



## بهسازی لرزه ای ساختمان ۱۰ طبقه فولادی با افزودن یک طبقه جداسازی شده در بام

حمید کاظمی\*<sup>۱</sup>، فاطمه فاطمی<sup>۲</sup>، عباسعلی صادقی<sup>۳</sup>

<sup>۱\*</sup> استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> دانش آموخته دکتری تخصصی، گروه مهندسی عمران، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

(kazemi0518@mshdiau.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۰)

### چکیده

به کارگیری جداسازهای لرزه‌ای در پایه یا طبقات میانی با بهره‌گیری از سازوکار میراگرهای جرمی تنظیم شده در سازه‌ها، روش مؤثری برای کنترل رفتار لرزه‌ای ساختمان‌ها فراهم کرده است. در این تحقیق، سه سازه فولادی با سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط که به ترتیب ۱۰ طبقه با استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم، ۱۰ طبقه با ویرایش چهارم و ۱۰ طبقه با ویرایش دوم همراه با یک طبقه اضافی روی جداساز لرزه‌ای در طبقه آخر، طراحی و مدل‌سازی گردیده است و تحت تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بارافزون و دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی با سه زلزله‌ی دور ازگسل قرار گرفته‌اند. نتایج به صورت نمودارهای بارافزون و تاریخچه‌زمانی جابجایی بام و برش پایه و مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی و شتاب طبقات ارائه شدند تا به کارگیری جداساز در بهسازی سازه‌ها و کاهش میزان اثرگذاری ضوابط لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه گردد. نتایج تحقیق نشان داد که افزودن یک طبقه جداسازی شده در بام اثر چشم‌گیری در کاهش تغییر مکان نسبی طبقات داشته و برای سازه‌ی طراحی شده بر اساس استاندارد لرزه‌ای ۲۸۰۰ ویرایش دوم به میزان میانگین ۲۵ درصد بوده است. افزون بر این، استفاده از جداساز لرزه‌ای سبب کاهش ۳۰ درصدی برش پایه و ۴۰ درصدی جابجایی بام گردیده است. همچنین، نتایج بیان‌گر کارآمدی به کارگیری طبقه‌ی جداسازی شده به عنوان طبقه‌ی آخر برای کاهش خسارت وارده است.

### کلمات کلیدی

قاب خمشی فولادی، جداساز لرزه‌ای، میراگر جرمی تنظیم شده، تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی.



# Seismic Rehabilitation of 10-Story Steel Building by Adding an Isolated Story at Roof Level

Hamid Kazemi<sup>1\*</sup>, Fateme Fatemi<sup>2</sup>, Abbasali Sadeghi<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

<sup>2</sup> M.Sc., Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

<sup>3</sup> Ph.D., Department of Civil Engineering, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran

(kazemi0518@mshdiau.ac.ir)

(Date of received: 23/09/2023, Date of accepted: 11/12/2023)

## ABSTRACT

The application of seismic isolators at the base or mid stories by employing the mechanism of tuned mass dampers (TMDs) in structures provides an effective seismic control method for buildings. In this study, three prototypes of 10-story steel moment-resisting frame structures with intermediate ductility that are designed in accordance with second and fourth editions of Iranian Seismic Design Code (Standard No. 2800) as well as the second edition with one story on seismic isolator at the last floor were designed and modelled using nonlinear static pushover and nonlinear dynamic time history analyses under three far-fault earthquakes. The results were presented in the form of pushover curves and time history of roof displacement, base shear, maximum drift and roof acceleration of stories to compare the seismic enhancement of roof-level isolating technique and the effectiveness of the seismic criteria of Standard No. 2800. The results of research indicated that adding on isolated story at roof level had a significant effect on decreasing the drift of the stories. This reduction for the designed structure based on the second edition of Standard No. 2800 is down to an average maximum of 25%. In addition, using seismic isolators reduces the base shear by 30%. The decrease in the amount of roof displacement is also 40%. Also, the results showed that the efficiency of isolated story application as the last story to reduce the damage

## Keywords:

Steel Moment-Resisting Frame, Seismic Isolator, Tuned Mass Damper (TMD), Nonlinear Static Pushover Analysis, Nonlinear Dynamic Time History Analysis.



در سال‌های اخیر، روش‌های زیادی در راستای کنترل و مقابله با نیروی زلزله به کار گرفته شده است که استفاده از سیستم‌های جذب انرژی شامل جداسازهای لرزه‌ای و میراگرها، در طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و موثرترین این روش‌ها محسوب می‌شوند. سیستم جداساز لرزه‌ای<sup>۱</sup>، با سختی جانبی کمی که بین سازه و پی ایجاد می‌کند، سازه را از مؤلفه‌های افقی حرکت زمین جدا می‌سازد و با به‌کارگیری جداسازها، می‌توان انتقال انرژی موجود در حرکت ارتعاشی زمین را به ساختمان محدود نمود. در این روش، هنگام زمین‌لرزه تغییرشکل‌های ساختمان در تکیه‌گاه‌ها متمرکز شده و سازه مانند جسم صلب با تغییرشکل‌های نسبی کوچک ارتعاش می‌کند. سیستم میرایی نیز با جذب بخش چشمگیری از انرژی لرزه‌ای و استهلاک آن، با سازوکاری ایمن‌تر نسبت به اجزای سازه‌ای سنتی، باعث کاهش پاسخ‌ها و در نتیجه حفظ اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای از خسارت‌های شدید می‌شود [۱]. از آنجایی که نصب سیستم‌های جداساز لرزه‌ای منجر به افزایش قابل ملاحظه در زمان تناوب اصلی سازه و کاهش نیروهای وارد بر سازه می‌شود، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای پایه در ساختمان‌های کوتاه و متوسط روی خاک سخت (ساختمان‌های نسبتاً صلب)، به دلیل پایین بودن زمان تناوب آن‌ها مناسب‌اند، لذا برای ساختمان‌های بلند روی خاک نرم (ساختمان‌های نرم)، به دلیل بالا بودن زمان تناوب آن‌ها توصیه نمی‌شوند. از سوی دیگر، استفاده از میراگرها در سازه‌های بلند، در کاهش پاسخ و جابجایی، کارآمد بوده حال آن که در سازه‌های سخت و کوتاه به علت محدود بودن جابه‌جایی‌ها، به‌طور ذاتی استفاده از آن‌ها چندان کارآمد نیست. به دلیل تغییرات زیاد آیین‌نامه‌های طراحی، در حال حاضر ساختمان‌های زیادی وجود دارند که فاقد سختی و مقاومت کافی در مقابل زمین‌لرزه‌های بزرگ می‌باشند و پاسخگوی نیاز آیین‌نامه‌های جدید نمی‌باشند [۲]. با توجه به لرزه‌خیزی بالای کشور ایران، در دهه‌ی اخیر اثر کاربرد فناوری و تجهیزات جدید در ساختمان‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. از سوی دیگر، پژوهشگران به دنبال راهکارهایی بوده‌اند که با استفاده از آن‌ها بتوان از نیروی اعمالی زمین‌لرزه به سازه بکاهند. لذا با توسعه‌ی روزافزون دانش و فن‌آوری، طراحی و ساخت سامانه‌های مقاومی همچون ابزار کنترل فعال، نیمه‌فعال و غیرفعال افزایش یافت. در این میان، کاربرد سامانه‌های کنترل غیرفعال که نیاز به منبع انرژی خارجی نداشته را در سازه توجیه‌پذیر ساخته است [۳]. از این روی، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی استفاده‌ی جداسازها همراه با میراگر جرمی تنظیم شده ( $TMD$ )<sup>۲</sup> همچنین استفاده‌ی آن‌ها در مکانی به غیر از زیر ستون‌های سازه صورت گرفته است. در این راستا، اهمیت پژوهش کنونی در بررسی مقاوم‌سازی ساختمان با افزوده نمودن یک طبقه‌ی جداسازی شده به آخرین طبقه‌ی ساختمان موجود به منظور بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان نهفته است. افزون بر این، ارزیابی میزان تفاوت رفتار سازه‌های موجود که تحت آیین‌نامه‌های لرزه‌ای قدیمی طراحی شده‌اند با سازه‌های آینده بسیار پراهمیت است. این در حالی است که در آیین‌نامه‌های جدید سطح نیروی طراحی افزایش یافته است، بنابراین سطح مقاومت ساختمان‌های موجود به مرور زمان نسبت به این آیین‌نامه‌ها فاصله گرفته و این ساختمان‌ها پاسخگوی نیاز آیین‌نامه‌های موجود نیستند [۴]. این تحقیق در نظر دارد به منظور بهسازی لرزه‌ای ساختمان فولادی ۱۰ طبقه موجود که بر اساس سطح نیروی جانبی کمتری طراحی شده است، با افزودن یک طبقه‌ی جداسازی شده به آخرین طبقه‌ی آن (مانند یک میراگر جرمی تنظیم شده)، به بهبود عملکرد لرزه‌ای ساختمان مذکور تحت رکوردهای دور از گسل کمک نماید تا منجر به کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای نظیر: تغییر مکان نسبی طبقات، جابه‌جایی بام، برش پایه و شتاب طبقات گردد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند روش کاربردی مناسبی را برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های موجود، در کنار توسعه سطح کاربری موثر ساختمان‌ها را ارائه دهد.

