



## مقایسه تاثیر میراگر ویسکوالاستیک و جداگر لاستیکی هسته سربی (LRB) بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی نامنظم در ارتفاع

میثم محبوبی نیازمندی<sup>۱\*</sup>، حسین لطفی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> دکتری مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران  
(m.mahboubi@sutech.ac.ir)

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی مهرآیین، دانشگاه آزاد اسلامی، گیلان، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه امیرکبیر (پلی تکنیک)، تهران، ایران

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۷)

### چکیده

در مقاله حاضر، اثرات میراگر ویسکوالاستیک و جداساز لاستیکی هسته سربی بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی نامنظم در ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور تعدادی قاب فولادی دارای سیستم باربر قاب خمشی به صورت ۵، ۹ و ۱۳ طبقه مدل‌سازی شده و به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای آنها در سه حالت بدون میراگر و جداساز، مجهز به میراگر ویسکوالاستیک و مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی پرداخته شد. پس از مدل‌سازی سازه‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود PERFORM-3D، با انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی (پوش اور) و دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی غیرخطی)، تاثیر میراگر و جداساز بر رفتار سازه‌های فولادی نامنظم در ارتفاع مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که میراگر ویسکوالاستیک و جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB) عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی را بهبود می بخشد؛ استفاده از میراگر ویسکوالاستیک در سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی باعث افزایش سختی سازه و به تبع آن نیروی برش پایه در مقایسه با قاب خمشی تنها و سازه‌های مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی شده است. همچنین نتایج نشان داد که در تمامی سازه‌ها برش پایه ایجاد شده در سازه جداسازی شده بسیار کمتر از روش‌های دیگر کنترل است که این مسئله به علت ماهیت جداساز لرزه‌ای یعنی کاهش نیروی وارده به سازه می باشد.

### کلمات کلیدی

میراگر ویسکوالاستیک، جداگر لاستیکی هسته سربی (LRB)، سازه فولادی نامنظم، عملکرد لرزه‌ای، آنالیز پوش اور و تاریخچه زمانی.



# Comparison the Effect of Viscoelastic Damper and Lead-Rubber Bearing (LRB) Isolators on the Seismic Performance of Irregular Steel Buildings

Meisam Mahboubi Niazmandi<sup>1,2\*</sup>, Hossein Lotfi<sup>2</sup>

<sup>\*1</sup> Ph.D. in Geotechnical Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran (m.mahboubi@sutech.ac.ir)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Mehr-Aeen Higher Education Institute, Guilan, Iran

<sup>3</sup> M.Sc. Graduated, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir (Polytechnic) University, Tehran, Iran

(Date of received: 18/01/2023, Date of accepted: 16/04/2023)

## ABSTRACT

*In the present paper, the effects of viscoelastic dampers and lead-rubber bearing (LRB) isolators on the seismic behavior of irregular steel buildings at height have been investigated. To this aim, a number of steel frames with flexural frame bearing system were modeled as 5, 9 and 13 stories and their seismic performance was evaluated in three modes: (1) without damper and isolator, (2) equipped with viscoelastic damper and (3) equipped with rubber core lead separator. After modeling the buildings in PERFORM-3D finite element software, by performing nonlinear static (pushover) and nonlinear dynamic (nonlinear time history) analyzes, the effect of damper and separator on the behavior of irregular steel buildings has been investigated. The results showed that the viscoelastic dampers and LRB isolators improve the seismic performance of steel buildings; The use of viscoelastic dampers in steel buildings with flexural frame system has increased the rigidity of the building and consequently the base shear force compared to single flexural frame and buildings equipped with LRB isolators. The results also showed that in all buildings, the base shear created in the isolated structure is much less than other control methods, which is due to the nature of seismic separation, ie reducing the force applied to the building.*

## Keywords:

*Viscoelastic Dampers, Lead-Rubber Bearing (LRB) Isolators, Irregular Steel Buildings, Seismic Performance, Pushover and Time History Analysis.*



در هنگام وقوع زلزله، سازه تغییر مکان یافته و اجزای مختلف آن نیز تحت تاثیر تغییرشکل‌های به‌وجود آمده قرار می‌گیرد. در زلزله‌های خفیف پاسخ سازه و تغییرشکل‌های اجزای آن در محدوده خطی (الاستیک) باقی می‌ماند، اما در زلزله‌های شدید، پاسخ سازه از محدوده ارتجاعی فراتر رفته و سازه را دچار خرابی می‌نماید [۱]. بنابراین اولین گام در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های موجود، ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای آنهاست. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای بررسی میزان آسیب پذیری سازه‌ها ارائه شده که اکثر آنها مبتنی بر ارزیابی‌های کیفی و کمی سازه‌هاست. براساس ارزیابی‌های که بر روی سازه انجام می‌شود، ضعف‌ها و کاستی‌های آن تعیین می‌گردد و سپس به منظور اصلاح ضعف‌ها، انجام مقاوم سازی و بهسازی با استفاده از روش مناسب ضروری است. امروزه ضرورت مقاوم‌سازی سازه‌ها بر هیچ کس پوشیده نیست که باید مورد توجه بیشتری قرار گیرد [۲]. از اینرو در بیشتر اوقات برای تعیین روش‌های مقاوم سازی در ساختمان محدودیت‌هایی وجود دارد که تاثیر عمده‌ای بر روش‌های انتخابی برای مقاوم‌سازی می‌گذارند [۳]. سیستم‌های قاب خمشی و بادبندی و انواع آنها از جمله سیستم‌های سازه‌ای معمول به شمار می‌روند که جهت تحمل بارهای جانبی چون زلزله مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ این سیستم‌ها اگرچه بسیار مورد توجه بوده و استفاده از آنها امری شایع است، اما مشکلاتی مانند استفاده از مقاطع بزرگ و سنگین، جزئیات اجرایی زیاد، محدودیت‌های معماری، محدودیت در کاهش پاسخ سازه‌ها و مواردی از این دست، باعث شده که امروزه علاوه بر این سیستم‌ها، جهت کنترل ارتعاش در سازه، مهندسان به سایر سیستم‌های مستهلک کننده انرژی همچون استفاده از میراگرها و جداسازها روی بیاورند [۴، ۵، ۶]؛ استفاده از سیستم‌های کنترل نیمه‌فعال سازه همچون میراگر و جداسازهای لرزه‌ای، راهکار مناسبی برای کاهش اثرات زلزله روی سازه موجود می‌باشد و هنگامی که حفاظت از اعضا مد نظر طراحی باشد و یا تجهیزات مهمی در ساختمان موجود باشد، با بکارگیری این وسایل دینامیکی می‌توان انتقال انرژی موجود در حرکات ارتعاشی زمین را به ساختمان محدود نمود [۷]. در این روش هنگام وقوع زلزله تغییرشکل‌های ساختمان در تکیه‌گاه‌هایی که قابلیت تغییرشکل زیادی دارند متمرکز شده و سازه مانند جسم صلب با تغییرشکل‌های کوچک ارتعاش می‌کند. به عبارت بهتر، استفاده از این مستهلک کننده‌ها منجر به کاهش پاسخ تغییرمکان یا شتاب سازه در برابر بارهای جانبی زلزله می‌شود [۸]. در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با وسایل جاذب انرژی، باید نیازهای مقاومت آئین‌نامه‌ها را بدون این وسایل تامین نمود و با میرایی بهبود یافته توسط این وسایل، محدودیت تغییرمکان جانبی سازه را کنترل کرد [۹]. بسیاری از قاب‌های خمشی فولادی نیازهای مقاومتی سازه را تامین می‌کنند، ولی جهت کنترل تغییرمکان جانبی به فولاد بیشتری نسبت به نیاز مقاومتی احتیاج دارند. این موضوع در سازه‌های فولادی نامنظم در ارتفاع، به دلیل تفاوت در محل ایجاد مرکز جرم و مرکز ثقل سازه، نمود بیشتری می‌یابد. از اینرو با افزودن میراگرها در چنین سازه‌هایی، نیاز به مقاطع قوی‌تر به علت محدود شدن تغییرمکان از بین می‌رود و از سوی دیگر، با توجه به اتلاف انرژی توسط میراگرها، خرابی سازه در هنگام زلزله کاهش می‌یابد [۱۰]. موفقیت سیستم‌های کنترل انرژی همچون میراگر و جداساز لرزه‌ای در سازه‌ها، بستگی زیادی به انتخاب وسایل دینامیکی مناسب دارد، بطوری که اجزای مزبور انعطاف‌پذیری افقی کافی با حداقل نیروهای متمرکز و میرایی مناسب را در اجزای مختلف سازه فراهم نمایند [۱۱]. با توجه به مطالب مذکور، هدف تحقیق بررسی اثر استفاده از میراگر ویسکوالاستیک و جداساز لرزه‌ای هسته سربی<sup>۱</sup> (LRB) بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فلزی نامنظم در ارتفاع می‌باشد. به همین منظور سازه‌هایی با تعداد طبقات مختلف در سه حالت (۱) بدون تجهیزات مستهلک کننده انرژی، (۲) مجهز به میراگر ویسکو الاستیک<sup>۲</sup> و (۳) مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB) مدل‌سازی شده و با انجام آنالیز غیرخطی استاتیکی و دینامیکی بر روی آنها، نتایج حاصل مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت برای افزایش توانایی طراح در انتخاب سیستم کنترل موثر، کارایی میراگر ویسکوالاستیک و جداسازی لرزه‌ای باهم مقایسه شده است. این تحقیق از این جهت دارای اهمیت است که می‌توان از نتایج آن برای ارزیابی سازه‌های مجهز به سیستم جداساز لرزه‌ای و میراگر ویسکوالاستیک در ارتفاع‌های مختلف و تاثیر آنها بر روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها جهت انتخاب سیستم بهسازی لرزه‌ای بهتر، بهره برد.

