

ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی دارای جداساز و نسبت لاغری یکسان با مدل سازی سه بعدی

فاضل آذرباد^۱، رضا وهدانی^۲، محمد ایمان خداکریمی^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این مقاله به ارزیابی سه بعدی عملکرد جداسازهای لرزه‌ای لاستیکی با هسته‌ی سربی در سازه‌های فولادی گیردار در پایه با نسبت لاغری‌های یکسان تحت زلزله‌های دور از گسل پرداخته شده است. بدین منظور سه سازه فولادی ۶، ۹ و ۱۲ طبقه، با سیستم مقاوم قاب خمشی متوسط به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده است. جداسازهای لاستیکی در تراز پایه سازه‌ها تعبیه شده‌اند. مدل‌های کنترل نشده و کنترل شده با سیستم جداساز لرزه‌ای تحت هفت رکورد زلزله دور از گسل قرار گرفته‌اند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده، عملکرد این سیستم کنترلی با هدف بیشترین کاهش در جابجایی، نسبت دررفت و برش حداکثر طبقات تحت زلزله‌های مورد مطالعه بدست آمده است. در مطالعات قبلی معمولاً یک پلان ثابت برای ارتفاع‌های متفاوت در نظر گرفته شده و تنها تأثیر ارتفاع را بررسی نموده‌اند که باعث می‌شود میزان صلبیت سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر شده و باعث افزایش عملکرد مثبت جداساز در آن سازه گردد؛ اما در این مقاله پلان سازه‌ها با ارتفاع تغییر نموده تا تأثیر افزایش ارتفاع ضمن رعایت نسبت لاغری یکسان، بر روی عملکرد جداساز لرزه‌ای بررسی گردد. نتایج نشان می‌دهد جداساز لرزه‌ای باهدف کنترل مقادیر بیشینه‌ی تغییر مکان، نسبت دررفت، شتاب و برش طبقات از بین سازه‌های مورد مطالعه با در نظر گرفتن پاسخ در هر دو راستای x و y ، در سازه‌ی ۹ طبقه عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. جداساز لرزه‌ای در این سازه باعث کاهش بالای ۲۷ درصدی تغییر مکان، کاهش بالای ۷۰ درصدی دررفت و کاهش بالای ۳۱ درصدی شتاب طبقه‌ی بام سازه و کاهش بالای ۳۱ درصدی برش پایه‌ی سازه شده است.

کلمات کلیدی: کنترل سازه‌ها، جداساز لرزه‌ای، نسبت لاغری، آنالیز تاریخیچه زمانی سه بعدی، قاب خمشی، سازه فولادی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
do	10.22065/jsce.2017.80257.1117	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
i:	10.22065/jsce.2017.80257.1117	۱۳۹۷/۱۰/۳۰	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۸/۰۲	۱۳۹۶/۰۷/۲۷	۱۳۹۵/۱۲/۲۳
		محمدایمان خداکریمی				* نویسنده مسئول:
		khodakarami@semnan.ac.ir				پست الکترونیکی:

Assessment of seismic behaviour of steel frame structures with base isolator and similar slenderness ratio using 3D modelling

Khodakarami Mohammad Iman^{*3}, Vahdani Reza², Azarbad Fazel¹

1- M.Sc. in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Science and Culture, Semnan, Iran

2- Professor, Department of Civil Engineering, Semnan, Iran

3- Professor, Department of Civil Engineering, Semnan, Iran

ABSTRACT

At the recent years, using structure control systems for energy dissipation due to earthquake and reduction of structure vibrations and thereby reduction of life and financial losses have been very much welcome seismic structures are from the most practical of structure control systems. In this paper, 3D evaluation of performance of seismic rubber isolators with lead core in fixed steel structures at the base and same slenderness ratios under far field earthquakes have been assessed. Thus, three steel structures 6, 9 and 12 stories have been considered with resistant system of intermediate moment frame as 3D. Rubber isolators have mounted on the base level of structures. Models of controlled and not controlled with seismic isolation systems have been under 7 far field earthquake records. According to conducted analyses, the performance of this control system with purpose of the most reduction in displacement, drift ratio and maximum stories shear under studied earthquakes has obtained.

In last researches, it was usually considered a constant plan for different heights and just assessed height influence which caused rigidity of shorter structures increased and subsequently caused increasing positive performance of isolation at that structure; but in this paper, structures plan change with height to influence of height increasing while same slenderness ratio investigate on seismic isolation performance. Results indicate seismic isolator with goal of controlling maximum values of displacement, drift ratio, acceleration and maximum stories shear among studied structures and considering response in both x and y directions, at structure 9 stories has shown better performance. In this structure, seismic isolation cause reduction more than 27% in displacements, 70% in drift and 31% in roof story acceleration and 31% in base shear of structure.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

ARTICLE INFO

Received: 13/03/2017

Revised: 19/10/2017

Accepted: 24/10/2017

Keywords:

Structural control
seismic isolation,
slenderness ratio,
3D Time-History Analysis,
Moment Resistant Frame,
Steel Structure.

doi: 10.22065/jsce.2017.80257.111

*Corresponding author: Khodakarami Mohammad Iman

Email address: khodakarami@semnan.ac.ir

۱- مقدمه

مسئله‌ی مهمی که مهندسين سازه در مورد تأمین مقاومت لرزه‌ای سازه در برابر زلزله با آن روبه‌رو هستند، چگونگی به حداقل رساندن تغییر مکان‌های حداکثر و تغییر مکان‌های نسبی زیاد طبقات می‌باشد زیرا که این تغییر مکان‌ها موجب افزایش نیرو در داخل اجزای سازه-ای و همچنین خسارات اجزای غیر سازه‌ای می‌گردد. تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای با افزایش سختی سازه کاهش می‌یابد، اما این عمل با توجه به شرایط سازه ممکن است موجب جذب انرژی بیشتر زلزله و نیروهای اعمال شده به سازه گردد که خود سبب افزایش شتاب طبقات و آسیب دیدن اجزای حساس غیر سازه‌ای می‌گردد. شتاب طبقه نیز با نرم کردن سیستم کاهش پیدا می‌کند، اما این کار موجب ایجاد تغییر مکان‌های نسبی زیاد بین طبقات می‌شود که دلیلی بر آسیب دیدن اجزای سازه می‌گردد. تنها راه کاهش همزمان تغییر مکان‌های نسبی بین طبقات و شتاب طبقات، استفاده از سیستم‌های کنترلی از قبیل جداسازهای لرزه‌ای می‌باشد. سیستم‌های جداساز لرزه‌ای با سختی افقی پایینی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند، سازه را از مؤلفه‌ی افقی شتاب زمین جدا می‌سازد. این عمل، سیستمی را بوجود می‌آورد که فرکانس پایه‌ی آن بسیار کوتاه‌تر از فرکانس غالب زلزله و همچنین فرکانس پایه‌ی سازه‌ی گیردار در پایه می‌باشد. در واقع جداسازی لرزه‌ای یک روش طراحی لرزه‌ای مقاوم است که به‌جای افزایش ظرفیت لرزه‌ای، بر اساس مفهوم کاهش نیاز لرزه‌ای عمل می‌کند. در خصوص این سیستم کنترلی مطالعات زیادی صورت گرفته است که به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌کنیم.

در مطالعاتی که توسط Buckle و Mayes (۱۹۹۰) و همچنین Nagarajaiah و همکارانش (۱۹۹۱) صورت گرفته است مدل‌های تحلیلی و الگوریتم راه‌حل‌های توسعه‌یافته برای تحلیل دینامیکی غیرخطی سازه‌های جداسازی شده به‌صورت سه‌بعدی با سیستم‌های جداسازی الاستومتری و لغزشی ارائه شده است. رفتار غیرخطی به پایه محدود شده است و رو سازه به‌صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. مدل‌های دومحوره و تک‌محوره برای هر دو جداساز الاستومتری و لغزشی ارائه شده است [۲و۱].

