعر فولادی تشکیل شده است که یک قطعه فولادی با مقاومت زیاد و اصطکاک کم بر روی آن حرکت می‌کند [۵]. اگر بار وارد بر یک جداساز سیستم آونگی اصطکاکی W ، تغییر مکان افقی آن D ، ضریب اصطکاک μ و شعاع صفحه R باشد، آنگاه نیروی مقاوم F برابر است با:

$$F = \frac{W}{R}D + \mu W(\operatorname{sgn}D) \quad (1)$$

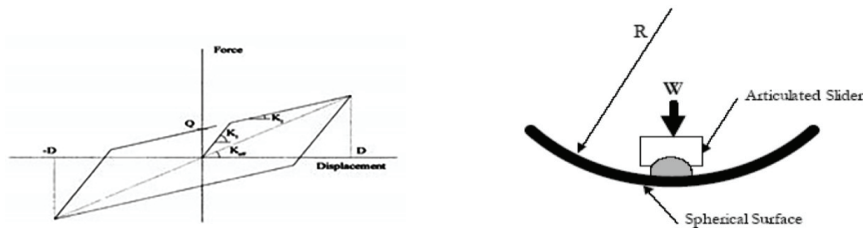
عبارت اول در این رابطه نیروی بازگرداندن ناشی از بلند شدن جرم بوده که سبب ایجاد سختی افقی برابر $K_H = \frac{W}{R}$ تناوب سازه جداسازی شده با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود که مستقل از جرم روی جداساز می‌باشد:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (2)$$

عبارت دوم نیروی اصطکاک بین قسمت لغزنده و سطح برآمده است. ضریب اصطکاک به مقدار فشار و سرعت لغزش بستگی دارد. سختی معادل از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$K_H = \frac{W}{R} + \mu \frac{W}{D} \quad (3)$$

جداسازها با استفاده از مدل رفتاری دو خطی و بر اساس سختی اولیه (K_1)، سختی پس از تسلیم (K_2) و مقاومت مشخصه (Q) مطابق نمودار ۵ مدل می‌شوند [۱۷]. سختی ارتجاعی را می‌توان به صورت یک ضریب تجربی از سختی ثانویه در نظر گرفت [۱۷]. مقاومت مشخصه Q را می‌توان از روی ضریب اصطکاک سطح لغزنده و بار وارد به جداساز محاسبه کرد.



شکل ۸. اجزای مختلف جداساز آونگی اصطکاکی [۵] نمودار ۵. مدل دو خطی جداساز [۱۷]

۳-۴-۱. طراحی سیستم جداساز لرزه‌ای

مراحل طراحی جداسازها به این صورت است که در ابتدا پیروید هدف برای سازه مورد نظر فرض می‌گردد. معمولاً دوره تناوب طبیعی برای سازه جداسازی شده در حدود ۲ تا ۳ ثانیه انتخاب می‌شود که بر این اساس شعاع جداساز و تغییر مکان طرح محاسبه می‌شود [۵]. در این پژوهش زمان تناوب برابر $2/84$ ثانیه در نظر گرفته شده است [۵] تا مطابق رابطه (۴) شعاع جداساز $2(R_{FPS})$ متر حاصل شود.

$$R_{FPS} = g \times \left(\frac{T_D}{2\pi}\right)^2 \quad (4)$$

g شتاب جاذبه زمین () و دوره تناوب طبیعی طراحی (S) می‌باشد. تغییر مکان طرح جداساز در طول زلزله با استفاده از رابطه

$$D_D = \frac{g}{4\pi^2} \times \frac{A \times (S+1) \times T_S^{\frac{2}{3}} \times T_D}{B_D} \quad \frac{KN}{m^2} \quad (5)$$

ضریب اصطکاک بهینه برای جداساز اصطکاکی آونگی در تحریکات نزدیک گسل $0/05$ لحاظ شده است [۱۷]. مطابق آیین‌نامه

UBC97¹⁶، برای ضریب اصطکاک ۵٪ ضریب میرایی برابر ۱ فرض می‌شود [۱۸]. بنابراین تغییر مکان طرح برابر با ۰/۳۸۸ متر به دست می‌آید. سختی ثانویه یا سختی پس از تسلیم (K_2) از رابطه (۶) تعیین می‌شود [۱۷]:

$$K_2 = \frac{W}{R_{FPS}} \quad (۶)$$

محاسبه سختی ارتجاعی (K_1) دشوار بوده و به صورت یک ضریب تجربی از سختی ثانویه طبق رابطه (۷) در نظر گرفته می‌شود [۱۷]:

$$K_1 = 10K_2 \quad (۸)$$

در روابط (۴) و (۵)، W بیانگر بارهای مرده و زنده مؤثر بر جداساز می‌باشد. سختی اولیه مطابق جدول ۸ محاسبه می‌گردد. سختی مؤثر سامانه جداسازی از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$K_{eff} = \frac{W}{R_{FPS}} + \frac{\mu W}{D} \quad (۱۳)$$

جداسازها در نرم‌افزار اپنسیس با المان Single Friction Pendulum Bearing، طول صفر و مدل اصطکاکی کلمب در پایه ستون‌ها تعریف شدند [۱۳].

۴. تحلیل نتایج مدل‌ها

هدف اصلی این پژوهش، مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه‌های بتن مسلح نامنظم با جداسازهای آونگی اصطکاکی می‌باشد. ۲۰ مدل سازه بتن مسلح ۵ و ۱۲ طبقه منظم و نامنظم ساخته شد و تحت تحریک همزمان مولفه‌های قائم و افقی ۷ شتابنگاشت نزدیک گسل قرار گرفتند و جمعا ۱۴۰ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر آن‌ها انجام شد. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها شامل بیشینه جابجایی جانبی طبقات، بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات، بیشینه برش پایه ساختمان‌ها و منحنی‌های هیستریزس^{۱۷} مدل‌ها در حالات با پایه گیردار و پایه جداسازی شده با کاربرد جداساز آونگی اصطکاکی، با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج از احتساب میانگین پاسخ تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی به دست آمده‌اند.