<sup>1</sup> Seismic Isolator

<sup>2</sup> Tuned Mass Damper



## ۲- پیشینه تحقیق

روش‌های طراحی و فناوری‌های اجرای ساختمان‌های مقاوم در برابر زلزله در سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته است. در این میان سیستم‌های کنترلی و مستهلک‌کننده انرژی مانند جداساز لرزه‌ای و میراگرها در ساختمان‌ها، عملکرد مناسبی را در برابر خطرات لرزه‌ای از خود نشان داده و از این رو مورد توجه محققان و مهندسان واقع شده‌اند. رابینسون و همکاران<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۱ جداساز لاستیکی با هسته سربی (*LRB*)<sup>۴</sup> را معرفی کردند که از لایه‌های لاستیک، فولاد و هسته‌ی سربی تشکیل شده است. جداساز لاستیکی با هسته سربی به عنوان یکی از متداول‌ترین انواع جداساز، انعطاف‌پذیری را به وسیله‌ی لاستیک‌هایش و میرایی را به وسیله‌ی هسته‌ی سربی افزایش می‌دهد [۵]. فرضیه‌ی میراگر جرمی تنظیم شده برای اولین بار در سال ۱۹۰۹ توسط فرام<sup>۵</sup> برای کاهش حرکات سالن کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۶]. در همین راستا، این مفهوم مورد توجه ویژه‌ی محققان بسیاری قرار گرفت و آنها این سیستم را جهت کنترل ارتعاشات، تحت بارهای متعددی مورد بررسی قرار دادند [۷]. اولین نظریه درباره‌ی میراگرهای جرمی تنظیم شده در سال ۱۹۲۸ توسط دن هارتگ<sup>۶</sup> ارائه گردید؛ این تئوری اولیه برای یک سیستم یک درجه آزادی نامیرا، تحت اثر بارهای هارمونیک مطرح گردید [۸]. در سال ۲۰۰۳، پینکیوو و همکاران<sup>۷</sup> میزان اثر و کارکرد *TMD* در کاهش خسارت لرزه‌ای وارده به ساختمان بتن آرمه با ۲۰ طبقه را مورد مطالعه قرار دادند و با معادل سازی آن به صورت یک سیستم تک درجه آزادی غیرخطی، آن را تحت بار هارمونیک و تحریک زلزله‌ی مکزیکوسیتی ۱۹۸۵، مورد تحلیل غیرخطی قرار دادند. نتایج نشان داد که اگر چه *TMD* نمی‌تواند پیشینه‌ی جابه‌جایی سازه کنترل شده را پس از جاری شدن کاهش دهد. اما، می‌تواند به طور چشم‌گیری آسیب‌های وارد به سازه را کاهش دهد [۹]. در سال ۲۰۰۶، راس و بومچرا<sup>۸</sup> به وسیله‌ی *TMD*، به اثر مطلوب این سیستم کنترلی در کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای پرداخته و آن را به عنوان یک سیستم کاملاً کارآمد در کاهش پاسخ‌های ارتعاشی سازه‌ها تحت تحریکات باد و هارمونیک معرفی نموده و پارامترهای متغییر تحریک زمین را در آثار کنترلی آن مورد بررسی قرار داده است [۱۰]. پتی و همکاران<sup>۹</sup> در سال ۲۰۰۹ مناسب‌ترین مکان بر اساس بیشترین انتقال در فرکانس سازه را از فرکانس نیروی رزونانسی به دست آوردند. آن‌ها نشان دادند که با قرار گیری مؤثر میراگرهای جرمی در مکان مناسب کارایی جاذب‌های انرژی به طور ویژه بهبود می‌یابد [۱۱]. مون<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۱۰، به این نتیجه رسید که میراگر جرمی در صورت توزیع در ارتفاع سازه و بر اساس اشکال مدی عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد [۱۲]. در سال ۲۰۱۳، فرشیدیانفر و سهیلی با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه‌ها، پارامترهای بهینه برای میراگر جرمی تنظیم شده را در ساختمان‌های بلند مرتبه و با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به منظور کاهش حداکثر جابه‌جایی و شتاب طبقات یافتند [۱۳]. در پژوهش کاتو و همکاران<sup>۱۱</sup> در سال ۲۰۱۴، یک مدل تحلیلی برای جداسازهای لاستیکی با میرایی بالا پیشنهاد شد. این مدل قادر است که در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی به ارزیابی رفتار الاستوپلاستیک این میراگر تحت بارگذاری‌های دوسویه لرزه‌ای و باد بپردازد [۱۴]. هدایتی و علم در سال ۲۰۱۴، عملکرد جداساز ساخته شده از الیاف تقویت‌شده (*FRP*)<sup>۱۲</sup> با سیم‌هایی از جنس آلیاژ حافظه‌دار شکلی<sup>۱۳</sup> را ارزیابی کردند. برای رسیدن به این هدف، یک نمودار جریان طراحی بر اساس سطوح عملکرد به همراه نمونه‌ای از روند طراحی فراهم آمد تا میزان سطح مقطع سیم‌ها در حالت پیش‌کرنش<sup>۱۴</sup> تعیین گردد. یافته‌ها مشخص کردند که به کارگیری سیم‌های آلیاژ حافظه‌دار سبب افزایش جذب انرژی در هنگام زلزله می‌شود [۱۵].

<sup>3</sup> Rabinson et al.

<sup>4</sup> Lead Rubber Bearing

<sup>5</sup> Frahm

<sup>6</sup> Den Hartog

<sup>۷</sup> Pinkaew et al.

<sup>۸</sup> Ras and Boumechra

<sup>9</sup> Petit et al.

<sup>10</sup> Moon

<sup>11</sup> Kato et al.

<sup>12</sup> Fiber Reinforced Polymer

<sup>13</sup> Shape Memory Alloy

<sup>14</sup> Pre-strain



در پژوهش چن و همکاران<sup>۱۵</sup> در سال ۲۰۱۵، یک سازوکار جذب انرژی با الهام گرفتن از پوسته‌های یک نوع صدف دریایی به نام آبالون<sup>۱۶</sup> برای جداسازهای لرزه‌ای توسعه یافت. این نوع سازوکار دارای پیوندهای قربانی و طول پنهان است که در آن مهارهای ضربدری به کاهش لرزش‌ها کمک می‌کنند. این نوع جداساز نوآورانه توسط یک مدل تحلیلی ارزیابی شد و رویکرد بهینه‌سازی توسط روش چندهدفه صورت پذیرفت. در کنار این بررسی، جداساز زیستی با نوع لاستیک هسته‌سربی و جداساز خطی با میرایی بالا مقایسه گردید. یافته‌ها نشان دادند که جداسازهای زیستی عملکرد چشم‌گیری نسبت به دیگر انواع جداساز به‌ویژه در زمین‌لرزه‌های حوزه‌ی نزدیک دارد [۱۶]. حوسن و همکاران<sup>۱۷</sup> در سال ۲۰۱۶، به ارزیابی کارایی میراگر جرمی چندگانه که بر اساس اشکال مدی غالب در طبقات مختلف یک مدل جرم و فنر از سازه‌ی ۱۰ طبقه توزیع شده بودند، پرداختند. نتایج کار آنها، توانایی قابل توجه این نوع از میراگرها را در کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه تحت شتابنگاشت‌های سه زلزله‌ی واقعی به عنوان جایگزینی برای میراگر جرمی منفرد و میراگر جرمی چندگانه در طبقه‌ی بام نشان داد [۱۷]. گواردهان و پائول<sup>۱۸</sup> در سال ۲۰۱۶، به بررسی آثار هسته‌ی سربی در جداسازهای الاستومری برای سازه‌های موجود در مناطق لرزه‌ای پرداختند. از آن جایی‌که هسته‌های سربی در جداسازها پس از اعمال برانگیزش‌های سازه‌ای آسیب می‌بینند، در این پژوهش تلاش بر این شد تا جداسازهایی طراحی گردند که بدون هسته‌ی سربی باشند. از این روی، پیشنهاد شد تا از لایه‌های سربی به جای هسته استفاده شود تا عملکرد این جداسازها بهبود یابد [۱۸]. کنسلارا و انگلیس<sup>۱۹</sup> در سال ۲۰۱۷، به ارزیابی و تحلیل دینامیکی غیرخطی سامانه‌های مختلف جداساز برای یک سازه‌ی قاب فولادی نامنظم در پلان پرداختند. از جداساز لرزه‌ای با میرایی بالا (*HDRB*)<sup>۲۰</sup> به همراه میراگر لغزشی سایشی و جداساز هسته‌سربی استفاده شد. نتایج نشان داد که جداساز هسته‌سربی ۱۵ تا ۳۰ درصد ظرفیت جذب انرژی بیشتری نسبت به جداساز *HDRB* دارد [۱۹]. در سال ۲۰۱۸، بیات و همکاران عملکرد میراگر جرمی چندگانه توزیع شده در ارتفاع را در یک مدل جرم و فنر سازه‌ی ۴ طبقه تحت شتابنگاشت‌های سه زلزله‌ی واقعی بررسی نمودند. با استناد به نتایج، آنها گزارش کردند که عملکرد میراگر جرمی چندگانه در کنترل لرزه‌های سازه مناسب‌تر از میراگرهای جرمی منفرد می‌باشد [۲۰]. اخلاق پسند و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی و مقایسه عملکرد میراگر جرمی منفرد واقع در محل بیشینه جابجایی مدی (بام سازه) و میراگرهای جرمی چندگانه توزیع شده در ارتفاع سازه بر اساس تحلیل مودال، از یک سازه ۴۰ طبقه در دو حالت خطی و غیرخطی پرداختند. نتایج تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که کنترل سازه در حالت خطی توسط میراگرهای جرمی چندگانه تنظیم شده بر اساس مدهای اول و دوم رفتار مناسب‌تری نسبت به سایر حالت‌ها دارد [۲۱]. مهدی‌زاده و همکاران در سال ۲۰۲۰، نقش جداساز پایه در ساختمان‌های فولادی تحت تأثیر اعمال زلزله‌ها با زوایای مختلف را بررسی نمودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که ساختمان‌های فولادی تحت زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه دارای پاسخ‌های لرزه‌ای بزرگ‌تر و بحرانی‌تری بوده، همچنین تأثیر جداساز بر کاهش پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها در زوایای ۶۰ و ۹۰ درجه چشم‌گیرتر بوده است [۲۲].

