



ارائه شاخص جدید عملکرد نسبی وزنی برای بررسی تأثیر سیستم جداسازی پایه بر رفتار لرزه‌ای سازه‌ها

مجتبی باجلان^۱، سید مهدی زهرائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲- استاد دانشکده عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران

*تهران، صندوق پستی، ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، mzahrai@ut.ac.ir

چکیده

یکی از روش‌های جلوگیری از انتقال مستقیم نیروی زلزله از زمین به سازه، جداسازی لرزه‌ای است. در واقع در جداسازی لرزه‌ای، هدف اصلی کاهش مقدار شتاب‌ها و نیروهایی است که در اثر زلزله به سازه منتقل می‌شود. این هدف با نصب سازه بر روی لایه‌های جداکننده که انعطاف‌پذیری افقی زیادی دارند انجام می‌گیرد. به این ترتیب هنگام زلزله که زمین زیر سازه به شدت ارتعاش می‌کند، حرکات چندانی به سازه منتقل نمی‌شود. در این پژوهش به ارائه یک شاخص جدید جهت مقایسه عملکرد سیستم جداسازی پایه پرداخته شده است که می‌تواند باعث طراحی سیستم جداسازی پایه با عملکرد بهتر برای سازه گردد. با استفاده از این شاخص به نام عملکرد نسبی وزنی (WRPI)، می‌توان عملکرد سازه و سیستم جداسازی پایه را علاوه بر در نظر گرفتن مقدار انرژی کرنشی جذب‌شده در سازه و جداساز، برای مقدار شتاب ماکزیمم و جابه‌جایی ایجادشده در سازه و جداساز نیز مقایسه و طراحی کرد. جهت بررسی کارایی شاخص پیشنهادی و مقایسه با شاخص‌های پیشین، یک قاب خمشی فولادی شش طبقه با و بدون جداساز مورد مطالعه قرار گرفت. به صورت کلی شاخص WRPI نسبت به شاخص‌های مورد استفاده پیشین، دارای کارایی و عملکرد بهتری به‌ویژه در سازه‌های حساس به شتاب و تغییرشکل‌های بین طبقه‌ای می‌باشد.

واژگان کلیدی

شاخص عملکرد نسبی وزن‌دار، جداساز لرزه‌ای، سیستم جداسازی پایه، سیستم کنترل غیرفعال، ارزیابی عملکرد سازه

Developing a New Weighted Relative Performance Index to Evaluate Base Isolation Systems in the Seismic Behavior of Structures

M. Bajalan, S.M. Zahrai

Abstract

One of the methods to prevent the direct transmission of earthquake forces from the ground to a structure is seismic isolation. The main goal of seismic isolation is to reduce the amount of acceleration and forces transferred to the structure during an earthquake. This goal is achieved by installing the structure on separating layers that possess high horizontal flexibility. In this way, when the ground beneath the structure vibrates strongly during an earthquake, minimal movement is induced in the structure. In this research, a new index has been introduced to compare the performance of base isolation systems, which can lead to the design of base isolation systems with improved performance for the structure. By utilizing the proposed index, known as the Weighted Relative Performance Index (WRPI), the performance of both the structure and the base isolation system can be evaluated. This evaluation considers the amount of strain energy absorbed in the structure and the isolator, as well as the maximum acceleration value and the displacement created in both the structure and the isolator. To evaluate the effectiveness of the proposed index and compare it to previous indices, a 6-story steel moment frame with and without base isolation system was studied. Overall, the WRPI index demonstrates better efficiency and performance than previously used indices, particularly in structures sensitive to acceleration and inter-story drifts.

Keywords

Weighted Relative Performance Index, Seismic Isolator, Base Isolation System, Passive Control System, Evaluate Structure Performance



در دهه‌های اخیر تلاش‌های فراوانی به منظور کاربرد سیستم‌های کنترل مدرن در سازه‌های در معرض زلزله انجام شده است و سیستم‌های جدیدی توسعه پیدا کرده‌اند که با انرژی ورودی به سازه را کاهش می‌دهند و یا بخش عمده‌ای از این انرژی را جذب می‌کنند. این سیستم‌ها با جذب مقداری از انرژی ورودی به سازه از تخریب اعضای سازه حین وقوع زلزله جلوگیری می‌نمایند و با استفاده از سازوکارهای ساده‌ای به کاهش پاسخ‌های سازه منجر می‌شوند. این کاهش‌ها می‌تواند در تغییر مکان‌های جانبی، شتاب‌های طبقات و برش پایه صورت گیرد. روش‌های کنترل سازه، راه‌های مؤثر در رسیدن به طراحی‌های قابل قبول از لحاظ پارامترهای لرزه‌ای هستند. از جمله کاربردی‌ترین این روش‌ها، کنترل غیرفعال می‌باشد. یکی از سیستم‌هایی که تحقیقات زیادی روی آن انجام پذیرفته و به عنوان یک سیستم حفاظتی در برابر زلزله مورد قبول و اجرا واقع شده است، سیستم جداساز لرزه‌ای است.

در سیستم جداساز لرزه‌ای دوره تناوب اصلی سازه با اضافه شدن انعطاف پذیری جداگرها تغییر پیدا می‌کند. جداسازی لرزه‌ای با افزایش دوره تناوب، منجر به کاهش شتاب پاسخ سازه و در پی آن، کاهش نیروهای وارد شده به سازه می‌گردد. بنابراین جداسازی لرزه‌ای، روشی برای محافظت ساختمان‌ها در برابر زلزله بوده و این عمل با محدود ساختن اثر تخریبی زلزله، نه افزایش مقاومت سازه در مقابل زلزله، انجام می‌پذیرد [۱]. در واقع سیستم جداساز پایه با جداسازی حرکت افقی زمین از حرکت افقی سازه، باعث کاهش خسارت‌های ناشی از زلزله بر روی سازه و اجزای وابسته به آن می‌شود. از مزایای اصلی این سیستم می‌توان به بهبود عملکرد سازه در تمامی سطوح خطر، به حداقل رساندن وقفه در استفاده از امکانات سازه (بازگشت سریع به سطح عملکرد مطلوب)، کاهش تغییر مکان‌های مخرب در اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای، کاهش شتاب سازه جهت کاهش آسیب به اجزای وابسته به سازه و حساس به شتاب، جلوگیری از تغییر شکل‌های پلاستیک المان‌های سازه، حفاظت از قاب ساختمانی و الحاقات غیرسازه‌ای، حفاظت از زندگی ساکنان و

بهبود ایمنی در ساختمان اشاره کرد. مزایای جداسازی لرزه‌ای در حذف یا کاهش بسیار صدمات سازه‌ای و غیرسازه‌ای، افزایش ایمنی اجزای الحاقی ساختمان و نماهای معماری و کاهش نیروهای طراحی زلزله می‌باشد. برای سازه‌های کوتاه و متوسط با سختی جانبی زیاد، نیروگاه‌های انرژی هسته‌ای، پل‌ها و بسیاری از انواع تجهیزات، مزایای ذکر شده، بیش‌ترین تأثیر را دارد [۲]. این روش‌های کنترلی در سال‌های اخیر به صورت چشم‌گیری رشد کرده است. تحقیقات علمی روی این موضوع به خوبی پیشرفت کرده و کاربردهای عملی آن در سرتاسر جهان گسترده شده است.

تحقیقات زیادی در زمینه سازه‌های جداسازی شده و مقایسه آن با سازه بدون سیستم جداساز انجام گرفته است. محققان متعددی مطالعات تحلیلی در زمینه بازده استفاده از سیستم جداساز لرزه‌ای و نحوه طراحی و بهینه‌سازی آن ارائه کرده‌اند. از اولین تحقیقات در این زمینه می‌توان به پژوهش فیلیاتورو^۱ و چری^۲ اشاره کرد. در این پژوهش یک فرایند طراحی برای سازه‌های دارای میراگر اصطکاکی پیشنهاد شد. از طریق این روش نوآورانه به بهینه‌سازی مقدار توزیع نیروی لغزش جهت طراحی میراگر اصطکاکی پرداخته شد. در این روش جهت محاسبه عملکرد میراگرها، مقایسه و بهینه‌سازی آن به معرفی و استفاده از شاخص عملکرد نسبی (RPI)^۳ پرداخته شد. نتایج نشان دادند که استفاده از این روش منجر به طراحی بهتر و بهینه‌تر می‌گردد [۳].

شتون^۴ و لین^۵ در یک پژوهش به مقایسه عملکرد نسبی یک قاب بتنی با پایه ثابت و جداسازی شده پرداختند. با توجه به نتایج آن، مقدار نیروی جانبی سازه جهت طراحی در حدود ۲۵ تا ۵۰ درصد نیروی توصیه شده برای سازه با پایه ثابت است [۴]. از شاخص RPI معرفی شده در پژوهش فیلیاتورو و چری^۶ توسط مورشی^۷ و سینگ^۸ جهت طراحی میراگرهای اصطکاکی و تسلیم‌شونده با عملکرد لرزه‌ای بهینه استفاده شد. در این پژوهش از چندین نمونه عددی برای طراحی بهینه میراگرها با عملکردهای مختلف با استفاده از شاخص RPI استفاده شده است [۵].