جدول ۸. سختی اولیه جداسازهای ساختمان‌ها (کیلو نیوتن بر متر)

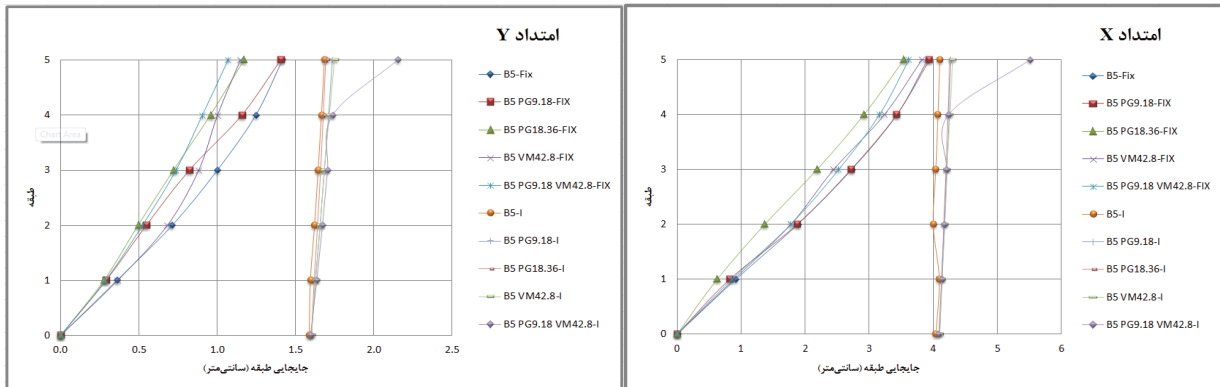
نامنظم در پلان و ارتفاع		نامنظم در ارتفاع		نامنظم در پلان		منظم		موقعیت جداساز
۱۲ طبقه	۵ طبقه	۱۲ طبقه	۵ طبقه	۱۲ طبقه	۵ طبقه	۱۲ طبقه	۵ طبقه	
۸۹۷۷	۳۶۷۱	۸۹۷۷	۳۶۷۱	۶۷۰۷	۳۰۱۱			ستون گوشه روی محورهای ۲ و ۵
۶۱۳۳	۲۳۵۹	۶۱۳۳	۲۳۵۹	۶۶۱۸	۲۸۷۶	۶۶۷۲	۳۳۱۲۶	ستون گوشه روی محورهای ۱ و ۶
۱۱۶۱۷	۴۸۴۱	۱۱۶۱۷	۴۸۴۱			۹۴۶۷	۴۹۲۰	ستون کناری روی محورهای ۲ و ۵
۸۷۰۹	۳۴۰۳	۸۷۰۹	۳۴۰۳			۹۴۶۷	۴۹۲۰	ستون کناری روی محورهای ۱ و ۶
۱۲۲۹۶	۵۵۲۱	۱۱۳۲۹	۴۵۵۳	۶۷۰۷	۳۰۱۱	۱۲۲۹۷	۶۹۱۲	ستون میانی روی محورهای ۳ و ۴
				۱۲۲۹۷	۵۵۲۱	۱۲۲۹۷	۶۹۱۲	ستون میانی روی محورهای ۲ و ۵
۱۱۲۲۲	۴۷۰۴			۸۶۳۸	۳۸۷۸			ستون‌های محل فرورفتگی

¹⁶ Uniform Building Code (UBC)

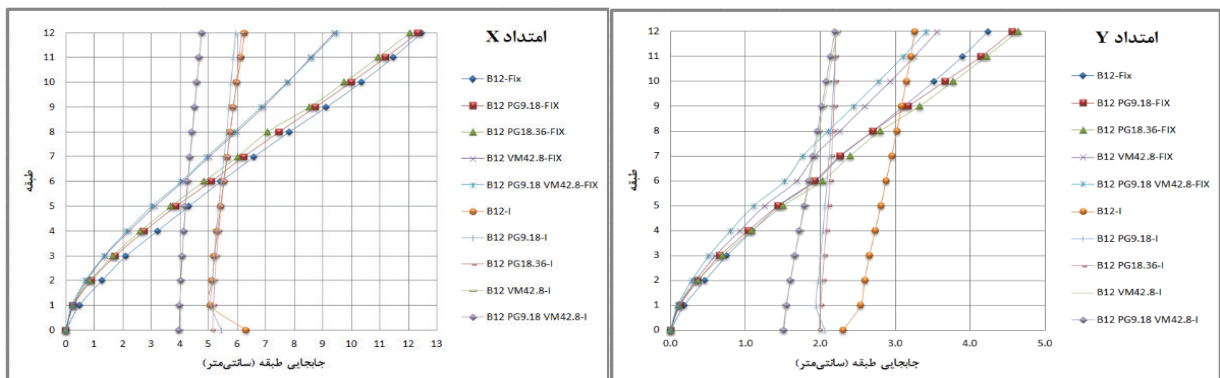
¹⁷ Hysteretic

۱-۴. بیشینه جابجایی جانبی طبقات

هدف از جداسازی در ساختمان‌ها، ایجاد بخش عمده‌ای از جابجایی جانبی در تراز جداساز می‌باشد، به طوری که تغییر شکل سازه اصلی بسیار کم شود. بیشینه جابجایی جانبی مراکز جرم طبقات حاصل از تحلیل به روش تاریخچه زمانی غیرخطی، در ساختمان‌های ۵ و ۱۲ طبقه، مطابق نمودارهای ۶ و ۷ بوده که در امتداد محورهای X و Y بررسی شدند.