<sup>1</sup> Lead-Rubber Bearing Isolators

<sup>2</sup> Viscoelastic Damper



## ۲- پیش زمینه

### ۲-۱- میراگر ویسکوالاستیک

کاربرد مواد ویسکوالاستیک برای کنترل ارتعاشات به سال ۱۹۵۰ بر می‌گردد زمانی که اولین بار بر روی هواپیما بعنوان وسیله ای برای کنترل خستگی ناشی از ارتعاشات، در بدنه هواپیما مورد استفاده قرار گرفت از آن زمان به بعد این مواد به شکل وسیعی در هواپیماها و سازه‌های فضایی استفاده شد [۲]. طبق تحقیقات به عمل آمده توسط Vader [۱۲] مشخص شد که بکارگیری میراگر ویسکوالاستیک در سازه‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۶۹ اتفاق افتاد که تعداد ۱۰۰۰۰ عدد از این میراگرها در برج‌های دوقلوی مرکز تجارت جهانی در شهر نیویورک امریکا جهت مقابله با ارتعاشات حاصل از باد استفاده شدند. کاربرد میراگرهای ویسکوالاستیک برای محدود کردن پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها ریشه در سالهای اخیر دارد. در این حالت افزایش میرایی بیشتری در مقایسه با اثرات ناشی از باد لازم است. علاوه بر آن انرژی ورودی به سازه ناشی از زلزله معمولاً محدود فرکانس وسیعی را دربرمی‌گیرد. بنابراین استفاده از مواد ویسکوالاستیک می‌تواند خیلی موثر باشد. مطالعات نظری و تجربی گسترده به عمل آمده در خصوص بررسی عملکرد لرزه‌ای این میراگرها منجر به اولین کاربرد آنها در تقویت لرزه‌ای یک ساختمان موجود در آمریکا در سال ۱۹۹۳ گردید [۱۳]. Lee و همکاران (۲۰۰۳) با ارائه تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های مجهز به میراگرهای ویسکوالاستیک، توانایی موثر این میراگرها در کاهش ارتعاشات جانبی سازه‌ها تحت زلزله‌های مختلف را نشان دادند [۱۴]. Ozan و Semih [۱۵] به کمک میراگرهای ویسکوالاستیک بعنوان وسائل جذب انرژی در ساختمان‌ها، مزایا و معایب افزودن آنها به سه مدل قاب فولادی ۷ طبقه، و قاب‌های بتن مسلح ۱۰ و ۲۰ طبقه را بررسی کردند و مطالعه تحلیلی تاریخچه زمانی ارائه دادند. نتایج تغییرمکان و شتاب مطلق بام ساختمان‌ها نشان داد که این میراگرها مثل پدال ترمز موجب کاهش شدید پاسخ لرزه‌ای متناسب میرایی قطعات ویسکوالاستیک می‌شوند. Min و همکاران [۱۶] با ارائه روند طراحی میراگرهای ویسکوالاستیک و بررسی نتایج آزمایشگاهی یک ساختمان فولادی ۵ طبقه یک دهانه با میراگرهای ویسکوالاستیک در طبقات ۱ و ۲، مشخصات مکانیکی میراگرها و دینامیک سازه تحت تحریک هارمونیک و ظرفیت میراگرهای ویسکوالاستیک برای ایجاد نسبت میرایی لازم را به‌دست آوردند و کاهش پاسخ دینامیکی به‌طور مطلوب را نشان دادند. Xu و همکاران [۱۷] با بررسی پارامترها و موقعیت بهینه میراگرهای ویسکوالاستیک، پاسخ خوبی را برای ساختمان بتنی با میراگرهای ویسکوالاستیک روی میز لرزه نشان دادند. Palmeri و Ricciardelli [۱۸] اقدام به آنالیز و تخمین عمر خستگی المان‌های سازه‌ای در ساختمان‌های بلندمرتبه دارای میراگرهای ویسکوالاستیک نموده‌اند. از تحقیقات اخیر انجام شده در این زمینه می‌توان به تحقیقات Lewandowski و Łasecka-Plura [۱۹] در خصوص آنالیز حساسیت طراحی سازه‌ها با کمک میراگرهای ویسکوالاستیک، Burlon و همکاران [۲۰] جهت آنالیز دقیق پاسخ فرکانس بارهای محوری با میراگرهای ویسکوالاستیک، Lewandowski و Pawlak [۲۱] در زمینه ارائه روش طیف پاسخ برای سازه‌های دارای میراگرهای ویسکوالاستیک با استفاده از روش مشتقات کسری، مطالعه Chang و همکاران [۲۲] در زمینه طراحی لرزه‌ای پارامترهای میراگرهای جرمی تنظیم شده با استفاده از الگوریتم کنترل فعال، مقاله Batou و Adhikari [۲۳] در خصوص بهینه‌سازی پارامترهای طراحی میراگرهای ویسکوالاستیک تنظیم شده، تحقیق Zhang و همکاران [۲۴] در ارائه روشی برای طراحی پارامترهای میراگر ویسکوالاستیک بر اساس منحنی کاهش پاسخ الاستیک-پلاستیک اشاره نمود.

### ۲-۲- جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB)

سیستم جداساز لاستیکی هسته سربی از تکیه‌گاه لاستیکی لایه لایه با یک سیلندر مرکزی از سرب تشکیل شده و انعطاف‌پذیری جانبی آن توسط لاستیک تأمین می‌شود. در مدل ریاضی چنین سیستمی یک عنصر هیسترتیک با فنر و میراکننده به‌طور موازی عمل می‌کند. این نوع از جداسازها در آوریل ۱۹۷۵ توسط رابینسون اختراع گردید [۲۵]. با توجه به تحقیقات پروایدکیس و بلیکلی، جداسازهای مختلفی شامل جداسازهای الاستومریک (با و بدون هسته سربی) تکیه‌گاه‌های لغزشی یا اصطکاکی و تکیه‌گاه‌های غلطکی به‌وجود آمده و در ۲۰ سال گذشته عملاً در طراحی ساختمان‌ها استفاده شده‌اند. در بین سیستم‌های جداسازی پایه مختلف



تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی (LRB) در نیوزیلند، ژاپن و آمریکا زیاد استفاده شده است. تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی شامل یک تعداد لایه ورق‌های فولادی و لاستیکی با میله‌های سربی است که در سوراخ‌هایی جاسازی می‌شود، هسته سربی در برش تغییرشکل می‌دهد و یک پاسخ دوخطی به وجود می‌آورد، همچنین در مقابل باد و زلزله‌های خفیف یک صلبیت اولیه به وجود می‌آورد. اولین ساختمان جداسازی شده با تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی در نیوزیلند در سال ۱۹۸۱ بود. و به دنبال آن در ساختمان‌های دیگری در کشورهای مختلف استفاده شد. ساختمان‌های جداسازی شده با تکیه‌گاه‌های لاستیکی سربی در زلزله‌های ۱۹۹۴ نورث‌ریچ و ۱۹۹۵ کوبه عملکرد خیلی خوبی در حین زلزله از خود نشان دادند. شماری از زلزله‌شناسان ساختمان‌های جداسازی شده در تحریکات نزدیک گسل را آسیب پذیر دانسته‌اند. ساختمان‌های جداسازی شده ممکن است به خاطر جابجایی‌های بزرگ جداساز در اثر دوره تناوب بلند مربوط به تحریکات نزدیک گسل عملکرد ضعیفی از خود نشان دهد که منجر به علاقه زیاد محققان به این موضوع شده است [۲۶]. رضوی سطوتی [۵] با مطالعه تأثیر شکل و ابعاد بر رفتار جداسازهای لاستیکی لایه ای به این نتیجه دست یافت که با افزایش ضخامت لایه‌های لاستیک، تغییرمکان افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی به صورت غیرخطی و افزایشی بیشتر می‌شود. همچنین نتیجه می‌شود که افزایش تغییرمکان افقی، قائم و چرخش صفحه فوقانی در حالتی که ضخامت صفحات فولادی کاسته می‌شود بسیار بیشتر از حالتی است که ضخامت صفحات فولادی ثابت است و از روی این نتایج می‌توان تأثیر بسزای ضخامت لایه‌های لاستیک و فولاد را بر روی تغییرمکان‌های افقی قائم و چرخش صفحه فوقانی تکیه‌گاه درک نمود. علاوه بر این، Estiri [۲۷] با بررسی اثر جداسازهای لاستیکی هسته سربی در ساختمان‌های فولادی با مهاربند همگرا به این نتیجه رسید که با افزایش دوره تناوب جداساز، شتاب مطلق بام و برش پایه کاهش می‌یابند؛ در حالی که تغییرمکان جداساز افزایش می‌یابد. تغییرات دررفت روسازه نیز از قانون مشخصی پیروی نمی‌کند. همچنین تعداد طبقات تأثیر چندانی بر روی دررفت روسازه در دوره تناوب یکسان جداسازها ندارد. از دیگر تحقیقات انجام شده در این زمینه، می‌توان به مطالعه کلانتری [۲۸] در بررسی اثر جداسازهای لرزه‌ای بر جابجایی طبقات و تشکیل مفاصل پلاستیک، مطالعه Torabi [۲۹] در بررسی اثر جداسازهای لاستیکی هسته سربی در ساختمان‌های فولادی با مهاربند واگرا و مطالعه Narouei [۳۰] جهت ارزیابی اثر جداساز لاستیکی هسته سربی بر سطح عملکرد سازه مهاربندی شده هم‌محور با استفاده از تحلیل پوش‌اور اشاره نمود. از سایر تحقیقات اخیر در ارتباط با کاربرد جداساز LRB می‌توان به مطالعات Shinozuka و همکاران (۲۰۱۵) در رابطه با اثر آلیاژ حافظه دار شکلی بر تحمل لرزه‌ای جداسازهای LRB [۳۱]، طراحی وسیله ای برای ارزیابی مقاومت کششی LRB در سازه‌ها توسط Hu و همکاران [۳۲]، Shoaiei و همکاران (۲۰۱۸) طراحی لرزه‌ای مبتنی بر قابلیت اطمینان سازه‌های دارای جداساز غیرالاستیک مجهز شده با جداساز لاستیک هسته سربی، Zeynali و همکاران [۳۳] تحلیل عددی و آزمایشگاهی میراگرهای لاستیکی هسته سربی در قاب‌های مهاربندی شده متمرکز شورون، Shoaiei و Mahsuli [۳۴] در رابطه با طراحی مبتنی بر قابلیت اطمینان سازه‌های قاب خمشی مجهز به سیستم جداسازهای لاستیکی هسته سربی، مطالعه Kim و همکاران [۳۵] آزمایشگاهی رفتار لرزه‌ای جداساز لاستیکی هسته سربی با توجه به حرکات ورودی افقی دوجته، Eem و Hahm [۳۶] در خصوص ارائه مدل غیرخطی برای ارزیابی کرنش‌های زیاد جداساز لاستیک هسته سربی برای زلزله‌های فراتر از زلزله طرح اشاره نمود. مطالعات گسترده‌ای که تاکنون پیرامون بهسازی سازه‌ها با انواع سیستم‌های جاذب انرژی همچون میراگرها و جداسازها به انجام رسیده، دلالت بر کارایی مناسب مکانیزم‌های مختلف کنترل لرزه‌ای غیرفعال سازه‌ها به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای مقابله با نیروهای زلزله دارد. همانگونه که بیان شد، با بهره‌گیری از این تجهیزات مکانیکی، ضمن افزایش سختی سازه بخصوص در سازه‌های نامنظم، قابلیت اتلاف انرژی هیستریزس سازه نیز افزایش یافته و رفتار غیرارتجاعی آن در مقابل تحریک شدید زمین‌لرزه کاهش می‌یابد. همچنین در سازه‌های با اهمیت زیاد می‌توان با انتخاب مناسب پارامترهای طراحی این نوع تجهیزات، می‌توان از ورود اعضای اصلی سازه به محدوده رفتار غیرارتجاعی که سبب خرابی‌های موضعی در نقاط مختلف سازه می‌شود، جلوگیری به عمل آورد و یا آن را به کمترین مقدار ممکن رسانید. از آنجایی که بیشتر مطالعات انجام شده در گذشته محدود به استفاده از یکی از سیستم‌های فوق در سازه‌ها و یا کارهای آزمایشگاهی بر روی استفاده از این سیستم‌ها در یک سازه خاص به صورت مجزا بوده است، لذا انجام پژوهشی عددی برای تعیین عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی نامنظم در ارتفاع با تعداد طبقات مختلف و مقایسه رفتار آنها در حالت



مجهاز به میراگر و جداساز با حالت بدون استفاده از این وسایل جاذب انرژی، ضروری می‌نماید. بر این اساس در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با مدلسازی تعدادی سازه دارای سیستم قاب خمشی فولادی نامنظم در ارتفاع، سطوح عملکرد آنها در حالت مسلح به دو نوع مستهلک کننده انرژی (میراگر ویسکوالاستیک و جداساز LRB) در مقایسه با حالت بدون استفاده از این تجهیزات، از طریق تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار بگیرد.