در مطالعاتی که توسط Shin و Kim (۱۹۹۷) صورت گرفته است به بررسی تجزیه و تحلیل دینامیکی سیستم‌های ثانویه قرار داده شده بر روی سازه‌های اولیه جداسازی شده پرداخته شده است، نشان داده شد که مفهوم جداسازی لرزه‌ای به‌عنوان راه‌حل مناسبی برای کنترل پاسخ سازه و جلوگیری از تشدید سازه می‌باشد [۳].

در پژوهشی توسط Moroni و همکارانش (۱۹۹۸) یک ساختمان چهار طبقه با جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا در سانتیگو شیلی ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که اگرچه شدت تحریکات وارده به سازه جداسازی شده کم بود، سیستم جداسازی در کاهش شتاب اوج سازه مؤثر بوده است. برای تحریکات بزرگتر، اثر جداسازی با افزایش غیرخطی رابطه‌ی نیرو - تغییر مکان در جداسازها نتایج مناسبی را رقم می‌زند [۴].

در تحقیقاتی بر روی سیستم‌های جداساز لغزشی توسط Jangid (۲۰۰۰) و همچنین Hong و Kim (۲۰۰۴) به بررسی ضریب اصطکاک بهینه برای سیستم لغزنده با نیروی بازگرداننده برای دستیابی به حداقل پاسخ شتاب یک سازه‌ی جداسازی شده تحت زلزله‌های مختلف پرداخته شده است. نتایج مناسبی بر اساس ضریب اصطکاک مطلوب سیستم جداسازی لغزنده تحت تغییرات پارامتری مانند دوره تناوب و میرایی رو سازه، نسبت جرم پایه به رو سازه، نسبت میرایی سیستم جداسازی، دوره تناوب سیستم جداسازی و شدت تحریک زلزله بدست آمد. نشان داده شد که پارامترهای بیان شده تأثیر قابل توجهی در ضریب اصطکاک بهینه‌ی سیستم جداسازی لغزشی دارند [۵و۶].

در تحقیقی که توسط Kaplan و Aydilek (۲۰۰۶) انجام شده است نشان داده شد که استفاده از یک سیستم جداسازی لرزه‌ای موجب کاهش قابل توجهی در شتاب مطلق و جابجایی و همچنین نیروهای برشی می‌شود. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش ۸۷ تا ۹۴ درصد در حداکثر شتاب سازه و نیروهای وارده به سازه می‌باشد [۷].

در دیگر مطالعات که توسط خوشنودیان و عزیزی (۲۰۰۷) انجام گرفته است، به بررسی پیچش در سازه‌های جداسازی شده با سیستم جداساز الاستومتری با در نظر گرفتن حرکت زمین در دو جهت پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه پاسخ رو سازه کاهش

قابل توجهی کرده است، تقویت پیچشی می‌تواند مربوط به خروج از مرکزیت رو سازه و جداساز و انعطاف‌پذیری جانبی و پیچشی جداسازها باشد [۸].

پاسخ لرزه‌ای از تحلیل ساختمان چندطبقه جداسازی شده با جداسازهای لاستیکی - سربی تحت زلزله‌های نزدیک گسل توسط Jangid (۲۰۰۷) و همچنین Jangid و Matsagar (۲۰۰۸) بررسی شد. قدرت عملکرد جداسازهای مطلوب برای پارامترهای سیستم مختلف تحت زلزله‌های نزدیک گسل مشتق شده و قدرت عملکرد بهینه‌ی جداسازهای لاستیکی - سربی در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن کل ساختمان تحت زلزله‌های نزدیک گسل یافت شده است [۹ و ۱۰].

پاسخ لرزه‌ای برای یک ساختمان بلند جداسازی شده که تحت زلزله‌های مختلف قرار گرفته است توسط Shao و همکارانش (۲۰۱۲) بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی کاهش زیادی در تغییر مکان نسبی بین طبقات و شتاب مطلق رو سازه برای ساختمان‌های بلند با استفاده از سیستم جداسازی می‌باشد. همچنین نشان داده شد که در صورت صرف‌نظر از اثر خمشی در سازه‌های بلند، پاسخ قابل‌ملاحظه‌ای از سازه در نتایج وارد نمی‌شود [۱۱].

در مطالعه‌ای که توسط Wang و همکارانش (۲۰۱۲) صورت گرفت مقایسه‌ای بر روی سازه‌های جداسازی شده در پایه و سازه‌های جداسازی شده در طبقات به صورت آزمایشگاهی انجام شد. نتایج حاصل از پژوهش‌ها نشان داد که در سازه‌های جداسازی شده در طبقات با همان طراحی رو سازه و سیستم جداسازی، نتایج دارای مقادیر معین اساسی کوچکتر، شامل فرکانس ارتعاش مؤثر، نسبت میرایی و نسبت جرم مشارکت نسبت به یک ساختمان جداسازی شده از پایه می‌باشد [۱۲].

در پژوهش‌هایی که توسط Iuliis و Faella (۲۰۱۳) انجام گرفته است به بررسی سیستم هوشمند جداسازی شده متشکل از جداسازهای الاستومتری معمولی با میرایی کم و میراگرهای نیمه‌فعال کنترل هوشمند مانند میراگرهای مایع مغناطیسی پرداخته شده است. نتایج حاصل از استفاده این سیستم بیان‌کننده‌ی کاهش قابل‌توجه در تغییر مکان نسبی پایه به همراه هیچ‌گونه افزایشی در برش پایه و یا شتاب اضافی در رو سازه می‌باشد [۱۳].

در مدل‌های ارائه‌شده توسط Ma و همکارانش (۲۰۱۳) بر اساس کاهش تعدادی از معادلات دیفرانسیل خطی معادل، یک روش تقریبی کارآمد برای محاسبه‌ی پاسخ غیرثابت سازه‌های جداسازی شده از پایه توسط مدل‌های بزرگ المان محدود ارائه شده است. تجزیه و تحلیل‌ها ترکیبی از روش شبه تحریک و روش خطی معادل آن می‌باشد. در تجزیه و تحلیل‌ها فرض می‌شود که رو سازه در سیستم جداسازی شده الاستیک باقی می‌ماند. روش انطباق مودال برای کاهش تعداد درجات آزادی سیستم استفاده می‌شود [۱۴].

در سایر مطالعات که بر روی اثر تحریکات زلزله‌های نزدیک گسل بر عملکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان و طراحی سیستم جداسازی شده از پایه توسط خوشنودیان و اسرافیلی (۲۰۱۳) و همچنین Kusanovic و Jensen (۲۰۱۴) صورت گرفته است، نشان داده شد که اثر زلزله‌های نزدیک گسل از نظر هزینه و عملکرد سیستم‌های جداسازی قابل‌توجه می‌باشد. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که حفاظت از رو سازه و کنترل جابجایی جداسازها در اهداف متضاد هم می‌باشد. بنابراین عملکرد رو سازه و سیستم جداسازی بایستی به‌طور همزمان برای ارزیابی مناسب از قابلیت اطمینان سیستم در نظر گرفته شود [۱۵ و ۱۶].