### ۳- روش تحقیق

در این مطالعه به منظور بررسی یک روش بهسازی موثر ساختمان، سه سازه‌ی فولادی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط شامل سازه طرح شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم [۲۳] (*St10-2800-V2*)، سازه طرح شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۲۴] (*St10-2800-V4*) و سازه طرح شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم به همراه یک طبقه اضافی با جداساز لرزه‌ای (*St11-2800-V2-Iso*) مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی شده‌اند. در طراحی سازه‌ها از ضوابط مقررات ملی ساختمان

<sup>۱۵</sup> Chen et al.

<sup>۱۶</sup> Abalone

<sup>۱۷</sup> Hussan et al.

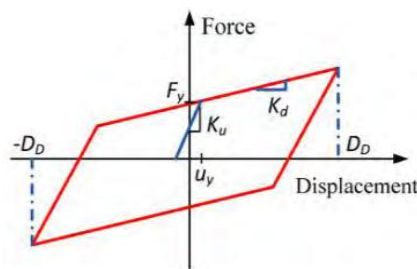
<sup>۱۸</sup> Govardhan and Paul

<sup>۱۹</sup> Cancellara and Angelis

<sup>۲۰</sup> High Damping Rubber Bearing



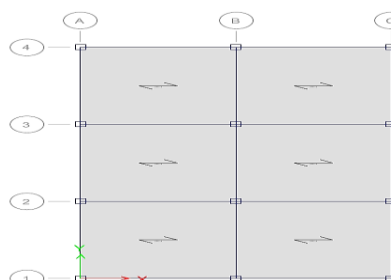
مباحث ششم و دهم [۲۵ و ۲۶] استفاده شده و جهت طراحی جداساز لرزه‌ای از نشریه ۵۲۳ دفتر نظام فنی و اجرایی کشور ایران استفاده شده است [۲۷]. برای کنترل رفتار سازه مجهز به جداساز لرزه‌ای از آیین‌نامه *ASCE-7* بهره برده شده است [۲۸]. رفتار بار-تغییرمکان جداساز مذکور به صورت ایده‌آل‌سازی شده در شکل ۱ نمایش داده شده است [۲۹]. جدول ۱ مشخصات طراحی جداساز لرزه‌ای را نشان می‌دهد و پارامترهای این جدول عبارت‌است از: زمان تناوب طبیعی هدف ( $T_D$ )، تغییرمکان طرح ( $D_D$ )، نسبت میرایی موثر ( $\beta_{eff}$ )، ارتفاع کل سیستم جداساز لرزه‌ای ( $H$ )، قطر هسته‌ی سربی ( $d$ )، تعداد لایه‌های لاستیک ( $N$ )، سختی موثر ( $K_{eff}$ )، سختی پس از تسلیم ( $K_d$ )، تغییرمکان تسلیم و تنش تسلیم ( $F_y$ ). عرض دهانه‌ها ۶ متر و ارتفاع طبقه‌ی اول ۴/۵ متر و سایر طبقات ۳/۵ متر و ارتفاع طبقه‌ی جداسازی شده ۳ متر است. شتاب مبنای طرح ۳۰ درصد شتاب ثقل و خاک بستر از نوع *II* انتخاب شده است. بار مرده و زنده تمامی طبقات به ترتیب برابر با ۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع فرض شده است. جرم لرزه‌ای طبقات برابر با بار مرده به علاوه ۲۰ درصد بار زنده در نظر گرفته شد. فولاد مصرفی از نوع *St37* با مشخصات مدول الاستیسیته معادل  $210 \times 10^6$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، ضریب پواسون  $0.3$  و تنش تسلیم معادل ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌باشند. تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بارافزون و دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌زمانی تحت سه شتاب‌نگاشت دور از گسل هم‌پایه شده انجام شده است. خروجی‌های نرم‌افزار به صورت وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک، وضعیت نقطه‌ی عملکرد، منحنی‌های ظرفیت، نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی بام و برش پایه و همچنین مقادیر بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات و شتاب میان طبقه‌ای ارائه شده است تا بتوان نتایج را به درستی مورد مقایسه و بررسی قرار داد. همچنین تحلیل خسارت مدل‌ها به کمک گزارش *HAZUS* [۳۰] و تحلیل ثقلی سازه‌ها به منظور ارزیابی هزینه‌ی بهسازی انجام شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ به جزئیات مربوط به سازه‌ی مدل‌سازی شده پرداخته شده است.



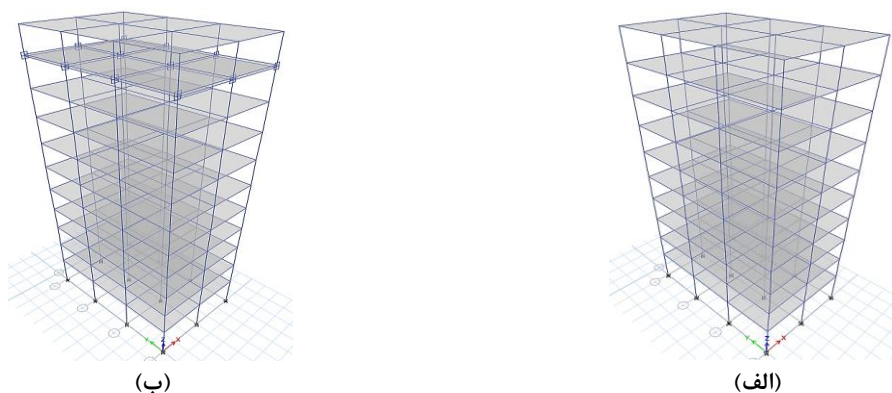
شکل ۱: رفتار بار-تغییرمکان جداساز لرزه‌ای [۲۹].

جدول ۱. مشخصات طراحی جداساز لاستیکی با هسته سربی [۲۷].

پارامتر	$T_D$ (sec)	$D_D$ (cm)	$\beta_{eff}$ (%)	$H$ (cm)	$d$ (cm)	$N$	$K_{eff}$ (kN/m)	$K_d$ (kN/m)	$D_y$ (cm)	$F_y$ (kN)
جداساز	۲/۵	۳۰	۱۵	۳۵	۷	۲۵	۴۲۷	۳۲۷	۱/۰۲	۳۳/۵



شکل ۲: پلان مشترک ساختمان فولادی ۱۰ طبقه.



شکل ۳: نمای سه بعدی ساختمان الف) ۱۰ طبقه و ب) ۱۱ طبقه با جداساز لرزه‌ای در طبقه ۱۱.

در این تحقیق، مفاصل پلاستیک با استفاده از تعریف پارامترهای سخت‌شدگی هیستریزیس و براساس آیین‌نامه *FEMA-356* نیز تعریف شده‌اند [۳۱]. مفاصل پلاستیک در نسبت طولی صفر و یک در ستون‌های قاب و در نسبت طولی ۵ و ۹۵ درصد در تیرها در نظر گرفته شده و کنترل ضوابط لرزه‌ای مانند تغییر مکان نسبی طبقات بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش دوم و چهارم انجام شده است. همچنین نسبت تنش در تمام اعضای مدل‌های سازه‌ای ۱۰ طبقه کمتر از ۱ است. مشخصات مقاطع مدل‌های قاب خمشی فولادی ۱۰ طبقه در سناریوهای مورد مطالعه در جدول‌های ۲ تا ۴ ارائه شده است:

جدول ۲. مقاطع طراحی شده مدل *St10-2800-V2*

تیر	ستون	طبقات
PG40-200X15-370X6	C400×400×30	طبقات اول و دوم
PG40-200X12-370X6	C300×300×20	طبقات سوم و چهارم
PG40-200X15-370X6	C250×250×20	طبقه پنجم
PG40-200X15-360X6	C250×250×20	طبقه ششم
PG40-200X20-360X6	C250×250×15	طبقه هفتم و هشتم
PG40-200X20-360X6	C250×250×12	طبقه نهم
PG25-200X15-360X6	C250×250×12	طبقه دهم

جدول ۳. مقاطع طراحی شده مدل *St10-2800-V4*

تیر	ستون	طبقات
PG40-200X15-370X6	C400×400×25	طبقات اول و دوم
PG40-200X12-370X6	C300×300×15	طبقات سوم و چهارم
PG40-200X15-370X6	C250×250×10	طبقه پنجم
PG40-200X15-360X6	C250×250×20	طبقه ششم
PG40-200X20-360X6	C250×250×15	طبقه هفتم و هشتم
PG40-200X20-360X6	C200×200×12	طبقه نهم
PG25-200X15-360X6	C200×200×12	طبقه دهم

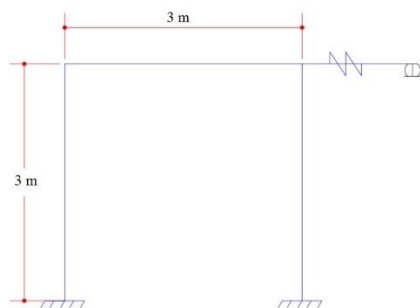


جدول ۴. مقاطع طراحی شده مدل *St11--2800-V2-Iso*

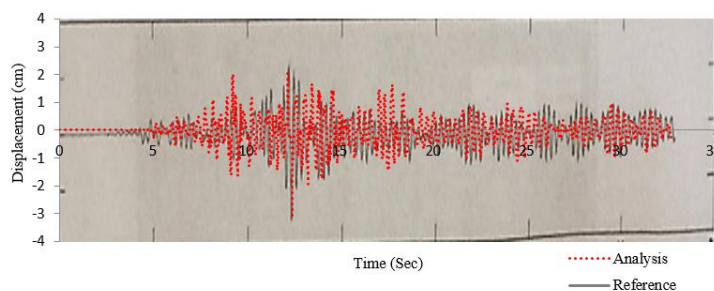
تیر	ستون	طبقات
PG40-200X15-370X6	C400×400×30	طبقات اول و دوم
PG40-200X12-370X6	C300×300×20	طبقات سوم و چهارم
PG40-200X15-370X6	C250×250×20	طبقه پنجم
PG40-200X15-360X6	C250×250×20	طبقه ششم
PG40-200X20-360X6	C250×250×15	طبقه هفتم و هشتم
PG40-200X20-360X6	C250×250×12	طبقه نهم
PG25-200X15-360X6	C250×250×12	طبقه دهم
PG25-200X10-360X6	C250×250×10	طبقه یازدهم