نمودار ۶. بیشینه جابجایی جانبی طبقات ساختمان‌های ۵ طبقه با پایه گیردار و با پایه جداسازی شده در امتداد محورهای X و Y

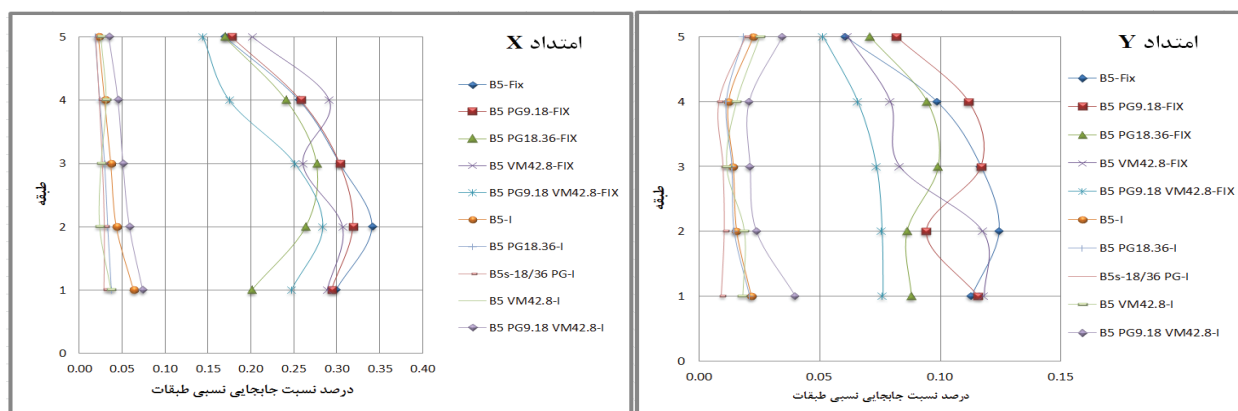


نمودار ۷. بیشینه جابجایی جانبی طبقات ساختمان‌های ۱۲ طبقه با پایه گیردار و با پایه جداسازی شده در امتداد محورهای X و Y

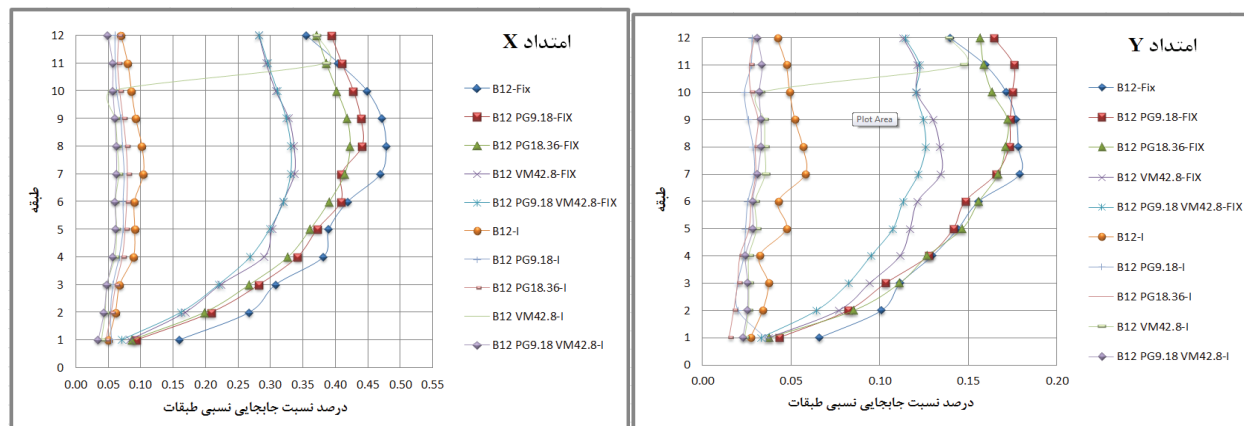
جابجایی جانبی در تراز جداساز ساختمان‌های ۵ طبقه با پایه جداسازی شده، در امتداد محورهای X و Y به ترتیب حدود ۴/۱ و ۱/۶ سانتی‌متر و در ساختمان‌های ۱۲ طبقه در امتداد محور X در محدوده (۴-۶/۴) و در امتداد محور Y در محدوده (۲/۳-۱/۵) سانتی‌متر است. اختلاف بیشینه جابجایی طبقات در مدل‌های ساختمان‌های ۵ طبقه در محدوده (۰/۱۸-۰/۰۱) سانتی‌متر متغیر است، در صورتی که در ساختمان‌های ۱۲ طبقه این مقادیر در محدوده (۰/۲۶-۱/۱۴) سانتی‌متر قرار دارند. در سیستم‌های با جداساز لرزه‌ای، بخش‌های فوقانی سازه‌ها تقریباً به صورت یک جسم صلب روی جداسازها تغییر مکان می‌دهند [۱۹]. در ساختمان‌های ۵ و ۱۲ طبقه با جداساز لرزه‌ای، عمده جابجایی جانبی در تراز جداساز رخ داده است و مدل‌ها مانند جسمی صلب با تغییر شکل‌های کوچک ارتعاش نمودند. جابجایی طبقه انتهایی ساختمان ۵ طبقه با نامنظمی‌های همزمان در پلان و ارتفاع به طور ناگهانی افزایش یافته است که این اتفاق می‌تواند به دلیل جرم کم این طبقه باشد.

۴-۲. بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات

نسبت جابجایی نسبی طبقات، به صورت جابجایی نسبی طبقات تقسیم بر ارتفاع طبقه تعریف می شود. عامل اصلی ایجاد خسارت اختلاف جابجایی بین دو طبقه است که چنانچه بتوان این مقدار را کاهش داد، خسارات وارده به سازه در ارتعاشات رفت و برگشتی به حداقل خواهد رسید. بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات در امتداد محورهای X و Y برای ساختمان های ۵ و ۱۲ طبقه در نمودارهای ۸ و ۹ نشان داده است.