جابجایی‌های زیاد جداسازها در طول تحریکات قوی، موجب آسیب رساندن به جداساز و ضربه به سازه‌های مجاور می‌شود. در مطالعاتی که توسط Das و همکارانش (۲۰۱۵) انجام گرفت بر روی ارائه محدودیت‌هایی بر جابجایی بیش‌ازاندازه جداسازها در روند بهینه‌سازی جداسازها کار شد [۱۷].

در این مقاله به ارزیابی سیستم کنترلی جداساز لرزه‌ای بر روی سازه‌های سه‌بعدی در ارتفاع‌های متفاوت و نسبت لاغری یکسان با رفتار غیرخطی پرداخته شده است. اثربخشی سیستم کنترلی بر مبنای کاهش مقادیر بیشینه‌ی تغییر مکان، نسبت دررفت، شتاب، برش طبقات و برش پایه سازه با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- فرضیات طراحی و مدل‌سازی

برای بررسی سه‌بعدی عملکرد لرزه‌ای جداسازهای لرزه‌ای بر روی سازه‌های گیردار در پایه، سه سازه ۶، ۹ و ۱۲ طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی متوسط در نظر گرفته شده است. این سازه‌ها مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۸]، مبحث ششم [۱۹] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۰]، در نرم‌افزار SAP2000 بارگذاری و به روش حالات حدی (LRFD) طراحی شده است. سپس جداسازهای لرزه‌ای برای هر مدل طراحی گردیده و در پایه‌ی سازه‌ها تعبیه گردیده‌اند. در ادامه فرضیات مربوط به طراحی سازه‌ها و جداسازهای لرزه‌ای ارائه شده است.

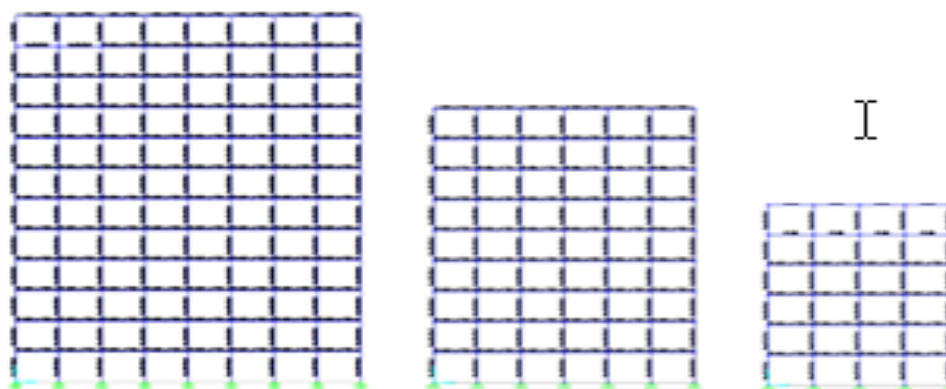
۱-۲- مشخصات مدل‌های سازه‌ای

سازه‌های مورد مطالعه در شهر شیراز با خطر لرزه‌خیزی زیاد و نوع خاک II قرار دارند. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر و تمامی اتصالات صلب در نظر گرفته شده است. جرم سازه‌ها مجموع بار مرده و ۲۰٪ بار زنده در نظر گرفته شده است. بارگذاری ثقلی طبقات برای تمامی مدل‌ها مطابق با جدول (۱) صورت گرفته است.

جدول ۱: بارگذاری ثقلی طبقات بر حسب Kg/m^2

بار مرده دیوارهای پیرامونی	بار زنده سایر طبقات	بار زنده بام	بار مرده بام
350	200	150	600

در طراحی ستون‌ها از مقاطع باکس مربعی و تیرها از تیر- ورق استفاده شده است و مقاطع طراحی شده برای این مدل‌ها در شکل (۱) و جدول (۲) ارائه گردیده است.



شکل ۱: مدل‌های سازه‌ای مورد استفاده

همچنین در جدول (۳) ابعاد پلان مدل‌های سازه‌ای باهدف رعایت نسبت لاغری (H/B) یکسان در هر سه مدل، ارائه گردیده است.

جدول ۲: مقاطع مدل‌های سازه‌ای

سازه	طبقات	مقاطع ستون‌ها	مقاطع تیرها
۶ طبقه	طبقات ۱ و ۲	Box 27x27x2	PG-W42x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۳ و ۴	Box 25x25x2	PG-W25x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۵ و ۶	Box 22x22x2	IPE 300
۹ طبقه	طبقات ۱ تا ۵	Box 35x35x2	PG-W42x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۶ و ۷	Box 30x30x2	PG-W38x1.2 -F 19x1.4
	طبقات ۸ و ۹	Box 25x25x2	PG-W25x1.6 -F 25x1.8
۱۲ طبقه	طبقات ۱ تا ۴	Box 40x40x3	PG-W45x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۵ و ۶	Box 35x35x2	PG-W45x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۷ تا ۹	Box 30x30x2	PG-W42x1.6 -F 25x1.8
	طبقات ۹ تا ۱۲	Box 25x25x2	PG-W42x1.6 -F 25x1.8

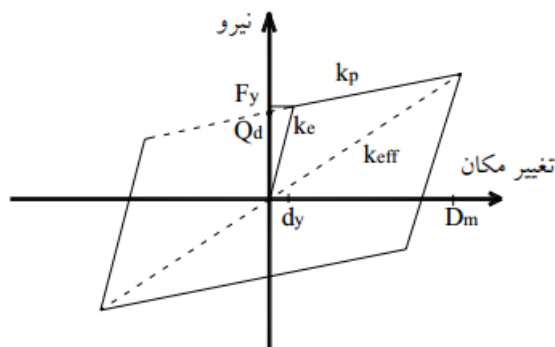
جدول ۳: مشخصات هندسی و نسبت لاغری مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی

تعداد طبقات	ارتفاع (m)	راستای X (طول دهانه × تعداد دهانه) (H/B)	راستای Y (طول دهانه × تعداد دهانه) (H/B)
6	19.2	4 × 3.5	1.37
9	28.8	6 × 3.5	1.37
12	38.4	8 × 3.5	1.37

۲-۲- مشخصات جداسازهای لرزه‌ای

جداسازهای مورد استفاده در این مقاله از نوع جداسازهای لاستیکی با هسته‌ی سربی (LRB) می‌باشد و طراحی آن‌ها مطابق بارانمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها (نشریه ۵۲۳) [۲۱] و دستورالعمل بهسازی ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) [۲۲]، صورت گرفته است.

تکیه‌گاه‌های لاستیکی با هسته‌ی سربی با نمایش رفتاری دوخطی با نرم شدگی تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی در زمینه‌ی کنترل توأم لرزه‌های خفیف و شدید از خود نشان داده‌اند. هسته‌ی سربی این تکیه‌گاه‌ها به همراه سختی بخش لاستیکی که در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک است، تأمین‌کننده‌ی سختی اولیه‌ی مورد نیاز در نمودار نیرو- تغییر مکان این تکیه‌گاه‌ها است. با افزایش میزان بارگذاری، این بخش به حد تسلیم رسیده و سختی بسیار کمی را در مقابل بار جانبی از خود نشان می‌دهد. این سختی به همراه سختی بخش لاستیکی تکیه‌گاه، سختی ثانویه را در نمودار نیرو- تغییر مکان از خود نشان می‌دهد. این رفتار در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار دوخطی نیرو - جابجایی جداساز [۲۱]

برای طراحی جداسازها نیاز به جرم سازه (W) می‌باشد که مطابق با قسمت قبل مجموع بار مرده و ۲۰٪ بار زنده‌ی سازه در نظر گرفته شده است. با توجه به نوع خاک II و نسبت شتاب مبنای طرح ($A=0/3$) شتاب طیفی طرح در زمان تناوب یک ثانیه مطابق رابطه‌ی (۱) برابر $(S_{ID}=0/472)$ بدست آمده است. در طراحی جداسازهای لرزه‌ای، دوره تناوب مؤثر سازه‌های جداسازی شده در تغییر مکان طرح (T_D) برابر $2/5$ ثانیه و نسبت میرایی مؤثر، ۱۰ درصد و نسبت سختی پس از تسلیم به سختی پیش از تسلیم ($\alpha=0/1$) فرض شده است. با توجه به روابطی که در ادامه آمده است، مشخصات جداسازهای لرزه‌ای برای هر سازه محاسبه و در جدول (۴) ارائه شده است.

$$S_{ID} = A \times B_{ID} \quad (1)$$

که در آن A و B_{ID} در رابطه‌ی فوق به ترتیب نسبت شتاب مبنای طرح و ضریب بازتاب می‌باشند.