لی^۹ و اوو^۹ طی یک پژوهش یک روش جهت طراحی سیستم ترکیبی جداساز پایه و سیستم‌های کنترلی نیمه‌فعال پیشنهاد دادند

^۲ Filiatrault

^۳ Cherry

^۴ Relative Performance Index

^۵ Shenton

^۶ Lin

^۷ Moreschi

^۸ Singh

^۹ Li

^{۱۰} Ou

که بتوان با استفاده از شاخص‌های معرفی‌شده به مقدار بهینه مشخصات سیستم‌های کنترلی دست یافت. شاخص استفاده‌شده شامل مقدار میانگین حداکثر نیروهای کنترلی در المان‌های کنترلی سازه بود. با استفاده از این شاخص و مقایسه یک ساختمان پنج طبقه به این نتیجه دست یافتند که استفاده از المان کنترل غیرفعال در ترکیب با سیستم جداساز پایه نتیجه مطلوب‌تری نسبت به استفاده از المان‌های کنترل فعال دارد [۶]. زهرانی و نادرپور در یک پژوهش به بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های جداسازی‌شده با مشخصات متفاوت سازه‌ای و جداساز پرداختند که باعث بهبود پارامترهای طراحی و رفتار بهتر سازه گردید [۷]. همچنین زهرانی و یزدانی در پژوهش دیگری به بررسی رفتار سازه‌های جداسازی‌شده تحت زلزله کریستچرچ^۱ که یکی از زلزله‌های قوی در کشور نیوزیلند بود، پرداختند. با توجه به مشاهدات، استفاده از سیستم جداسازی پایه باعث کاهش شتاب، برش پایه، دررفت و افزایش جابه‌جایی و عملکرد سازه و کنترل خسارت در سازه‌ها گردید [۸].

مورگان^۲ و ماهین^۳ طی یک پژوهش به طراحی عملکردی سازه‌های دارای سیستم جداساز لرزه‌ای با در نظر گرفتن اهداف عملکردی چندگانه از جمله شتاب، دررفت و عملکرد سیستم جداساز پرداختند [۹]. اردوران^۴ و همکاران به مقایسه سازه‌های رایج فولادی با سازه‌های جداسازی‌شده کوتاه‌مرتبه پرداختند. آن‌ها دریافتند در حداکثر زلزله در نظر گرفته‌شده، سیستم جداساز باعث کاهش دررفت و شتاب طبقات نسبت به سازه معمولی می‌گردد [۱۰].

سایانی^۵ و همکاران یک مطالعه پارامتری جهت مقایسه سازه‌های جداسازی‌شده و سازه‌های با پای ثابت در پیوند و پاسخ شکل‌پذیری تغییر مکان یکسان انجام دادند. تحلیل تاریخیچه زمانی نشان داد برش پایه، جابه‌جایی بین طبقه‌ای و شتاب بام در سازه‌های جداسازی‌شده نسبت به سازه‌های با پای ثابت، کاهش یافته بودند. یک شاخص مقایسه عملکرد CPM^۶ برای ارزیابی نسبی پاسخ (مقدار جابه‌جایی بین طبقه‌ای و شتاب) سازه‌های جداسازی‌شده و سازه‌های با پای ثابت توسعه پیدا کرد. ایراد این روش این بود که نسبت به سازه‌های با شکل‌پذیری یکسان،

محدود بود و شناسایی بهترین طراحی با توجه به هر دو هدف عملکرد و ملاحظات هزینه امکان‌پذیر نبود [۱۱].

یانیک^۷ و همکاران یک شاخص عملکرد کنترل فعال در سازه‌های سه‌بعدی دارای سیستم‌های کنترلی معرفی کردند که در زلزله‌های حوزه دور و نزدیک کارایی مناسبی نسبت به شاخص‌های کلاسیک داشت [۱۲]. یانیک در ادامه این پژوهش، یک شاخص دیگر برای سازه‌های دارای سیستم کنترل ارتعاش فعال تحت تحریک‌های لرزه‌ای معرفی کرد که نسبت به شاخص‌های پیشین مؤثرتر است و با روش ساده‌تری قابل محاسبه می‌باشد [۱۳].

دجدویی^۸ و همکاران در یک پژوهش از سیستم نیمه‌فعال با کنترل فازی میراگرهای جرم تنظیم‌شونده جهت کاهش پاسخ سازه‌های جداسازی‌شده پرداختند. آن‌ها دریافتند که این سیستم ترکیبی باعث کاهش ۵۰ درصدی در جابه‌جایی و شتاب پایه و کاهش ۱۵ درصدی در دررفت بین‌طبقه‌ای می‌گردد [۱۴]. شعاعی و همکاران یک روش مبتنی بر قابلیت اطمینان لرزه‌ای برای طراحی غیرالاستیک سازه‌های دارای سیستم جداساز LRB^۹ پیشنهاد دادند [۱۵].

شی^{۱۰} و همکاران با پیشنهاد یک روش به نام LQRSG^{۱۱} به طراحی یک سیستم جداساز پایه نیمه‌فعال پرداختند. این شاخص از توسعه روش LQR^{۱۲} به دست آمد و با توجه به نتایج پژوهش این شاخص از شاخص پیشین در تحریک‌های دارای دوره تناوب کوتاه و بلند بهتر عمل می‌کند [۱۶]. میاموتو^{۱۳} و همکاران نیز یک شاخص جدید با توسعه شاخص LQR جهت مقایسه عملکرد ترکیب سیستم کنترل فعال و جداساز پایه در سازه معرفی کردند [۱۷].

بنایی و همکاران در یک پژوهش به معرفی یک الگوریتم ژنتیک جدید برای سیستم‌های کنترل فعال با در نظر گرفتن تأخیر زمانی پرداختند که نتایج، نشان‌دهنده دقت و تأثیر بیش‌تر این روش نسبت به روش‌های پیشین می‌باشد. در ادامه این پژوهش، از روش وزن‌دهی به پارامترها جهت رسیدن به عملکرد هدف استفاده کردند که باعث دقت و کارایی بیش‌تر الگوریتم پیشین گردید [۱۸ و ۱۹].

⁷ Yanik

⁸ Djedoui

⁹ Lead Rubber Bearing

¹⁰ Shi

¹¹ Linear Quadratic Regulator Control with Frequency-Dependent Scheduled Gain

¹² Linear Quadratic Regulator

¹³ Miyamoto

¹ Christchurch

² Morgan

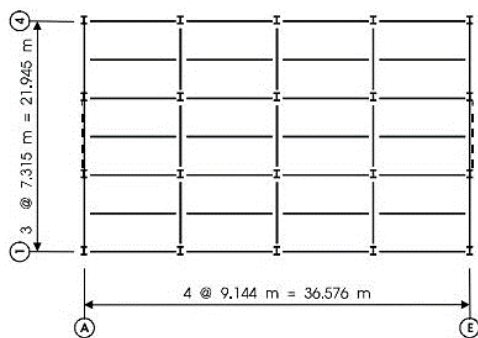
³ Mahin

⁴ Erduran

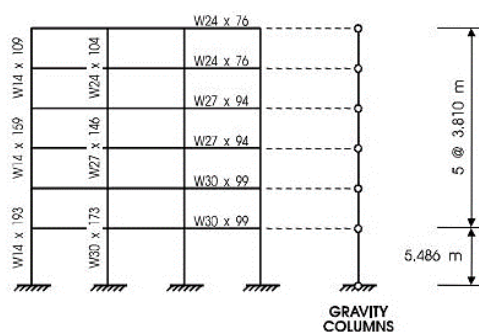
⁵ Sayani

⁶ Comprehensive Response Index

حسب کیلوپاسکال شامل بار مرده بام $3/8$ ، بار مرده سقف طبقات $4/5$ ، بار زنده بام ۱، بار زنده کف طبقات $3/8$ و بار دیوارهای خارجی $1/7$ می باشد. مقاطع مورد استفاده از نوع W Section و نوع فولاد مورد استفاده A36 ($F_y = 290 \text{ MPa}$) است.



شکل ۱- پلان سازه مورد بررسی



شکل ۲- سازه دوبعدی معادل شده

تحلیل تاریخیچه زمانی و بررسی عملکرد لرزه‌ای تحت اثر سه تحریک El Centro، LA02 و LA10 با شاخص‌های ارزیابی عملکرد پیشین و جدید انجام شده است، که این تحریک‌ها با احتمال فراگذشت ۱۰ درصد در ۵۰ سال برای شهر لس‌آنجلس ایالات متحده مقیاس شده است. طیف طرح برای سطح خطر مذکور بر اساس آیین‌نامه ASCE7-16 برای ساختگاه لس‌آنجلس به‌دست آمده که در شکل (۴) نمایش داده شده است [۲۳]. همچنین طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها در شکل (۳) قابل مشاهده است.

جدول ۱- شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده

Earthquake	PGA (g)	Time (sec)
El Centro	۰/۳۴۸	۶۴
LA02	۰/۶۶۳	۵۳/۴۶
LA10	۰/۳۵۳	۷۹/۹۸
NF13	۰/۸۷۳	۱۴/۹۳۵

فورما^۱ و همکاران جهت مقایسه عملکرد المان‌های کنترل فعال، یک روش خلافتان جدید معرفی کردند. با این روش امکان کمی-سازی عملکرد سیستم‌های کنترل فعال جهت مقایسه بهتر آن‌ها امکان پذیر شده است [۲۰].