نمودار ۸. بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات ساختمان های ۵ طبقه با پایه گیردار و با پایه جداسازی شده در امتداد محورهای X و Y



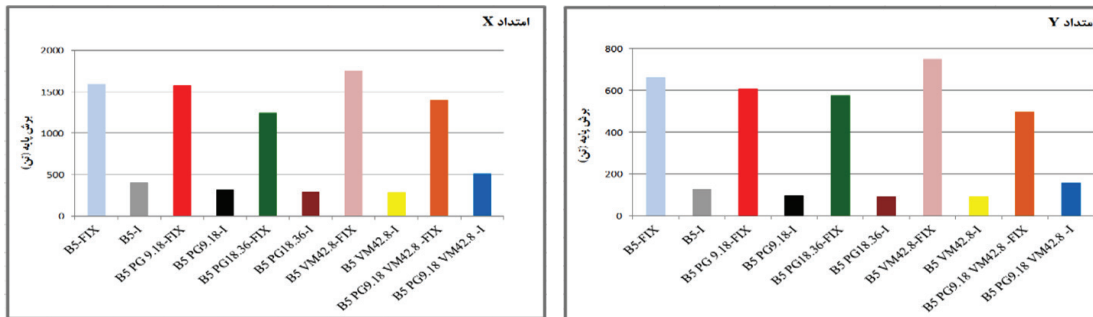
نمودار ۹. بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات ساختمان های ۱۲ طبقه با پایه گیردار و با پایه جداسازی شده در امتداد محورهای X و Y

مطابق نمودار ۷ دیده می شود که میزان بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات ساختمان ۵ طبقه منظم با پایه گیردار در امتداد محورهای X و Y به ترتیب ۸۱/۵٪ و ۸۱/۶٪ نسبت به حالت ساختمان ۵ طبقه منظم با پایه جداسازی شده کاهش یافت. این مقدار کاهش در امتداد محورهای X و Y در ساختمان ۵ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪ به ترتیب برابر با ۸۴/۱٪ و ۸۲/۵٪، در ساختمان ۵ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪ برابر با ۸۹٪ و ۸۰٪، در ساختمان ۵ طبقه نامنظم در ارتفاع برابر با ۸۸٪ و ۷۹٪ و همچنین در ساختمان ۵ طبقه با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع برابر با ۷۵٪ و ۵۰٪ می باشد. جداساز لرزه ای قادر است با کاهش جابجایی جانبی نسبی طبقات، پاسخ سازه را کاهش دهد و در نتیجه خسارت های وارد به سازه را به حداقل برساند [۱۷]. مقادیر مذکور مؤید کاهش قابل ملاحظه نسبت جابجایی نسبی طبقات مدل های با پایه جداسازی شده نسبت به مدل های با پایه گیردار بود. میزان بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات ساختمان ۱۲ طبقه منظم با پایه گیردار در امتداد محورهای

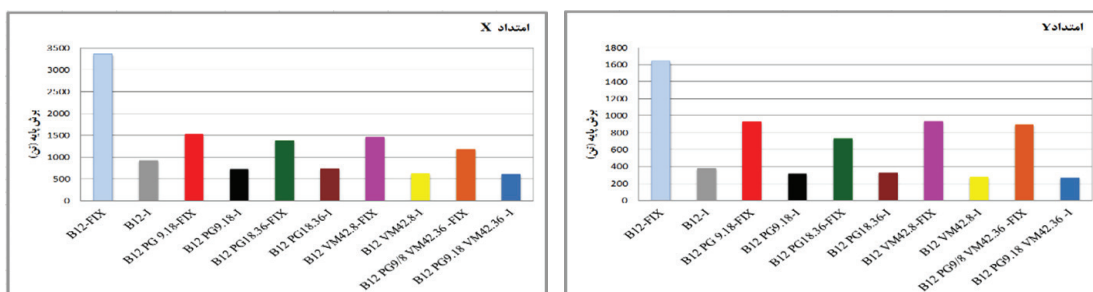
X و Y طبق نمودار ۸ به ترتیب ۷۹/۱٪ و ۶۶/۷٪ نسبت به حالت با پایه جداسازی شده کاهش را نشان داد. این مقدار کاهش در امتداد محورهای X و Y در ساختمان ۱۲ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪ به ترتیب برابر با ۸۸/۳٪ و ۸۳/۸٪، در ساختمان ۱۲ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪ برابر با ۸۱/۲٪ و ۸۱/۷٪، در ساختمان ۱۲ طبقه نامنظم در ارتفاع برابر با ۸۰/۶٪ و ۷۳٪ و در ساختمان ۱۲ طبقه با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع برابر با ۸۰/۱٪ و ۷۳/۸٪ می‌باشند. هر چند جداساز لرزه‌ای در ابتدا برای سازه‌های کوتاه مرتبه با رفتار صلب توسعه یافت، ولی کاربرد آن در سازه‌های متوسط و بلندمرتبه رو به افزایش است. سازه‌های بلند دارای پیوند بلند و شتاب ورودی اندک هستند، افزودن جداساز به آن‌ها می‌تواند جابجایی بین طبقه‌ای را کاهش دهد. به این ترتیب، ساختمان‌های بلندمرتبه می‌توانند حین زلزله به صورت کامل قابلیت بهره‌برداری را حفظ نموده و بلافاصله پس از زلزله قابل اسکان باشند [۲۰]. کاهش نسبت جابجایی نسبی در برخی طبقات ساختمان‌های جداسازی شده در پایه نسبت به حالت گیردار در پایه می‌تواند حدود ۷۰٪ باشد [۲۱]. بنابراین در ساختمان‌های ۵ و ۱۲ طبقه کاهش نسبت جابجایی نسبی طبقات مدل‌های با پایه جداسازی شده نسبت به مدل‌های با پایه گیردار وجود دارد.