### ۳- مدلسازی

به منظور شناخت رفتار لرزه‌ای سیستم‌های سازه‌ای، نیاز به بررسی رفتار غیرخطی آنها می‌باشد که برای دستیابی به این مهم می‌توان از نرم‌افزارهای مختلفی که توانایی انجام آنالیزهای غیرخطی را دارا هستند، بهره برد. لیکن عموماً برای استفاده از نرم‌افزارهای مورد نظر نیاز به طراحی اعضای سازه‌ای در مرحله مقدماتی است و پس از طراحی اعضای سازه‌ای و برآورده شدن ملزومات آیین‌نامه‌ای، از مقاطع و مشخصات هندسی اعضای مورد نظر در آنالیزهای غیرخطی استفاده می‌گردد. با توجه به بهبود روند طراحی سازه‌ها و همچنین سهولت انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای و میراگر در نرم‌افزار PERFORM-3D (Ver.5)، در مطالعه حاضر، جهت مدلسازی‌ها از این نرم‌افزار بهره گرفته شده است. در ادامه، پس از معرفی مشخصات سازه‌های مختلف، ابتدا به طراحی مدل‌های مورد استفاده پرداخته شده و سپس آنالیزهای غیرخطی بر روی مدل‌ها انجام شده است.

#### ۳-۱- مشخصات سازه‌های مدل شده

سازه‌های مورد مطالعه در این مقاله، از نوع فولادی و با تعداد طبقات مختلف (۵، ۹ و ۱۳ طبقه) با سیستم باربر جانبی قاب خمشی متوسط فولادی و نامنظم در ارتفاع از نوع هندسی می‌باشند. سازه‌ها بر مبنای دستورالعمل طراحی ساختمان‌های دارای جداساز لرزه‌ای تحلیل شده است. بارگذاری لرزه‌ای سازه‌ها بر اساس خاک نوع II و منطقه با لرزه‌خیزی خیلی زیاد انجام شده است و طراحی بر اساس آیین‌نامه IS-360-10 LRFD [۲۸-۲۹] صورت گرفته است. فولاد مصرفی از نوع ST37 با تنش تسلیم و تنش نهایی بترتیب،  $240 \text{ kg/cm}^2$  و  $370 \text{ kg/cm}^2$  بوده و مقاومت فشاری بتن نیز  $250 \text{ kg/cm}^2$  در نظر گرفته شده است. کاربری سازه‌ها مسکونی و بنابراین بر اساس مقررات استاندارد ACI، مقدار بار زنده در طبقات  $200 \text{ kg/m}^2$  و بار برف  $150 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. سیستم باربر کف طبقات، سقف تیرچه بلوک بتنی انتخاب گردیده است. مساحت سازه  $575$  متر مربع است که ابعاد آن  $23 \times 25$  متر است. طول دهانه‌ها در جهت X عبارتند از ۴، ۶، ۳، ۶ و ۴ متر و در جهت Y عبارتند از ۴، ۵، ۳/۵، ۴/۵ و ۳ متر که ارتفاع طبقه اول همه سازه‌ها ۲/۸ متر است و ارتفاع کلیه طبقات ۳/۲ متر است، همچنین ارتفاع خرپشته ۲/۴ متر در نظر گرفته شده است. سازه ۵ طبقه تا طبقه سوم منظم است، اما از طبقه چهارم به یک سازه نامنظم در ارتفاع تبدیل می‌شود. همچنین سازه‌های ۹ و ۱۳ طبقه نیز بترتیب در طبقه ششم و دهم در ارتفاع نامنظم می‌شوند. همچنین از ذکر جزئیات مربوط به مقدار بار مرده صرف‌نظر شده است. اطلاعات سیستم سازه‌ها و مقاطع استفاده شده در مدلسازی آنها، بترتیب در جداول ۱ و ۲ آمده است. برای تعیین پارامترهای لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه، با بهره‌گیری از آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم [۳۷])، نتایج برای سازه‌های معمولی و مجهز به میراگر و همچنین برای سازه‌های مجهز به جداساز در جدول ۳ آمده است.



جدول ۱. اطلاعات سیستم سازه‌ها.

ارتفاع سازه (متر)	سیستم سازه‌ای مورد استفاده	تعداد طبقات	نام مدل
۱۵/۶	قاب خمشی فولادی متوسط	۵	A1
۱۵/۶	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به میراگر ویسکوالاستیک	۵	A2
۱۶/۱	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی	۵	A3
۲۸/۴	قاب خمشی فولادی متوسط	۹	B1
۲۸/۴	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به میراگر ویسکوالاستیک	۹	B2
۲۸/۹	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی	۹	B3
۴۱/۲	قاب خمشی فولادی متوسط	۱۳	C1
۴۱/۲	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به میراگر ویسکوالاستیک	۱۳	C2
۴۱/۷	قاب خمشی فولادی متوسط مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی	۱۳	C3

جدول ۲. مقاطع استفاده شده در مدل‌های سازه‌ای.

الف) سازه ۵ طبقه			ب) سازه ۹ طبقه			ج) سازه ۱۳ طبقه		
تیر	ستون	طبقه	تیر	ستون	طبقه	تیر	ستون	طبقه
2IPE240 + PL10	TUBO 40×2	۲ تا ۱	2IPE270 + PL10	TUBO 55×2	۲ تا ۱	2IPE270 + PL10	TUBO 70×2	۲ تا ۱
2IPE240 + PL10	TUBO 40×1.5	۳	2IPE270 + PL10	TUBO 40×2	۳	2IPE270 + PL15	TUBO 60×2	۳
IPE270 + PL10	TUBO 30×1	۴	2IPE240 + PL10	TUBO 40×2	۴ تا ۶	2IPE270 + PL10	TUBO 60×2	۴ تا ۵
IPE270	TUBO 30×1	۵	IPE270	TUBO 30×2	۷ تا ۹	2IPE270 + PL10	TUBO 55×2	۶ تا ۸
						2IPE240 + PL10	TUBO 40×2	۹ تا ۱۱
						IPE270 + PL10	TUBO 30×2	۱۲ تا ۱۳

جدول ۳. پارامترهای لرزه‌ای برای سازه‌های مختلف.

نوع سازه	سازه‌ها	ارتفاع سازه (H)	$T_0$	$T_S$	زمان تناوب اصلی نوسان (T)	ضریب شکل طیف ( $B_I$ )	ضریب اصلاح طیف (N)	ضریب بازتاب ساختمان (B)
سازه‌های معمولی و مجهز به میراگر	۵ طبقه	15.6	0.1	0.5	0.623	1.99	1.0256	2.041
	۹ طبقه	28.4	0.1	0.5	0.984	1.27	1.0968	1.392
	۱۳ طبقه	41.2	0.1	0.5	1.3	0.961	1.16	1.114
سازه‌های مجهز به جداساز	۵ طبقه	16.1	0.1	0.5	0.643	1.994	1.0286	1.999
	۹ طبقه	28.9	0.1	0.5	0.997	1.253	1.0994	1.377
	۱۳ طبقه	41.7	0.1	0.5	1.31	0.954	1.162	1.108

### ۳-۲- طراحی میراگر ویسکوالاستیک

مشخصات فنی میراگرهای ویسکوالاستیک عموماً توسط سه پارامتر مدول ذخیره<sup>۳</sup> ( $G'$ )، مدول کاهش<sup>۴</sup> ( $G''$ ) و فاکتور کاهش<sup>۵</sup> ( $\eta$ ) بیان می‌گردد. در این مطالعه از ماده ویسکوالاستیک با نام تجاری 3M ISD110 به‌عنوان میراگر ویسکوالاستیک استفاده شده است که مشخصات فنی آن طبق روابط زیر بیان می‌گردد [۳۸].

<sup>3</sup> Storage Modulus

<sup>4</sup> Loss Modulus

<sup>5</sup> Loss Factor



$$G' = e^{10.17443} T^{-3.10305} F^{0.475466} \quad (1)$$

$$\eta_v = 1.2 \quad (2)$$

روش انرژی کرنشی در تعیین نسبت میرایی ( $\zeta_i$ )، به صورت وسیع توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. این روش در تعیین نسبت میرایی سازه‌های دارای میراگر ویسکوالاستیک نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. اگر نسبت میرایی سازه اولیه مقدار ناچیزی باشد، مقدار نسبت میرایی سازه‌ای که توسط میراگر ویسکوالاستیک مقاوم سازی (طراحی) می‌گردد، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\zeta_i = \frac{\eta_{v-b}}{2} \left( 1 - \frac{\phi_i^T K_o \phi_i}{\phi_i^T K_s \phi_i} \right) \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $\zeta_i$  نسبت میرایی مود  $i$ ام سازه،  $K_o$  ماتریس سختی سازه بدون میراگر ویسکوالاستیک،  $K_s$  ماتریس سختی سازه که با استفاده از میراگر ویسکوالاستیک مقاوم سازی (طراحی) شده،  $\phi_i$  شکل مودی مود  $i$ ام سازه مقاوم سازی (طراحی) شده با استفاده از میراگر ویسکوالاستیک و  $\eta_{v-b}$  ضریب اتلاف موثر میراگر ویسکوالاستیک بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\eta_{v-b} = \frac{\frac{K_b}{K_v}}{\eta_v^2 + \frac{K_b}{K_v} + 1} \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $\eta_v$  ضریب اتلاف میراگر ویسکوالاستیک،  $K_b$  سختی بادبند متصل به میراگر و  $K_v$  سختی میراگر می‌باشند. اگر از تغییراتی که در اثر اضافه کردن میراگر ویسکوالاستیک در شکل مودی سازه به وجود می‌آید صرف نظر گردد، می‌توان نسبت میرایی را از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$\zeta_i = \frac{\eta_{v-b}}{2} \left( 1 - \frac{\omega_i^2}{\omega_{si}^2} \right) \quad (5)$$

در رابطه فوق  $\omega_i$  و  $\omega_{si}$  به ترتیب  $i$ امین فرکانس طبیعی سازه‌ی بدون میراگر و سازه‌ی با میراگر هستند. روش گام به گام طراحی میراگر ویسکوالاستیک برای سازه‌ها در زیر شرح داده شده است.