### ۳-۱- راستی آزمایی مدل سازی

به منظور راستی آزمایی میراگر جرمی تنظیم شده (*TMD*)، مطابق شکل ۴، نمونه‌ی مذکور در قاب دوبعدی فولادی برگرفته شده از کتاب کاربرد نرم افزار *OpenSees* در مدل سازی و تحلیل سازه‌ها حاصل کار حسینی و همکاران [۳۲] در نرم افزار *ETABS* طراحی شد و نتیجه‌ی مدل سازی نرم افزاری در *ETABS* با خروجی *OpenSees* از کتاب مذکور مقایسه شد که تطابق قابل قبولی دارد. در این تحقیق، برای مدل سازی میراگر جرمی تنظیم شده از المان *Link* استفاده شده است. به دلیل موازی عمل کردن فنر و میراگر، المان لینک استفاده شده از نوع خطی است. سختی و میرایی در جهات مختلف به صورت *coupled* است. به علت این که میراگر جرمی تنظیم شده مورد نظر تنها در دو راستای افقی عمل می کند لازم است میراگر جرمی تنظیم شده را در جهات  $U_2$  و  $U_3$  تعریف و درجات آزادی دیگر بسته شوند. المان *Link* خطی مورد نظر با توجه از یک طرف به یک جرم متمرکز و انتقالی همچنین از طرف دیگر به سازه متصل شده است. در ادامه، براساس شکل ۵، مطابقت مدل سازی با نتیجه‌ی مرجع هم‌ارزی قابل قبولی دارد.



شکل ۴: مدل سازی قاب دوبعدی فولادی دارای *TMD* مطابق مرجع [۳۲]



شکل ۵: مقایسه‌ی نتیجه‌ی مدل سازی تحقیق حاضر با مرجع [۳۲].



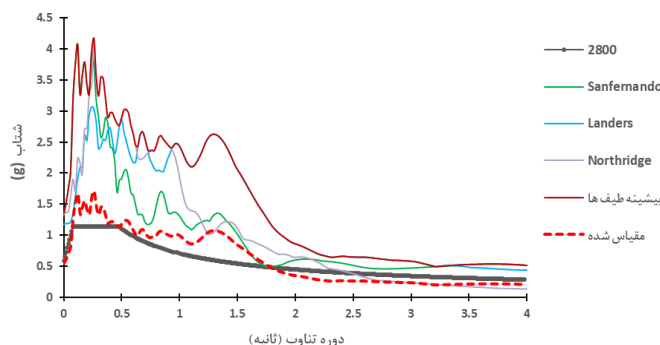


### ۳-۲- زلزله های مورد مطالعه

به منظور انجام تحلیل های غیرخطی تاریخچه زمانی، از سه زوج شتاب نگاشت دور از گسل استخراجی *PEER* [۳۴] استفاده شده است که فاصله آن ها بیش از ۳۰ کیلومتر از گسل است. جدول ۵ زلزله های دور از گسل مورد نظر را نشان می دهد. با استفاده از نرم افزار *SeismoSignal*، طیف پاسخ الاستیک با میرایی ۵ درصد زمین لرزه های مورد نظر به دست آمده است [۳۵]. شکل ۱۴ نحوه ی مقیاس کردن زمین لرزه های را بر اساس استاندارد لرزه ای ۲۸۰۰ ویرایش چهارم نشان می دهد. در بازه ی  $0.1T$  الی  $1.5T$  طیف زمین لرزه های مورد نظر باید بزرگ تر از طیف طرح استاندارد باشد. منظور از  $T$  زمان تناوب مد اول سازه است. در ادامه شکل ۶، نحوه ی مقیاس کردن شتاب نگاشت های دور از گسل را بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم نشان می دهد.

جدول ۵. معرفی زلزله های دور از گسل مورد نظر.

ردیف	رخداد	سال وقوع	ایستگاه ثبت	ضرایب مقیاس
۱	سن فرناندو	۱۹۷۱	لا- هالی وود	۱/۸۲
۲	لندرز	۱۹۹۲	یمو- فایر استیشن	۱/۶۸
۳	نورثریج	۱۹۹۴	بورلی هیلز- مول هول	۰/۷۲



شکل ۶: مقیاس کردن شتاب نگاشت های دور از گسل بر اساس استاندارد ۲۸۰۰.

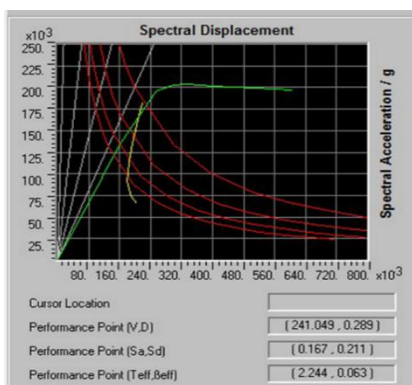
### ۴- نتایج تحقیق

در این بخش، پاسخ های دو سازه ی فولادی سه بعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی با شکل پذیری متوسط طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم (*St10-2800-V2*) و چهارم (*St10-2800-V4*) همچنین یک سازه ی ۱۱ طبقه ی طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم با طبقه یازدهم جداسازی شده (*St11-2800-V2-Iso*) تحت تحلیل های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی با سه شتاب نگاشت دور از گسل هم پایه شده بر اساس استاندارد لرزه ای ۲۸۰۰ ویرایش چهارم بررسی می شوند. خروجی های پاسخ ها به منظور کاربرد مؤثر سیستم جداساز افزوده شده در بهسازی لرزه ای سازه ها و همچنین میزان اثرگذاری ضوابط لرزه ای استاندارد لرزه ای ۲۸۰۰ مقایسه می گردد. در ادامه به منظور جمع بندی، سه سازه ی فولادی یاد شده تحت تحلیل خسارت مدل ها بر پایه ی گزارش *HAZUS*، تحلیل ثقلی و مقایسه ی اقتصادی سازه ها قرار می گیرند.

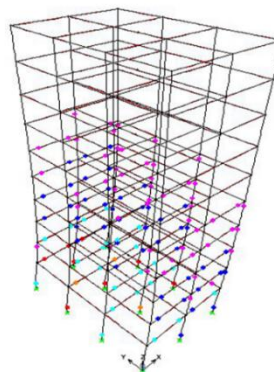


#### ۴-۱- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون

شکل‌های ۷ تا ۱۰ به ترتیب مشخصات مفاصل پلاستیک سازه‌ی فولادی با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و دوم همراه با مشخصات نقطه‌ی عملکرد در استاتیکی غیرخطی سازه‌ی فولادی با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ویرایش چهارم و دوم و در نهایت منحنی‌های بار افزون سازه‌های فولادی ویرایش چهارم و دوم را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های مذکور، براساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی، نقطه‌ی عملکرد در مدل *St10-2800-V4* ۲۹ سانتی‌متر و میزان برش پایه در این نقطه ۲۴۱ تن است. همچنین، برای مدل *St10-2800 V2* نیز نقطه‌ی عملکرد ۳۴ سانتی‌متر و میزان برش پایه در این نقطه ۲۱۳ تن به دست آمد. با توجه به تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی انجام شده مقاوم‌سازی سازه‌ی طرح شده با ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ انجام شده است.

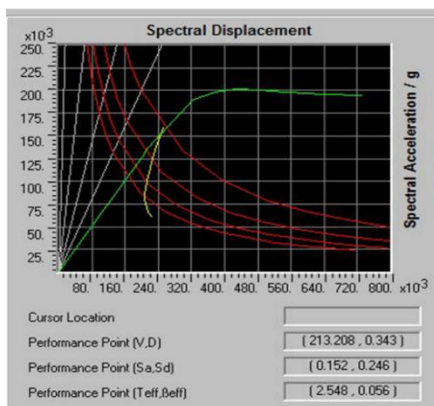


(ب)

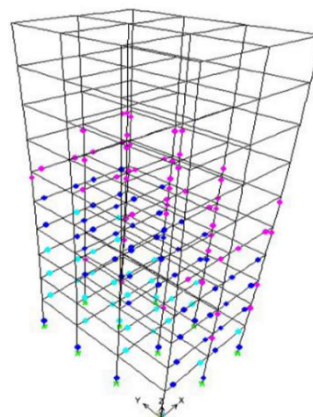


(الف)

شکل ۷: مشخصات مدل *St10-2800-V4*؛ (الف) مفاصل پلاستیک (ب) نقطه‌ی عملکرد در تحلیل استاتیکی غیرخطی.