سختی جانبی مؤثر هر جداساز (K_{eff}) در تغییر مکان طرح از رابطه‌ی (۳) قابل محاسبه است که در آن N تعداد جداسازهای تعبیه شده در سازه می‌باشد.

$$K_{eff} (total) = \left(\frac{W}{g}\right) \times \frac{2\pi}{T_D} \quad (2)$$

$$K_{eff} = \frac{K_{eff} (total)}{N} \quad (3)$$

تغییر مکان هدف (D_m)، میزان انرژی مستهلک شده (W_d) و مقدار اولیه مقاومت مشخصه (Q_d) جداساز لرزه‌ای به ازای نسبت میرایی مؤثر (ξ_{eff}) از روابط (۲) تا (۴) قابل محاسبه می‌باشد.

$$D_m = \left(\frac{g}{4\pi^2}\right) \times \frac{S_{ID}}{B_D} \quad (2)$$

$$W_d = 2\pi K_{eff} D_m^2 \xi_{eff} \quad (3)$$

$$Q_d = \frac{W_d}{4(D_m - d_y)} \quad (4)$$

که در آن‌ها B_D ضریب میرایی جداساز است که با توجه به نسبت میرایی مؤثر محاسبه می‌گردد و مقدار آن به ازای $\xi_{eff} = 10\%$ برابر $1/2$ می‌باشد. با فرض اینکه d_y در برابر D_m بسیار کوچک است مقدار اولیه Q_d از رابطه‌ی (۵) بدست می‌آید.

$$Q_d = \frac{W_d}{4 D_m} \quad (5)$$

سپس سختی ثانویه (K_p) و سختی اولیه (K_e) جداساز از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌گردد؛

$$K_p = K_{eff} - \frac{Q_d}{D_m} \quad (6)$$

$$K_e = \frac{K_p}{\alpha} \quad (7)$$

مقدار دقیق Q_d پس از محاسبه تغییر مکان تسلیم جداساز (d_y) قابل محاسبه است و با استفاده از آن نیروی تسلیم جداساز (F_y) را می‌توان محاسبه نمود.

$$d_y = \frac{Q_d}{K_e - K_p} \quad (10)$$

$$Q_d = \frac{W_d}{4(D_m - d_y)} \quad (11)$$

$$F_y = Q_d + K_p \cdot d_y \quad (12)$$

در نهایت میرایی مؤثر (C_{eff}) جداساز لرزه‌ای از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌گردد که در آن M جرم کل سازه می‌باشد که مشخصات کامل جداسازهای مورد استفاده، در جدول (۴) ارائه شده است.

$$C_{eff} = 2\xi_{eff} \sqrt{M \cdot K_{eff}} \quad (13)$$

جدول ۴: مشخصات جداسازهای لرزه‌ای

α	D_y (m)	F_y (Ton)	K_e (Ton/m)	C_{eff} (Ton.sec/m)	K_{eff} (Ton/m)	تعداد طبقات
0.1	0.005	15.7	3101.3	28.7	361.1	6
0.1	0.005	20.6	4077.6	37.8	474.7	9
0.1	0.005	25	4946.8	45.8	575.9	12

۳- مشخصات رکوردهای زلزله

در این مطالعه، ۷ شتاب‌نگاشت دور از گسل مطابق با مشخصات محل پروژه با بزرگا و فواصل متفاوت از مرکز پژوهش مهندسی زلزله حوزه اقیانوس آرام^۱ (PEER)، استخراج و در تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی به‌عنوان بار جانبی به سازه اعمال گردیده است که در جدول (۵) مشخصات رکوردهای مورد استفاده ارائه گردیده است.

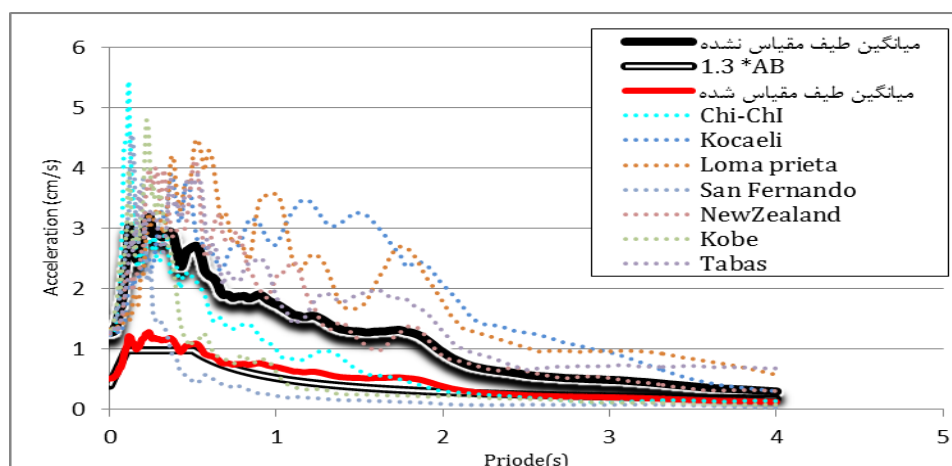
¹ Pacific Earthquake Engineering Research Center

به منظور مقیاس کردن رکوردها ابتدا تمامی زوج شتاب‌نگاشت‌ها به مقدار حداکثر خود مقیاس شده‌اند، به صورتی که حداکثر شتاب در مؤلفه‌ای که دارای بیشینه بزرگتری است برابر با شتاب ثقل (g) گردد. در مرحله بعد طیف پاسخ شتاب، برای هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد، با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal تعیین گردیده است. طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شده است. سپس ضریب مقیاس رکوردها برای هر مدل سازه‌ای به گونه‌ای انتخاب گردیده که متوسط طیف بدست آمده از تمامی رکوردها در محدوده‌ی 0.2T تا 1.5T (T دوره تناوب اصلی سازه‌ی موردنظر) از ۱/۳ برابر مقادیر متناظر طیف طرح استاندارد کمتر نشود.

جدول ۵: مشخصات رکورد زلزله‌های مورد استفاده

PGD (cm)	PGA (g)	Components	Rjb (km)	Magnitude	Station Name	Earthquake
1.32	0.153	E	42.87	7.62	HWA032	Chi-Chi 1999
8.78	0.11	N				
18.58	0.124	IZN090	30.73	7.51	Iznik	Kocaeli 1999
6.66	0.091	IZN180				
9.46	0.103	A10000	41.71	6.93	APEEL 10 - Skyline	Loma Prieta 1989
8.29	0.09	A10090				
7.64	0.106	BOS-L1	24.07	7.35	Boshrooyeh	Tabas 1978
8.03	0.085	BOS-T1				
2.86	0.092	CHY000	49.91	6.9	Chihaya	Kobe 1995
0.98	0.11	CHY090				
0.88	0.155	SAD003	30.7	6.61	Santa Anita Dam	San Fernando 1971
0.77	0.221	SAD273				
6.99	0.089	SN76W	43.6	7	CSHS	New Zealand 2010
8.84	0.116	SS14W				

در شکل ۳ طیف مربوط به رکوردهای موردنظر به همراه مقدار میانگین مقیاس شده در قیاس با طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ آورده شده است.