۳-۴. برش پایه مدل‌های گیردار و جداسازی شده در پایه

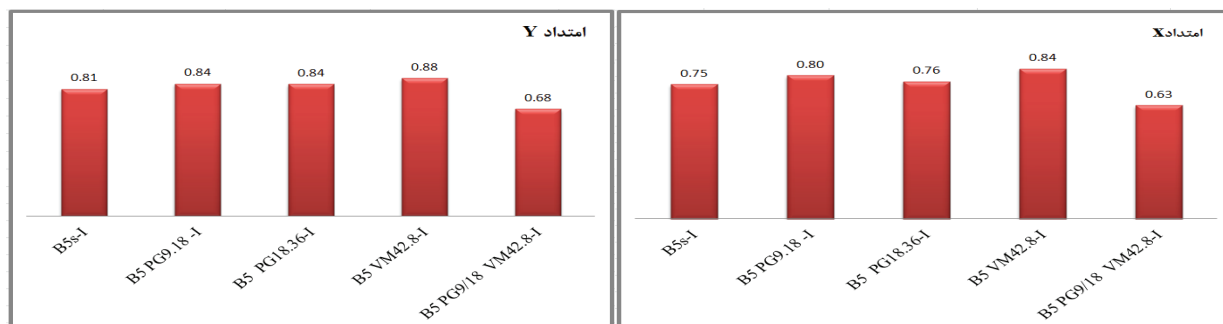
یکی از عوامل تأثیرگذار در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، برش پایه اعمال شده بر سازه تحت تحریک لرزه‌ای زمین می‌باشد. در این بخش مقدار بیشینه برش پایه حاصل از تحلیل به روش تاریخچه زمانی غیرخطی ساختمان‌های ۵ و ۱۲ طبقه، در امتداد محورهای X و Y در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است. همچنین درصد کاهش بیشینه برش در پایه مدل‌های ۵ و ۱۲ طبقه جداسازی شده در پایه نسبت به مدل‌های گیردار در پایه در امتداد محورهای X و Y مطابق نمودارهای ۱۲ و ۱۳ می‌باشد.



نمودار ۱۰. بیشینه برش پایه حاصل از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل‌های ۵ طبقه در امتداد محورهای X و Y



نمودار ۱۱. بیشینه برش پایه حاصل از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل‌های ۱۲ طبقه در امتداد محورهای X و Y



نمودار ۱۲. میزان کاهش برش پایه مدل‌های ۵ طبقه جداسازی شده در پایه نسبت به حالت گیردار در امتداد محورهای X و Y



نمودار ۱۳. میزان کاهش برش پایه مدل‌های ۱۲ طبقه جداسازی شده در پایه نسبت به حالت گیردار در امتداد محورهای X و Y

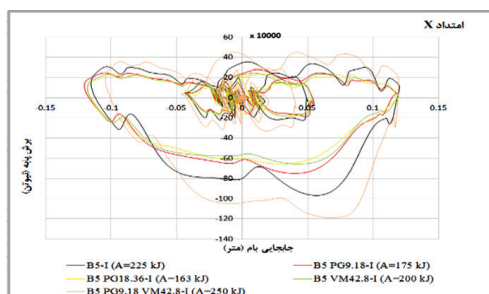
مطابق نمودارهای ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود، به کارگیری جداساز لرزه‌ای در مدل‌های ۵ طبقه، برش پایه را در محدوده ۶۸٪ تا ۸۸٪ و در مدل‌های ۱۲ طبقه در محدوده ۴۸٪ تا ۷۷٪ کاهش می‌دهد. بیشترین کاهش برش پایه در مدل‌های ۵ طبقه، مدل نامنظم در ارتفاع و پس از آن به ترتیب مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪، مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪ و مدل منظم در پلان و ارتفاع می‌باشد. بیشترین کاهش برش پایه در مدل‌های ۱۲ طبقه به ترتیب مربوط به ساختمان منظم، پس از آن به ترتیب مربوط به مدل نامنظم در ارتفاع، مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪، مدل منظم در پلان و ارتفاع و مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪ می‌باشد. جداسازها با حذف مقدار زیادی از انرژی دینامیکی منتقل شده از زمین به سازه باعث کم شدن نیروهای به وجود آمده بر اثر زمین‌لرزه می‌شوند [۱۷] به طوری که با جداسازی ساختمان، برش پایه می‌تواند حدود ۶۲٪ کاهش یابد [۲۲]. مقدار برش پایه، با به کارگیری جداساز لرزه‌ای آونگی اصطکاکی در تمام مدل‌های پژوهش، به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

۴-۴. منحنی هیستریزس برش پایه-جابجایی بام

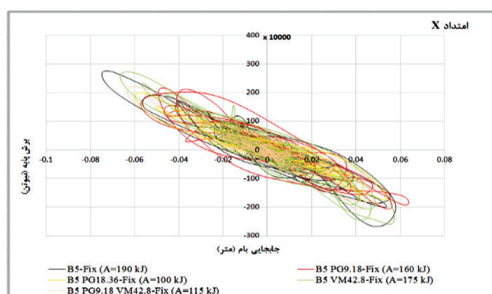
منحنی برش پایه-جابجایی بام، بیانگر رفتار چرخه‌ای سازه است. مساحت زیر منحنی برابر با میزان جذب انرژی سازه تحت بارهای رفت و برگشتی می‌باشد. هر چه مساحت منحنی بیشتر باشد، جذب انرژی سازه بالاتر است. برای ترسیم این منحنی‌ها، زلزله‌هایی انتخاب شد که بیشترین اثر را بر مدل‌ها داشته و مساحت زیر منحنی بیشینه باشد. در مدل‌های ۱۲ طبقه با و بدون جداساز و ۵ طبقه با جداساز، از زلزله بم و در مدل‌های ۵ طبقه با پایه گیردار از زلزله‌های ارائه شده در جدول ۹ استفاده شد. منحنی‌های هیستریزس برش پایه-جابجایی بام برای مدل‌های ۵ و ۱۲ طبقه در حالات گیردار و جداسازی شده در پایه، طبق نمودارهای ۱۴ تا ۱۷ ارائه شدند. مقدار A روی نمودارها بیانگر مساحت زیر منحنی‌ها می‌باشد.