در این پژوهش ابتدا شاخص جدیدی جهت ارزیابی عملکرد سازه‌های دارای سیستم‌های جذب انرژی، ارائه شده و سپس جهت مقایسه و بررسی کارایی شاخص ارائه شده با شاخص‌های پیشین، به بهبود عملکرد یک سازه فولادی شش طبقه معادل شده دوبعدی با سیستم جداساز پایه پرداخته شده است. این شاخص جدید علاوه بر در نظر گرفتن معیارهای شاخص‌های پیشین جهت ارزیابی عملکرد، معیارهای شتاب و تغییر مکان جانبی طبقات را نیز در بر می‌گیرد که باعث طراحی بهینه و مؤثرتر به خصوص برای سازه‌های حساس به شتاب و تغییر مکان جانبی از جمله سازه‌های بیمارستانی، سازه‌های دارای الحاقات غیرسازه‌ای حساس و ... می‌گردد.

۲- معرفی سازه مورد بررسی

در تحقیق حاضر، یک ساختمان شش طبقه فولادی که اولین بار توسط تسای^۲ و پوپوف^۳ (۱۹۸۸) بهسازی شده، بررسی شده است [۲۱]. این سازه در جهت شمال-جنوب مهاربندی شده و در جهت شرق-غرب قاب خمشی می‌باشد. در پژوهش پیش رو، این ساختمان به صورت دوبعدی معادل سازی شده است و ابتدا در حالت پای ثابت مورد بررسی قرار گرفته و سپس با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد پیشین و شاخص WRPI^۴، سیستم جداساز لرزه‌ای با عملکرد بهتر بررسی شده و در نهایت رفتار سازه با پای ثابت با سازه جداسازی شده مقایسه شده است. هدف از انجام این مقایسه‌ها، بررسی کارایی شاخص جدید WRPI با سایر شاخص‌ها است. سیستم جداساز لرزه‌ای در زیر سازه و در محل اتصال ستون‌ها به پی، وصل می‌شود و تمامی سیستم‌های جداساز با هم به صورت موازی عمل می‌کنند؛ بنابراین در مدل سازی می‌توان یک فنر را به عنوان نماینده تمامی جداسازها مدل کرد و در آخر با توجه به تعداد جداسازهای مورد استفاده، مشخصات هر جداساز را محاسبه کرد. در این تحقیق سیستم جداساز به صورت یک فنر دوطبقی مدل سازی شده است.

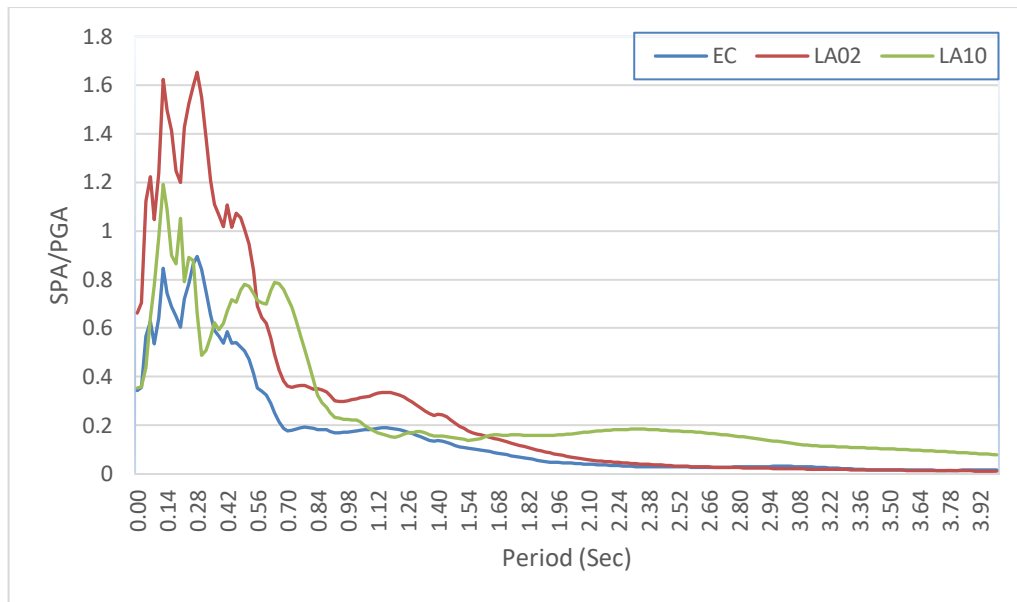
ارتفاع طبقه اول ۵/۴۹ متر و سایر طبقات ۳/۸ متر می‌باشد. ابعاد پلان ساختمان بر حسب متر ۲۱/۹۵ و ۳۶/۵۸ بوده، که در راستای عرضی و طولی به ترتیب دارای ۳ و ۴ دهانه است. طراحی سازه اولیه بر اساس آیین‌نامه UBC 1994 انجام شده است [۲۲]. این سازه در ناحیه ۴ بر روی خاک تیپ ۲ قرار دارد. بارهای ثقلی طراحی بر

¹ Forma

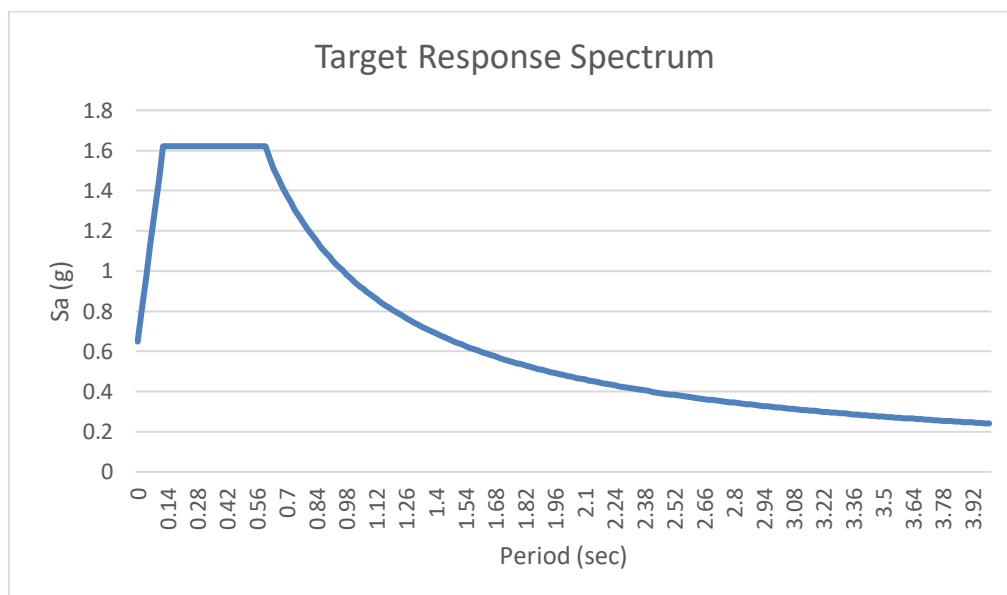
² Tsai

³ Popov

⁴ Weighted Relative Performance Index

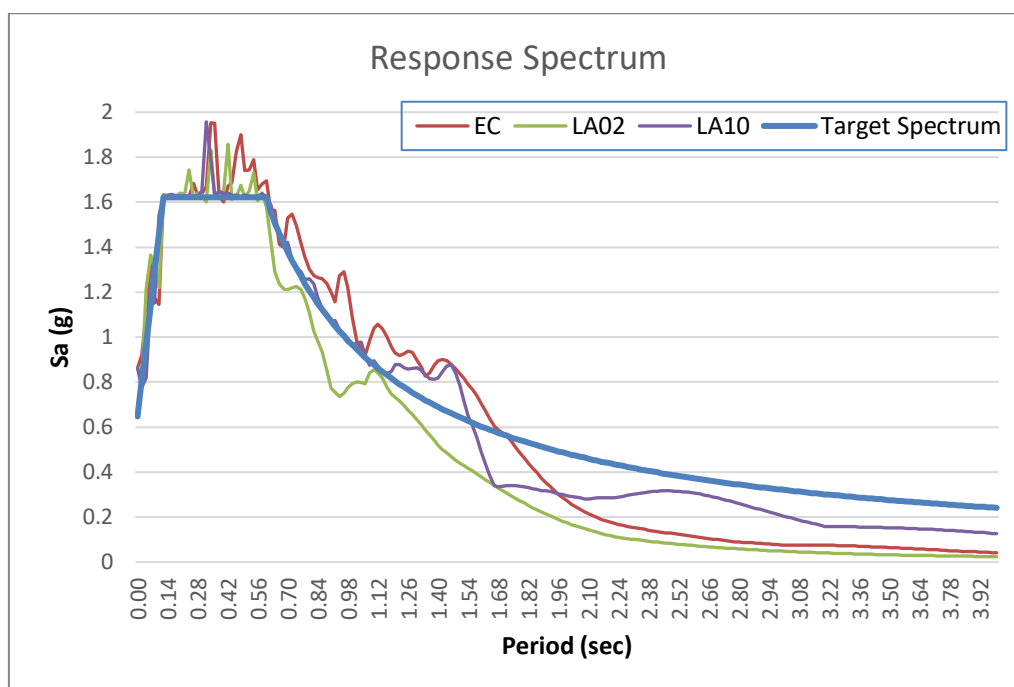


شکل ۳- طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های استفاده‌شده در تحلیل تاریخچه زمانی



شکل ۴- طیف پاسخ طرح برای ساختگاه لس‌آنجلس

مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از روش آیین‌نامه ASCE7-16 انجام شده است. با توجه به زمان تناوب اصلی سازه تحلیل‌شده، مقدار محدوده زمان تناوب جهت مقیاس‌کردن شتاب‌نگاشت‌ها برابر ۰/۲ تا ۱/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده با طیف طرح ساختمان

در انتهای بررسی سازه‌ها تحت شتاب‌نگاشت‌های مذکور، برای بررسی کارایی شاخص WRPI از تحریک حوزه نزدیک NF13 استفاده شده است که این رکورد در ایستگاه رینالدی^۱ در فاصله ۷/۵ کیلومتر از مرکز زلزله در طول زلزله نورتریج^۲ با بزرگی ۶/۷ ثبت شده است.