**گام اول:** تعیین نسبت میرایی مورد نیاز برای سازه (رسیدن به نسبت میرایی ۱۵ درصد هدف).

**گام دوم:** فرض اولیه برای تعیین نسبت سختی بادبند به سختی میراگر ( $\frac{K_b}{K_v} = 40$ )

**گام سوم:** تعیین  $K_{v-b}$  با استفاده از روش انرژی کرنشی (طبق رابطه ۴)

**گام چهارم:** محاسبه سختی هر یک از میراگرهای ویسکوالاستیک طبق رابطه زیر:





$$K_v = \frac{\left[ (1 + \eta_v^2) + \frac{K_b}{K_v} \right] [1 + \eta_{v-b}^2]}{\frac{K_b}{K_v} (1 + \eta_v^2)} \times K_{v-b} \quad (6)$$

**گام پنجم:** تعیین سختی بادبند با توجه به گام پنجم و فرض انجام شده در گام دوم (با توجه به سختی به دست آمده برای بادبند یا میله و با توجه به اینکه بادبندها به صورت قطری در نظر گرفته می شود) مساحت بادبندها بر حسب طول بادبند (L) به صورت رابطه ۷ به دست می آید. جهت اطمینان از طول بادبندهای طبقه دوم به بعد برای محاسبه استفاده شده است شایان ذکر است در جهت اطمینان از کاهش طول ناشی از نصب میراگر در طول بادبندها صرف نظر شده است.

$$K_b = \frac{EA}{L} \times \cos^2 \theta \quad (7)$$

**گام ششم:** تعیین ابعاد ماده ویسکوالاستیک، تعیین ضخامت ماده ویسکوالاستیک با توجه به بیشینه مقدار تغییرشکلی که می تواند انجام دهد، محاسبه می گردد. مقدار دررفت طبقات به ۲ درصد ارتفاع هر طبقه محدود می گردد. مقدار بیشینه مجاز تغییرمکان هر میراگر از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\Delta_{max} = 0.02h \quad (8)$$

با فرض اینکه میراگر قرار است در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد عمل نماید و حداکثر کرنش مجاز ماده ویسکوالاستیک در این دما ۱۵۰٪ باشد، ضخامت ماده ویسکوالاستیک به صورت زیر محاسبه می گردد.

$$t = \frac{\Delta_{max}}{1.5} \quad (9)$$

در نهایت سطح ماده ویسکوالاستیک، طبق رابطه ۱۰ قابل محاسبه است.

$$A = \frac{K_v t}{NnG'} \quad (10)$$

**گام هفتم:** تعیین ضریب میرایی ماده ویسکوالاستیک (C)، ضریب میرایی ماده ویسکوالاستیک به ابعاد ماده ویسکوالاستیک، مدول اتلاف و فرکانس بارگذاری وابسته است که از رابطه ۱۱ محاسبه می گردد. شایان ذکر است که رابطه زیر تنها زمانی کاربرد دارد که سازه تحت تاثیر بار هارمونیک قرار گرفته است، لیکن در مراجع عنوان شده است در صورتیکه محدوده فرکانسی بار وارده از وسعت کمی برخوردار باشد نیز می توان از این رابطه استفاده نمود. در ارتباط با بارگذاری زلزله، شایسته است که فرکانس غالب زلزله مورد استفاده قرار گیرد، اما یادآوری این نکته ضروری است که شرایط بحرانی زمانی اتفاق می افتد که فرکانس غالب زلزله نزدیک به فرکانس طبیعی سازه بوده و باعث ایجاد تشدید در سازه گردد.



$$G' = e^{10.17443 T - 3.10305 F} 0.475466 \quad (11)$$

با فرض استفاده از ماده ویسکوالاستیک 3M ISD110 در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد و فرکانس به دست آمده با کرنش ۲۰ درصد، مشخصات فنی ذکر شده مقادیر زیر را دارا خواهند بود.

$$G' = 0.513 \text{ Mpa } \eta_v = 1.2 \quad (12)$$

$$G'' = \eta_v G' = 1.2 \times 0.513 = 0.616 \text{ Mpa} \quad (13)$$

$$C = \frac{G'' A}{F_{S1} t} \quad (14)$$

نتایج مربوط به طراحی میراگر برای سازه‌های مختلف ۵، ۹ و ۱۳ طبقه در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. خصوصیات میراگرهای ویسکوالاستیک طراحی شده در سازه‌های مورد مطالعه.

سازه‌ها / پارامترها	۵ طبقه	۹ طبقه	۱۳ طبقه
سختی اتلاف موثر میراگر (K <sub>v-b</sub> )	۷۷۰۷۲۰	۹۵۳۳۸۵	۱۷۸۴۱۹۱
سختی میراگر (K <sub>v</sub> )	۷۶۳۸۳۲	۹۴۴۸۶۳	۱۷۶۸۲۴۳
سختی میله یا بادبند (K <sub>b</sub> )	۳۰۵۵۳۲۸۰	۳۷۷۹۴۵۲۰	۷۰۷۲۹۷۲۰
سطح مقطع میله یا بادبند (A <sub>S</sub> )	۶۱/۲	۷۶	۱۴۲
ضخامت مواد ویسکوالاستیک (t)	۵	۵	۵
سطح مقطع میراگر ویسکوالاستیک (A)	۱۸۶۲	۲۳۰۳	۴۳۰۸
میرایی (C)	۹۱۷۵۹۴	۱۴۵۲۰۰۰	۲۱۹۷۷۰۴

### ۳-۳- طراحی جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB)

تکیه‌گاه‌های لاستیکی با هسته سربی با نمایش رفتاری دو خطی با نرم شدگی تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، عملکرد مطلوبی در زمینه کنترل توام لرزه‌های خفیف و شدید از خود نشان داده‌اند. هسته سربی این تکیه‌گاه‌ها به همراه سختی بخش لاستیکی که در مقایسه با سختی بخش سربی بسیار اندک است. تامین‌کننده سختی اولیه مورد نیاز در نمودار نیرو-تغییرمکان این تکیه‌گاه است. با این دیدگاه طراحی این نوع تکیه‌گاه‌ها را می‌توان به دو بخش (۱) طراحی هسته سربی و (۲) طراحی بخش لاستیکی تقسیم کرد. همچنین توصیه‌های زیر در مورد نحوه طراحی این جداساز لازم به اجرا می‌باشد.

۱- تعیین وزن سازه و نیروی قائم بر روی جداساز (PDL+LL): در تعیین بار قائم بر روی جداساز، ترکیب بار مرده، بار زنده و بار لرزه‌ای باید مورد توجه قرار گیرد.

۲- تعیین دوره تناوب طبیعی هدف سازه جداساز شده (T<sub>D</sub>)

۳- با داشتن دوره تناوب طبیعی و وزن سازه، سختی جانبی موثر حداقل سیستم جداساز K<sub>eff</sub> طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$K_{eff} = \frac{K_{Dmin}}{N} \quad (15)$$



به طوریکه در این رابطه  $N$  تعداد ستون و  $W$  وزن سازه بوده و  $K_{Dmin}$  طبق رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$K_{Dmin} = \frac{4\pi^2 \times w}{g \times T_D^2} \quad (16)$$

در رابطه فوق،  $T_D$  پریود موثر سازه است که طبق آیین نامه طراحی سه برابر پریود اصلی است (رابطه ۱۶).

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{w}{K_{Dmin} \times g}} \quad (17)$$

۴- تعیین حداکثر مقادیر تغییرشکل نسبی برشی ( $\gamma_{eff}$ )، مدول یانگ ( $E$ )، مدول برشی ( $G$ ) برای لاستیک با استفاده از نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌ها. با فرض استفاده از لاستیک IRHD-50 خصوصیات آن بترتیب شامل مدول یانگ  $220 \text{ N/cm}^2$ ، مدول برشی  $64 \text{ N/cm}^2$  و ضریب سختی  $0.73$  می‌باشد.

۵- تعیین میرایی معادل موثر  $\beta_{eff}$  با روش درونیابی (طبق مرجع [۳۹])

۶- تعیین تغییرمکان طرح ( $D_D$ ) با استفاده از روابط و روش‌های مندرج در دستورالعمل (رابطه ۱۸).

$$D_D = \frac{(g/4\pi^2)A * (S + 1)T_S^{\frac{2}{3}} * T_D^{\frac{4}{3}}}{B_D} \quad (18)$$

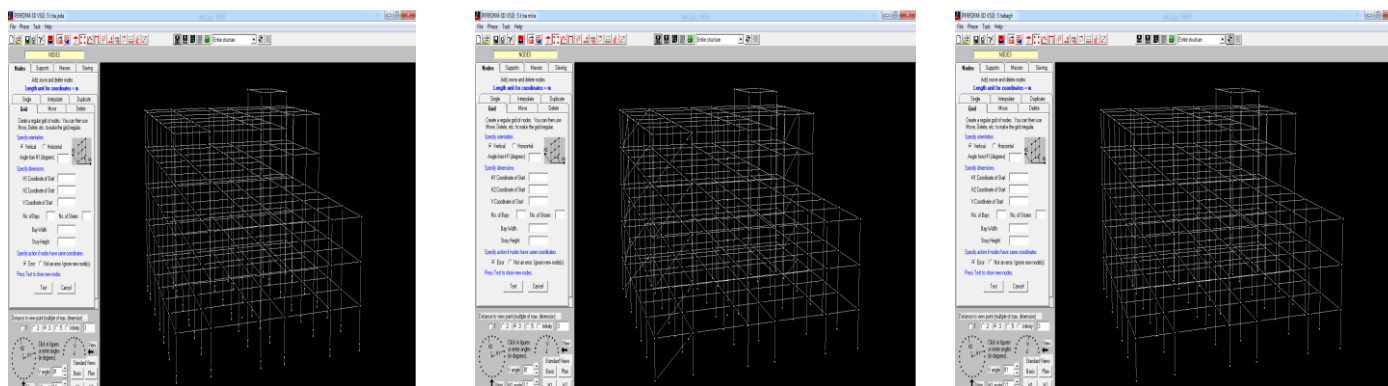
نتایج مربوط به طراحی جداساز برای سازه‌های مختلف ۵، ۹ و ۱۳ طبقه در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. خصوصیات جداگرهای LRB طراحی شده در سازه‌های مورد مطالعه.

سازه‌ها	۵ طبقه	۹ طبقه	۱۳ طبقه
پارامترها			
$K_{eff}$ سختی موثر هر جداساز	۴۹۳۵۰	۴۰۵۲۶	۳۵۷۱۹
$D_D$ تغییرمکان طراحی (cm)	۲۶	۴۴	۶۳
$Q_d$ مقاومت مشخصه	۳۳۹۴	۴۴۲۳	۵۳۰۲
$k_d$ سختی اولیه	۳۶۲۹۶	۳۰۴۵۱	۲۶۸۱۴
$k_{pd}$ سختی ثانویه	۱۳۰۵۴	۱۰۰۷۵	۸۹۰۵
$A$ سطح مقطع کل هر جداساز $\text{cm}^2$	۹۶۲	۱۵۲۰	۲۱۰۰
$D_y$ تغییرمکان تسلیم هر جداساز (cm)	۱/۳۸	۱/۶۱	۲/۳
$F_y$ تنش تسلیم جداساز	۳۷۶۸	۴۹۲۴	۶۲۲۷
$F_u$ تنش نهایی جداساز	۱۲۸۳۱	۱۷۸۳۱	۲۲۵۰۳



پس از انجام محاسبات مذکور، سازه‌های ۵ طبقه در سه حالت مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. سازه‌های ۹ و ۱۳ طبقه هم به همین شکل مدلسازی شده‌اند و به منظور خلاصه‌سازی، از ارائه تصویر مدل‌های ساخته شده آنها صرف‌نظر شده است. در ادامه نتایج حاصل از آنالیزهای غیرخطی از نرم‌افزار استخراج شده و عملکرد سازه‌ها با یکدیگر مقایسه شده و نتایج به صورت نمودارها و جداول مختلف ارائه شده است.



(الف) بدون میراگر و جداساز (ب) مجهز به میراگر ویسکوالاستیک (ج) مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی

شکل ۱: مدلسازی سازه فولادی قاب خمشی ۵ طبقه نامنظم در حالت‌های مختلف.