شکل ۳: طیف رکوردهای زلزله به همراه مقدار میانگین و طیف طرح آیین نامه

۴- بحث و نتایج

به منظور بررسی تأثیر جداساز لرزه‌ای بر روی سازه‌های گیردار در پایه از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. پس از انجام این تحلیل‌ها خروجی‌های مربوطه برای هر دو راستای X و Y، استخراج و نمودارهای مقادیر بیشینه‌ی تغییر مکان، نسبت دریافت، شتاب و برش طبقات هر سازه در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با استفاده از جداساز لرزه‌ای، برای میانگین رکوردهای دور از گسل در راستای Y ارائه شده و عملکرد سیستم کنترل جداساز لرزه‌ای بر مبنای بررسی نیازهای لرزه‌ای در هر دو راستا، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در جداول ۶ و ۷ دوره تناوب و درصد مشارکت مودال هر سازه برای سه مود اول آن‌ها، در دو حالت کنترل نشده و کنترل شده با استفاده از جداساز لرزه‌ای آورده شده است.

جدول ۶: مشخصات مودال مدل‌های سازه‌ای گیردار در پایه

Modal Participating Mass Ratio					
U_θ	U_y	U_x	priod	mode	model
0	0.778	0	1.34	1	۶ طبقه
0	0	0.781	1.28	2	
0.785	0	0	1.16	3	
0	0.786	0	1.73	1	۹ طبقه
0	0	0.785	1.65	2	
0.789	0	0	1.52	3	
0	0.765	0	2.18	1	۱۲ طبقه
0	0	0.762	2.06	2	
0.763	0	0	1.95	3	

جدول ۷: مشخصات مودال مدل‌های سازه‌ای جداسازی شده

Modal Participating Mass Ratio					
U_θ	U_y	U_x	priod	mode	model
0	0.91	0	1.755	1	
0	0	0.918	1.713	2	۶ طبقه
1	0	0	1.128	3	
0	0.896	0	2.166	1	
0	0	0.903	2.1	2	۹ طبقه
1	0	0	1.267	3	
0	0.873	0	2.579	1	
0	0	0.881	2.469	2	۱۲ طبقه
1	0	0	1.359	3	

پس از انجام تحلیل‌ها و استخراج خروجی‌ها، میانگین جابجایی حداکثر هر طبقه‌ی سازه، تحت اثر ۷ رکورد زلزله‌ی یادشده، با استفاده از رابطه‌ی (۱۴) محاسبه گردیده است؛ سپس میانگین پارامتر محاسبه‌شده برای کل طبقات هر سازه از رابطه‌ی (۷) محاسبه شده است.

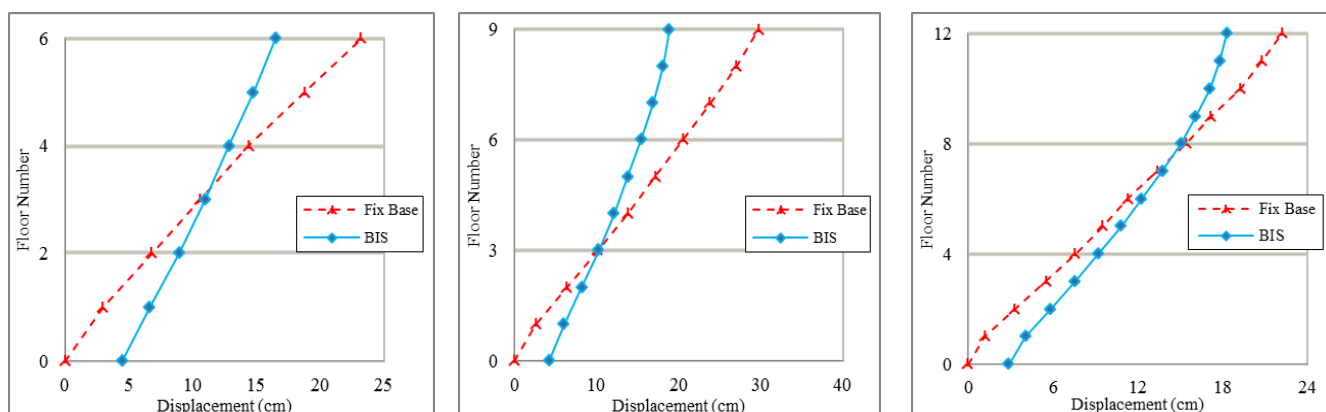
$$\text{Average}_{\text{Max}(X_i)} = \frac{\sum_{i=1}^7 \text{Max}(X_{ij})}{7} \quad (14)$$

$$\text{Average}_{\text{Max}(X)} = \frac{\sum_{j=0}^n \text{Average}_{\text{Max}(X_j)}}{n+1} \quad (15)$$

به منظور ارزیابی عملکرد جداساز لرزه‌ای در کنترل تغییر مکان حداکثر طبقات به‌ویژه طبقه‌ی بام، میزان کارایی این سیستم کنترلی با استفاده از روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه و در جدول (۷) آورده شده و نمودار تغییر مکان طبقات هر سازه، ترسیم و در شکل (۴) ارائه گردیده است.

$$Er_1 = \left[\frac{\text{Average}_{\text{Max}(X_{BIS})} - \text{Average}_{\text{Max}(X_{FBS})}}{\text{Average}_{\text{Max}(X_{FBS})}} \right] \times 100 \quad (16)$$

$$Er_2 = \left[\frac{\text{Average}_{\text{Max}(X_n \text{ BIS})} - \text{Average}_{\text{Max}(X_n \text{ FBS})}}{\text{Average}_{\text{Max}(X_n \text{ FBS})}} \right] \times 100 \quad (17)$$



شکل ۴: جابجایی حداکثر طبقات سازه‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل در راستای Y

با توجه به نمودارها جداساز لرزه‌ای در سازه‌ی ۹ طبقه بیشینه تغییر مکان $\frac{2}{3}$ از طبقات سازه را کاهش داده که این آمار برای سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه تقریباً $\frac{2}{3}$ از طبقات سازه می‌باشد. همچنین با توجه به جدول (۸)، میزان کاهش این نیاز لرزه‌ای در سازه‌ی ۹ طبقه به‌ویژه طبقه‌ی بام آن، به نسبت دو سازه‌ی دیگر، بیشتر بوده است.