جدول ۲- مشخصات مقاطع مورد استفاده

مقطع	ارتفاع مقطع (mm)	سطح مقطع (mm ²)	ممان اینرسی حول محور خمشی (mm ⁴)	لنگر تسلیم (kN.mm)	نیروی محوری تسلیم* (kN)
W14X109	۳۶۴	۲۰۶۴۵	۵۱۲×۱۰ ^۶	۹۱۲×۱۰ ^۳	۵۹۸۷
W24X104	۶۱۱	۱۹۷۴۲	۱۲۹۰×۱۰ ^۶	۱۳۷۳×۱۰ ^۳	۵۷۲۵
W14X159	۳۸۰	۳۰۱۲۹	۷۹۱×۱۰ ^۶	۱۳۶۴×۱۰ ^۳	۸۷۳۷
W27X146	۶۹۵	۲۷۶۷۸	۲۳۴۳×۱۰ ^۶	۲۱۹۱×۱۰ ^۳	۸۰۲۷
W14X193	۳۹۳	۳۶۶۴۵	۹۹۹×۱۰ ^۶	۱۶۸۷×۱۰ ^۳	۱۰۶۲۷
W30X173	۷۷۳	۳۲۷۷۴	۳۴۱۳×۱۰ ^۶	۲۸۷۵×۱۰ ^۳	۹۵۰۵
W24X76	۶۰۸	۱۴۴۵۲	۸۷۴/۱×۱۰ ^۶	۹۵۰×۱۰ ^۳	-
W27X94	۶۸۴	۱۷۸۷۱	۱۳۶۱×۱۰ ^۶	۱۳۲۱×۱۰ ^۳	-
W30X99	۷۵۳	۱۸۷۷۴	۱۶۶۱×۱۰ ^۶	۱۴۸۳×۱۰ ^۳	-

* حداکثر نیروی تسلیم مقطع در حالت تسلیم کششی یا فشاری بدون در نظر گرفتن کماتش

² Northridge

¹ Rinaldi

۳- مدل سازی عددی

با توجه به هدف اصلی این مقاله که ارائه و بررسی کارایی شاخص جدید معرفی شده (WRPI) و مقایسه با شاخص های پیشین می باشد، مقایسه رفتاری سازه جداسازی شده با سازه پایه ثابت و در نهایت یافتن مشخصات سیستم جداساز با عملکرد بهتر در نمونه های در نظر گرفته شده انجام گردید. نخست یک طراحی اولیه برای سیستم جداساز انجام شد، سپس با مدل سازی اولیه سازه با سیستم جداساز در نرم افزار RUAMOKO، طرح اولیه تحت تحلیل تاریخچه زمانی در اثر تحریک های مزبور قرار گرفت و با استفاده از شاخص های ارزیابی عملکرد پیشین و جدید مورد مقایسه قرار گرفته و طرح با عملکرد بهبود یافته برای سیستم جداساز به دست آمد.

برای مدل سازی و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی سازه از نرم افزار RUAMOKO 2D استفاده شده است. تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد که بهره گیری از جداساز لرزه ای در سازه تحت ارزیابی عملکرد با شاخص WRPI، سبب ایجاد بیش ترین کاهش در تغییر مکان نسبی بین طبقه ای و برش پایه، کم ترین افزایش در تغییر مکان پای سازه و بام می گردد. همچنین باعث به حداقل رساندن مقدار انرژی جذب شده در سیستم جداساز نسبت به کل انرژی جذب شده در سازه و سیستم جداساز گردید. در مدل سازی سیستم جداساز از یک فنر دوخطی با مشخصات سختی اولیه (K_1)، سختی ثانویه پس از تسلیم (K_2) و مقدار تنش تسلیم (F_y) استفاده شده است. پس از طراحی اولیه سیستم جداساز لرزه ای، مقادیر K_1 ، K_2 و F_y به دست آمده در مدل سازی اولیه استفاده شده است. برای مدل سازی، ابتدا در مدل اصلی سازه، قید افقی تکیه گاه های سازه آزاد شده و در راستای آزاد شده به هم بسته شده اند؛ باید توجه داشت که در این گره ها جهت پایداری و انتقال بار ثقلی سازه به زمین همچنان قید قائم و لنگر مقاوم به زمین بسته می شود. سپس یک نقطه به عنوان زمین تعریف شده و تمامی قیدهای آن به زمین وصل می شود. با توجه به این که تمامی جداسازها با هم موازی هستند، می توان تمامی جداسازها را با یک جداساز مدل کرده و پس از اتمام طراحی، مشخصات جداساز مدل سازی شده را به مشخصات هر جداساز تبدیل نمود. برای این امر، سیستم جداساز با یک فنر دوخطی مدل سازی شده است؛ این فنر دوخطی به عنوان نماینده تمامی جداسازها با توجه به طراحی اولیه تعریف شده و بین سازه و زمین قرار گرفته است. سپس با توجه به وزن قاب محاسبه شده طبق مشخصات اولیه سازه، جهت معادل سازی مقدار 2000 kN به عنوان وزن قاب به صورت بار ثقلی به نقاط مدل سازی شده در قاب اعمال شده است. پس از

مدل سازی اولیه قاب و سیستم جداساز، این طرح تحت شاخص های ارزیابی عملکرد WRPI و شاخص های پیشین مورد بررسی قرار گرفته و کارایی شاخص ارزیابی عملکرد معرفی شده، بررسی و با سایر شاخص های پیشین مقایسه شده است.

۴- معرفی شاخص های ارزیابی عملکرد

یکی از شاخص های رایج در ارزیابی و مقایسه عملکرد سیستم های جداساز، شاخص عملکرد نسبی (RPI) می باشد. این شاخص شامل دو جزء نسبت انرژی کرنشی جذب شده و حداکثر انرژی کرنشی در سازه دارای سیستم جداساز نسبت به سازه عادی در طول تحریک است. مقدار این شاخص عددی بین صفر تا یک می باشد که هر قدر به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده طرح بهتر و بهینه تر است. در واقع هر چقدر مقدار این شاخص به عدد صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده انرژی جذب شده توسط سیستم جداساز و عدد یک نشان دهنده جذب کل انرژی توسط سازه است. مقدار شاخص RPI با استفاده از رابطه (۱) قابل محاسبه است.

$$RPI = \frac{1}{2} \times \left[\frac{SEA}{SEA_0} + \frac{U_{max}}{U_{max0}} \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱) و (۲) پارامتر (SEA_0) برابر مقدار انرژی کرنشی کل سازه با پایه ثابت (معادل با سطح زیر نمودار انرژی در برابر کرنش سازه با پایه ثابت در طول تحریک)، (SEA) مقدار انرژی کرنشی کل سازه دارای سیستم جداساز (معادل با سطح زیر نمودار انرژی در برابر کرنش سازه دارای سیستم جداساز در طول تحریک)، (U_{max0}) مقدار حداکثر انرژی کرنشی سازه با پایه ثابت در طول تحریک و (U_{max}) مقدار حداکثر انرژی کرنشی سازه دارای سیستم جداساز در طول تحریک می باشد.