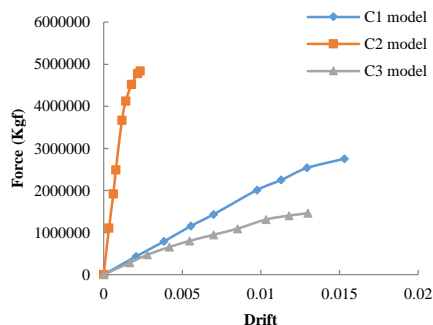
#### ۴- تحلیل داده ها

##### ۴-۱- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش اور)

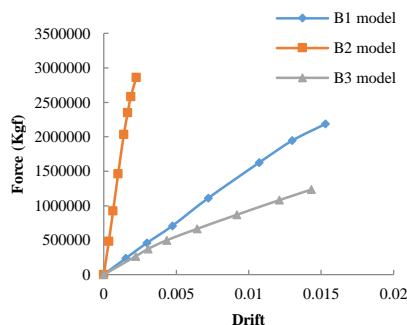
پس از مدلسازی سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه فولادی با استفاده از نرم‌افزار PERFORM-3D تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی آنها انجام شد. در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی پرداخته شده است.

##### ۴-۱-۱- نمودار ظرفیت سازه ها (پوش اور)

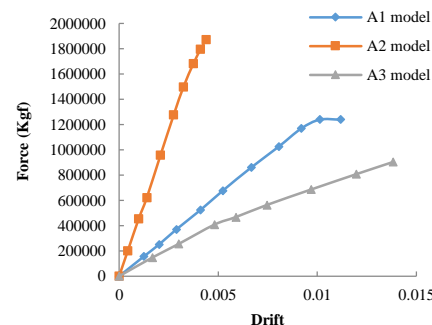
در این قسمت به مقایسه نمودارهای ظرفیت سازه پرداخته شده است. نتایج مربوطه در شکل ۲ بترتیب برای سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه و همچنین جدول ۷ آمده است. همانطور که طبق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوالاستیک به دلیل افزایش سختی که در سیستم اعمال می‌کنند برش پایه سازه را افزایش می‌دهند. برش پایه در سازه‌های فولادی با سیستم باربر جانبی قاب خمشی مجهز به میراگر ویسکوالاستیک با افزایش ارتفاع، افزایش می‌یابد، اما ویژگی بارز میراگر ویسکوالاستیک این است که تغییرمکان را به شدت کاهش می‌دهد. همچنین سازه‌های مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی به دلیل جداسازی سازه با فونداسیون، قسمت زیادی از نیروی برش پایه را تلف می‌کند و اجازه نمی‌دهد که نیروی برش پایه به سازه آسیب برساند. در واقع جداساز این نیرو را جذب می‌کند و قسمت کمی از آن را به سازه انتقال می‌دهد و این نشان از قابلیت فوق العاده این سیستم اتلاف انرژی است. از لحاظ تغییرمکان هم در مقایسه با سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک ضعیفتر نشان می‌دهد و جابجایی سازه جداساز شده بیشتر از سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک است. به عبارت بهتر از نظر برش پایه، سیستم مجهز به جداساز LRB عملکرد بهتری داشته، اما از نظر تغییرمکان تسلیم، عملکرد سازه دارای میراگر ویسکوالاستیک بهتر بوده است. علاوه بر این، نتایج مربوط به نمودار ظرفیت سازه‌ها به صورت عددی در جدول ۶ ارائه شده است.



(ج) سازه ۱۳ طبقه



(ب) سازه ۹ طبقه



(الف) سازه ۵ طبقه

شکل ۲: نمودار ظرفیت سازه در حالت‌های مختلف.

جدول ۶. برش پایه و تغییر مکان تسلیم سازه‌های مختلف.

مدل	برش پایه تسلیم (ton)	درصد تغییر برش پایه (%)	تغییر مکان تسلیم (cm)	درصد تغییر تغییر مکان (%)
A1	۱۱۷۶	-	۹/۷	-
A2	۱۶۰۰	+۳۶/۰۵	۳/۴	-۶۴/۹۴
A3	۴۴۱/۲	-۶۲/۴۸	۶/۱	-۳۷/۱۱
B1	۱۸۷۰	-	۲۴/۴۸	-
B2	۲۴۲۶	+۲۹/۷۳	۲/۵	-۸۹/۷۸
B3	۵۲۰/۹	-۷۲/۱۴	۹	-۶۳/۲۳
C1	۲۴۰۰	-	۳۲/۴۱	-
C2	۴۱۴۳	-۷۲/۶۵	۲/۷۷	-۹۱/۴۵
C3	۷۷۹/۶	-۶۷/۵۱	۱۳/۵	-۵۸/۳۴

#### ۴-۱-۲- نمودار نیاز سازه و تعیین تغییر مکان هدف سازه

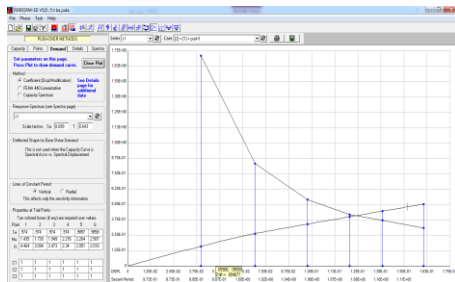
نمودار نیاز سازه براساس طیف پاسخ سازه رسم می‌شود؛ محل برخورد نمودار نیاز با نمودار ظرفیت را نقطه هدف سازه و تغییر مکان متناظر با آن را تغییر مکان هدف سازه می‌نامند. در این بخش برای تعیین تغییر مکان هدف سازه براساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود در استاندارد FEMA356 [۴۰ و ۴۱] عمل شده و مطابق رابطه ۱۹ تعیین گردیده و نتایج آن در شکل ۳ برای سازه ۵ طبقه در حالت‌های مختلف آمده است.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad (19)$$

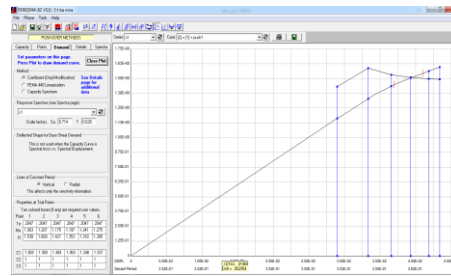
به طوری که در رابطه فوق،  $T_e$  زمان تناوب اصلی موثر ساختمان،  $C_0$  ضریب اصلاح برای تبدیل تغییر مکان طیفی به تغییر مکان مرجع،  $C_1$  ضریب اصلاح برای تبدیل تغییر مکان ارتجاعی به تغییر مکان غیرارتجاعی،  $C_2$  ضریب برای در نظر گرفتن نوع قاب بندی و سطح عملکردی و  $C_3$  ضریب برای در نظر گرفتن اثرات  $P\Delta$  بوده و طبق مرجع [Error! Bookmark not defined.] قابل دستیابی است. به منظور خلاصه سازی، از ذکر جزئیات مربوط به سایر سازه‌ها (۹ و ۱۳ طبقه) صرف نظر شده و نتایج کلی تغییر مکان هدف سازه‌ها با مدل‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که میراگر ویسکوالاستیک تغییر مکان



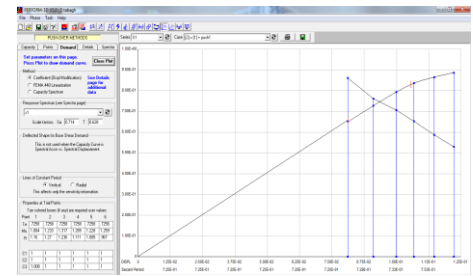
سازه را به حداقل ممکن می‌رساند اما برش پایه را تا حد زیادی افزایش می‌دهد که از نقاط ضعف این میراگر می‌باشد. جداساز لاستیکی هسته سربی، هم تغییر مکان سازه را کنترل می‌کند و برش پایه را به شدت کاهش می‌دهد.



مدل A3 (ج)  $(\delta_t = 12.4\text{cm})$



مدل A2 (ب)  $(\delta_t = 3.93\text{cm})$



مدل A1 (الف)  $(\delta_t = 9.34\text{cm})$

شکل ۳. نمودار نیاز و تعیین تغییر مکان هدف سازه ۵ طبقه در سه حالت مختلف.

علاوه بر این در جدول ۷، نتایج مربوط به ضریب رفتار ( $R_u$ ) و شکل‌پذیری به کمک نمودار ظرفیت برای تمامی سازه‌ها ارائه شده است. برای تعیین ضریب رفتار و ضریب شکل‌پذیری سازه، به ترتیب از روابط ۲۰ و ۲۱ استفاده شده است.

$$R_u = \frac{V_{\text{elastic}}}{V_s} \quad (20)$$

$$\mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \quad (21)$$

به طوری که در این روابط،  $V_{\text{elastic}}$  برش پایه الاستیک،  $V_s$  نصف برش پایه تسلیم،  $\mu$  ضریب شکل‌پذیری سازه،  $\delta_m$  تغییر مکان گسیختگی و  $\delta_y$  تغییر مکان تسلیم می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجهز به جداساز لرزه‌ای در مقایسه با سازه‌های دارای میراگر ویسکوالاستیک و سازه‌های قاب خمشی فولادی بهتر و موفقیت آمیزتر است به طوری که مقایسه ضرایب رفتار و شکل‌پذیری در هر سه مدل ۵، ۹ و ۱۳ طبقه انجام شد و نتیجه زیر حاصل شده است:

$R_u$  سازه قاب خمشی تنها  $R_u >$  سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک  $R_u >$  سازه مجهز به جداساز لرزه‌ای

$\mu$  سازه قاب خمشی تنها  $\mu >$  سازه مجهز به میراگر ویسکوالاستیک  $\mu >$  سازه مجهز به جداساز لرزه‌ای

جدول ۷. نتایج نیاز و ظرفیت برای سازه‌های مختلف.

مدل	تغییر مکان هدف (cm)	ضریب رفتار ( $R_u$ )	ضریب شکل‌پذیری ( $\mu$ )
A1	۹/۳۴	۲/۵	۱/۲۵۶
A2	۳/۹۳	۲/۵۳	۱/۲۷۳
A3	۱۲/۴	۵/۵۶	۲/۶۳۲
B1	۲۳/۹۱	۲/۵	۱/۲۴
B2	۳/۰۳	۲/۶۸	۱/۵۱۳
B3	۲۵/۲۵	۷/۱	۳/۱۹
C1	۳۱/۶۷	۲/۶۱	۱/۳۵
C2	۵	۳/۴۷	۲/۰۹
C3	۳۰/۳۶	۵/۶۷	۲/۷۳



#### ۴-۱-۳- مقایسه سطوح عملکرد سازه ها

در این قسمت به مقایسه نتایج مربوط به سطوح عملکرد برای سازه‌های مختلف پرداخته شده است. این مقایسه شامل سطوح عملکرد تیرها و ستون‌ها می‌باشد تا مشخص شود هر یک از آنها در طبقات مختلف سازه‌ها در کدام یک از سطوح عملکردی (حالت استفاده بی وقفه (IO)، حالت ایمنی جانی (LS)، حالت آستانه فروریزش (CP)) قرار دارند. در جداول ۸ الی ۱۰، نتایج مقایسات ارائه شده است.

جدول ۸. حالات حدی سازه ۵ طبقه برای مدل‌های مختلف

حالت‌های حدی			حالت استفاده بی وقفه (IO)			حالت ایمنی جانی (LS)			حالت آستانه فروریزش (CP)		
نوع مدل			مدل A1	مدل A2	مدل A3	مدل A1	مدل A2	مدل A3	مدل A1	مدل A2	مدل A3
تیر و ستون طبقه ۱			*	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۲			*	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۳			*	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۴			ستون دارد	ستون دارد	ستون دارد	ستون دارد	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۵			*	ستون دارد	*	*	*	*	*	*	*

جدول ۹. حالات حدی سازه ۹ طبقه برای مدل‌های مختلف.