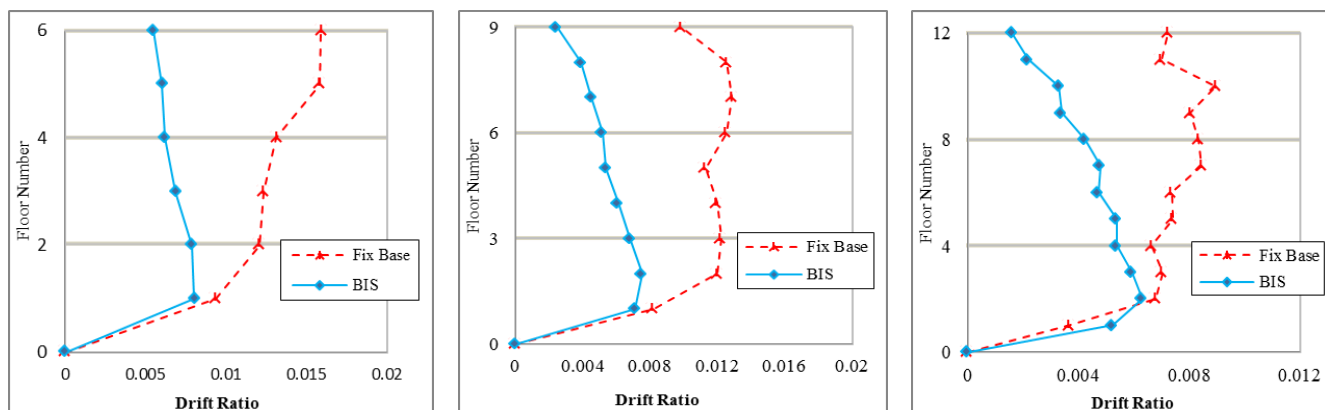
جدول ۸: تغییرات جابجایی حداکثر سازه جداسازی شده نسبت به سازه گیردار تحت زلزله‌های دور از گسل

درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر				تعداد طبقات
درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر طبقه بام		طبقات		
راستای X	راستای Y	راستای X	راستای Y	
-27%	-29%	+1%	-2%	6
-27%	-37%	-6%	-18%	9
-26%	-18%	-9%	+3%	12

میانگین نسبت دریافت حداکثر هر طبقه‌ی سازه، تحت اثر ۷ رکورد زلزله‌ی یادشده و میانگین پارامتر محاسبه‌شده برای کل طبقات هر سازه همانند قسمت قبل، محاسبه و به‌منظور ارزیابی عملکرد جداساز لرزه‌ای در کنترل نسبت دریافت حداکثر طبقات به‌ویژه طبقه‌ی بام، میزان کارایی این سیستم کنترلی با الگوبرداری از روابط (۸) و (۹) محاسبه و در جدول (۹) آورده شده است. همچنین نمودار نسبت دریافت حداکثر طبقات هر سازه، ترسیم و در شکل (۵) ارائه گردیده است.

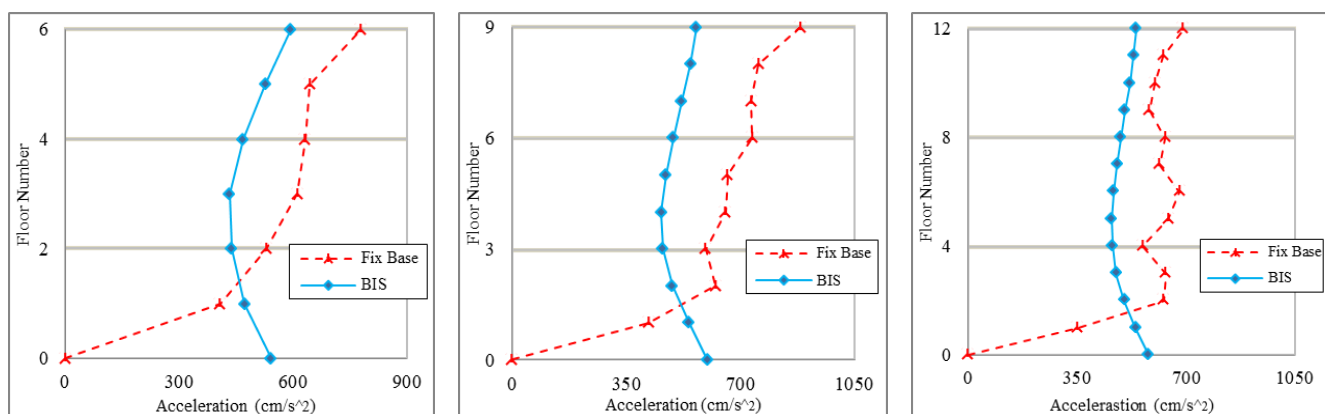
جدول ۹: تغییرات نسبت دریافت حداکثر سازه جداسازی شده نسبت به سازه گیردار تحت زلزله‌های دور از گسل

درصد تغییرات میانگین نسبت دریافت حداکثر طبقه بام		درصد تغییرات میانگین نسبت دریافت حداکثر طبقات		تعداد طبقات
راستای X	راستای Y	راستای X	راستای Y	
-69%	-66%	-48%	-48%	6
-72%	-75%	-48%	-53%	9
-80%	-78%	-47%	-40%	12



شکل ۵: نسبت دریفت حداکثر طبقات سازه‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل در راستای y

با توجه به نمودارها، جداساز لرزه‌ای در سازه‌های ۶ و ۹ طبقه بیشینه نسبت دریفت تمامی طبقات سازه را کاهش داده و در سازه‌ی ۱۲ طبقه نیز جز طبقه اول، باعث کاهش این نیاز لرزه‌ای در سایر طبقات سازه شده است. همچنین با توجه به جدول (۹)، میزان کاهش این نیاز لرزه‌ای در طبقات سازه‌های ۹ و ۱۲ طبقه به‌ویژه طبقه‌ی بام، به نسبت سازه‌ی ۶ طبقه بیشتر بوده است. میانگین شتاب حداکثر هر طبقه‌ی سازه، تحت اثر ۷ رکورد زلزله‌ی یادشده و میانگین پارامتر محاسبه‌شده برای کل طبقات هر سازه همانند قسمت‌های قبل، محاسبه و به‌منظور ارزیابی عملکرد جداساز لرزه‌ای در کنترل شتاب حداکثر طبقات به‌ویژه طبقه‌ی بام، میزان کارایی این سیستم کنترلی با الگوبرداری از روابط (۸) و (۹) محاسبه و در جدول (۱۰) آورده شده است. همچنین نمودار شتاب حداکثر طبقات هر سازه، ترسیم و در شکل (۶) ارائه گردیده است.



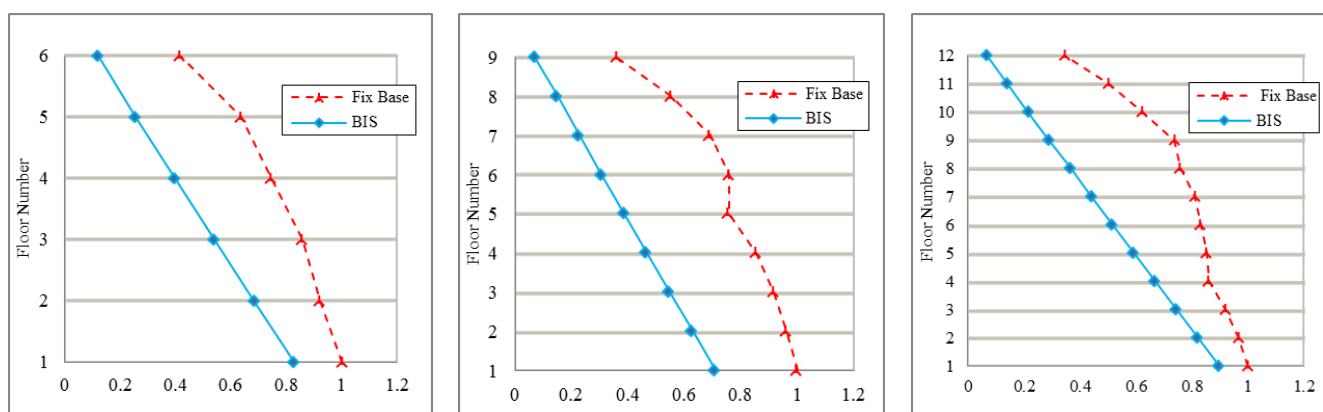
شکل ۶: نسبت دریفت حداکثر طبقات سازه‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل در راستای y

با توجه به نمودارها جداساز لرزه‌ای در سازه‌های مورد مطالعه بیشینه شتاب طبقات سازه را بسیار بهم نزدیک نموده است. همچنین با توجه به جدول (۱۰)، میزان کاهش این نیاز لرزه‌ای طبقات در سازه‌ی ۹ طبقه به‌ویژه طبقه‌ی بام آن و با در نظر گرفتن هر دو راستا، به نسبت دو سازه‌ی دیگر بیشتر بوده است.