جدول ۹. شتابنگاشت‌های انتخاب شده برای بررسی رفتار چرخه‌ای مدل‌های ۵ طبقه

نوع ساختمان	زلزله در امتداد X	زلزله در امتداد Y
B5-Fix	لومپرتا	کوبه
B5 PG9.18-Fix	نورتریج	نورتریج
B5 PG18.36-Fix	لومپرتا	کوبه
B5 VM42.8-Fix	لومپرتا	کوبه
B5 PG9.18 VM42.8-Fix	لومپرتا	کوبه

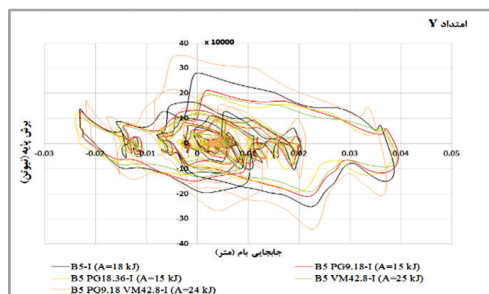


(ب)

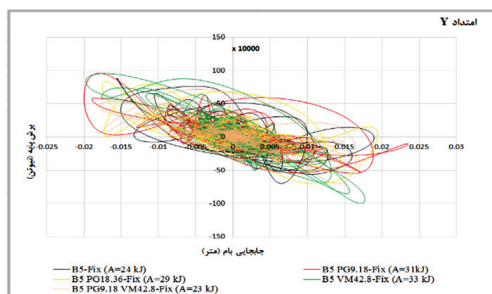


(الف)

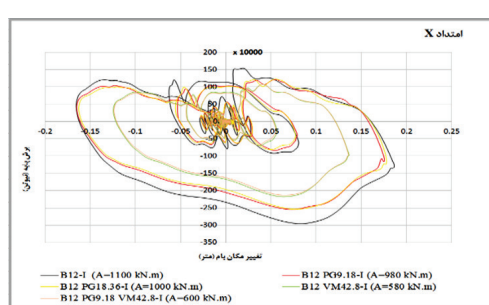
نمودار ۱۴. منحنی هیستریزس مدل‌های ۵ طبقه با پایه گیردار (الف) و جداسازی شده (ب) در امتداد محور X



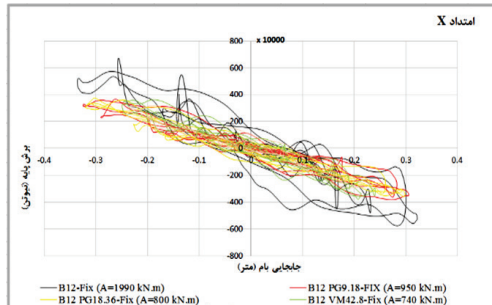
(الف) (ب)



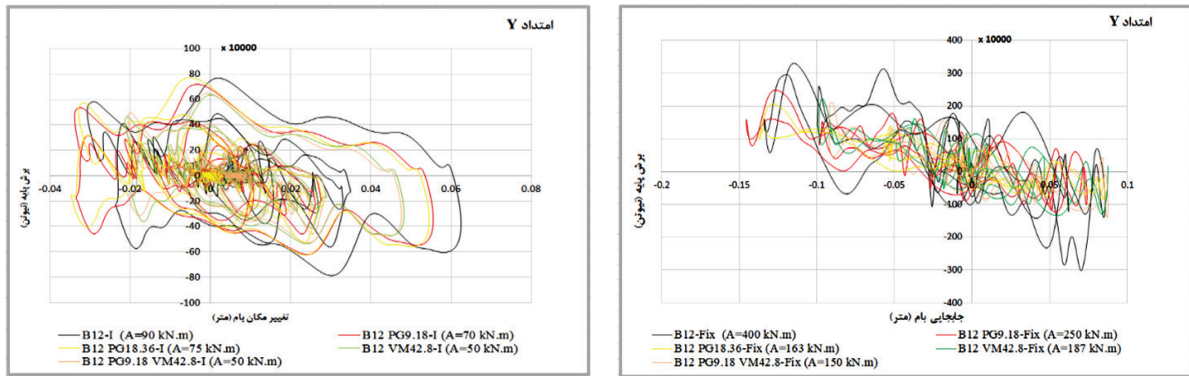
نمودار ۱۵. منحنی هیستریزس مدل‌های ۵ طبقه با پایه گیردار (الف) و جداسازی شده (ب) در امتداد محور Y



(الف) (ب)



نمودار ۱۶. منحنی هیستریزس مدل‌های ۱۲ طبقه با پایه گیردار (الف) و جداسازی شده (ب) در امتداد محور X



(الف) (ب)

نمودار ۱۷. منحنی هیستریزس مدل‌های ۱۲ طبقه با پایه گیردار (الف) و جداسازی شده (ب) در امتداد محور Y