حالت‌های حدی			حالت استفاده بی وقفه (IO)			حالت ایمنی جانی (LS)			حالت آستانه فروریزش (CP)		
نوع مدل			مدل A1	مدل A2	مدل A3	مدل A1	مدل A2	مدل A3	مدل A1	مدل A2	مدل A3
تیر و ستون طبقه ۱			ستون دارد	*	تیر دارد	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۲			تیر دارد	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۳			تیر و ستون دارد	ستون دارد	*	*	ستون دارد	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۴			تیر و ستون دارد	ستون دارد	*	*	ستون دارد	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۵			تیر و ستون دارد	ستون دارد	*	*	ستون دارد	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۶			تیر دارد	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۷			تیر و ستون دارد	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۸			ستون دارد	*	*	*	*	*	*	*	*
تیر و ستون طبقه ۹			*	*	*	*	*	*	*	*	*

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که عملکرد جداساز لرزه‌ای بسیار مطلوب بوده و نیروهای وارده به سازه را به نحو احسن مستهلک می‌کند. در ادامه نتایج حاصل از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است.



جدول ۱۰. حالات حدی سازه ۱۳ طبقه برای مدل‌های مختلف.

حالت آستانه فروریزش (CP)			حالت ایمنی جانی (LS)			حالت استفاده بی وقفه (IO)			حالت‌های حدی
مدل A3	مدل A2	مدل A1	مدل A3	مدل A2	مدل A1	مدل A3	مدل A2	مدل A1	نوع مدل
*	*	*	*	*	ستون دارد	تیر دارد	*	ستون دارد	تیر و ستون طبقه ۱
*	*	*	*	*	*	تیر دارد	*	تیر دارد	تیر و ستون طبقه ۲
*	*	*	*	ستون دارد	تیر و ستون دارد	*	ستون دارد	تیر و ستون دارد	تیر و ستون طبقه ۳
*	*	*	*	ستون دارد	تیر دارد	*	ستون دارد	تیر و ستون دارد	تیر و ستون طبقه ۴
*	*	*	*	ستون دارد	تیر و ستون دارد	*	ستون دارد	تیر و ستون دارد	تیر و ستون طبقه ۵
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	ستون دارد	تیر دارد	تیر و ستون طبقه ۶
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	تیر و ستون دارد	تیر دارد	تیر و ستون طبقه ۷
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	تیر و ستون دارد	تیر دارد	تیر و ستون طبقه ۸
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	ستون دارد	ستون دارد	تیر و ستون طبقه ۹
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	تیر و ستون دارد	*	تیر و ستون طبقه ۱۰
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	تیر و ستون دارد	*	تیر و ستون طبقه ۱۱
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	تیر و ستون دارد	*	تیر و ستون طبقه ۱۲
*	*	*	*	ستون دارد	*	*	ستون دارد	*	تیر و ستون طبقه ۱۳

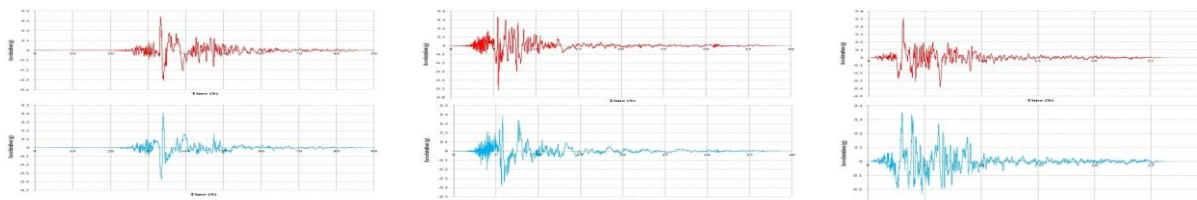
#### ۴-۲- نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی)

شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند، باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله، باشند. برای رسیدن به این هدف لازم است حداقل سه زوج شتاب‌نگاشت و یا هفت زوج متعلق به مولفه‌های افقی زلزله‌های مختلف ثبت شده، انتخاب گردند. سپس زوج شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده باید مقیاس سازی شوند [۱۳]. در این مقاله، از سه زوج شتاب‌نگاشت زلزله‌های Northridge، Imperial Valley و ChiChi برای انجام تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. برای مقیاس‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها ابتدا کلیه آنها به مقدار حداکثر خود مقیاس شده و حداکثر شتاب آنها برابر با شتاب ثقل (g) گردید. سپس طیف پاسخ شتاب هر یک از زوج شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده با منظور کردن نسبت میرایی ۵ درصد تعیین شد. در ادامه طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شد. در ادامه طیف‌های پاسخ ترکیبی سه زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری شده و در محدوده زمان‌های تناوب ۰٫۲ تا ۱٫۵ برابر دوره تناوب اصلی سازه با طیف طرح استاندارد مقایسه شد. ضریب مقیاس به نحوی تعیین می‌شود که در این





محدوده مقادیر متوسطها در هیچ حالت کمتر از ۱,۴ برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد نباشد. مشخصات اولیه شتابنگاشت‌های استفاده شده، نمودار متوسط طیفهای پاسخ و طیف استاندارد و متوسط طیف اصلاح شده و همچنین مقادیر ضریب مقیاس برای شتابنگاشت‌ها در ادامه در شکل ۴، جدول ۱۱ و شکل ۵ آمده است.



ChiChi زلزله (ج)

Imperial Valley زلزله (ب)

Northridge زلزله (الف)

شکل ۴. نمایی از مولفه‌های طولی (بالا) و عرضی (پایین) شتابنگاشت زلزله‌های مختلف در تحلیل تاریخچه زمانی

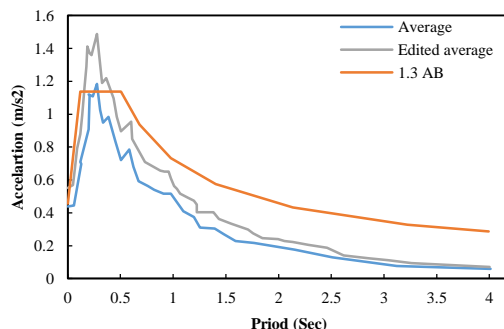
جدول ۱۱. مشخصات شتابنگاشت‌های استفاده شده.

شتابنگاشت	مدت زمان (sec)	PGA (g)		میانگین	ضریب مقیاس
		مؤلفه Y	مؤلفه X		
Northridge	39.98	0.514	0.568	1.648	0.77
Imperial	32.74	0.342	0.333	0.887	1.42
ChiChi	32.28	0.394	0.328	0.829	1.52

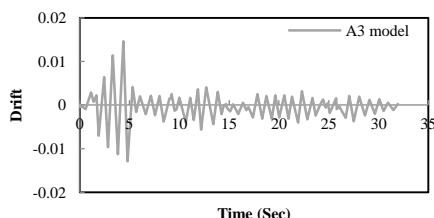
در نهایت پس از تعیین ضریب مقیاس تعیین شده، این شتابنگاشت‌ها همپایه شده و در تحلیل دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه نتایج مربوط به تحلیل تاریخچه زمانی بر روی سازه‌های مختلف با وارد کردن اثر سه زوج شتابنگاشت مذکور بر روی مدل‌های سازه ای مختلف، مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است.

#### ۴-۲-۱- نتایج تغییرشکل نسبی (دریفت) طبقات

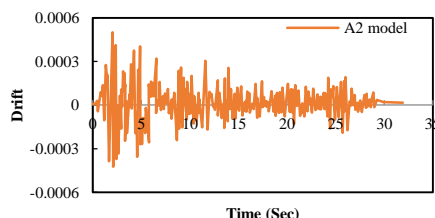
در این بخش نتایج تغییرشکل نسبی (دریفت) طبقات در سازه‌های مختلف ارائه و مقایسه شده است. به منظور تعیین مکانیزم اثر دریفت، مقدار آن در طبقه اول سازه ۵ طبقه در سه حالت مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. این نتایج برای مدل‌های مختلف سازه‌های ۹ و ۱۳ طبقه نیز محاسبه شده و از ذکر نتایج آن صرفنظر شده است. نتایج مربوط به ماکزیمم دریفت طبقات در سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه با مدل‌های مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد در سازه‌های مجهز به جداساز، در طبقه اول دریفت بزرگی تحمل می‌شود و با افزایش طبقات این دریفت کاهش می‌یابد؛ این در حالیست که در سازه‌های مجهز به میراگر، دریفت طبقات به کمترین مقدار خود رسیده است.



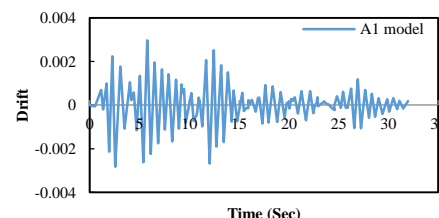
شکل ۵: نمودار متوسط طیف‌های پاسخ و طیف استاندارد و متوسط طیف اصلاح شده.



شکل ۶ (الف) مدل A3

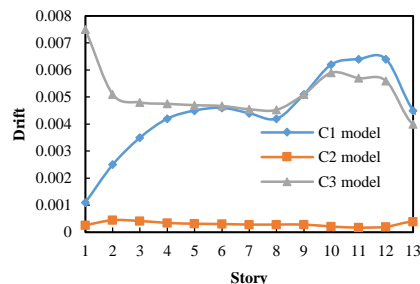


شکل ۶ (ب) مدل A2

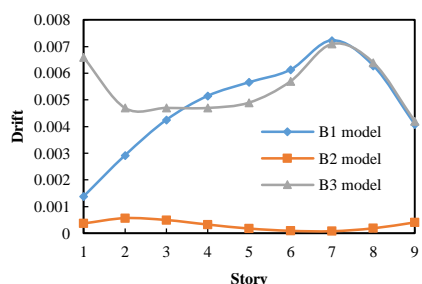


شکل ۶ (ج) مدل A1

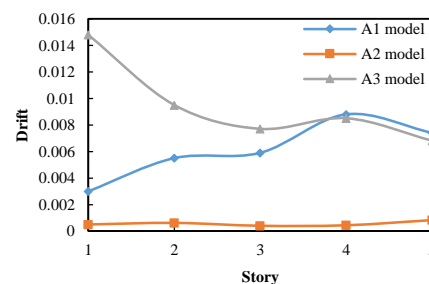
شکل ۶: نمودار پاسخ تغییر شکل نسبی (دریفت) طبقه اول سازه ۵ طبقه در سه حالت مختلف.



شکل ۷ (الف) سازه ۱۳ طبقه



شکل ۷ (ب) سازه ۹ طبقه



شکل ۷ (ج) سازه ۵ طبقه

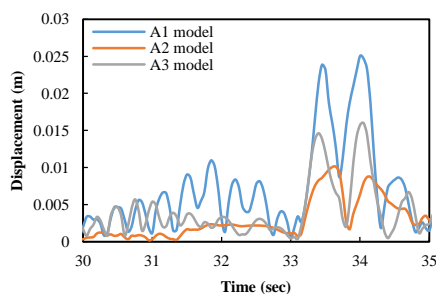
شکل ۷: تغییر شکل نسبی (دریفت) طبقات.