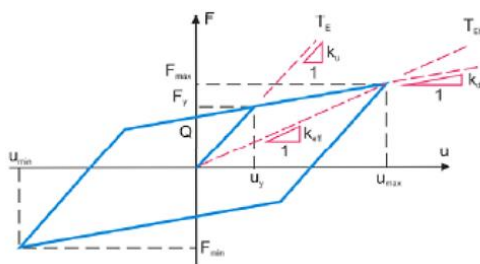
به دلیل کافی نبودن و در نظر گرفتن همه ابعاد مؤثر در بهبود عملکرد سازه اصلی در شاخص RPI، در این پژوهش به معرفی شاخص جدیدی با نام شاخص عملکرد نسبی وزنی (WRPI) پرداخته شده است که علاوه بر در نظر گرفتن اثرات انرژی کرنشی جذب شده در سازه و سیستم جداساز که در شاخص RPI آمده بود، معیار جابه جایی بین طبقات و شتاب طبقات در طول زلزله را نیز در بر گرفته است و همچنین با اعمال ضریب های وزنی به هر یک از این معیارها، شاخص WRPI برای انواع سازه های مختلف و با درجه اهمیت و کاربری های متفاوت مقیاس می گردد، که از مزایای این شاخص نسبت به شاخص RPI است. مقدار شاخص WRPI با استفاده از رابطه (۲) قابل محاسبه است. برای مقایسه عملکرد سیستم های جداسازی از دو معیار RPI و WRPI

جهت بررسی دقیق تر تأثیر شاخص WRPI دو پارامتر جانبی دیگر که ترم سوم و چهارم این پارامتر است به صورت زیر تعریف شده است.

$$\begin{cases} RA = \frac{\bar{a}_{(max)0}}{\bar{a}_{(max)}} \\ RD = \frac{\sigma d_{(max)0}}{\sigma d_{(max)}} \end{cases} \quad (4)$$

۵- مشخصات طراحی اولیه سیستم جداساز

سیستم جداساز به صورت یک فنر دوطبقی با مشخصات زیر مدل سازی شده است:



شکل ۶- رفتار فنر دوطبقی معادل شده با سیستم جداساز

با توجه به سیستم های جداساز متعارف موجود در بازار، حداکثر مقدار جابه جایی مجاز در سیستم جداساز ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به داده های آزمایشگاهی و مدل سازی های رایج در سایر مقالات مرتبط، رابطه بین سختی قبل از تسلیم K_1 و سختی بعد از تسلیم K_2 به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$K_1 = 10 \times K_2 \quad (5)$$

مقادیر اولیه برای مدل سازی عددی فنر دوطبقی معادل با سیستم جداساز در جدول (۳) گزارش شده است:

جدول ۳- مشخصات اولیه سیستم جداساز

Fy (kN)	K2 (kN/m)	K1 (kN/m)
۸۲۰۹	۳/۰۶	۳۰/۶۱

۶- روند ارزیابی عملکرد سازه

تلاش اولیه بر مبنای طراحی اولیه صورت گرفته است؛ با توجه به نتایج به دست آمده، در این حالت از درصد قابل توجهی از جابه جایی ماکزیمم ممکن استفاده نشده و همچنین مقادیر شاخص های ارزیابی عملکرد نسبتاً زیاد و طرح دارای عملکرد مناسبی نمی باشد. در تلاش دوم، مقدار نیروی تسلیم کاهش پیدا

استفاده و در هر گام سعی در کاهش این دو معیار شده است و در نهایت طرحی که دارای کمترین RPI و WRPI می باشد، به عنوان طرح با عملکرد بهتر انتخاب شده است.

$$WRPI = \frac{1}{A+B+C+D} \left[A \frac{SEA}{SEA_0} + B \frac{U_{max}}{U_{(max)0}} + C \frac{\bar{a}_{(max)0}}{\bar{a}_{max}} + D \frac{\sigma d_{(max)0}}{\sigma d_{(max)}} \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲)، $\bar{a}_{(max)0}$ مقدار میانگین حداکثر شتاب طبقات در سازه با پایه ثابت در طول تحریک، $\bar{a}_{max}$ مقدار میانگین حداکثر شتاب در سازه دارای سیستم جداساز پایه در طول تحریک، $\sigma d_{(max)0}$ مقدار انحراف معیار استاندارد حداکثر جابه جایی بین طبقه ای در سازه با پایه ثابت در طول تحریک و $\sigma d_{(max)}$ مقدار انحراف معیار استاندارد حداکثر جابه جایی بین طبقه ای در سازه دارای سیستم جداساز پایه در طول تحریک می باشد. همچنین پارامترهای A, B, C و D برابر مقادیر ضرایب هر معیار است که مطابق کاربری و درجه اهمیت سازه تعیین می گردد.

جهت محاسبه مقدار انحراف معیار استاندارد حداکثر جابه جایی بین طبقه ای در سازه از رابطه (۳) استفاده شده است. در این رابطه مقدار $d_{(max)i}$ برابر حداکثر جابه جایی بین طبقه ای برای هر طبقه، $\bar{d}_{(max)}$ میانگین جابه جایی بین طبقه ای همه طبقات و (n) تعداد طبقات می باشد.

$$\sigma d_{max} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_{(max)i} - \bar{d}_{(max)})^2}{n}} \quad (3)$$

مقادیر ضرایب A, B, C و D با توجه به کاربری و درجه اهمیت سازه می تواند تغییر کند؛ در این پژوهش با توجه به هدف طراحی که عدم تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه است، برای ضرایب A و B مقدار ۳ و ضرایب C و D مقدار ۱ در نظر گرفته شده است. اگر کاربری سازه به نحوی باشد که مقدار شتاب و یا تغییر مکان نسبی از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، ضرایب C و D برای بهبود این مقادیر افزایش می یابد. به صورت کلی برای سازه های حساس به شتاب و تغییر مکان، می توان ضرایب C و D و برای سازه های با نیاز به جذب انرژی بالاتر، ضرایب A و B را بیش تر در نظر گرفت. برای سازه های معمولی با هدف جذب انرژی و مقایسه آنها، ضرایب ۱ و ۳ طبق موارد گفته شده مناسب تر هستند.

در هر مرحله پس از تحلیل تاریخچه زمانی، نمودار انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه نسبت به زمان رسم شده است و همچنین مقادیر شتاب ماکزیمم طبقات و انحراف معیار ماکزیمم جابه جایی بین طبقه ای محاسبه شده و در نهایت مقادیر مورد نیاز جهت برآورد شاخص های فوق به کار رفته است.

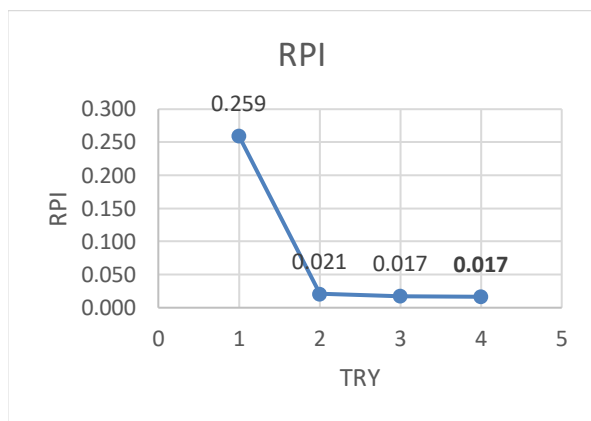
کرده و مقدار جابه‌جایی و جذب انرژی در سیستم جداساز افزایش یافته است. این روند ادامه یافته، در نهایت در تلاش چهارم به مقطع نهایی نزدیک شده که در آن مقادیر شاخص‌های عملکردی به‌وضوح کمتر شده و عملکرد سازه بهتر شده است. روند ارزیابی عملکرد و سعی و خطاهای انجام‌شده در جدول (۴)

گزارش شده است، که در این جدول شاخص RD نشان‌دهنده نسبت انحراف معیار ماکزیمم تغییر مکان‌های طبقات سازه جداسازی‌شده به سازه پایه ثابت، شاخص RA نسبت میانگین ماکزیمم شتاب طبقات سازه جداسازی‌شده به سازه پایه ثابت و شاخص MAX D_D حداکثر تغییر مکان در سیستم جداساز می‌باشد.

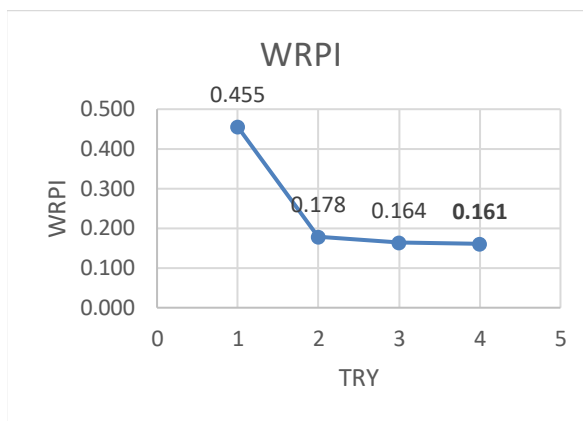
جدول ۴- روند ارزیابی عملکرد و مقادیر شاخص‌ها در هر مرحله