(ب)



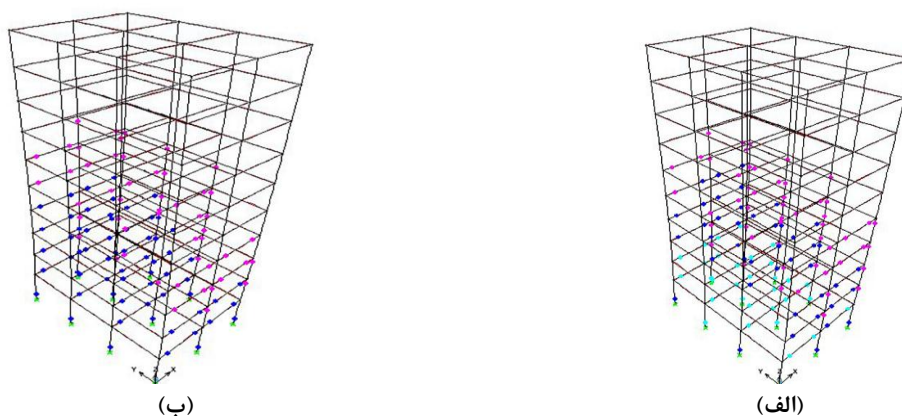
(الف)

شکل ۸: مشخصات مدل *St10-2800-V2*؛ (الف) مفاصل پلاستیک (ب) نقطه‌ی عملکرد در تحلیل استاتیکی غیرخطی.

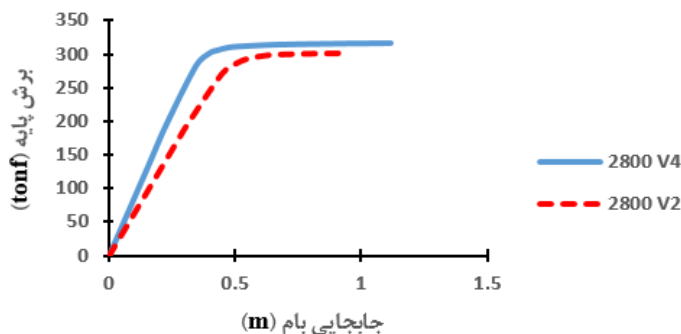
هنگامی که ساختمان دارای سیستم باربر جانبی قاب خمشی تحت نیروی جانبی قرار می‌گیرد. در اثر اعمال بار جانبی، لنگرهای خمشی و نیروهای برشی در تیرها و ستون‌های سازه ایجاد می‌شود. با افزایش مقدار نیروی اعمالی به سازه و به تبع آن افزایش تنش‌ها، امکان شکل‌گیری مفاصل پلاستیک خمشی در تیرها و ستون‌ها وجود دارد. اما به طور کلی ترتیب تشکیل مفاصل پلاستیک در اعضای مختلف سازه‌ای، دارای اهمیت فراوانی می‌باشد به طوریکه مهندسیین تلاش می‌کنند سازه‌ها را به گونه‌ای طراحی کنند که



مفاصل پلاستیک تحت نیروهای جانبی وارده، ابتدا در تیرها و سپس در ستون‌ها تشکیل شود؛ چرا که ایجاد مفصل پلاستیک در عضو، با خرابی همراه است و در صورتی که مفاصل پلاستیک در ستون‌ها، قبل از تیرها تشکیل شوند، مقدار خرابی‌های وارده به سازه بسیار شدیدتر از حالتی خواهد بود که مفاصل پلاستیک قبل از ستون‌ها، در تیرها شکل بگیرد. از این رو همواره سعی می‌شود که تیرها نسبت به ستون‌ها، ضعیف‌تر طراحی شده به شکلی که فلسفه ی کنترل تیر ضعیف-ستون قوی، که بند ۱۰-۳-۹-۲ از مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۲۶] به این موضوع اختصاص داده شده است، از همین بحث نشأت گرفته است. در ادامه، نقطه‌ی عملکرد سازه‌ها محاسبه شده است. با بارگذاری سازه‌ها تا رسیدن آن‌ها به نقطه‌ی عملکرد، سطح عملکرد دو ساختمان (طرح شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم و چهارم) به دست می‌آید. رنگ مفاصل پلاستیک تیرها و ستون‌های طبقات اول تا سوم ساختمان طرح شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم نشان داده است که در مقایسه با سازه‌ی طراحی شده بر اساس ویرایش چهارم، نیاز به مقاوم‌سازی دارد و حد ایمنی جانی  $(LS)^{21}$  را برآورده نکرده است. از این روی، تیرها و ستون‌های این طبقات قوی‌تر انتخاب شده‌اند.



شکل ۹: الف) مفاصل پلاستیک مدل  $St10-2800-V4$  در نقطه‌ی عملکرد؛ ب) مفاصل پلاستیک مدل  $St10-2800-V2$  در نقطه‌ی عملکرد.



شکل ۱۰: منحنی‌های بار افزون سازه‌های فولادی ۱۰ طبقه

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

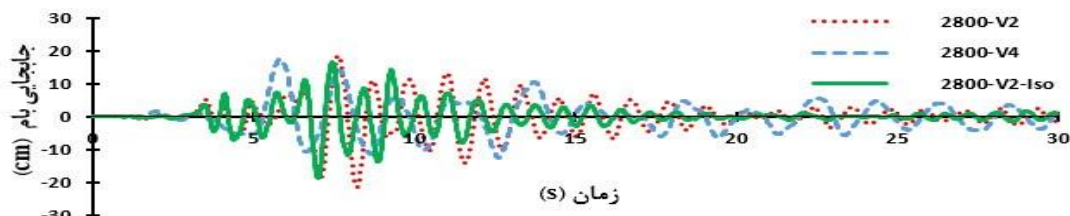
##### ۴-۲-۱- پاسخ لرزه‌ای جابجایی بام

شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، پاسخ تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌های مورد مطالعه را تحت زلزله‌های معرفی شده نشان می‌دهد. با بررسی شکل‌های مذکور مشخص می‌شود که حداکثر جابجایی بام در مدل  $St10-2800-V2$  رخ داده است که با بهسازی آن با جداساز

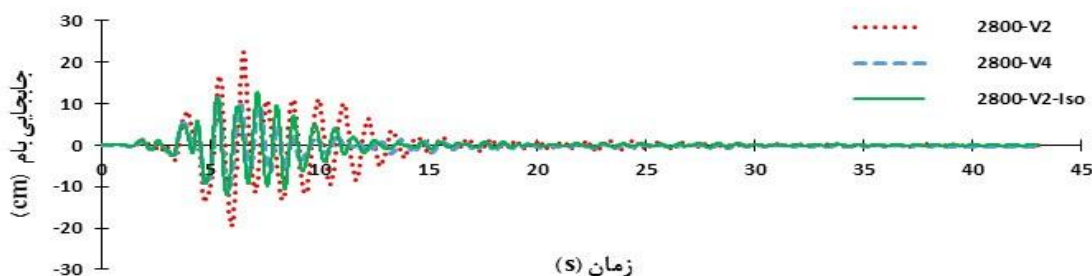
<sup>21</sup> Life Safety



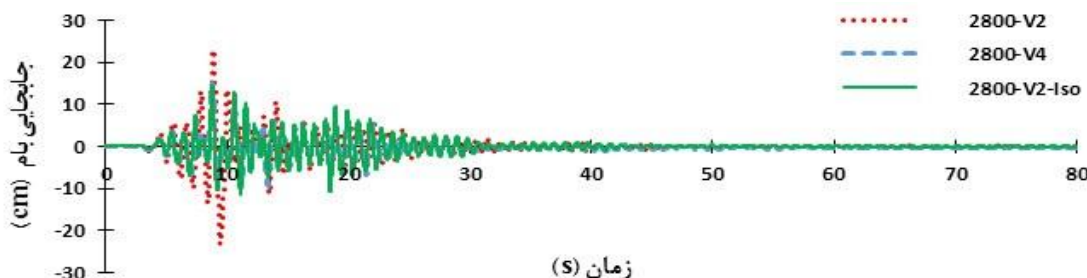
لرزه‌ای در طبقه‌ی آخر، میزان جابجایی کاهش یافته است. افزودن جداساز لرزه‌ای باعث کاهش تقریبی ۴۰ درصدی جابجایی بیشینه‌ی بام می‌شود. بیشینه‌ی جابجایی بام در مدل  $St10-2800-V2$  تحت زلزله‌های نورث‌ریچ، لندرز و سن فرناندو به ترتیب معادل ۲۱، ۲۲ و ۲۳ سانتی‌متر می‌باشد. به عنوان نمونه، میزان جابجایی بیشینه‌ی بام تحت زلزله‌ی لندرز در مدل  $St11-2800-V2-Iso$  کاهش می‌یابد اما پاسخ‌های جابجایی بیشینه‌ی بام در مدل‌های  $St10-2800-V4$  و  $St11-2800-V2-Iso$  تقریباً یکسان است.



شکل ۱۱: تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی نورث‌ریچ.



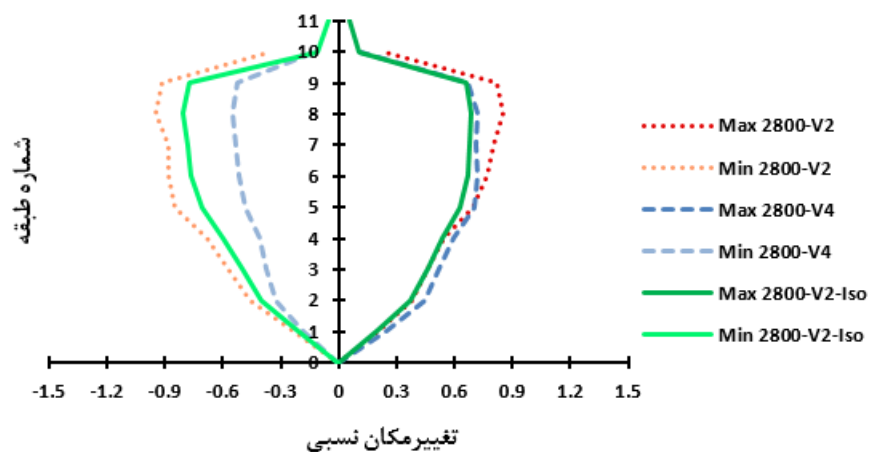
شکل ۱۲: تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی لندرز.