#### ۴-۲-۲- تغییر مکان (جابجایی) طبقات

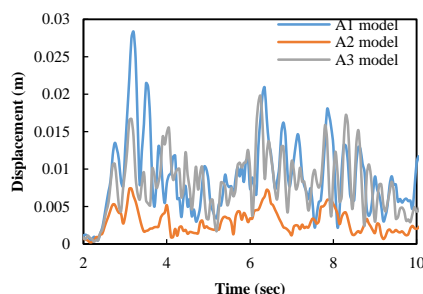
در این بخش نتایج تغییر مکان سازه‌های مختلف ارائه و مقایسه شده است. به همین منظور، ابتدا یک نقطه مشخص از سازه در نظر گرفته شده و سپس تغییر مکان سازه‌ها تحت اثر زلزله شتاب‌نگاشت‌ها به دست آمده است. به منظور تعیین مکانیزم اثر تغییر مکان و جابجایی، مقدار آن در طبقه بام سازه ۵ طبقه در سه حالت مختلف در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ (الف) به صورت دقیق، تغییرات متغیر مورد نظر را نشان نمی‌دهد، لذا تغییرات متغیر مذکور در بازه‌های کوچکتر زمانی در شکل‌های ۸ (ب) و ۸ (ج) نشان داده شده است. شایان ذکر است، بازه‌های زمانی به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که تغییر مکان سقف ساختمان در آن زمان‌ها بیشترین مقدار را داشته باشند. نتایج مربوط به بیشترین تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه تحت شتاب‌نگاشت‌های بیان شده از ۲ تا ۱۰ ثانیه پس از آغاز تحریک زلزله در هر سه حالت مختلف (شکل ۸ (ب)) نشان می‌دهد که تغییر مکان بام در صورت وجود میراگر کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت که وجود میراگر به جداساز بیشتر است. نکته‌ی دیگری که به نظر می‌رسد این است که زمان رخ دادن تغییر مکان‌های بام در صورت وجود میراگر حدود ۰/۵ ثانیه عقب می‌افتد. همچنین نتایج مربوط



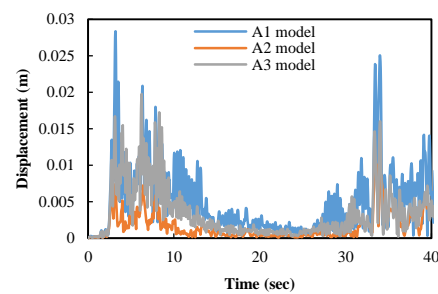
به بیشترین تغییر مکان بام سازه ۵ طبقه از ۳۰ تا ۳۵ ثانیه پس از آغاز تحریک زلزله در سه حالت مختلف (شکل ۸(ج)) نشان می‌دهد که اختلاف تغییر مکان بین حالت‌هایی که میراگر و جداساز وجود دارد و حالت بدون استفاده از آنها دیده می‌شود، هرچند میزان این اختلاف در این زمان کمتر می‌باشد. این نتایج برای مدل‌های مختلف سازه‌های ۹ و ۱۳ طبقه نیز محاسبه شده و از ذکر نتایج آن صرف‌نظر شده است. در ادامه، نتایج ماکزیمم تغییر مکان طبقات در سازه‌ها و مدل‌های مختلف در شکل ۹ ارائه شده است. لازم به ذکر است که نتایج تغییر مکان مربوط به هر سازه از طبقه بام سازه در نظر گرفته شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در سازه‌های مجهز به جداساز، در طبقه بام، تغییر مکان بزرگی تحمل می‌شود و با افزایش طبقات این دریافت کاهش می‌یابد؛ این در حالیست که در سازه‌های مجهز به میراگر دریافت طبقات به کمترین مقدار خود رسیده است. با مقایسه نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از جداساز LRB، تغییر مکان سازه را تا حد زیادی کنترل می‌نماید. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که سازه‌ها در حالت بدون میراگر و جداساز، متحمل تغییر مکان زیادی می‌شوند؛ اما مقدار تغییر مکان در حالت استفاده از میراگر نسبت به دو حالت مذکور، تا حد زیادی کاهش یافته است.



(ج) از ثانیه ۳۰ تا ۳۵ پس از آغاز تحریک زلزله

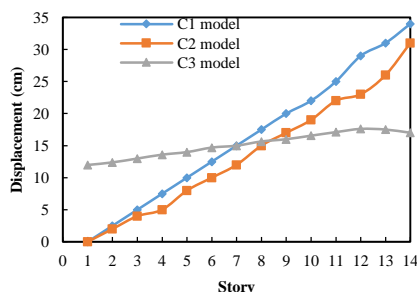


(ب) از ثانیه ۲ تا ۱۰ پس از آغاز تحریک زلزله

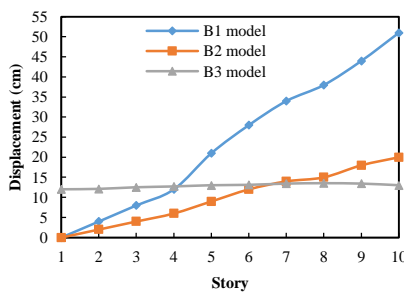


(الف) از آغاز تا پایان تحریک زلزله

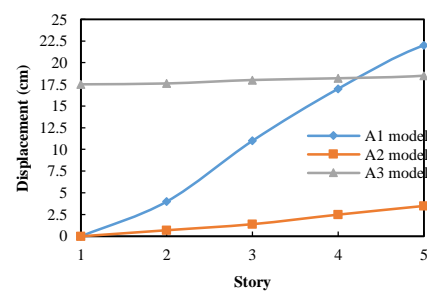
شکل ۸: نمودار پاسخ تغییر مکان طبقه اول سازه ۵ طبقه در سه حالت مختلف.



(ج) سازه ۱۳ طبقه



(ب) سازه ۹ طبقه



(الف) سازه ۵ طبقه

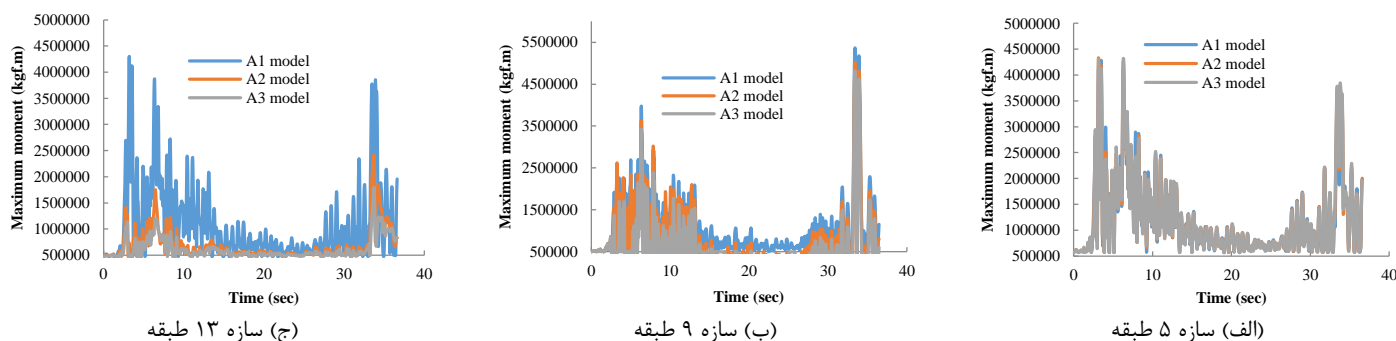
شکل ۹: نمودار پاسخ بیشینه تغییر مکان طبقات.

### ۴-۲-۳- لنگر واژگونی

در شکل ۱۰، نتایج مربوط به تغییرات ماکزیمم لنگر واژگونی سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه با مدل‌های مختلف، تحت اثر تحلیل تاریخچه زمانی نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که ماکزیمم لنگر واژگونی مدل‌های مختلف در سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه تفاوت چندانی نداشته است. به عبارت دیگر، وجود میراگر و جداساز در سازه‌های با ارتفاع کم، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقادیر ماکزیمم لنگر واژگونی نداشته است. این در حالی است که با افزایش ارتفاع سازه (سازه ۹ طبقه)، میزان کاهش لنگر واژگونی در صورت استفاده از میراگر و جداساز، کاهش یافته است و بیشترین مقدار کاهش آن در سازه ۱۳ طبقه ایجاد شده است. بنابراین می‌توان دریافت که وجود میراگر و جداساز در سازه‌های با ارتفاع و تعداد طبقات بیشتر، تاثیر بسزایی بر کاهش لنگر واژگونی



خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌های با تعداد طبقات کمتر (۵ و ۹ طبقه)، وجود جداساز LRB، تاثیر زیادی در کاهش لنگر واژگونی داشته است، با این وجود میراگر ویسکوالاستیک، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش لنگر واژگونی در مقایسه با حالت بدون مستهلک کننده نداشته است. اما در سازه با تعداد طبقات بیشتر، وجود هر دو نوع مستهلک کننده، تاثیر زیادی در کاهش لنگر واژگونی در حالت بدون استفاده از آنها داشته است. نکته دیگری که نباید از نظر دور بماند این است که وجود مستهلک کننده ها (میراگر و جداساز)، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر زمان به‌وجود آمدن لنگر واژگونی سازه ندارد. بعبارت دیگر لنگر واژگونی بیشینه در جریان تحلیل تاریخچه زمانی در حالت بدون و با مستهلک کننده‌ها به‌صورت هم‌زمان رخ می‌دهد.



شکل ۱۰: نمودار پاسخ لنگر واژگونی سازه‌ها با مدل‌های مختلف.

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی نقش استفاده از میراگر ویسکوالاستیک و جداساز لاستیکی هسته سربی در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با ارتفاع مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور با توزیع مختلف این دو نوع سیستم کنترل فعال در سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه قاب خمشی متوسط در سه حالت (بدون میراگر و جداساز، مجهز به میراگر ویسکوالاستیک، مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی)، به ارزیابی و مقایسه نتایج به‌دست آمده در خصوص کارایی میراگر و جداساز در هر یک از مدل‌ها پرداخته شده است. همچنین تاثیر میراگر و جداساز در رفتار مدل‌ها در ارتفاع‌های مختلف مورد مقایسه قرار گیرد و هدف رسیدن به این نتیجه است که میراگر جداساز در کدام سازه عملکرد لرزه‌ای بهتری دارد و برای چه ارتفاعی مناسب هستند. نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر به طور خلاصه در زیر ارائه شده است:

۱- میراگر ویسکوالاستیک و جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB) عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی را بهبود می‌بخشند؛ استفاده از میراگر ویسکوالاستیک در سازه‌های فولادی با سیستم قاب خمشی باعث افزایش سختی سازه و به تبع آن نیروی برش پایه در مقایسه با قاب خمشی تنها و سازه‌های مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی شده است. همچنین نتایج نشان داد که در تمامی سازه‌ها برش پایه ایجاد شده در سازه جداسازی شده بسیار کمتر از روش‌های دیگر کنترل است که این مسئله به علت ماهیت جداساز لرزه‌ای یعنی کاهش نیروی وارده به سازه می‌باشد.