مطابق نمودارهای ۱۴ تا ۱۷ مشاهده می‌شود که منحنی‌های هیستریزس مدل‌های ۵ طبقه جداسازی شده در پایه نسبت به حالت گیردار در پایه، متقارن‌تر بوده و شیب حلقه‌های آن‌ها کمتر است. این در حالی است که در ساختمان‌های ۵ طبقه جداسازی شده در پایه، مساحت همه منحنی‌ها نسبت به حالت ۵ طبقه گیردار در پایه بیشتر می‌باشد. بیشترین انرژی جذب شده در مدل‌های ۵ طبقه با جداساز لرزه‌ای، مربوط به مدل با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع و پس از آن به ترتیب مربوط به مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪، مدل منظم در پلان، مدل نامنظم در ارتفاع و کمترین انرژی جذب شده مربوط به مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۹/۱۸٪ می‌باشد. در سیستم‌های جداسازی شده با افزایش زمان تناوب و جذب انرژی زلزله، از خرابی اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای جلوگیری می‌شود [۱۹]. انرژی جذب شده مدل ۱۲ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۳۶/۱۸٪، در امتداد محورهای X و Y در حالت جداسازی شده در پایه به ترتیب برابر ۱۰۰۰ kJ و ۷۵ kJ و در حالت گیردار به ترتیب برابر با ۸۰۰ kJ و ۱۶۳ kJ بود. مطابق نمودارهای مذکور مشخص گردید که انرژی جذب شده سایر مدل‌ها در حالت جداسازی شده، کمتر از مقادیر مذکور در حالت گیردار در پایه بوده است. وجود ضربه‌های بلندمدت در حرکات نزدیک گسل، سازه‌های جداسازی شده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. با توجه به اینکه با افزایش ارتفاع، میزان اثرپذیری سازه از زلزله‌های پریود بلند بیشتر می‌شود [۲۳]، بنابراین استفاده از جداساز اصطکاکی آونگی برای مدل‌های ۱۲ طبقه در حوزه نزدیک گسل توصیه نمی‌شود.

۵. نتایج

نتایج کلیدی پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

۱- اختلاف بیشینه جابجایی طبقات در مدل‌های ۵ طبقه جداسازی شده، در محدوده (۰/۱۸-۰/۰۱) و در مدل‌های ۱۲ طبقه جداسازی شده در محدوده (۰/۲۶-۱/۱۴) سانتی‌متر قرار دارد. بنابراین رفتار مدل‌های ۵ طبقه نسبت به مدل‌های ۱۲ طبقه در حالت جداسازی شده، شباهت بیشتری به جسم صلب داشتند. از طرفی به دلیل بحرانی‌تر بودن جابجایی جانبی طبقات انتهایی مدل‌های ۱۲ طبقه نسبت به مدل‌های ۵ طبقه، استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث کاهش قابل توجه جابجایی جانبی این طبقات در مدل‌های ۱۲ طبقه شده است.

۲- نسبت جابجایی نسبی طبقات در همه مدل‌های جداسازی شده در پایه به طور قابل توجهی نسبت به انواع گیردار در پایه کاهش یافت. حداکثر درصد کاهش بیشینه جابجایی نسبی با ۸۹٪ مربوط به مدل ۵ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ۱۸/۳۶٪

- و کمترین درصد کاهش با ۵۰٪ مربوط به مدل ۵ طبقه با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع بوده است.
- ۳- بیشترین کاهش نسبت جابجایی نسبی طبقات در مدل‌های ۵ طبقه با جداساز لرزه‌ای، مربوط به مدل‌های دارای یک نوع نامنظمی (در پلان یا در ارتفاع) در محدوده ٪ (۷۹-۸۹)، و کمترین میزان کاهش مربوط به مدل دارای نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع با ۵۰٪ بوده است.
- ۴- بیشترین کاهش نسبت جابجایی نسبی طبقات در مدل‌های ۱۲ طبقه با جداساز لرزه‌ای به میزان ٪ ۸۸/۳ مربوط به مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ٪ ۹/۱۸ و کمترین کاهش به میزان ٪ ۶۶/۷ مربوط به مدل منظم بوده است.
- ۵- بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات در مدل‌های ۱۲ طبقه نسبت به مدل‌های ۵ طبقه، کاهش بیشتری داشته‌اند. کاهش بیشینه نسبت جابجایی نسبی طبقات مدل‌های ۱۲ طبقه گیردار به جداسازی شده در پایه، در امتداد محور ٪ در محدوده ٪ (۷۹/۱-۸۸/۳) و در امتداد محور ٪ در محدوده ٪ (۶۶/۷-۸۳/۸) و همچنین این مقادیر برای مدل‌های ۵ طبقه در امتداد محور ٪ در محدوده ٪ (۷۵-۸۹) و در امتداد محور ٪ در محدوده ٪ (۵۰-۸۲/۵) بوده است.
- ۶- در همه مدل‌ها، استفاده از جداساز لرزه‌ای باعث کاهش قابل توجه برش پایه شده است. برش پایه مدل ۵ طبقه با نامنظمی در ارتفاع در حالت گیردار در پایه و در امتداد محور ٪ به میزان ۷۴۸/۹۹ تن و در حالت جداسازی شده به میزان ۹۱/۹۲ تن بوده و بیشترین کاهش برش پایه را به میزان ٪ ۸۸ داشته است. همچنین برش پایه مدل ۱۲ طبقه نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ٪ ۱۸/۳۶ در حالت گیردار در پایه و در امتداد محور X به میزان ۱۳۸۵/۶۸ تن و در حالت جداسازی شده به میزان ۷۳۷/۹۴ تن بوده که کمترین کاهش برش پایه را با میزان ٪ ۴۷ داشته است.
- ۷- جداساز لرزه‌ای، برش پایه را در مدل‌های ۵ طبقه به میزان بیشتری نسبت به برش پایه در ساختمان‌های ۱۲ طبقه کاهش داده است. کاهش برش پایه در مدل‌های ۵ طبقه در محدوده ٪ (۶۳-۸۸) و در مدل‌های ۱۲ طبقه در محدوده ٪ (۴۷-۷۷) بود.
- ۸- شیب حلقه‌های منحنی‌های هیستریزیس در تمام مدل‌های جداسازی شده در پایه، نسبت به حالات گیردار در پایه کمتر بوده‌اند. هر چه شیب حلقه‌های منحنی‌های هیستریزیس کمتر باشد، رفتار سازه شکل‌پذیرتر است و زوال مقاومت سازه نیز کاهش می‌یابد.
- ۹- منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های گیردار در پایه نسبت به حالت جداسازی شده لاغرتر بودند، که این نتیجه در بارهای رفت و برگشتی سبب ایجاد ترک در بتن و رفتار نامناسب سازه می‌شود.
- ۱۰- میزان اختلاف جذب انرژی در مدل‌های ۵ طبقه جداسازی شده در پایه نسبت به حالت گیردار در پایه بیشتر بود. بیشترین میزان اختلاف جذب انرژی در حالت با جداساز نسبت به گیردار در پایه، مربوط به مدل با نامنظمی همزمان در پلان و ارتفاع بوده که این مقدار در حالت گیردار در پایه kJ115 و در حالت جداسازی شده در پایه kJ250 می‌باشد. همچنین کمترین میزان جذب انرژی مربوط به مدل نامنظم با کاهش سطح پلان به میزان ٪ ۹/۱۸ بوده که این مقدار در حالت گیردار در پایه kJ 160 و در حالت جداسازی شده در پایه kJ 175 بود.
- با توجه به اینکه انرژی جذب شده مدل‌های ۱۲ طبقه در حالت گیردار نسبت به حالت جداسازی شده در پایه بیشتر بود، بنابراین استفاده از جداساز اصطکاکی آونگی برای مدل‌های ۱۲ طبقه در حوزه نزدیک گسل توصیه نمی‌شود.