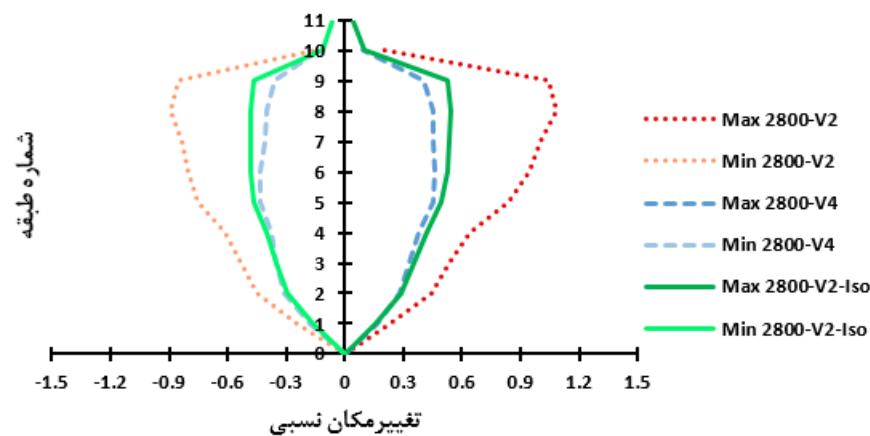
شکل ۱۳: تاریخچه زمانی جابجایی بام سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی سن فرناندو.

#### ۴-۲-۲- پاسخ لرزه‌ای تغییرمکان نسبی طبقات

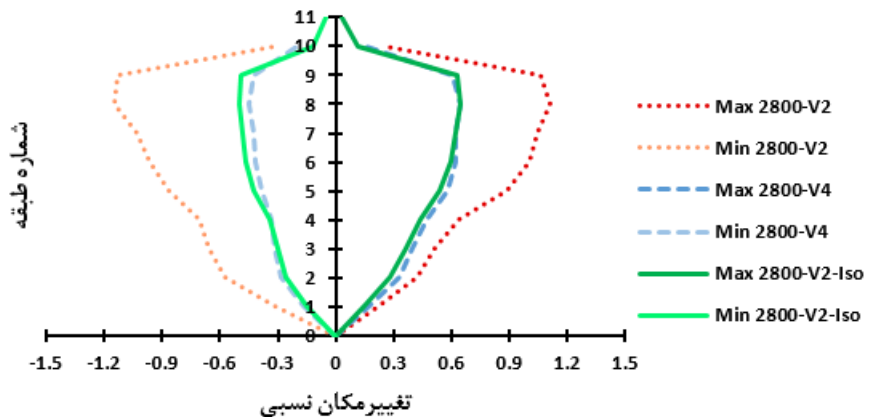
مقادیر تغییرمکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌های استفاده شده مطابق شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ ارائه شده است. به عنوان نمونه، بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی تحت زلزله‌ی لندرز متعلق به طبقه‌ی هشتم سازه‌های مورد مطالعه است که با افزودن جداساز لرزه‌ای به‌عنوان روشی به‌منظور بهسازی سیستم لرزه‌ای، میزان تغییرمکان نسبی کاهش یافته و مقدار آن در مدل  $St10-2800-V4$  رسیده است. میزان تغییرمکان نسبی بر اثر قرار دادن جداساز لرزه‌ای در مدل  $St11-2800-V2-Iso$  معادل ۵۰ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۴: بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی نورتریج.



شکل ۱۵: بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی لندرز

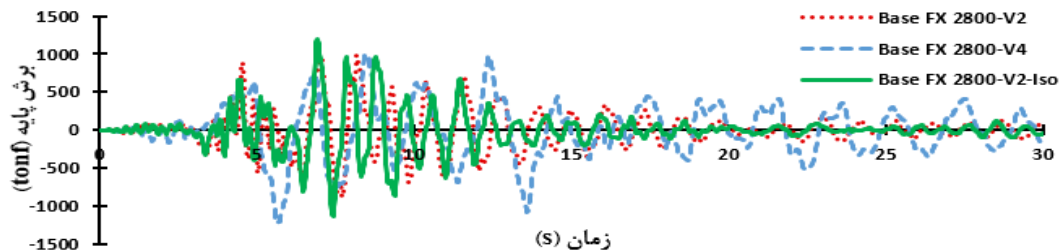


شکل ۱۶: بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی سن فرناندو.

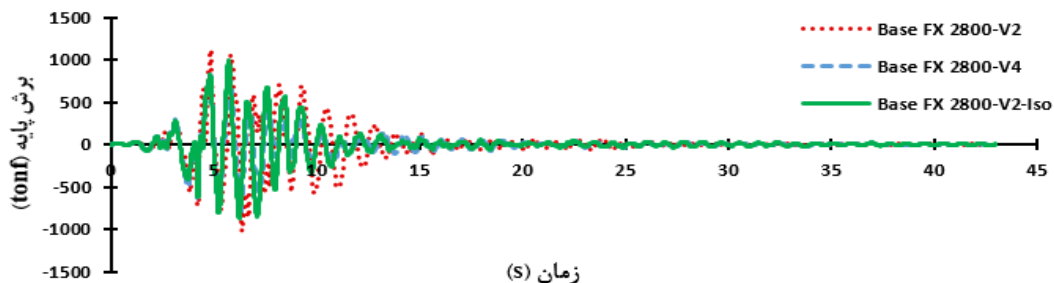


#### ۴-۲-۳- پاسخ لرزه ای برش پایه

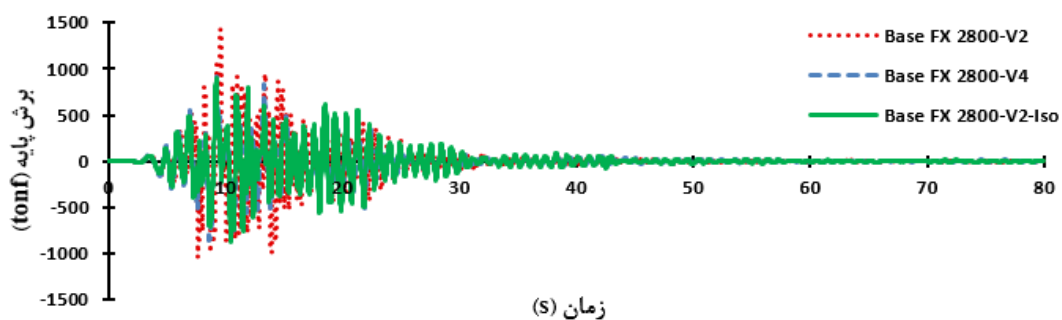
تاریخچه زمانی برش پایه سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌های مذکور مطابق شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ ارائه شده است. بیشینه‌ی برش پایه در مدل  $St10-2800-V2$  تحت زلزله‌های نورث‌ریچ، لندرز و سن فرناندو به ترتیب معادل ۹۸۷، ۱۱۱۲ و ۱۴۲۳ تن می‌باشد. به عنوان نمونه، بیشینه‌ی برش پایه تحت زلزله‌ی سن فرناندو متعلق به مدل  $St10-2800-V2$  است که با افزودن طبقه‌ی جداسازی شده به طبقه‌ی آخر، میزان برش پایه‌ی کمینه کاهش می‌یابد و منطبق با حالت طراحی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم می‌گردد. با افزودن جداساز لرزه‌ای به منظور بهسازی لرزه‌ای، میزان برش پایه معادل ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۷: تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی نورث‌ریچ.



شکل ۱۸: تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی لندرز.



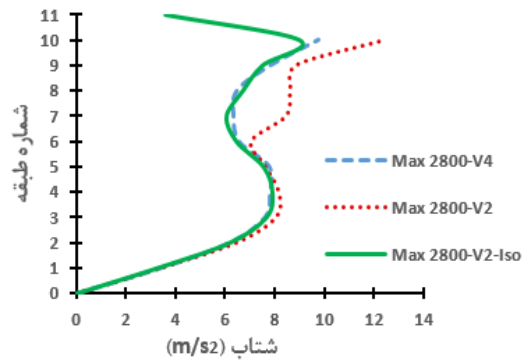
شکل ۱۹: تاریخچه زمانی برش پایه‌ی سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی سن فرناندو.

#### ۴-۲-۴- پاسخ لرزه ای شتاب طبقات

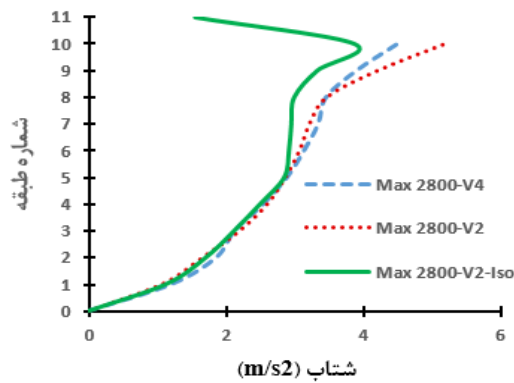
مقادیر شتاب طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌های استفاده شده مطابق شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ ارائه شده است. بیشینه‌ی شتاب طبقات در  $St10-2800-V2$  تحت زلزله‌های نورث‌ریچ، لندرز و سن فرناندو به ترتیب معادل ۱۲، ۵/۵ و ۴ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. به عنوان نمونه، شتاب کمینه‌ی طبقات تحت زلزله‌ی لندرز مربوط به مدل  $St10-2800-V2$  را نشان می‌دهد. در زمینه‌ی شتاب



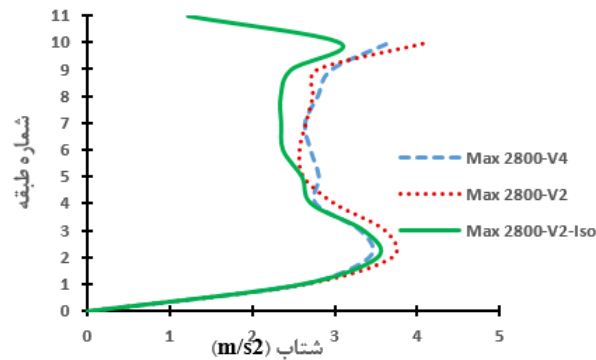
کمینه‌ی طبقات مربوط به مدل  $St11-2800-V2-Iso$  است با افزودن جداساز به‌عنوان روشی به‌منظور بهسازی سیستم لرزه‌ای، میزان شتاب طبقه‌ی هشتم ۲۰ درصد نسبت به دو حالت دیگر کاهش یافته است.