۲- مجهز کردن سازه به میراگر ویسکوالاستیک باعث افزایش شتاب طبقات می‌شود. اما استفاده از جداساز لاستیکی هسته سربی باعث کاهش چشمگیر شتاب طبقات سازه می‌شود. میراگر ویسکوالاستیک باعث کاهش شدید تغییرمکان سازه می‌شود و تغییرمکان سازه را به حداقل مقدار خود می‌رساند. اما جداساز لاستیکی هسته سربی باعث افزایش تغییرمکان سازه می‌گردد.

۳- جداساز لاستیکی سربی سطح عملکرد سازه را از ایمنی جانی به قابلیت استفاده بی‌وقفه ارتقاء می‌دهد. در سازه جداسازی شده با اعمال بار جانبی، سازه بدون اینکه مفصل خمیری در اعضایش به‌وجود آید تغییرمکان آن به تغییرمکان هدف می‌رسد، ولی در سازه جداسازی نشده قبل از اینکه تغییرشکلش به تغییرمکان هدف برسد در آن مفصل خمیری تشکیل می‌شود. همچنین سازه‌های



مجهاز به جداساز لاستیکی هسته سربی شکل پذیرتر و ضریب رفتار آنها بزرگتر از سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوالاستیک و سازه‌های قاب خمشی تنها است.

۴- سازه‌های مجهز به جداساز لاستیکی هسته سربی با افزایش پیوند سازه، شتاب را به شدت کاهش می‌دهد درحالی‌که در سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوالاستیک کاملاً برعکس است که با کاهش پیوند سازه، شتاب افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با استفاده از جداساز لاستیکی هسته سربی و میراگر ویسکوالاستیک می‌توان از مقاطع سبکتر در سازه استفاده کرد و در مصرف فولاد صرفه جویی کرد.

۵- نتایج مربوط به مقایسه دررفت طبقان نشان داد که با استفاده میراگر ویسکوالاستیک می‌توان دررفت سازه را تا حد زیادی کاهش داد. این در حالی است که در سازه‌های مجهز به جداساز در طبقه اول دارای دررفت بزرگی است و با افزایش طبقات این دررفت کاهش پیدا می‌کند. تا حدی که دررفت آن با دررفت سازه قاب خمشی تنها تقریباً برابر می‌شود. اما در سازه‌های مجهز به میراگر ویسکوالاستیک دررفت در تمامی طبقات به کمترین مقدار خود می‌رسد. در سازه‌های مجهز به جداساز در طبقه همکف دارای تغییرمکان بزرگی است که دلیل آن جداساز سازه به وسیله جداساز از زمین است که نیروی زلزله باعث می‌شود سازه حتی در طبقه همکف هم جابجایی داشته باشد که این جابجایی با افزایش طبقات افزایش پیدا می‌کند.

۶- نتایج مربوط به تغییرات ماکزیمم لنگر واژگونی سازه‌های ۵، ۹ و ۱۳ طبقه با مدل‌های مختلف، تحت اثر تحلیل تاریخچه زمانی نشان می‌دهد که مقدار این متغیر در حالت‌های مختلف وجود میراگر و جداساز و بدون آنها در سازه‌های با ارتفاع کم، تاثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته است. اما با افزایش ارتفاع سازه (سازه ۹ طبقه)، میزان کاهش لنگر واژگونی در صورت استفاده از میراگر و جداساز، کاهش یافته است و بیشترین مقدار کاهش آن در سازه ۱۳ طبقه ایجاد شده است. بنابراین می‌توان دریافت که وجود میراگر و جداساز در سازه‌های با ارتفاع و تعداد طبقات بیشتر، تاثیر بسزایی بر کاهش لنگر واژگونی خواهد داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در سازه‌های با تعداد طبقات کمتر (۵ و ۹ طبقه)، وجود جداساز LRB، تاثیر زیادی در کاهش لنگر واژگونی داشته، اما میراگر ویسکوالاستیک، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش لنگر واژگونی در مقایسه با حالت بدون مستهلک کننده نداشته است. اما در سازه با تعداد طبقات بیشتر، وجود هر دو نوع مستهلک کننده، تاثیر زیادی در کاهش لنگر واژگونی در حالت بدون استفاده از آنها دارد.

## ۶- مراجع

- 1- Dowell, E. H., 1983, **The behavior of a linear, damped modal system with a non-linear spring-mass-dry friction damper system attached**, Journal of Sound and Vibration, 89, 1, 65-84.
- 2- Zahrai, S.M., 2010, **Passive control of vibrations**, the University of Tehran Press, Tehran, Iran (in Persian).
- 3- Andriano, T., and Carr, A.G., 1991, **Reduction and distribution of lateral seismic inertia forces on base-isolated multistory structures**, Bull., NZ Nat. Soc. Earthquake Engineering., 24, 3, 225-237.
- 4-Pall, A. S., and Marsh, C., 1982, **Response of Fiction Damped Braced Frame**, ASCE, Journal of Structural Division, 108, 1313-1323.
- 5- Pall, A. S., and Pall, R., 1989, **Friction-Dampers Used for Seismic Control of New and Existing Building in Canada**, ATC-17-1, Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, Applied Technology Council, 1989, 675-686.
- 6- Kelly, T. E., 2001, **In Structure Damping and Energy Dissipation**, S. E. Holmes Consulting Group, Revision O, July 2001.



- 7- Zhou, Q., Søren, R.K, and Qu, W. L., 2006, **Semi-active control of three-dimensional vibrations of an inclined sag cable with magnetorheological dampers**, Journal of sound and vibration, 296, 1, 1-22.
- 8- Skinner, I. R., Robinson, W. H., and McVerry, G. H., 1993, **A book on 'An Introduction to Seismic Isolation**, John Wiley & Sons.
- 9- Uniform Building Code (UBC), 1997, **Earthquake regulations for seismic isolated structures**, Whittier CA, USA.
- 10- Dusi, A., and Mezzi, M., 2007, **Increasing Safety of Structures in Seismic Area: The Base Isolation Challenge**, Proceedings of the 5th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.
- 11- Kilar, V., and Koren, D., 2009, **Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators**, Engineering Structures, 31, 910-921.
- 12- Vader, A. S., 2004, **The influence of signature tower passive energy dissipating devices on seismic response of long span cable-supported bridges**, Ph.D thesis, Washington state university.
- 13- Chachapara, V., Purohit, S., and Patel, P. V., 2011, **Seismic Response Control of the buiding using passive devices**, Institute of technology, Nirma University.
- 14- Lee, D.G., Hong, S., and Kim, J., 2002, **Efficient seismic analysis of building structures with added viscoelastic dampers**, Engineering Structures, 24, 1217-1227.
- 15- Semih, S. T., and Ozan, U., 2003, **Reduction of earthquake response of plane frame buildings by Viscoelastic dampers**, Engineering Structures, 25, 1755-1761.
- 16- Min, K.W., Kim, J., and Lee, S. H., 2004, **Vibration tests of 5-storey steel frame with viscoelastic dampers**, Engineering Structures, 26, 831-839.
- 17- Xu, Z. D., Zhao, H. T., and Li, A. Q., 2004, **Optimal analysis and experimental study on structures with Viscoelastic dampers**, Journal of Sound and Vibration, 273, 607-618.
- 18- Palmeri, A., and Ricciardelli, F., 2006, **Fatigue analyses of buildings with viscoelastic dampers**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94, 5, 377-395.
- 19- Lewandowski, R., and Łasecka-Plura, M., 2016, **Design sensitivity analysis of structures with viscoelastic dampers**, Computers & Structures, 164, 95-107.
- 20- Burlon, A., Failla, G., and Arena, G., 2016, **Exact frequency response analysis of axially loaded beams with viscoelastic dampers**, International Journal of Mechanical Sciences, 115-116, 370-384.
- 21- Lewandowski, R., and Pawlak, Z., 2018, **Response spectrum method for building structures with viscoelastic dampers described by fractional derivatives**, Engineering Structures, 171, 1017-1026.
- 22- Chang, C. M., Shia, S., and Lai, Y. A., 2018, **Seismic design of passive tuned mass damper parameters using active control algorithm**, Journal of Sound and Vibration, 426, 150-165.
- 23- Batou, A., and Adhikari, S., 2019, **Optimal parameters of viscoelastic tuned-mass dampers**, Journal of Sound and Vibration, 445, 17-28.
- 24- Zhang, L., Su, M., Zhang, C., Shen, H., and Zhang, R., 2019, **A design method of viscoelastic damper parameters based on the elastic-plastic response reduction curve**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 149-163.
- 25- Robinson, W. H., and Tucker, A. G., 1997, **A Lead-Rubber Shear Damper**, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 10, 3, 151-153.



- 26- Blakeley, R. W. G., 1982, **Code requirements for base isolated structures**, Proc., Inter. Conf. on Natural Rubber for Earthquake Protection of Bldgs. and Vibration Isolation, 292-311, Kuala Lumpur, Malaysia.
- 27- Estiri, H., 2012, **The Effect of Lead Rubber Separators on Steel Buildings with Converged Brackets**, 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, 2012 (In Persian).
- 28- Kalantari, S. M., 2008, **Investigating the Effect of Seismic Separators on the Class Displacement and Formation of Plastic Joints**, Journal of Modeling in Engineering, 6, 15.
- 29- Torabi, S., 2012, **Effect of Lead Rubber Separators on Steel Buildings with Divergent Brackets**, 6th National Congress of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran (In Persian).
- 30- Narouei, S., 2014, **Effect of Lead Rubber Base Separator on the Performance Level of Coaxial Structured Structures Using Push Analysis**, Third National Conference on Industry and Construction, Mashhad, Iran. (In Persian).
- 31- Shinozuka, M., Chaudhuri, S. R., and Mishra, S. K., 2015, **Shape-Memory-Alloy supplemented Lead Rubber Bearing (SMA-LRB) for seismic isolation**, Probabilistic Engineering Mechanics, 41, 34-45.
- 32- Hu, K., Zhou, Y., Jiang, L., Chen, P., and Qu, G., 2017, **A mechanical tension-resistant device for lead rubber bearings**, Engineering Structures, 152, 1, 238-250.
- 33- Zeynali, K., Saeed Monir, H., Mirzai, N. M., and Wan Hu, J., 2018, **Experimental and numerical investigation of lead-rubber dampers in chevron concentrically braced frames**, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18, 1, 162-178.
- 34- Shoaie, P., and Mahsuli, M., 2019, **Reliability-based design of steel moment frame structures isolated by lead-rubber bearing systems**, Structures, 20, 765-778.
- 35- Kim, J. H., Kyu Kim, M., Choi, I. K., 2019, **Experimental study on seismic behavior of lead-rubber bearing considering bi-directional horizontal input motions**, Engineering Structures, 198, Article 109529.
- 36- Eem, S., and Hahm, D., 2019, **Large strain nonlinear model of lead rubber bearings for beyond design basis earthquakes**, Nuclear Engineering and Technology, 51, 2, 600-606.
- ۳۷- کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه، ۱۳۹۴، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰-ویرایش چهارم، نشریه شماره ۲۵۳ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- 38- Chang, K. C., Lin, Y. Y., and Lai, M. L., 1998, **Seismic Analysis and Design of Structures with Viscoelastic Dampers**, ISET Journal of Earthquake Technology, 4, 35, 166-143.
- 39-Win, A. C., 2008, **Analysis and Design of Base Isolation for Multi-Storied Building**, GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS, 2008.
- 40- FEMA356, 2014, The Federal Emergency Management Agency.
- 41- FEMA451, 2014, NEHRPH Recommended Provisions, Chapter 11: Seismically Isolated Structures. Charles A. Kircher.