TRY	PROPERTY	RECORD	RPI	RD	RA	WRPI	MAX D _D (mm)
1	K ₁ =30.61 (kN/mm) K ₂ /K ₁ =0.1 F _y =8209 (kN/m ²)	LA10	۰/۱۶۵	۰/۹۵۳	۱/۲۰۲	۰/۳۱۵	۸۹/۳۹۱
		LA02	۰/۲۵۹	۰/۷۴۳	۱/۳۴۴	۰/۴۵۵	۹۲/۹۲۹
		EC	۰/۰۳۹	۱/۰۵۳	۰/۹۲۸	۰/۱۳۵	۷۴/۸۷۹
		MAX	۰/۲۵۹	۱/۰۵۳	۱/۳۴۴	۰/۴۵۵	۹۲/۹۲۹
2	K ₁ =30 (kN/mm) K ₂ /K ₁ =0.1 F _y =900 (kN/m ²)	LA10	۰/۰۲۱	۰/۱۸۱	۰/۹۹۰	۰/۱۲۱	۲۲۶/۷۹
		LA02	۰/۰۱۹	۰/۰۸۹	۱/۲۲۳	۰/۱۷۸	۱۷۹/۳
		EC	۰/۰۱۶	۰/۳۴۰	۰/۹۴۲	۰/۰۹۷	۹۷/۲۳۱
		MAX	۰/۰۲۱	۰/۳۴۰	۱/۲۲۳	۰/۱۷۸	۲۲۶/۷۹
3	K ₁ =20 (kN/mm) K ₂ /K ₁ =0.1 F _y =700 (kN/m ²)	LA10	۰/۰۱۷	۰/۱۶۷	۰/۹۳۱	۰/۱۱۲	۲۷۶/۲۵
		LA02	۰/۰۱۵	۰/۰۶۹	۱/۱۵۰	۰/۱۶۴	۱۹۸/۳۹
		EC	۰/۰۱۴	۰/۲۴۸	۱/۲۹۷	۰/۱۱۹	۱۰۳/۸۷
		MAX	۰/۰۱۷	۰/۲۴۸	۱/۲۹۷	۰/۱۶۴	۲۷۶/۲۵
4	K ₁ =18 (kN/mm) K ₂ /K ₁ =0.1 F _y =650 (kN/m ²)	LA10	۰/۰۱۷	۰/۱۶۲	۰/۹۱۹	۰/۱۰۹	۲۸۸/۹۶
		LA02	۰/۰۱۵	۰/۰۶۵	۱/۱۳۱	۰/۱۶۱	۲۱۱/۳۴
		EC	۰/۰۱۳	۰/۲۳۲	۰/۹۶۱	۰/۰۹۲	۹۸/۸۶۵
		MAX	۰/۰۱۷	۰/۲۳۲	۱/۱۳۱	۰/۱۶۱	۲۸۸/۹۶

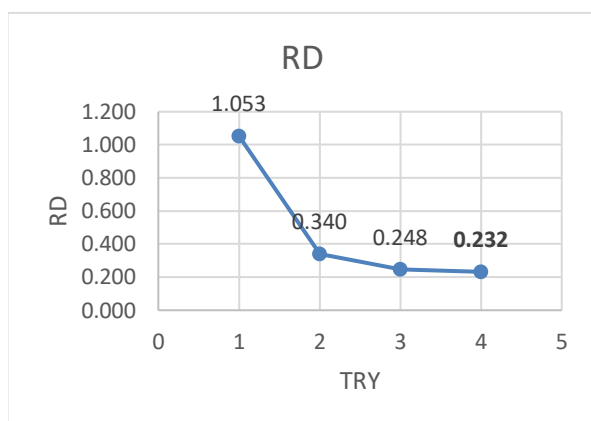




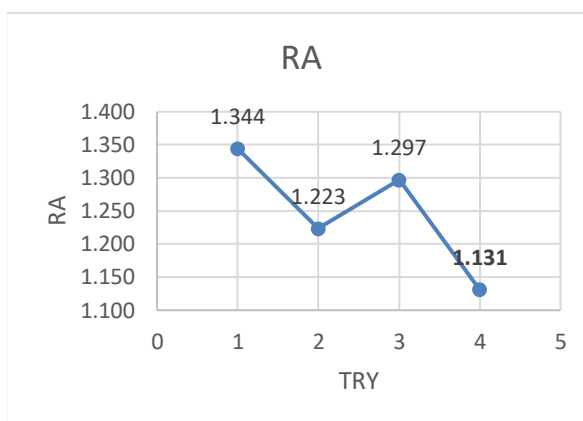
شکل ۸- مقادیر شاخص RPI در روند ارزیابی عملکرد



شکل ۷- مقادیر شاخص WRPI در روند ارزیابی عملکرد



شکل ۱۰- مقادیر شاخص RA در روند ارزیابی عملکرد



شکل ۹- مقادیر شاخص RD در روند ارزیابی عملکرد

قابل مشاهده هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تمامی پارامترها در طرح نهایی نسبت به طرح اولیه کاهش چشمگیری داشته‌اند. در محور افقی این نمودارها هر تحلیل با شماره‌های ۴ تا ۷ و در محور قائم آن مقادیر شاخص متناظر نمایش داده شده است.

۷- تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی تشکیل مفاصل پلاستیک در المان‌های سازه، جابه‌جایی بین طبقه‌ای، حداکثر شتاب مطلق طبقات پرداخته شده است. سپس سازه جداسازی شده و سازه پایه ثابت برای آزمایش طرح نهایی ارائه شده تحت تحریک حوزه نزدیک قرار گرفته و نتایج حاصل مقایسه شده است.

۷-۱- تشکیل مفاصل پلاستیک

در این قسمت به مقایسه تشکیل مفاصل پلاستیک در المان‌های سازه در سازه پایه ثابت و سازه جداسازی شده پرداخته شده است. همان‌طور که از نتایج ارائه شده در جدول (۵) مشخص است، در سازه جداسازی شده هیچ مفصل پلاستیکی در المان‌های سازه‌ای تشکیل نشده است که حاکی از بهبود عملکرد سازه جداسازی شده نسبت به سازه پایه ثابت است.

با توجه به ذات شاخص‌های معرفی و استفاده شده در روند ارزیابی عملکرد، با کاهش مقادیر محاسبه شده شاخص‌ها، سازه و سیستم جداساز پایه با طرح بهینه‌تر طراحی می‌گردد. درواقع با کاهش ترم اول و دوم شاخص WRPI سهم بیش‌تری از انرژی جذب شده در سیستم جداساز پایه ذخیره می‌گردد. همچنین با کاهش ترم سوم و چهارم این شاخص به‌ترتیب سهم بیش‌تری از شتاب و تغییر مکان در سیستم جداساز پایه اعمال می‌شود.

همان‌طور که از نتایج ارزیابی عملکرد مشخص است، استفاده از شاخص جدید WRPI علاوه بر افزایش جذب انرژی در سیستم جداساز پایه باعث کاهش شتاب طبقات و همچنین کاهش توزیع یکنواخت‌تر جابه‌جایی بین طبقه‌ای در سازه می‌گردد. درواقع این شاخص جدید برای مقایسه و طراحی بهینه‌تر سازه‌ها با عملکرد بالاتر مناسب‌تر است.

در روند ارزیابی عملکرد، سعی شده است مقادیر شاخص‌ها تا حد امکان و با توجه به مسائل اقتصادی کاهش یابد، که در نتیجه در تلاش چهارم شاخص‌ها مقادیر مناسبی که در شکل‌های (۷) الی (۱۰) به‌صورت دایره توپر نمایش داده شده‌اند،

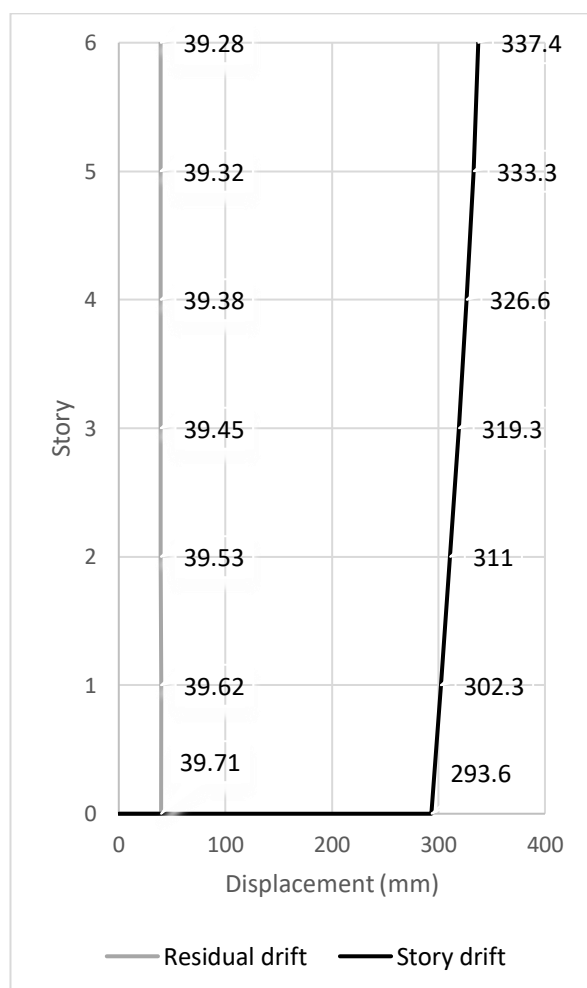
جدول ۵- تعداد مفاصل پلاستیک تشکیل شده در المان‌های سازه‌ای

Record	Fixed Base	Base Isolation			
		Try1	Try2	Try3	Try4
El Centro	۱۷	۵	۳	۲	۰
LA02	۴۳	۴	۵	۱	۰
LA10	۸۴	۳	۳	۲	۰