- [1] Habibi, A; Jami, E; Roštami, S, "Evaluation of the relationship between seismic parameters of far and near fault areas using the concept of correlation", *Omran Sharif Scientific and Research Journal*, Vol. 32-2, No. 2-3, pp. 133-144, 2016[In Persian].
- [2] Azhideh, A; Sharafi, H, "Study of the effect of seismic behaviour near and far from faults on irregular concrete buildings", *3rd International Congress of Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Iran (Tehran)*, 25 August, 2015[In Persian].
- [3] Azhideh, A; Sharafi, H, "Effect of vertical seismic component on concrete structures", *5th National Concrete Conference of Iran, Iran (Tehran)*, 15 October, 2013[In Persian].
- [4] Habibi, A; Jami, E; Roštami, S, "Improving the Application of Foundation Separators using Genetic Algorithm", *Amirkabir Journal*, Vol. 44, No. 2, pp. 95-107, 2012[In Persian].
- [5] *Guide to design and implementation of seismic isolation systems in buildings*, Journal No. 523, 2010[In Persian].
- [6] Suthar, A; Noval, R, "Seismic Response of Symmetrical and Asymmetrical Structure with Base Isolators", *International Journal for Scientific Research & Developmen*, Vol. 5, No. 09, pp. 294-297, 2017.
- [7] Mazza, F, Mazza, M, Vulcano, A, "Base-isolation systems for the seismic retrofitting of RC framed buildings with soft-storey subjected to near-fault earthquakes", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 109, pp.2018 ,209-221 .
- [8] Irwan, R; Sjahril A; Yuskar, L; Hendro, Y, "Comparative Analysis of Fixed base and Isolated Structure in L Shape Plan with Time History Analysis based on ASCE7-16," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 473, 2019.
- [9] Saffari, H; Maleki, P; Mortazavi, A Asghar, " Investigation of Combined Steel-Concrete Structures with Inter-Story Seismic Isolator in Near-Fault Field", *Iranian Society of Structural Engineering Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 148-164, 2018[In Persian].
- [10] Noroozinajad Farsangi, E, "Seismic Fragility Estimation of Base Isolated Non-Ductile RC Buildings under Orthogonal Seismic Excitations", *Journal of Structural and Construction Engineering*, Vol. 8, No. 12, pp. 102-121, 2022[In Persian].
- [11] S. Bandyopadhyay, Y.M. Parulekar, A. Sengupta, J. Chattopadhyay, "Structure soil structure interaction of conventional and base-isolated building subjected to real earthquake", *Structures*, Vol. 32, 2021, pp.474-493.
- [12] Kheyroddin, A; Aramesh, S, *Structural resistant system in tall buildings*, 2015[In Persian].
- [13] Foroughi Moghaddam, SMJ, *The most complete OpenSEES application reference*, Tehran: Knowledge Writer, 2016[In Persian].
- [14] *Ministry of Housing and Urban Development, Deputy Minister of Housing and Construction, National Building Regulations of Iran*, Issue 6, 2019[In Persian].
- [15] *Earthquake Design Regulations (2800), Fourth Edition (2013)*[In Persian].
- [16] *Ministry of Housing and Urban Development, Deputy Minister of Housing and Construction, National Building Regulations of Iran*, Article 9, 2020[In Persian].
- [17] Naeim, F, Kelly, JM, "Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice", *John Wiley & Sons, INC.*, 1999.
- [18] *UBC 97, Uniform Building Code*, 1997.

- [19] Kelly, JM, (1986). "A seismic Base Isolation: Review and Bibliography", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 2-16.
- [20] Becker, TC, Yamamoto, S, Hamaguchi, H, Higashino, M, Nakashima, M, "Application of isolation to high-rise buildings: A Japanese design case study through a US design code lens", *Earthquake Spectra*, 2014.
- [21] Mazza, F, "Seismic demand of base-isolated irregular structures subjected to pulse-type earthquakes." *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 108, pp. 111-129, 2018.
- [22] Karabork, T, Deneme, IO, Bilgehan, RP, "A comparison of the effect of SSI on base isolation systems and fixed-base structures for soft soil", *Geomechanics and Engineering*, Vol. 7, pp. 87-103, 2014.
- [23] Bazrafshan, A; Khaji, N, "Seismic response of tall buildings isolated due to long period movements of the earth", *Imran Modarres*, Vol. 16, No. 2, pp. 42-51, 2016[In Persian].