شکل ۲۰: بیشینه‌ی شتاب طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی نورتریج.



شکل ۲۱: بیشینه‌ی شتاب طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی لندرز.

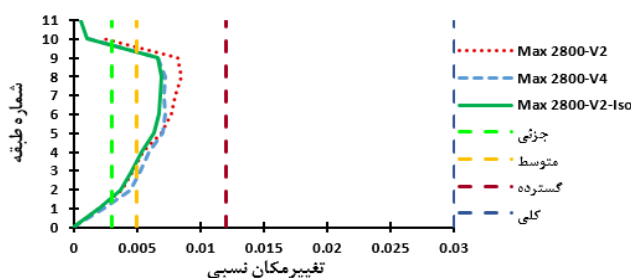


شکل ۲۲: بیشینه‌ی شتاب طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی سن فراندو.

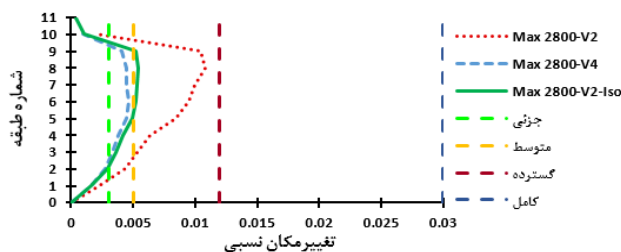


### ۳-۴- تحلیل خسارت مدل‌ها

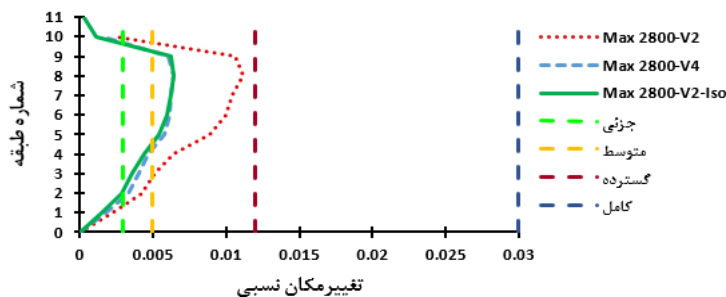
گزارش HAZUS (۱۹۹۹)، میزان خسارات، حدود و حالات خرابی اعضای سازه‌ای (تغییرمکان نسبی) و اعضای غیرسازه‌ای (تغییرمکان نسبی و شتاب)، ناشی از زمین‌لرزه‌های آینده را پیش‌بینی می‌کند. در گزارش HAZUS، برای ساختمان‌های فولادی و بتنی مسلح با سیستم قاب خمشی و تعداد طبقات کم، متوسط و زیاد ۴ حالت خرابی بر اساس نسبت تغییرمکان نسبی در نظر گرفته شده است که به ترتیب حالت خرابی جزئی (اجزای سازه‌ای بدون آسیب باقی می‌مانند و آسیب‌های بسیار ناچیزی به اجزای غیرسازه‌ای وارد می‌شود)، حالت خرابی متوسط (اجزای سازه‌ای آسیب جزئی می‌بینند و اجزای غیرسازه‌ای، آسیب زیاد متحمل می‌شوند)، حالت خرابی گسترده (خرابی اجزای سازه‌ای بسیار زیاد و اجزای غیرسازه‌ای کامل خراب شده‌اند) و حالت خرابی کلی یا کامل (سازه یا خراب می‌شود و یا در آستانه‌ی خرابی است) است. یکی از پارامترهای قابل اندازه‌گیری برای ارزیابی آسیب‌پذیری، تغییرمکان نسبی است و بر اساس آیین‌نامه‌های موجود معمولاً محدودیت تغییرمکان نسبی به عواملی نظیر موقعیت سازه از نظر لرزه‌خیزی، ارتفاع و درجه‌ی اهمیت بستگی دارد [۳۰]. در ادامه، مطابق شکل‌های ۲۳ تا ۲۵، بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات تحت زلزله‌های مورد مطالعه در مقایسه با گزارش HAZUS ارائه شده است.



شکل ۲۳: بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی نورث‌ریچ بر اساس سطوح خسارت HAZUS



شکل ۲۴: بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی لندرز بر اساس سطوح خسارت HAZUS

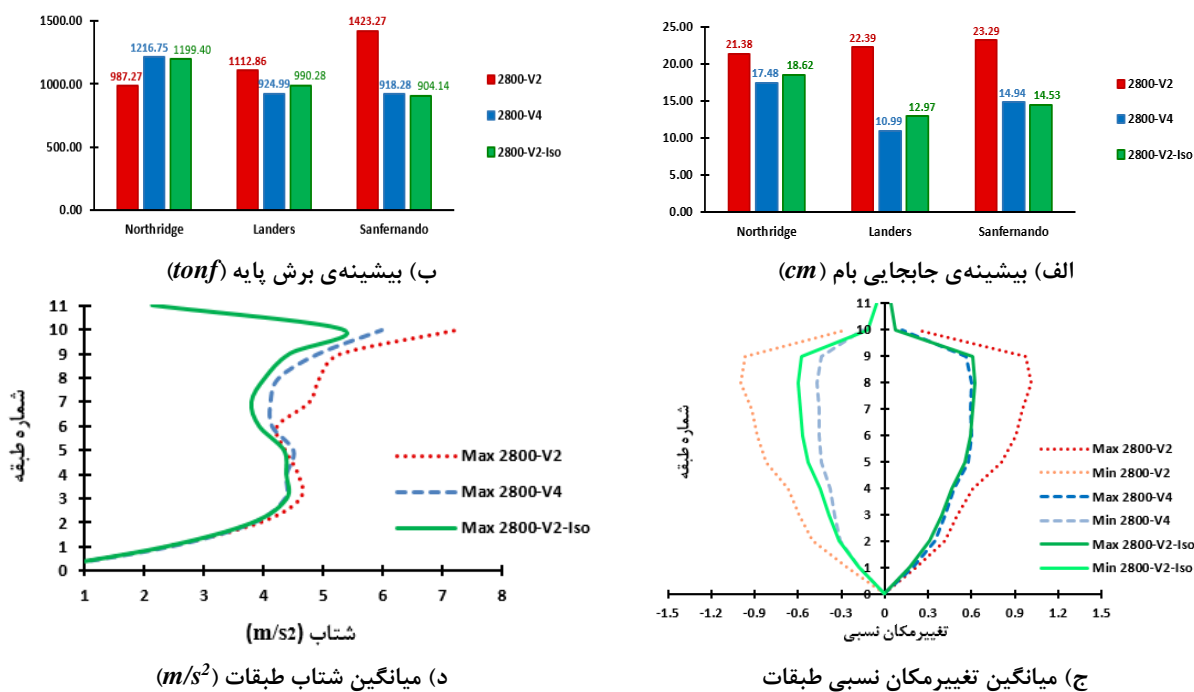


شکل ۲۵: بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات سازه‌های مورد مطالعه تحت زلزله‌ی سن فرناندو بر اساس سطوح خسارت HAZUS





بر اساس شکل‌های ۲۳ تا ۲۵، مشخص می‌شود که  $St11-2800-V2-Iso$  و  $St10-2800-V4$  دارای تقریبی سازوکار خسارت یکسانی می‌باشد. همچنین، طبقه‌ی جداسازی شده دارای تغییرمکان نسبی کمتری است و سطح خسارت، جزئی محاسبه شد. در ادامه شکل ۲۶ به منظور جمع‌بندی نتایج مدل‌های مورد مطالعه ارائه شده است. این شکل به مقایسه‌ی پاسخ‌های بیشینه‌ی جابجایی بام، برش پایه، میانگین تغییرمکان نسبی و شتاب طبقات برای مدل‌های مذکور تحت سه زلزله‌ی نورثریچ، لندرز و سن فرناندو می‌پردازد. با بررسی نتایج مشخص شد که مدل‌های  $St10-2800-V4$  و  $St11-2800-V2-Iso$  باعث کاهش پاسخ‌های لرزه‌ای جابجایی بیشینه بام، بیشینه‌ی برش پایه و بیشینه‌ی میانگین تغییرمکان نسبی طبقات و میانگین شتاب طبقات شده است.



شکل ۲۶: نمودارهای جمع‌بندی پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه.

## ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

استفاده از جداسازهای لرزه‌ای در بام با بهره‌گیری از سازوکار میراگرهای جرمی تنظیم شده در سازه‌های بلند، روش مهار لرزه‌ای مؤثری برای ساختمان‌ها را فراهم کرده است. در واقع، ترکیب جداسازهای پایه (مناسب برای سازه‌های کوتاه) برای جداسازی طبقه‌ی آخر و استفاده از این طبقه به عنوان میراگر جرمی، سیستم مناسبی را پدید می‌آورد که برای طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌های میان و بلند مرتبه می‌تواند کارآمد باشد. در این تحقیق، دو سازه‌ی فولادی سه‌بعدی ۱۰ طبقه با سیستم قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش دوم و ویرایش چهارم همچنین مدل دیگری با اضافه کردن یک طبقه جداسازی شده به آخرین طبقه مدل اول (طرح شده براساس استاندارد ۲۸۰۰ و ویرایش دوم) به کمک نرم‌افزار *ETABS* مدل‌سازی و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بار افزون و دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی قرار گرفتند. نتایج به‌صورت تعیین وضعیت تشکیل مفاصل پلاستیک، وضعیت نقطه‌ی عملکرد و محاسبه‌ی منحنی ظرفیت تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی همچنین نمودارهای تاریخچه زمانی جابجایی بام، برش پایه، بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی و شتاب طبقات تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام



گرفت تا به کارگیری جداساز در بهسازی لرزه‌ای سازه و همچنین میزان اثرگذاری ضوابط لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه گردد. دست‌آوردهای این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۱- براساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی، نقطه‌ی عملکرد در مدل *St10-2800-V4*، ۲۹ سانتی‌متر و میزان برش پایه در این نقطه ۲۴۱ تن است. همچنین، برای مدل *St10-2800-V2* نیز نقطه‌ی عملکرد ۳۴ سانتی‌متر و میزان برش پایه در این نقطه ۲۱۳ تن به دست آمد. رنگ مفاصل پلاستیک تیرها و ستون‌های طبقات اول تا سوم مدل *St10-2800-V2* نشان داده است که در مقایسه با مدل *St10-2800-V4*، این سازه نیاز به مقاوم‌سازی دارد و حد ایمنی جانی (*LS*) را برآورده نکرده است.

۲- افزودن طبقه‌ی جداسازی شده به مدل *St10-2800-V2* موجب می‌شود که بخش زیادی از انرژی ورودی توسط جداساز جذب شده و به میزان زیادی از انرژی پسماند کاسته شود و همچنین تغییرمکان نسبی طبقه به شدت کاسته یافته و خسارت بر اساس گزارش *HAZUS* در سطح بسیار کمی می‌باشد.

۳- افزودن طبقه‌ی جداسازی شده به مدل *St10-2800-V2* به میزان میانگین ۲۵ درصد از خسارت لرزه‌ای سازه می‌کاهد.

۴- با بررسی برش پایه و جابجایی بیشینه بام مشخص شد که با افزودن طبقه‌ی جداسازی شده در مدل *St11-2800-V2-Iso*، به ترتیب به میزان ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

۵- به ترتیب تحت زلزله‌های نورتریج، لندرز و سن فرناندو، در اثر اضافه نمودن طبقه‌ی جداسازی شده در مدل *St11-2800-V2-Iso*، شتاب میان طبقه‌ای به میزان ۵، ۲۰ و ۱۸ درصد کاهش یافته است.

۶- طبقات میانی پاسخ‌های سازه‌ای بحرانی تری از خود نشان داده‌اند که با قرار دادن طبقه‌ی جداسازی شده به عنوان طبقه‌ی آخر، میزان پاسخ‌های لرزه‌ای کاهش چشم‌گیری داشتند.

۷- قرار دادن طبقه‌ی جداسازی شده به عنوان طبقه‌ی آخر، یک روش مقاوم‌سازی است که اثر زیادی در کاهش تغییرمکان نسبی طبقات داشته و سبب کاهش همه‌ی مقادیر تا محدوده‌ی مجاز گزارش *HAZUS* می‌شود. این کاهش برای سازه‌های طراحی شده بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش دوم چشمگیر و تقریبی به صورت میانگین بیشینه‌ی ۲۵ درصد به دست آمد.

## ۶- مراجع

- 1- Whipp, K. P., 2005, **Structural control by induced stress based stiffness modification**, Doctoral dissertation, Vanderbilt University
- 2- Ahmadi, G., 1995, **Overview of base isolation, passive and active vibration control strategies for aseismic design of structures**, Scientia Iranica, 2, 2, 99-116.
- 3- Inaudi, J. A., and Kelly, J. M., 1993, **Optimum damping in linear isolation systems**, Earthquake engineering & structural dynamics, 22, 7, 583-598.
- 4- Saberi V., saberi H., and Sadeghi A., 2020, **Collapse Assessment of Steel Moment Frames Based on Development of Plastic Hinges**, Amirkabir Journal of Civil Engineering. (In Persian).
- 5-Rabinson, W. H., 1982, **Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes**, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 10, 593-604.
- 6- Frahm, H., 1909, **Devices for Damping Vibrations of Bodies**, U.S. Patent, No. 989985.



- 7- Mahendra, P. S., and Sarbjeet, S., and Luis, M. M., 2002, **Tuned Mass Dampers for Response Control of Torsional Building**, Earthq. Eng. Struct. Dyn., 31, 749-769.
- 8- Den Hartog, J. P., 1940, **Mechanical Vibration**, 1<sup>st</sup> Edition, New York: Mcgraw-HiLL.
- 9- Pinkaew, T., Lukkunaprasit, P., and Chatupote, P., 2003, **Seismic effectiveness of tuned mass dampers for damage reduction of structures**, Engineering Structures, 25, 1, 39-46.
- 10- Ras, A., and Boumechra, N., 2017, **Dissipation's Capacity Study of Lead-Rubber Bearing System in Seismic Steel Structures Design**, Arabian Journal for Science and Engineering, 42, 9, 3863-3874.
- 11- Petit, F., Loccufer, M., and Aeyels, D., 2009, **On the Attachment Location of Dynamic Vibration Absorbers**. **Journal of Vibration and Acoustics**, American Society of Mechanical Engineers (ASME), 131, 3, 1-8.
- 12- Moon, K. S., 2010, **Vertically distributed multiple tuned mass dampers in tall buildings: performance analysis and preliminary design**, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 19, 3, 347-366.
- 13- Farshidianfar, A., and Soheili, S., 2013, **Ant colony optimization of tuned mass dampers for earthquake oscillations of high-rise structures including soil-structure interaction**, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 51, 14-22.
- 14- Kato, H., Mori, T., Murota, N., & Kikuchi, M., 2015, **Analytical Model for Elastoplastic and Creep-Like Behavior of High-Damping Rubber Bearings**, Journal of Structural Engineering, 141, 9, 04014213.
- 15- Hedayati Dezfuli, F., and Alam, M., 2014, **Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires**, Engineering Structures, 61, 166-183.
- 16- Chen, X., Yang, H., Shan, J., Hansma, P., and Shi, W., 2016, **Bio-Inspired Passive Optimized Base-Isolation System for Seismic Mitigation of Building Structures**, Journal of Engineering Mechanics, 142, 1, 04015061.
- 17- Hussan, M., Rahman, M. S., Sharmin, F., Kim, D., and Do, J., 2017, **Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under seismic excitation**, Ocean Engineering, 160, 449-460.
- 18- Govardhan, Paul, D., 2016, **Effect of Lead in Elastomeric Bearings for Structures Located in Seismic Region**, Procedia Technology, 25, 146-153.
- 19- Cancellara, D., and De Angelis, F., 2017, **Assessment and dynamic nonlinear analysis of different base isolation systems for a multi-storey RC building irregular in plan**, Computers & Structures, 180, 74-88.
- 20- Bayat, A., Beiranvand, P., and Ashrafi, H. R., 2018, **Vibration Control of Structures by Multiple Mass Dampers**, Jordan Journal of Civil Engineering, 12, 3, 461-471.
- 21- Akhlagh pasand, A., Fatollah pour, A., and Zahrai, S., 2019, **Comparing performance of TMD and MTMD vertically distributed in height for multi-modal seismic control of tall buildings**, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 52, 10, 12-21.
- 22- Mehdizadeh, K., Hashemi, S., Sadeghi, A., and Shobeyrii, G., 2020, **Investigation of the Base Isolation in Improving the Behavior of Steel Buildings subjected to Earthquakes applied with Different Angles**, Quarterly Specialized Journal of Structural Engineering, 17, 3, 1-12.
- 23- BHRC., 1999, **Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings**, Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, 2<sup>nd</sup> edition. (In Persian).
- 24- BHRC., 2014, **Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings**, Tehran: Building and Housing Research Centre, Standard No. 2800, 4<sup>th</sup> edition. (In Persian).
- 25- INBC., 2013, **Design Loads for Buildings**, Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 6. (In Persian).
- 26- INBC., 2013, **Design and Construction of Steel Structures**, Tehran: Ministry of Housing and Urban Development, Iranian National Building Code, Part 10. (In Persian).
- 27- Code 523., 2010, **Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings**, Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System.



- 28- American Society of Civil Engineers (ASCE7), 2010, **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**, pp.7.
- 29- Hu, J.W., 2014, **Response of Seismically Isolated Steel Frame Buildings with Sustainable Lead-Rubber Bearing (LRB) Isolator Devices Subjected to Near-Fault (NF) Ground Motions**, Sustainability, 7, 1, 111-137.
- 30- HAZUS-MH MR1., 1999, **Advanced Engineering Building Module**, Federal Emergency Management Agency.
- 31-FEMA 356. 2000, **Pre-Standard and Commentary for the seismic Rehabilitation of Buildings**, Washington D.C. Federal Emergency Management Agency, USA.
- 32- Hosseini, M. and Fanaei, N., 2013, **Application of OpenSees software in modeling and analysis of structures**, Tehran: rahian arshad.
- 33- CSI, ETABS., 2016, V-16.2. 2.0: Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual. Computers and Structures Inc.
- 34- Next Generation Attenuation of Ground Motion (Nga) Project, 2006, [http://Peer. Berkeley. Edu/nga/](http://Peer.Berkeley.Edu/nga/)(Accessed 10 October 2006).
- 35- SeismoSignal., 2018, constitutes a simple, yet efficient, package for the processing of strong-motion data.