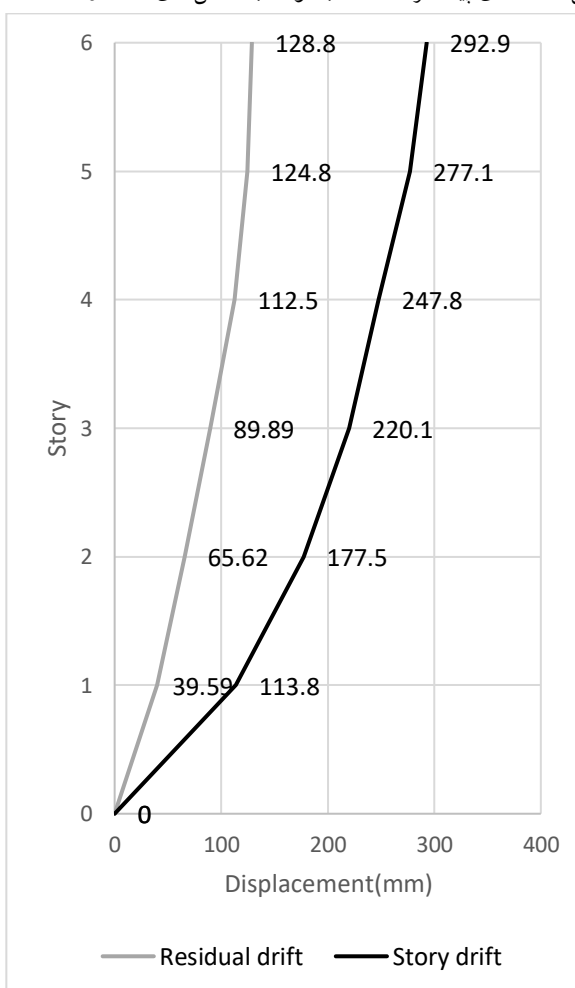
مشخص است که مقادیر جابه‌جایی حداکثر و پسماند در طبقات کاهش یافته و در قسمت جداساز که برای همین هدف طراحی شده است، متمرکز می‌باشد. همچنین توزیع جابه‌جایی بین طبقه‌ای در سازه دارای سیستم جداساز پایه نسبت به سازه با پایه ثابت یکنواخت‌تر شده که در شکل (۱۱) قابل مشاهده است.

۷-۲- جابه‌جایی بین طبقه‌ای

در نمودارهای زیر مقادیر جابه‌جایی حداکثر و باقی‌مانده ناشی از سه تحریک اعمال شده برای هر دو سازه پایه ثابت و با جداساز پایه گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر جابه‌جایی حداکثر و باقی‌مانده در سازه جداسازی شده کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده است. با توجه به شکل‌های (۱۱) و (۱۲)



شکل ۱۲- حداکثر جابه‌جایی سازه جداسازی شده تحت سه تحریک



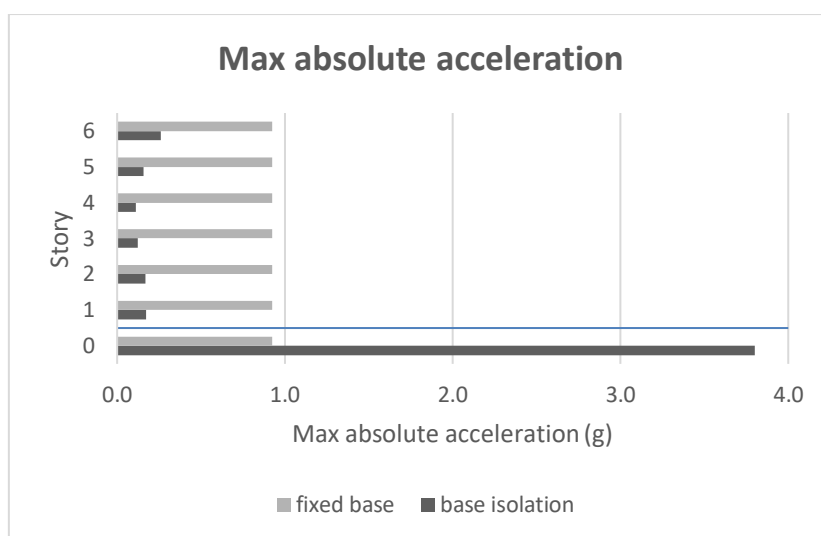
شکل ۱۱- حداکثر جابه‌جایی سازه پایه ثابت تحت سه تحریک

*در شکل (۱۱)، جابه‌جایی در طبقه صفر معادل جابه‌جایی سیستم جداساز می‌باشد.

۷-۳- شتاب مطلق طبقات

در نمودارهای زیر مقادیر حداکثر شتاب مطلق طبقات ناشی از سه تحریک اعمال شده برای هر دو سازه با پایه ثابت و دارای سیستم

جداساز پایه گزارش شده است. با توجه به شکل (۱۳)، مقدار حداکثر شتاب مطلق طبقات کاهش یافته و در سیستم جداساز متمرکز شده است.



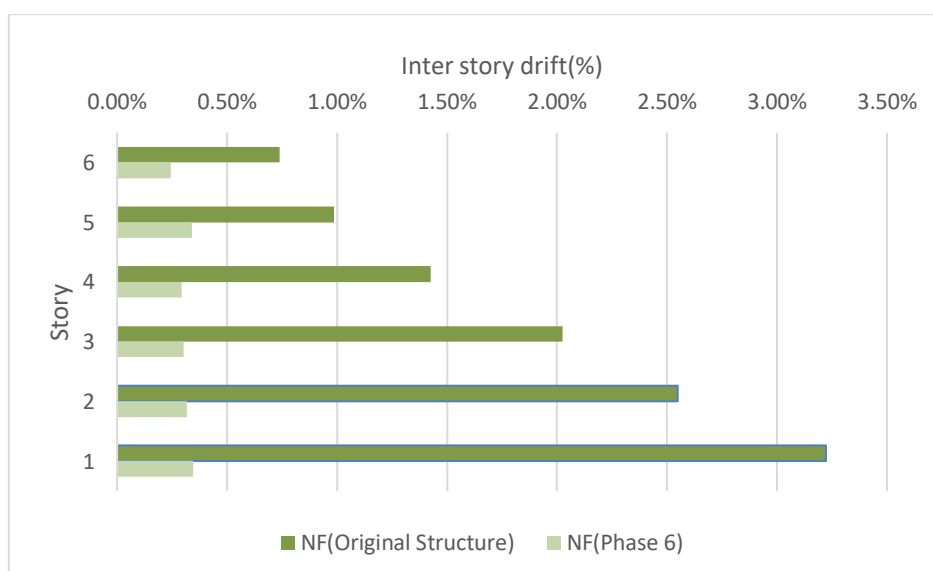
شکل ۱۳- حداکثر شتاب مطلق طبقات سازه پایه ثابت و جداسازی شده تحت سه تحریک اعمال شده

۷-۴- مقایسه طرح نهایی سازه با پایه ثابت و سازه دارای

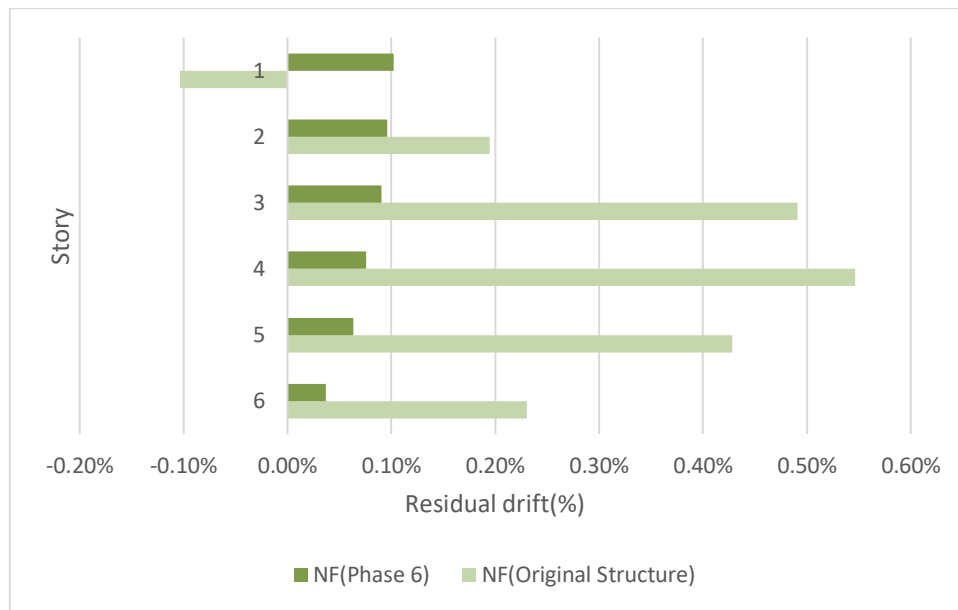
سیستم جداساز پایه تحت زلزله حوزه نزدیک

جهت مقایسه و بررسی شاخص ها، سازه با پایه ثابت و طرح نهایی سازه دارای سیستم جداسازی پایه تحت تحلیل زلزله حوزه نزدیک نورتریج قرار گرفت. با توجه به تحلیل ها و بررسی های انجام شده، سازه نهایی با عملکرد بهتر با استفاده از شاخص جدید