جدول ۱۰: تغییرات شتاب حداکثر سازه جداسازی شده نسبت به سازه گیردار تحت زلزله‌های دور از گسل

تعداد طبقات	درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر طبقات		درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر طبقه بام	
	راستای Y	راستای X	راستای Y	راستای X
6	-4%	-3%	-24%	-18%
9	-15%	-13%	-36%	-35%
12	-10%	-11%	-22%	-24%

در تحلیل‌های انجام گرفته بر روی مدل‌های مورد نظر نتایج مناسبی در بهبود برش طبقات با استفاده از جداساز لرزه‌ای بدست آمده است. در این مقاله برش حداکثر هر طبقه پس از استخراج به برش پایه سازه‌ی گیردار تحت زلزله‌ی مورد مطالعه، تقسیم و تمامی برش‌ها بی‌بعد شده تا مقایسه‌ی بهتری در این زمینه صورت بگیرد. آنگاه میانگین برش حداکثر هر طبقه‌ی سازه، تحت اثر ۷ رکورد زلزله‌ی یاد شده و میانگین پارامتر محاسبه شده برای کل طبقات هر سازه، همانند قسمت‌های قبل، محاسبه و به منظور ارزیابی عملکرد جداساز لرزه‌ای در کنترل برش حداکثر طبقات به‌ویژه برش پایه‌ی سازه، میزان کارایی این سیستم کنترلی با الگوبرداری از روابط (۸) و (۹) محاسبه و در جدول (۱۱) آورده شده است. همچنین نمودار برش حداکثر طبقات هر سازه، ترسیم و در شکل (۷) ارائه گردیده است. با توجه به نمودارهای شکل (۷) و جدول (۱۱)، میزان کاهش این نیاز لرزه‌ای طبقات در سازه‌ی ۹ طبقه به‌ویژه برش پایه‌ی آن، به نسبت دو سازه‌ی دیگر و با در نظر گرفتن دو راستای مورد بررسی، بیشتر بوده است.

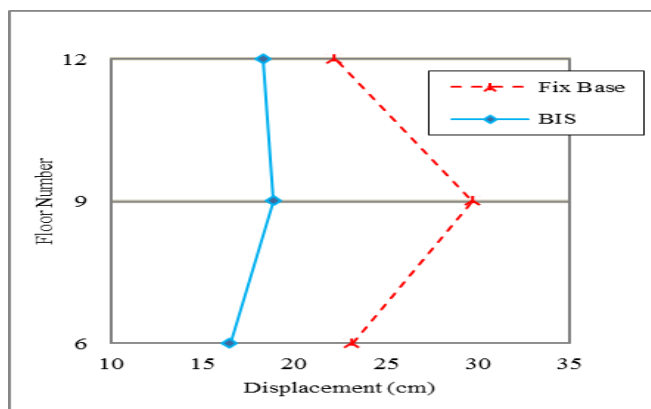


شکل ۷: برش حداکثر نرمال شده طبقات سازه‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل در راستای Y

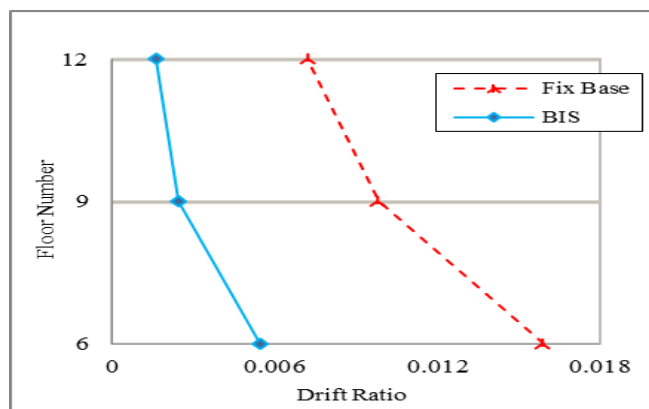
جدول ۱۱: تغییرات برش حداکثر سازه جداسازی شده نسبت به سازه گیردار تحت زلزله‌های دور از گسل

تعداد طبقات	درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر طبقات		درصد تغییرات میانگین تغییر مکان حداکثر طبقه پایه	
	راستای Y	راستای X	راستای Y	راستای X
6	-38%	-36%	-17%	-15%
9	-49%	-48%	-29%	-31%
12	-38%	-47%	-10%	-30%

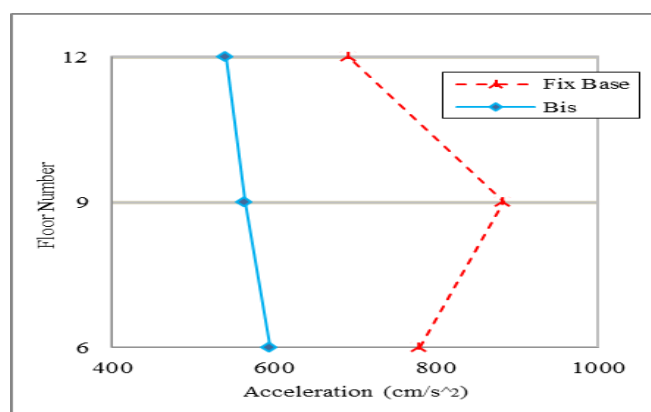
به منظور بررسی بهتر عملکرد جداساز لرزه‌ای با پی‌یود طرح ۲/۵ ثانیه در سازه‌های گیردار با نسبت لاغری (H/B) یکسان و ارتفاع‌های متفاوت، برای هر سازه میانگین پارامترهای مورد بررسی برای طبقه بام در جهت Y، تحت ۷ رکورد دور از گسل محاسبه و مبنای مقایسه قرار گرفته و نمودارهای مربوطه در شکل (۸) ارائه گردیده است. با توجه به جداول (۸) تا (۱۱) و نمودارهای شکل (۸) سیستم جداساز لرزه-ای با هدف کاهش بیشینه‌ی جابجایی، نسبت دریافت و شتاب طبقات و همچنین برش پایه‌ی حداکثر، در سازه‌ی ۹ طبقه نسبت به دو سازه-ی دیگر دارای عملکرد بهتری بوده است.