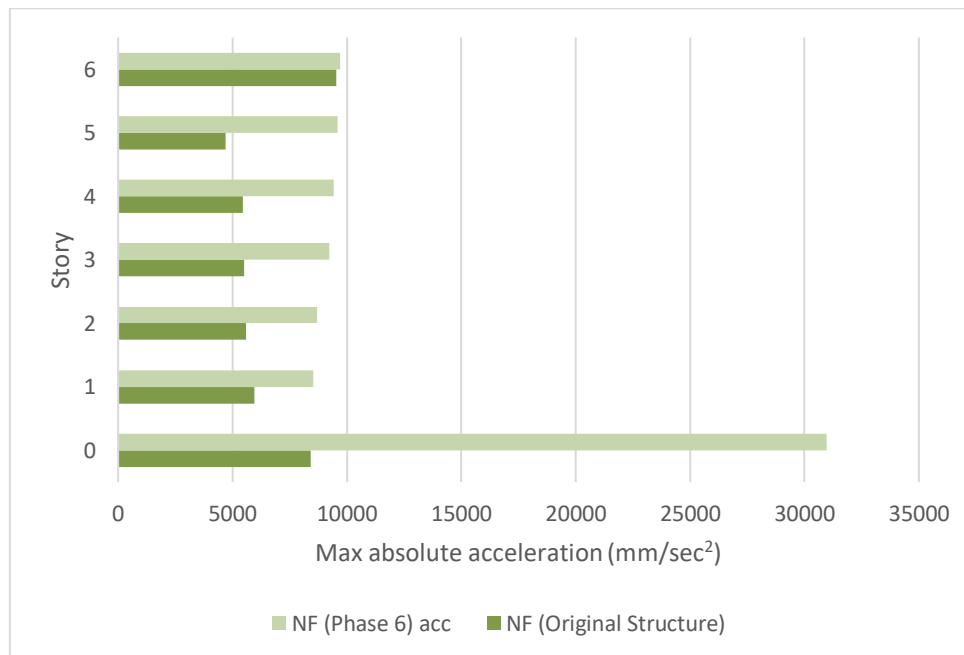
WRPI دارای سیستم جداساز پایه تحت زلزله حوزه نزدیک عملکرد مناسبی داشته و هیچ مفصل پلاستیکی در سازه تحت این زلزله تشکیل نشده و حداکثر شتاب مطلق طبقات و جابه جایی حداکثر و باقی مانده طبقات نیز نسبت به سازه با پایه ثابت کاهش داشته اند، که گویای کارآمد بودن شاخص WRPI در طرح نهایی با عملکرد بهتر سیستم جداساز می باشد.



شکل ۱۴- حداکثر جابه جایی نسبی طبقات در زلزله حوزه نزدیک



شکل ۱۵- مقایسه جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده در طبقات مختلف در زلزله حوزه نزدیک



شکل ۱۶- مقایسه شتاب مطلق طبقات در زلزله حوزه نزدیک

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به معرفی یک شاخص جهت ارزیابی عملکرد سازه‌های دارای سیستم جذب انرژی و بررسی و مقایسه این شاخص با شاخص‌های پیشین پرداخته شده است. برای این منظور پس از معرفی شاخص جدید WRPI به بررسی رفتار لرزه‌ای یک ساختمان شش طبقه معادل‌شده دویعدی در دو حالت سازه با پایه ثابت و سازه دارای سیستم جداساز پایه پرداخته شد. برای این

مقایسه رفتاری، سازه دارای سیستم جداساز پایه با استفاده از شاخص‌های ارزیابی عملکرد ارائه‌شده، طراحی و سیستم جداساز پایه با عملکرد بهتر طراحی شد. در قدم بعدی به مقایسه عملکرد سازه با پای ثابت و سازه دارای سیستم جداساز پایه پرداخته شد. همچنین برای ارزیابی طرح نهایی ارائه‌شده برای سیستم جداساز، سازه دارای سیستم جداساز پایه و سازه پایه ثابت تحت تحریک حوزه نزدیک قرار گرفتند و نتایج نهایی با هم مقایسه و مشاهده

شد که سازه دارای سیستم جداساز پایه با طراحی نهایی با شاخص WRPI عملکرد بسیار مناسبی نسبت به سازه پایه ثابت از خود نشان می‌دهد.

به‌عنوان نتیجه اصلی می‌توان گفت که شاخص پیشنهادی WRPI معرفی‌شده جهت طراحی و مقایسه عملکرد سازه‌های دارای سیستم جذب انرژی به‌خصوص سیستم جداساز پایه نسبت به شاخص‌های قبلی به‌خوبی می‌تواند دربرگیرنده طیف گسترده‌ای از تغییرات به‌وجودآمده در سازه در فرایند ارزیابی عملکرد باشد که منجر به طرح کارآمد با نتایج معقول‌تر با در نظر گرفتن انرژی جذب‌شده، شتاب و تغییر مکان طبقات سازه می‌شود.

در نتیجه استفاده از این شاخص خصوصاً برای طراحی سیستم‌های جذب انرژی برای سازه‌ها با نیاز به عملکرد بهتر از جمله سازه‌های حساس به شتاب و تغییر مکان مانند بیمارستان‌ها و ... می‌تواند بهبوددهنده و مؤثر باشد.

- response index", *Journal of Structural Engineering*, 135(6), pp.698-707.
- [12] Yanik, A., Aldemir, U., and Bakioglu, M. (2014), "A new active control performance index for vibration control of three-dimensional structures", *Engineering Structures*, 62, pp.53-64.
- [13] Yanik, A. (2019), "Absolute instantaneous optimal control performance index for active vibration control of structures under seismic excitation", *Shock and Vibration*, 2019(1), p.4207427.
- [14] Djedoui, N., Ounis, A., Mahdi, A., and Zahrai, S.M. (2018), "Semi-active fuzzy control of tuned mass damper to reduce base-isolated building response under harmonic excitation", *Jordan Journal of Civil Engineering*, 12(3).
- [15] Shoaee, P., Orimi, H.T., and Zahrai, S.M. (2018), "Seismic reliability-based design of inelastic base-isolated structures with lead-rubber bearing systems", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, pp.589-605.
- [16] Shi, Y., Becker, T.C., Furukawa, S., Sato, E., and Nakashima, M. (2014), "LQR control with frequency-dependent scheduled gain for a semi-active floor isolation system", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(9), pp.1265-1284.
- [17] Miyamoto, K., Sato, D., and She, J. (2018), "A new performance index of LQR for combination of passive base isolation and active structural control", *Engineering Structures*, 157, pp.280-299.
- [18] Banaei, A., and Alamatian, J. (2021), "New genetic algorithm for structural active control by considering the effect of time delay", *Journal of Vibration and Control*, 27(7-8), pp.743-758.
- [19] Banaei, A., Alamatian, J., and Tohidi, R.Z. (2023), "Active control of structures using genetic algorithm with dynamic weighting factors in the constrained objective function", in *Structures*, vol. 47, pp. 189-200.
- [20] Forma, L., Boutin, H., Wilkie-Chancellier, N., Le Conte, S., and Jossic, M. (2025), "An innovative method for the objective comparison of the performance of active control devices", *Journal of Sound and Vibration*, 596, p.118688.
- [21] Tsai, K.C., and Popov, E.P. (1990), "Seismic panel zone design effect on elastic story drift in steel frames", *Journal of Structural Engineering*, 116(12), pp.3285-3301.
- [22] UBC (1994), "Uniform building code", Volume 1, International Conference of Building Officials.
- [23] Loads MD. (2017), "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures".
- [1] Moriizumi, E., and Kobayashi, M. (2012), "A study on earthquake response considered vibration characteristics of superstructure and substructure of seismically isolated buildings", In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal, pp. 24-28.
- [2] Iordachescu, A., and Iordachescu, E. (2012), "Seismic rehabilitation of Bucharest City Hall building through base isolation method", In *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake*, Lisbon, Portugal.
- [3] Filiatrault, A., and Cherry, S. (1990), "Seismic design spectra for friction-damped structures", *Journal of Structural Engineering*, 116(5), pp.1334-1355.
- [4] Shenton III, H.W., and Lin, A.N. (1993), "Relative performance of fixed-base and base-isolated concrete frames", *Journal of Structural Engineering*, 119(10), pp.2952-2968.
- [5] Moreshchi, L.M., and Singh, M.P. (2003), "Design of yielding metallic and friction dampers for optimal seismic performance", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(8), pp.1291-1311.
- [6] Li, H., and Ou, J. (2006), "A design approach for semi-active and smart base-isolated buildings", *Structural Control and Health Monitoring: The Official Journal of the International Association for Structural Control and Monitoring and of the European Association for the Control of Structures*, 13(2-3), pp.660-681.
- [7] Naderpour, H., Zahrai, S.M., and Kalantary, S.M. (2008), "Nonlinear dynamic response of base-isolated structures with different characteristics of superstructure and isolators", In *Proceedings, CSCE Annual Conference - Canadian Society Civil Engineering*.
- [8] Zahrai, S.M., GHarahshir, N., and Yazdani, M. (2011), "Behavior of Base isolated Structures in the Christchurch Earthquake", In *The 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering*. Tehran, Iran.
- [9] Morgan, T.A., and Mahin, S.A. (2008), "Performance-based design of seismic isolated buildings considering multiple performance objectives", *Smart Structures System*, 4(5), pp.655-666.
- [10] Erduran, E., Dao, N.D., and Ryan, K.L. (2011), "Comparative response assessment of minimally compliant low-rise conventional and base-isolated steel frames", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40(10), pp.1123-1141.
- [11] Sayani, P.J., and Ryan, K.L. (2009), "Comparative evaluation of base-isolated and fixed-base buildings using a comprehensive