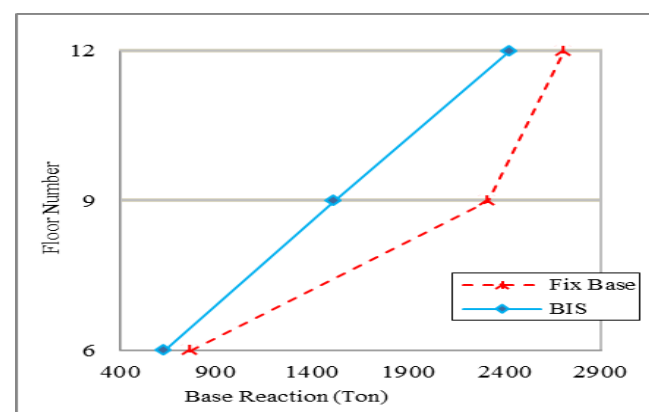
(ب)



(ف)



(ت)



(پ)

شکل ۸: نیازهای لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده با پی‌یود طرح یکسان، الف) جابجایی، ب) نسبت دریافت، پ) برش پایه، ت) شتاب

۵- نتیجه گیری

ارزیابی عملکرد جداسازهای لرزه‌ای در سازه با ارتفاع‌های مختلف و پلان ثابت، به علت کاهش نسبت لاغری و در نتیجه افزایش صلبیت سازه در سازه‌های کوتاه‌تر، اثربخشی مثبت جداساز را ارتقاء می‌بخشد لذا در این مقاله با ثابت فرض نمودن دو نسبت لاغری برای راستاهای X و Y، در تمامی مدل‌ها، عملکرد جداساز لرزه‌ای با پی‌یود طرح ۲/۵ ثانیه، در این‌گونه از سازه‌های فولادی با مدل‌سازی سه‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۱- جداساز لرزه‌ای با هدف کنترل مقادیر بیشینه‌ی تغییر مکان، نسبت دریافت، شتاب و برش طبقات از بین سازه‌های مورد مطالعه با نسبت لاغری یکسان و با در نظر گرفتن پاسخ در هر دو جهت X و Y، در سازه‌ی ۹ طبقه عملکرد بهتری را از خود نشان داده است. جداساز لرزه‌ای

در این سازه باعث کاهش بالای ۲۷ درصدی تغییر مکان، کاهش بالای ۷۰ درصدی دررفت و کاهش بالای ۳۱ درصدی شتاب طبقه‌ی بام سازه در هر دو راستا شده است. همچنین برش پایه‌ی سازه در هر دو راستای X و Y را بالای ۳۱ درصد کاهش داده است.

۲- بر مبنای مطالعات انجام گرفته در این زمینه با شرایط نسبتاً یکسان اما در نظر گرفتن پلان ثابت و تنها تغییر ارتفاع سازه، جداساز لرزه-ای در سازه‌های کوتاه‌تر به علت بالاتر بودن صلبیت نسبی، عملکرد بهتری را از خود نشان داده است اما در این مطالعه مشاهده گردید که با در نظر گرفتن نسبت لاغری یکسان، جداساز لرزه‌ای در سازه‌ی میانی (۱۲ طبقه) عملکرد بهتری را از خود نشان داده است.

۳- جداسازهای لرزه‌ای علاوه بر کاهش نیازهای لرزه‌ای طبقات مختلف سازه، از جمله تغییر مکان، دررفت، شتاب و برش حداکثر، به‌طور قابل توجهی آن‌ها را به یکدیگر نزدیک و اختلافشان را بسیار کم نموده است که این خود موجب پیشگیری از تمرکز خرابی در یک طبقه از سازه و در نهایت انهدام کل سازه می‌گردد.

۴- استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای در سازه‌های مورد مطالعه، با افزایش کافی دوره تناوب غالب سازه موجب کاهش شتاب جذب شده و در نتیجه کاهش نیازهای لرزه‌ای آن‌ها شده است البته میزان عملکرد مثبت آن به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر خصوصیات رکورد زلزله اعمالی بر سازه از جمله PGA، PGV و PGD مؤلفه‌های افقی، مدت تداوم مؤثر، پیود غالب و طیف شتاب زلزله قرار گرفته است که در این مقاله میانگین پاسخ‌ها تحت اثر رکوردهای دور از گسل، مبنای ارزیابی عملکرد این سیستم کنترلی قرار گرفته است.

مراجع

- [1] Buckle, IG. and Mayes, RL. (1990). Seismic isolation: history, application and performance- A world overview. *Earthquake Spectra*, 6(2), 161-202.
- [2] Nagarajaiah, S. and Reinhorn, AM. and Constantinou, MC. (1991). Nonlinear dynamic analysis of 3-D base isolated structures. *Structural Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 7, July.
- [3] Shin, TM. And Kim, KJ. (1997). Seismic response of submerged secondary systems on base-isolated structures. *Engineering Structures, Elsevier Science Ltd*, Vol. 19, No. 6, pp. 452-464.
- [4] Moroni, MO. and Sarrazin, M. and Boroschek, R. (1998). Experiments on base-isolated building in Santiago. *Engineering Structures, Elsevier Science Ltd*, Vol. 20, No. g, pp. 720-725.
- [5] Jangid, RS. (2000). Optimum frictional elements in sliding isolation systems. *Computers and Structures, Elsevier Science Ltd*, 76, 651-661.
- [6] Hong, WK. and Kim, HC. (2004). Performance of a Multi-Story Structure With a Resilient-Friction Base Isolation System. *Computers and Structures, Elsevier Science Ltd*, 82, 2271-2283.
- [7] Kaplan, H. and Aydılek, HA. (2006). Seismic analysis of a low-rise base-isolated structural system. *Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 25(2), 93-109.
- [8] Khoshnoudian, F. and Azizi, N. (2007). Nonlinear response of a torsionally coupled base-isolated structure. *Structures & Buildings*, 160 Issue SB4, 207-219.
- [9] Jangid, RS. (2007). Optimum lead-rubber isolation bearings for near-fault motions. *Engineering Structures, Elsevier Science Ltd*, 29, 2503-2513.
- [10] Matsagar, VA. and Jangid, RS. (2008). Base isolation for seismic retrofitting of structures. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 13, No. 4.
- [11] Shao, J. and Liu, J. and Zhao, J. (2012). Evaluation of various non-linear 3-D models for predicting wind flow around an isolated high-rise building within the surface boundary layer. *Building and Environment, Elsevier Science Ltd*, 57, 145-155.
- [12] Wang, SJ. and Chang, KC. and Hwang, JS. and Hsiao, JY. and Lee, BH. and Hung, YC. (2012). Dynamic behavior of a building structure tested with base and mid-story isolation systems. *Engineering Structures, Elsevier Science Ltd*, 42, 420-433.
- [13] Iuliis, MD. and Fealla, C. (2013). Effectiveness analysis of a semiactive base isolation strategy using information from an early-warning network. *Engineering Structures Elsevier Science Ltd*, 52, 518-535.
- [14] Ma, CF. and Zhang, YH. and Tan, P. and Kennedy, D. and Williams, FW. and Zhou, FL. (2013). Non-stationary seismic response analysis of base-isolated buildings with many hysteretic devices. *Computers and Structures, Elsevier Science Ltd*, 123, 39-47.

- [15] Khoshnoudian, F. and Ebrahimi, S. (2013). Lateral force distribution on base-isolated structures under near-field earthquakes. *Structures and Buildings*, 166, 342-354.
- [16] Jensen, HA. and Kusanovic, DS. (2014). On the effect of near-field excitations on the reliability-based performance and design of base-isolated structures. *Probabilistic Engineering Mechanics*, Elsevier Science Ltd, 36, 28-44.
- [17] Das, S. Gur, S. Mishra, SK. Chakraborty, S. (2015). Optimal performance of base isolated building considering limitation on excessive isolator displacement. *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, Vol. 11, No. 7, 904-917.
- [۱۸] آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم (۱۳۹۳). مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۱۹] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان، ویرایش سوم، (۱۳۹۲)، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان ایران.
- [۲۰] مقررات ملی ساختمان ایران، مبحث دهم، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، ویرایش چهارم، (۱۳۹۲)، دفتر تدوین مقررات ملی ساختمان ایران.
- [۲۱] راهنمای طراحی و اجرای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در ساختمان‌ها، نشریه شماره ۵۲۳، ۱۳۸۹، معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی.
- [۲۲] دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، نشریه شماره ۳۶۰، ۱۳۸۵، معاونت امور فنی سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی.