

مجله علمی - پژوهشی

مهندسی عمران مدرس

دوره بیست و سوم، شماره ۱، سال ۱۴۰۲

# طراحی جداسازهای لرزه‌ای لاستیکی سربی با روش انرژی و بررسی دقت آن برای سازه‌های فولادی خیلی مهم

سحر ابراهیمی<sup>۱</sup>، سید مهدی زهرائی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشکده عمران، دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

mzahrai@ut.ac.ir\*

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۰۵/۲۳

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۱/۲۹

## چکیده

جداسازی پایه یک فناوری مؤثر برای کاهش آسیب‌های لرزه‌ای به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای و همچنین محتویات ساختمان است که به ساختمان‌ها اجازه می‌دهد حتی در طول یک زلزله نادر و با شدت زیاد عملکرد خود را حفظ کنند. در این مقاله از روش جدید تعادل انرژی برای طراحی جداساز لاستیکی هسته سربی (LRB) استفاده شده است. از مزیت‌های آن می‌توان، عدم نیاز به سعی و خطا در روند طراحی، امکان طراحی نوع لاستیکی و لغزشی جداساز لرزه‌ای، امکان استفاده از میراگر ویسکوز و یا تسلیمی و یا ترکیب آن دو در محل نصب جداساز را ذکر نمود. برای بررسی دقت این روش، سه سازه فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با مهاربندی همگرای معمولی با کاربری درمانگاه، به روش تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی تحت ۱۰ رکورد زمین لرزه حوزه دور و نزدیک تحلیل شده‌اند که نتایج بدست آمده از تحلیل تاریخچه زمانی، هماهنگی خوبی با نتایج تخمینی روش تعادل انرژی دارند. درصد خطای مربوط به جابه‌جایی جداساز نسبت به مقدار فرض شده در ابتدای طراحی برای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۰/۶، ۰/۱۱ و ۰/۷۴ درصد است. همچنین درصد خطای مربوط به برش حداکثر جداساز نسبت به مقدار بدست آمده از منحنی عملکردی برای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۲/۶۳، ۱۳/۳۲ و ۱۴/۶۷ درصد است.

**واژگان کلیدی:** جداسازی پایه، روش تعادل انرژی، سازه سه بعدی فولادی، زمین لرزه‌ای حوزه دور و نزدیک، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی.

## ۱- مقدمه

زلزله بزرگ دشوار است. از سوی دیگر، در یک ساختمان جداسازی شده، انرژی لرزه‌ای بیشتر در تراز جداسازی لرزه‌ای جذب می‌شود. در نتیجه اعضای سازه‌ای آسیب نمی‌بینند و از فروریختن و واژگونی اعضای غیرسازه‌ای (سقف، دیوارهای

در یک ساختمان مقاوم در برابر زلزله، اعضای سازه برای جلوگیری از واژگونی و فروریختن با جذب انرژی و تغییر شکل پلاستیک آسیب می‌بینند، اما حفظ عملکرد ساختمان هنگام یک

۱ Lead Rubber Bearing

خارجی) و وسایل داخل ساختمان جلوگیری می‌شود. بنابراین، عملکرد ساختمان در یک زلزله بزرگ حفظ می‌شود. به عبارت دیگر، یک ساختمان جداسازی شده نه تنها از جان انسان‌ها محافظت می‌کند، بلکه می‌تواند اموال را نیز حفظ کند. چون با استفاده از جداسازی آسیب‌های ناشی از زلزله کاهش می‌یابد، نیاز به تعمیر هم کم می‌شود و هزینه‌های چرخه عمر کاهش و از نظر اقتصادی بهبود می‌یابد. علاوه بر این، تقاضا برای ساختمان‌های با عمر طولانی‌تر از نظر حفاظت از محیط زیست جهانی در حال افزایش است و این مستلزم یک سیستم طراحی سازه با عملکرد بالا برای کشورهای با پتانسیل لرزه‌خیزی قابل توجه است. در ساختمان‌های مجهز به جداسازی لرزه‌ای، تقریباً تمام انرژی لرزه‌ای در تراز جداسازی شده، جذب می‌شود، بنابراین نیروی برشی و حرکت بین طبقه‌ای برای طراحی روسازه کوچک است. این امر باعث کاهش اندازه اعضای سازه‌ای در مقایسه با یک ساختمان معمولی و ساده‌سازی اتصالات اعضای غیر سازه‌ای می‌شود. علاوه بر ساختمان‌های جدید، جداسازی لرزه‌ای به عنوان یک روش بسیار مؤثر در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود به منظور اطمینان از ایمنی لرزه‌ای به کار می‌رود و نصب جداساز می‌تواند در هنگام استفاده از ساختمان انجام شود [1].

به تازگی ساختمان دارای جداساز لرزه‌ای به عنوان سیستم سازه‌ای شناخته شده است که دارای قابلیت اطمینان و عملکرد بالا در زلزله شدید است [2]. این امر آن را به یک سیستم اصلاح پاسخ لرزه‌ای ایده‌آل برای ساختمان‌های دارای اهمیت بالا تبدیل می‌کند. سازه جدا شده از پایه به طور گسترده به عنوان سازه کنترل آسیب شناخته می‌شود، زیرا مهندسان سازه می‌توانند تمرکز انرژی زلزله را در مرحله طراحی در لا به جداسازی کنترل کنند. جداسازی، انرژی را در فرکانس‌هایی که به طور پویا با سازه در حال تعامل هستند، مستهلک نموده و تنها آن انرژی را منتقل می‌کند که در محدوده فرکانسی با توانایی تحریک سازه به میزان ضعیف، قرار دارد [3]. مزیت اصلی سازه‌های جداسازی شده این است که می‌توان پاسخ‌های

لرزه‌ای را به راحتی و به طور مؤثر با طولانی شدن دوره تناوب و افزایش میرایی، کاهش داد. بنابراین، دوره تناوب طبیعی سازه جداسازی شده از پایه، طولانی‌تر می‌شود [4]. متداول‌ترین دستگاه‌های جداسازی پایه که در طول سال‌ها توسط مهندسان مورد استفاده قرار گرفته، جداکننده‌های لاستیکی سربی (LRB) هستند که عملکرد جداسازی و اتلاف انرژی را در یک واحد فشرده ترکیب می‌کنند [5]. این جداسازها مشابه جداکننده‌های لاستیکی با میرایی بالا<sup>۱</sup> (HDRB) هستند با این تفاوت که از یک هسته مرکزی سربی برای اتلاف انرژی اضافی استفاده می‌کنند. LRB همچنین ظرفیت جذب انرژی را از طریق میرایی هیسترتیک اضافی با تسلیم هسته سربی فراهم می‌کند که جابه‌جایی‌های جانبی جداکننده را به ویژه تحت ارتعاشات محیطی کاهش می‌دهد. این سیستم جداسازی پایه ویژگی‌های ترکیبی پشتیبانی از بار عمودی، انعطاف پذیری افقی، نیروی بازگرداننده و میرایی را در برابر تحریک زلزله فراهم می‌کند [6]. علاوه بر این، آن‌ها در مقایسه با سایر دستگاه‌های کنترل ارتعاش غیرفعال، به حداقل هزینه برای نصب و نگهداری نیاز دارند [5].

برای تعیین اینکه آیا معیارهای طراحی برآورده شده است یا خیر و همین‌طور تعیین رفتار ساختمان جداسازی شده در هنگام زلزله، از روش‌های مختلفی مانند موارد زیر برای پیش‌بینی پاسخ استفاده می‌شود: ۱- تحلیل پاسخ تاریخیچه زمانی ۲- روش طیف پاسخ ۳- روش تعادل انرژی

هر یک از این روش‌ها، حرکات ورودی زمین را به شکل متفاوتی اعمال می‌کند. در تحلیل پاسخ تاریخیچه زمانی، حرکات ورودی زمین به شکل موج شتاب است. در روش تعادل انرژی از طیف انرژی و در روش طیف پاسخ، از طیف پاسخ شتاب استفاده می‌شود. روش‌های تحلیل پاسخ تاریخیچه زمانی شامل روش‌های ادغام عددی مانند روش شتاب، روش رانگ کوتا<sup>۲</sup> و روش‌های مبتنی بر راه حل‌های دقیق (روش نیگام جینگز<sup>۳</sup>) است. برای مقابله با ویژگی غیرخطی دستگاه‌های جداسازی

<sup>۳</sup> Nigam-Jennings method

<sup>۱</sup> High Damping Rubber Bearing

<sup>۲</sup> Runge-Kutta method

لرزه‌ای و روسازه، بیشتر از روش شتاب استفاده می‌شود. روش شتاب روشی است که در آن تغییر شتاب در یک گام زمانی کوچک فرض می‌شود و مقادیر پاسخ در هر بازه کوچک به دست می‌آید. تحلیل پاسخ تاریخچه زمانی به طور مستقیم مقادیر پاسخ سازه‌ها را محاسبه می‌کند، بنابراین یک روش مؤثر است. با این حال، مقادیر پاسخ‌ها به ویژگی‌های حرکات ورودی زمین حساس هستند، بنابراین تأیید نتایج با روش محاسبه دیگری پیشنهاد می‌شود. روش طیف پاسخ عبارت است از پیش‌بینی ساده برای مقادیر حداکثر پاسخ یک سیستم تک درجه آزادی معادل شامل ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی سازه با استفاده از دو نوع مختلف میرایی، یعنی میرایی ویسکوز و میرایی هیسترتیک، و به دنبال آن پیش‌بینی بیشترین پاسخ با استفاده از یک طیف پاسخ الاستیک [1].

در روش تعادل انرژی، انرژی لرزه‌ای ورودی ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین و انرژی جذب شده توسط جداسازهای لرزه‌ای را می‌توان به طور مستقیم ارزیابی کرد. با استفاده از پاسخ انرژی، می‌توان حداکثر جابجایی و تغییرشکل پلاستیک تجمعی را پیش‌بینی نمود [1]. روش تعادل انرژی در واقع یک روش تجزیه و تحلیل برای ارزیابی مقاومت لرزه‌ای بر اساس تعادل انرژی ورودی لرزه‌ای به ساختمان‌ها در اثر حرکت زمین و انرژی جذب شده توسط ساختمان است. به عبارت دیگر روش تعادل انرژی یک روش پیش‌بینی تقریبی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های جدا شده از پایه است. این روش برای تعیین رابطه بین سطح حرکت زمین، دوره تناوب جداسازی لرزه‌ای و اثر کاهش واکنش میراگرها مؤثر است [7]. بطور کلی بر اساس دانش مرسوم در محافل مهندسی زلزله، سازه‌هایی که دارای سیستم جداسازی پایه هستند باید به گونه‌ای طراحی شوند که انرژی ورودی را به حداقل و درصد انرژی ورودی را که با مکانیسم‌های میرایی و غیرارتجاعی اتلاف می‌شود به حداکثر برسانند [8]. آکیاما<sup>۱</sup> نشان داد که المان‌های انعطاف‌پذیر برای سازه جدا شده از پایه، لازم است تا منجر به افزایش جذب

انرژی به طور مؤثر و کاهش تغییرشکل ماندگار در سازه جدا شده از پایه شوند [4]. روش پیش‌بینی پاسخ برای ساختمان‌های لرزه‌ای جدا شده با میراگر ویسکوز بر اساس نظریه تعادل انرژی توسط آکیاما پیشنهاد شده است. این روش پیشنهاد شده توسط آکیاما همان روند طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله را پیش می‌گیرد. در این روش، فرض بر این است که مجموع انرژی الاستیک ارتعاشی جدا ساز و انرژی کرنشی پلاستیک میراگر با تفاوت انرژی ورودی و انرژی میرایی میراگر ویسکوز، برابر است [2]. در این روش مشخصات سیستم جداساز شامل سختی، برش تسلیم و نسبت میرایی ویسکوز به شکلی تنظیم می‌شود که بیشترین برش و بیشترین تغییر شکل در سیستم جداساز از مقدار مشخصی که توسط طراح تعیین می‌شود، فراتر نرود. طراحی با روش تعادل انرژی، اولین بار در ژاپن مطرح شد و مورد استفاده قرار گرفت. این روش در راهنمای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مجهز به میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای ایران که در دست تهیه توسط دفتر مقررات ملی ساختمان است، پیشنهاد شده است و تا به حال در کشور از آن استفاده چندانی نشده است [9].

به طور معمول طراحی سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای بر اساس دستورالعمل‌های موجود در این زمینه (مانند Eurocode، UBC<sup>۲</sup>، IBC<sup>۳</sup> (که بیشتر بر پایه ASCE<sup>۴</sup>-7 استوار است) انجام می‌گیرد. بر اساس ASCE-7، طراحی سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای به دو روش نیروی جانبی معادل و یا روش دینامیکی انجام می‌شود [10]. در این مقاله، دقت روش جدید تعادل انرژی، که تاکنون در ایران از آن استفاده چندانی نشده، برای طراحی جدا سازهای لاستیکی هسته سربی بدون وجود میراگر ویسکوز در محل نصب جدا سازها مورد بررسی قرار گرفته و روش پیشنهادی با شبیه‌سازی عددی و مدلسازی تأیید شده و به نتایج مطلوبی منجر شده است. روند طراحی سازه جداسازی شده به کمک این روش بدین صورت انجام می‌گیرد

۱ Akiyama

۲ Uniform Building Code

۳ International Building Code

۴ American Society of Civil Engineers

در سازه‌های مجهز به سیستم جدا سازی لرزه‌ای، برای این که جداساز بتواند نقش خود را به درستی ایفا کند، لازم است رفتار غیرارتجاعی سازه اصلی در بالای تراز جداسازی محدود شده و رفتار سازه در قسمت پایین تراز جداسازی شده کاملاً در محدوده الاستیک خود باقی بماند. به بیان دیگر برخلاف سیستم‌های دارای میراگر که در آن سازه اصلی نیز می‌تواند وارد محدوده غیرارتجاعی خود شود، در ساختمان‌های مجهز به سیستم جداساز، لازم است رفتار غیرارتجاعی سازه اصلی محدود شود در غیر این صورت عملکرد سیستم جداساز مختل خواهد شد.

جدول ۱. حداقل اهداف عملکردی برای ساختمان‌های جدید دارای سیستم جداساز لرزه‌ای [9]

Importance of structure	Seismic Hazard Level		
	Service Level (return period of 40 years)	Level 1 (return period of 475 years)	Level 2 (return period of 2475 years)
very high	O	IO	LS or IO
high	O	IO	LS
moderate	O	LS or IO	LS

**Table 1.** Minimum performance objectives for new buildings with seismic isolation system [9]

O: Operational, IO: Immediate Occupancy, LS: Life Safety

## مرحله ۲: تعیین مشخصات سیستم جداساز

در این مرحله مشخصات سیستم جدا سازی لرزه‌ای مشخص می‌شود. در این جا از روش تعادل انرژی استفاده شده که جزئیات کامل آن در دستورالعمل جداسازهای لرزه‌ای ژاپن (AIJ, 2016) ارائه شده است [1]. در این روش نسبت حداکثر برش سیستم جدا سازی به وزن و سازه ( $\alpha_{max-SRSS}$ ) و بیشترین تغییر شکل برشی سیستم جداساز ( $\Delta_{max-SRSS}$ ) به صورت روابط (۱) و (۲)، تخمین زده می‌شوند. این مقادیر برابر با مقدار  $SRSS^2$  (جذر مجموع مربعات) برش و جابه‌جایی سیستم جداساز در هر دو امتداد افقی می‌باشند.

$$\alpha_{max-SRSS} = \frac{\sqrt{1 + \xi_{max}^2}}{1 + 4\pi n \xi_{max}} \left\{ 4n\alpha_y + \sqrt{(4n\alpha_y)^2 + (1 + 4\pi n \xi_{max}) \left( \frac{2\pi V_E}{T_{in} g} \right)^2} \right\} + \alpha_y \quad (1)$$

که در مرحله اول سطح عملکرد لرزه‌ای ساختمان تحت زلزله‌های با دوره‌های بازگشت مختلف تعیین می‌شود.

در مرحله دوم، ابتدا مقدار زمان تناوب جداساز و جابه‌جایی در تراز جداساز، تعیین می‌شوند و سپس سایر مشخصات سیستم جدا سازی شامل نسبت بیشترین برش سیستم جدا سازی به وزن و سازه و نسبت برش تسلیم جداساز با استفاده از منحنی‌های عملکردی تخمین زده می‌شوند. در مرحله سوم روسازه طراحی می‌شود که برای طراحی آن لازم است بیشترین برش سیستم جداساز در هر امتداد به سازه اصلی اعمال شود. در مرحله چهارم به طراحی جدا سازی پرداخته می‌شود؛ یعنی مشخصات لازم برای اجزای سیستم جداساز که شامل سختی جانبی، برش تسلیم و نسبت میرایی و اسکوز در سیستم جدا سازی است، محاسبه می‌شوند. در نهایت جداسازها به پای سازه طراحی شده اختصاص داده می‌شوند و به منظور بررسی پاسخ سازه، تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که در این روش نیاز به روند سعی و خطا در تعیین تغییرمکان ناشی از زلزله طیف طرح نیست و زمانی که در تأمین درز انقطاع در اطراف ساختمان و تراز جداسازی شده محدودیت وجود داشته باشد، این امکان را به طراح می‌دهد که جابه‌جایی حداکثر در تراز جداساز را از ابتدا فرض کرده و براساس آن جداساز و روسازه را طراحی نماید. همچنین این امکان وجود دارد که سیستم جداساز به شکلی طراحی شود که برش حداکثر آن و به دنبال آن نیروی وارد شده بر سازه روی تراز جدا سازی از مقدار مشخصی فراتر نرود که این قابلیت برای بهسازی سازه‌های موجود که ظرفیت جانبی مشخصی دارند، می‌تواند ملاک طراحی سیستم جداساز باشد.

## ۲- روند کلی طراحی

### مرحله ۱: تعیین اهداف عملکردی

در این مرحله لازم است سطح عملکرد لرزه‌ای ساختمان تحت زلزله‌های با دوره‌های بازگشت مختلف تعیین شود. حداقل اهداف عملکردی برای ساختمان‌های دارای سیستم جداساز لرزه‌ای در جدول (۱) برای سازه‌های جدید ارائه شده است.

انقطاع در اطراف ساختمان و تراز جداسازی شده محدودیت وجود دارد، می‌تواند ملاک طراحی سیستم جداساز باشد. بیشترین تغییرشکل و حداکثر برش سیستم جداساز بدست آمده در این مرحله مربوط به هر دو امتداد افقی به شکل همزمان هستند. به عبارت دیگر به طور تقریبی مقدار SRSS تغییرشکل حداکثر و برش حداکثر جداساز در هر دو امتداد سازه برابر با مقادیر تخمین زده شده از منحنی‌های عملکردی خواهد بود. پس با توجه به رابطه (۴)، برای تخمین مقادیر در هر امتداد به طور مجزا لازم است برش حداکثر و تغییرشکل حداکثر بدست آمده از منحنی‌های عملکردی بر عدد ۱/۳ تقسیم شود.

$$\alpha_{\max} \approx \frac{\alpha_{\max-SRSS}}{1.3}, \Delta_{\max} \approx \frac{\Delta_{\max-SRSS}}{1.3} \quad (4)$$

### مرحله ۳: طراحی مقاومتی سازه

در این مرحله لازم است سازه روی سیستم جدا ساز طراحی شود. برای طراحی رو سازه لازم است حداکثر برش سیستم جدا ساز در هر امتداد که در مرحله قبل تخمین زده می‌شود، به سازه اصلی اعمال شود. برای طراحی سازه لازم است مقدار سرعت معادل انرژی ورودی  $V_E$  برای سطح خطر ۲ (دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله) در نظر گرفته شده باشد. به منظور توزیع برش پایه مذکور در طبقات می‌توان از روش‌های مشابه سازه‌های فاقد جداساز استفاده نمود به شرطی که برش پایه از تراز جداسازی شده به سازه اعمال شود. با توجه به این که سازه بالای سیستم جدا ساز می‌تواند در زلزله با سطح خطر ۲ مقداری وارد محدوده غیرارتجاعی شود، می‌توان نیروی جانبی فوق را بر  $R_I$  تقسیم کرد. مقدار  $R_I$ ، یک سوم ضریب رفتار سیستم باربر جانبی سازه اصلی است که مقدار آن نباید بیشتر از ۲ و کمتر از ۱ در نظر گرفته شود (بند 7.5.4.2-ASCE7-16). به جز مقدار نیروی ناشی از زلزله، سایر بارها و الزامات طراحی مشابه ساختمان‌های فاقد جداساز است. در سازه‌های مجهز به سیستم جدا ساز با توجه به اینکه لازم است بیشتر در محدوده الاستیک خود باقی بماند و از ظرفیت شکل‌پذیری سازه نباید استفاده شود، بنابراین استفاده از سیستم‌های سازه‌ای با شکل‌پذیری پایین (سیستم‌های باربر جانبی معمولی و متوسط) در کلیه مناطق بلامانع است. به طور کلی سازه‌های مجهز به

$$\Delta_{\max,vis} = \frac{1}{1+4\pi n\xi_{\max}} \left\{ -n\alpha_y \left( \frac{T_{iso}}{\pi} \right)^2 g + \sqrt{\left( n\alpha_y \left( \frac{T_{iso}}{\pi} \right)^2 g^2 + (1+4\pi n\xi_{\max}) \left( \frac{T_{iso} V_E}{2\pi} \right)^2} \right\} \quad (2)$$

در روابط بالا  $\xi_{viscous}$  نسبت میرایی ویسکوز سیستم جداساز بوده که در صورت عدم وجود میراگرهای ویسکوز در تراز جداسازی شده، برابر صفر خواهد بود.  $\alpha_y$  نسبت برش تسلیم سیستم جداساز به وزن سازه روی تراز جداسازی شده می‌باشد (هر دو پارامتر دارای مقادیری بین ۰ تا ۱ هستند). زمان تناوب مد اصلی سازه جداسازی شده با  $T_{iso}$  نشان داده شده و پارامتر  $n$ ، تعداد سیکل‌های معادل برای استهلاک انرژی ورودی در سیستم جداسازی شده است. پارامتر  $V_E$  برابر سرعت معادل سیستم جداساز بر اساس انرژی ورودی است. مطابق رابطه (۳)، می‌توان  $V_E$  را برحسب مقدار طیف شتاب و طیف طرح سرعت در زمان تناوب مد اصلی سازه جداسازی شده برآورد نمود.

$$V_E = 1.4 S_V (T_{iso}, 5\%) = 1.4 \frac{g T_{iso}}{2\pi} S_a (T_{iso}, 5\%) \quad (3)$$

در رابطه فوق  $S_a$  و  $S_V$  مقدار طیف طرح شتاب و طیف طرح سرعت در زمان تناوب مد اصلی سازه جداسازی شده هستند. مقدار  $S_V$  بر حسب متر بر ثانیه بوده و مقدار  $S_a$  به صورت بی‌بعد و نرمال شده با شتاب ثقل بیان می‌شود. بدین ترتیب  $V_E$  دارای واحد متر بر ثانیه خواهد بود. با توجه به این که سازه‌های جداسازی شده معمولاً در قسمت سرعت ثابت طیف قرار خواهند گرفت، پس برآورد مقدار  $V_E$  بر اساس طیف سرعت ساده‌تر بوده و در اغلب موارد برای یک سطح خطر و منطقه مشخص مستقل از زمان تناوب خواهد بود. این پارامتر معرف سطح خطر لرزه‌ای می‌باشد. با استفاده از روابط (۱ و ۲) می‌توان منحنی‌های عملکردی برای سیستم جداسازی بدست آورد. این منحنی‌ها برای مقادیر مختلف سرعت معادل انرژی

( $V_E$ ) ترسیم می‌شوند که طراح می‌تواند به جای استفاده از روابط (۱ و ۲) از منحنی‌های عملکردی به منظور تعیین مشخصات سیستم جداساز استفاده کند. با استفاده از منحنی‌های عملکردی سیستم جداسازی، این امکان وجود دارد که سیستم جداساز به شکلی طراحی شود که جابه‌جایی حداکثر آن در یک سطح خطر خاص از مقدار مشخصی فراتر نرود. این قابلیت در مواردی که در تأمین درز

جداساز لازم است از سختی و مقاومت جانبی بالایی برخوردار باشند.

#### مرحله ۴: طراحی جداساز

پس از طراحی رو سازه، مشخصات لازم برای اجزای سیستم جدا سازی تعیین می شوند. این مشخصات عبارتند از سختی جانبی، برش تسلیم و نسبت میرایی ویسکوز در سیستم جداسازی که بر اساس این سه مشخصه، مشخصات لازم برای نشیمنگاه‌ها و میراگرهای سیستم جدا سازی تعیین می شود. با توجه به منحنی‌های عملکردی که در مرحله دوم عنوان شد، زمان تناوب سیستم جداساز ( $T_{iso}$ )، نسبت برش تسلیم سیستم جداسازی ( $\alpha_y$ ) و نسبت میرایی ویسکوز سیستم جداسازی لرزه‌ای ( $\xi_{viscous}$ ) مشخص هستند. در نتیجه کل سختی جانبی ( $k_{iso}$ )، برش تسلیم ( $V_{y-iso}$ ) و ضریب میرایی ویسکوز خطی ( $C_{L-iso}$ ) در سیستم جدا ساز (ناشی از تمام نشیمنگاه‌ها و میراگرها) به صورت روابط (۵، ۶ و ۷)، قابل محاسبه هستند که  $M_s$  جرم مؤثر کل سازه (مجموع جرم همه طبقات) است.

$$k_{iso} = \frac{4M_s \pi^2}{T_{iso}^2} \quad (5)$$

$$V_{y-iso} = \alpha_y M_s g \quad (6)$$

$$C_{L-iso} = \frac{4\pi M_s \xi_{viscous}}{T_{iso}} \quad (7)$$

پارامتر دیگری که برای طراحی جداساز نیاز هست،  $K_0$  (سختی اولیه) است که به گونه‌ای در نظر گرفته می شود که تغییر شکل تسلیم جداساز ( $\Delta_y$ )، حدود ۱ تا ۲ سانتی متر باشد. به جای استفاده از ضریب زلزله‌ای که در آیین نامه طراحی سازه‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ( $C = \frac{ABI}{R}$ )، عنوان شده است، از رابطه (۸) استفاده می شود [11].

$$C = \frac{\alpha_{max}}{R_I} \quad (8)$$

در رابطه فوق  $R_I$  ضریب رفتار سازه جدا شده می باشد که ۰/۳ برابر ضریب رفتار سیستم باریب جانبی سازه اصلی است [12]. روند مذکور از راهنمای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های مجهز به

میراگرها و جداگرهای لرزه‌ای ایران که در دست تهیه توسط دفتر مقررات ملی ساختمان است، گرفته شده است [9]. قبل از مدلسازی جداساز در نرم افزار، برای اینکه اطمینان حاصل شود سازه عملکرد لازم را دارد، تحلیل استاتیکی غیرخطی (بارافزون) انجام گرفت تا کنترل شود که آیا سازه اصلی برش حداکثر جداساز را می تواند در حالت تقریباً الاستیک جوابگو باشد یا خیر.

#### ۳- معرفی مدل‌های سازه‌ای و سیستم جداساز

سازه‌های مورد بررسی در این مقاله، سازه‌های فولادی پنج، ده و پانزده طبقه با سیستم مهاربندی همگرای معمولی به صورت ضربدری دو طبقه یا ۷ و ۸ در دو طبقه مجاور در هر دو جهت (به منظور افزایش صلبیت) هستند. سیستم سقف سازه، کامپوزیت بوده و کاربری سازه‌ها، درمانگاه می باشد. نوع خاک تیپ II و لرزه‌خیزی ساختگاه (تهران) در رده لرزه‌خیزی خیلی زیاد ( $A=0.35$ ) است. ضریب رفتار سازه اصلی ( $R=3.5$ ) و ضریب اهمیت سازه برابر ( $I=1.4$ ) در نظر گرفته شده است. پلان ستون‌گذاری و سقف و جایگاه مهاربندها در شکل (۱) و برش یکی از قاب‌های سه سازه در شکل (۲) مشاهده می شود. طراحی سازه‌ها بر پایه آیین نامه طراحی لرزه‌ای یا استاندارد ۲۸۰۰ [11] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و با رعایت ضوابط مربوط به طراحی لرزه‌ای انجام شده است.

#### ۳-۱- طراحی سیستم جداساز لرزه‌ای

جداساز در نظر گرفته شده در این پژوهش از نوع لاستیکی هسته سربی است. مدل رفتاری این نوع جدا ساز که با روش تعادل انرژی طراحی می شود، در شکل (۳) نشان داده شده است.

در شکل (۳)،  $\alpha$  نسبت سختی پس از تسلیم به سختی اولیه،  $K_0$  سختی اولیه و  $V_y$  برش تسلیم جداساز می باشد.

فرض شده است که هیچ میراگر ویسکوزی در محل نصب جدا ساز وجود ندارد ( $\xi_{viscous} = 0$ ). سازه‌های مورد بررسی،

در شهر تهران ساخته می شوند که  $V_E$  (سرعت معادل سیستم جداساز براساس انرژی ورودی) برای تهران تقریباً ۲/۵ متر بر ثانیه تخمین زده می شود. طراحی جداسازها براساس محدود

شکل ۳. مدل رفتار برشی دو خطی جداساز [9]

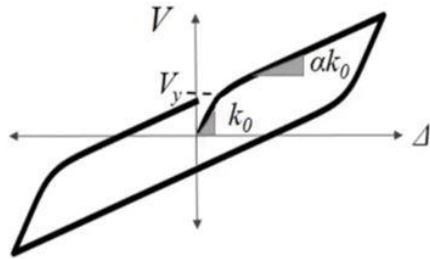


Fig. 3. Bilinear shear behavior model of isolator [9]

شکل ۴ منحنی عملکردی جداساز [9]

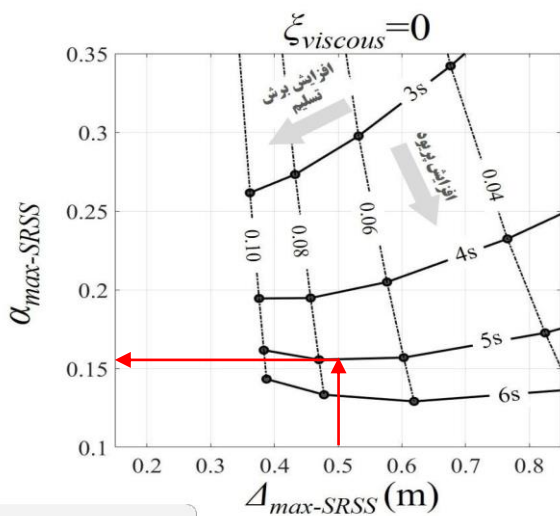


Fig. 4. Isolator performance curve [9]

توجه شود که برای حفظ کارایی جداساز، زمان تناوب سیستم جداساز باید به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود. به علاوه طبق منحنی عملکردی هر چه زمان تناوب جداساز کوچکتر در نظر گرفته شود، برش حداکثر آن افزایش می‌یابد. در نتیجه به منظور اینکه مقدار برش حداکثر جداساز در حد قابل قبولی قرار گیرد، زمان تناوب جدا ساز برای سه مدل ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، برابر ۵ ثانیه لحاظ شده است.

با توجه به شکل (۴)، در صورتی که جداساز ۰/۵ متر و  $T_{iso}$ ، ۵ ثانیه در نظر گرفته شود،  $\alpha_{max-SRSS}$  برابر با ۰/۱۵۶ و  $\alpha_y$  (خطوط عمودی موجود در نمودار) با انجام درونبایی، برابر ۰/۰۷۵ می‌شود. ضریب زلزله وارد بر سازه‌ها در جدول (۲)

کردن جابه‌جایی آن‌ها به ۰/۵ متر و فرض زمان تناوب برابر با ۵ ثانیه، برای هر سه سازه صورت گرفته است. منحنی عملکردی در (شکل ۴) نشان داده شده است.

شکل ۱. پلان سازه‌های طراحی شده با قاب‌های مهاربندی محیطی

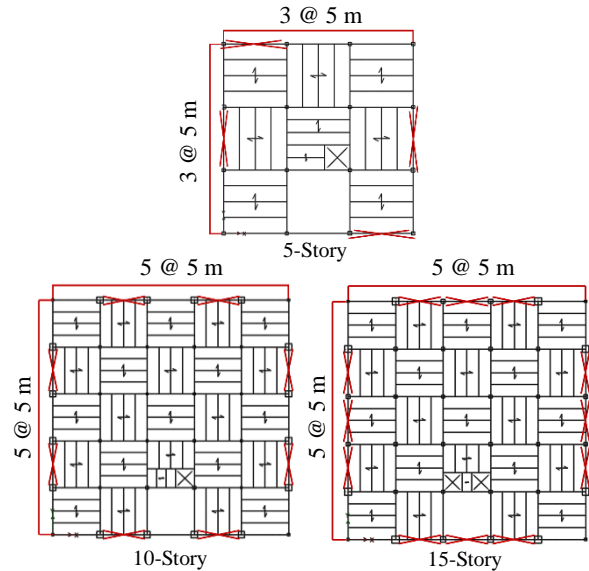


Fig. 1. Plan view of designed structures with perimeter bracing frames

شکل ۲. قاب مهاربندی شده سازه‌های طراحی شده

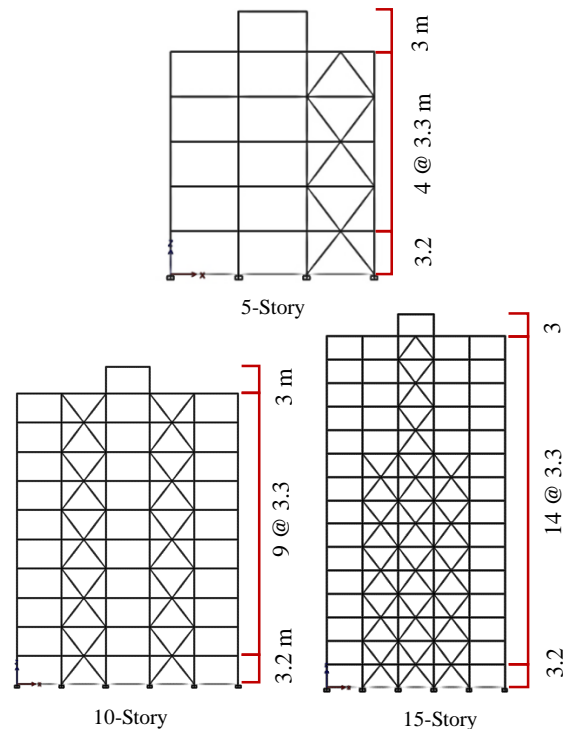


Fig. 2. Braced frames of designed structures.

$$k_{post-yield-LRB} = \frac{k_{iso}}{\text{number of BI}} \quad (9)$$

$$V_{y-LRB} = \frac{V_{y-iso}}{\text{number of BI}} \quad (10)$$

### ۳-۲- مدل‌سازی جداساز در نرم‌افزار

برای المان‌های جداساز از لینک Rubber Isolator در نرم‌افزار استفاده شده است. به منظور تعریف پارامترهای جداساز در دو جهت افقی، سختی پس از تسلیم جداساز، سختی اولیه جداساز، برش تسلیم جداساز و نسبت سختی ثانویه به اولیه به نرم‌افزار معرفی شدند. با توجه به اینکه سختی جداساز در جهت عمودی زیاد است، برای جهت قائم، ۱۰۰۰ برابر سختی افقی در نرم‌افزار معرفی شد.

مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که ضریب زلزله طبق رابطه (۸)، محاسبه می‌شود.

توجه شود که به منظور کارایی بهتر جداساز در سازه‌ی ۱۵ طبقه (که سازه بلند مرتبه محسوب می‌شود)، از تعداد دهانه‌های مهاربندی بیشتری استفاده شد تا صلبيت کافی حاصل شود. در نتیجه با توجه به جدول (۲) دوره تناوب آن نسبت به دوره تناوب سازه ۱۵ طبقه معمول، کاهش پیدا کرده است.

مشخصات جداسازهای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که  $k_{post-yield-LRB}$  و  $V_{y-LRB}$  به صورت روابط (۹ و ۱۰)، محاسبه می‌شوند.

جدول ۲. ضریب زلزله وارد بر سازه‌ها

Number of stories	Height of structure (m)	A	I	Soil type	Period of fixed base structure (sec)	K	$\alpha_{max-SRSS}$	$\alpha_{max-X}$	$\alpha_{max-Y}$	R	$R_I$	index of Direction X & Y
5	16.4	0.35	1.4	II	0.937	1.218	0.156	0.12	0.12	3.5	1.167	0.103
10	32.9	0.35	1.4	II	1.678	1.589	0.156	0.12	0.12	3.5	1.167	0.103
15	49.4	0.35	1.4	II	1.596	1.548	0.156	0.12	0.12	3.5	1.167	0.103

Table 2. Earthquake index of structures

جدول ۳. مشخصات طراحی جداسازها

Number of stories	Effective mass of the structure (kg)	Height of BI (cm)	$k_{iso}$ (kN/mm)	$V_{y-iso}$ (kN)	Number of BIs	$k_{post-yield-LRB}$ (kN/mm)	$V_{y-LRB}$ (kN)	$\Delta_y$ (mm)	$K_0$ (kN/mm)
5	973034.48	90	1.536	511.36	16	0.096	31.96	20	1.59
10	4805298.5	100	7.588	2525.35	36	0.210	70.15	20	3.51
15	7284991.7	125	11.504	3828.52	36	0.319	106.34	20	5.32

Table 3. Design parameters of isolators

مهاربندی دو سر مفصل شده‌اند، مفاصل پلاستیک فقط برای ستون‌ها (مفاصل auto P-M2-M3) در فواصل ۰/۰۵ و ۰/۹۵ از دو انتهای المان (با توجه به اینکه پای ستون‌ها گیردار است و لنگر در آن‌ها ایجاد می‌شود و اثر p-delta وجود دارد) و برای مهاربندها (مفاصل auto P) در وسط المان، تعریف شده است. یک نقطه گوشه در طبقه بام برای کنترل تغییرمکان در طول تحلیل

### ۳-۳- تحلیل سازه

مدلسازی و تحلیل سازه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Etabs 16.2.1 انجام شده است. در ابتدا به منظور کنترل این که سازه‌ی اصلی بتواند برش حداکثر جداساز را ( $\alpha_{max}$ ) در حالت تقریباً الاستیک جوابگو باشد، تحلیل بارافزون روی سازه‌های با پای ثابت انجام گرفته است. با توجه به این که تیرها به موازات قاب



شکل ۶. منحنی پوش سازه ۱۰ طبقه: پوش در جهت X (راست) و پوش در جهت Y (چپ)

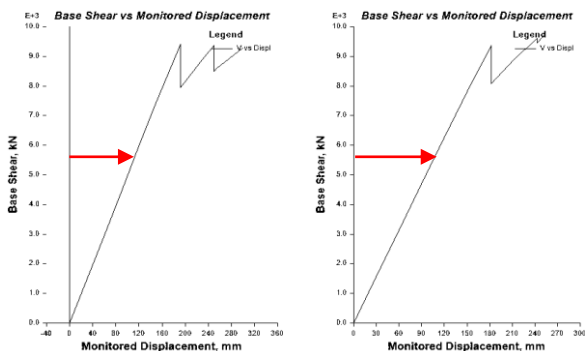


Fig. 6. Pushover curve for 10-story structure: in the X direction (right) and in the Y direction (left)

جدول ۵. مقایسه زمان تناوب سازه دارای پای ثابت با سازه جداسازی شده

	Period of fixed base structure (sec)	Period of isolated structure (sec)
5 stories	0.937	5.234
10 stories	1.678	5.52
15 stories	1.596	5.385

Table 5. Comparison of period between fixed base structure and isolated structure

شکل ۷. منحنی پوش سازه ۱۵ طبقه: پوش در جهت X (راست) و پوش در جهت Y (چپ)

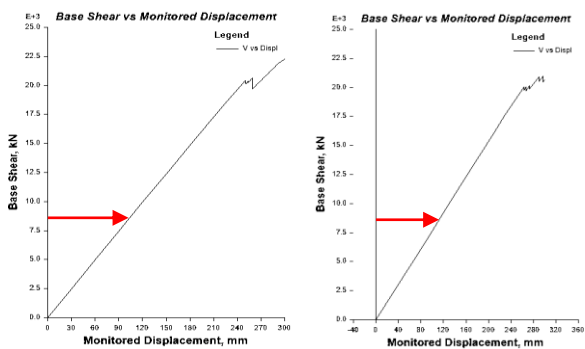


Fig. 7. Pushover curve for 15 story structure: push in the X direction (right) and push in the Y direction (left)

### ۳-۴- درستی آزمایشی مدل

در این مقاله جهت کنترل درستی مدل‌های ساخته شده، به عنوان نمونه سازه ۵ طبقه با پای گیردار در نرم‌افزار المان محدود اپنسیس [13] مدل‌سازی شد و زمان تناوب ۳ مود اول و همینطور درصد مشارکت جرمی بدست آمده از نرم‌افزار ایتبس با اپنسیس مورد مقایسه قرار گرفت. در اپنسیس برای تعریف مقاطع، از مصالح Steel01 استفاده شده است. برای ستون‌ها و مهاربندها

انتخاب شده است و از توزیع بار یکنواخت (مستطیلی) به عنوان الگوی بار جانبی استفاده شده است.

برش حداکثر جداساز براساس رابطه (۱۱)، بدست می‌آید.

$$V_{\max-iso} = \alpha_{\max} \times M_s \times g \quad (11)$$

برش حداکثر جداساز برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در (جدول ۴) ارائه شده است.

جدول ۴. برش حداکثر جداساز

Number of stories	$\alpha_{\max} \times M_s \times g$ (kN)
5	1145.486
10	5656.797
15	8575.892

Table 4. Maximum shear of isolator

نتایج بدست آمده از تحلیل بارافزون برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب در شکل‌های (۵، ۶ و ۷) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، برش حداکثر جداساز در محدوده خطی قرار گرفته است پس احتمالاً در حالت جداسازی شده، مفصل پلاستیک در اعضای سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه تشکیل نمی‌شود و الاستیک باقی خواهند ماند.

شکل ۵. منحنی پوش سازه ۵ طبقه: پوش در جهت X (راست) و پوش در جهت Y (چپ)

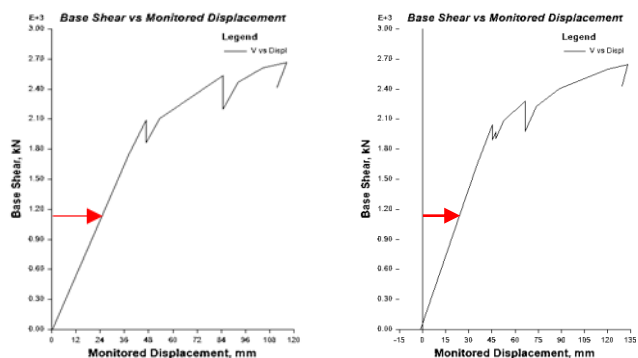


Fig. 5. Pushover curve for 5 story structure: push in the X direction (right) and push in the Y direction (left)

پس از قرار دادن جداسازها در پای مدل‌ها، با انجام تحلیل مودال باید به این نتیجه رسید که زمان تناوب هر سه سازه حدوداً همان مقدار ۵ ثانیه که در ابتدا برای جداساز فرض شده بود، بدست آید که نتایج در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۶. مقایسه زمان تناوب و درصد مشارکت جرمی سازه مدلسازی شده در ایتبس و اپنسیس

Mode	Etabs		OpenSees		*Difference between softwares (%)	
	Period (sec)	participating mass ratio	Period (sec)	participating mass ratio	Period (sec)	participating mass ratio
1	0.837	68.85	0.835	68.84	0.2	0.008
2	0.828	70.03	0.828	69.59	0.029	0.6
3	0.554	3.17	0.561	2.5	1.4	21.1

\*درصد تفاوت دو نرم‌افزار نسبت به مقادیر Etabs 16.2.1 محاسبه شده‌اند و قدرمطلق می‌باشند.

Table 6. Comparison of the period and modal participating mass ratio of the modeled structure

جدول ۷. مشخصات زلزله‌های ورودی

Earthquake name	Station	Year	magnitude	Type	Distance from the fault (km)	PGA (max) (g)
Manjil	Abbar	1990	7.4	Far field	12.6	0.51
Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	1992	7	Far field	14.3	0.55
Kobe	Nishi-Akashi	1995	6.9	Far field	7.1	0.51
Sarpol-e Zahab	Sarpol-e Zahab	2017	7.3	Far field	39	0.69
Tabas	Dayhook	1978	7.4	Far field	13.9	0.41
Erzincan	Erzincan	1939	6.7	Near field	4.4	0.50
Gazli	Karakyr	1984	6.8	Near field	5.5	0.86
Bam	Bam	2003	6.6	Near field	1.7	0.81
Loma Prieta	Saratoga-Aloha	1989	6.9	Near field	8.5	0.51
Parkfield	Parkfield-fault zone14	2004	6	Near field	8.8	1.31

Table 7. Specifications of earthquake records

شکل ۸. مقایسه منحنی پوش سازه مدلسازی شده در ایتبس و اپنسیس

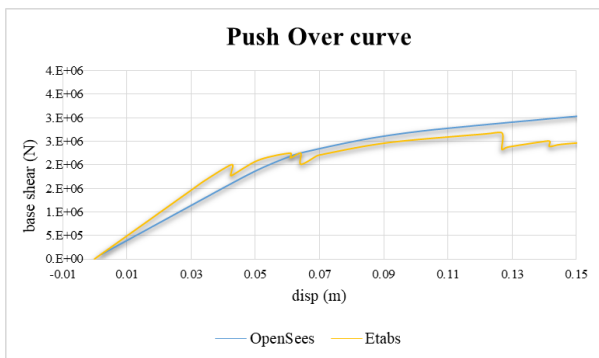


Fig. 8. Comparison of the PushOver curve of the modeled structure in Etabs and OpenSees

### ۳-۵- تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی

#### ۳-۵-۱- مشخصات زلزله‌های ورودی

تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی دو مؤلفه‌ای، با ده شتاب‌نگاشت که در جدول (۷) ارائه شده است، انجام گرفته است. داده‌های زلزله‌های ورودی از پایگاه<sup>۱</sup> PEER استخراج شده است [14]

از المان forceBeamColumn و برای تیرها از ElasticTimoshenkoBeam، استفاده شده است. در تیرها و مهاربندها با استفاده از المان zeroLength، در دو انتها مفصل تعریف شده است. در نهایت از دستور eigen برای آنالیز مودال استفاده شده است. با توجه به ساده سازی‌های انجام شده در مدلسازی سازه در اپنسیس، نتایج مطلوبی حاصل شد که در جدول (۶) نشان داده شده است. علت کاهش زمان تناوب سازه مدلسازی شده در ایتبس در جدول (۶) نسبت به مقدار عنوان شده در جدول (۵) این است که زمان تناوبی که در جدول (۵) بدست آمده است، همراه با کاهش سختی می‌باشد.

در شکل (۸)، منحنی پوش سازه در دو نرم‌افزار مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نزدیک بودن مقادیر زمان تناوب و درصد مشارکت جرمی در دو نرم‌افزار و نیز هماهنگی مطلوب نمودارهای بار افزون، می‌توان از درستی مدلسازی نرم‌افزاری سازه‌های با پای ثابت، اطمینان یافت.

حداکثر جداساز و برش حداکثر جداساز) تحت ۱۰ رکورد ذکر شده با مقادیر اولیه فرض شده (تغییر شکل حداکثر در هر جهت برابر با ۳۸۴/۶ میلی‌متر و برش حداکثر در هر جهت برای سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۱۴۵/۴۵، ۵۶۵۶/۷۹ و ۸۵۷۵/۸۹ کیلونیوتن) مقایسه شد که نتایج در شکل‌های (۱۲ تا ۱۷) ارائه شده است. بخاطر تفاوت تقاضای لرزه‌ای وارد بر سازه در جهت X و Y، پاسخ‌ها در دو جهت بررسی شده‌اند.

توجه شود که به دلیل اینکه تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزارهای CSI زمان‌بر است، تعداد رکوردهای بررسی شده در این مقاله محدود می‌باشد در نتیجه بررسی جداگانه رکوردهای حوزه دور و نزدیک از نظر آماری ارزشمند نبوده و میانگین‌گیری کل رکوردها منطقی‌تر به نظر می‌رسد.

شکل ۱۰. نمایش تشکیل مفصل پلاستیک در سطح خطر ۱ تحت رکورد گزلی: (A) سازه با پای ثابت، (B) سازه جداسازی شده

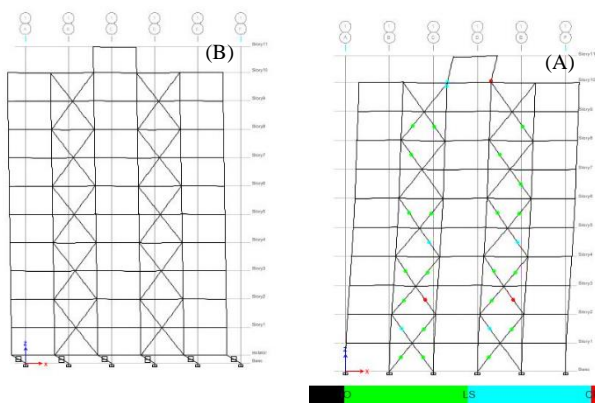
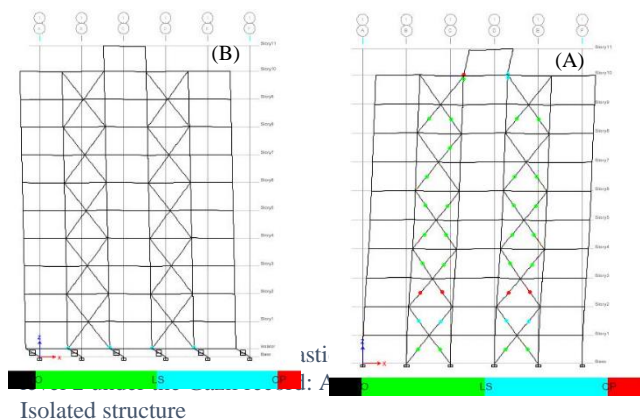


Fig. 10. Demonstration of plastic hinge formation in hazard level I under the Gazli record: A) Fixed base structure B) Isolated structure

شکل ۱۱. نمایش تشکیل مفصل پلاستیک در سطح خطر ۲ تحت رکورد گزلی: (A) سازه با پای ثابت، (B) سازه جداسازی شده



و رکوردها براساس آیین‌نامه ASCE 7-16 [12] و با استفاده از نرم‌افزار Spectral Match, SeismoMatch شده‌اند. در ضمن باتوجه به این که تیرها به موازات قاب مهاربندی دوسر مفصل شده‌اند، مفاصل پلاستیک فقط برای ستون‌ها (مفاصل فایبر) و مهاربندها (مفاصل دستی طبق نشریه ۳۶۰) تعریف شده است [15].

به عنوان نمونه رکورد منطبق شده مؤلفه افقی زلزله بم (جهت L) در بازه ۰/۵ تا ۸ ثانیه در شکل (۹) نشان داده شده است.

شکل ۹. رکورد مقیاس شده زلزله بم

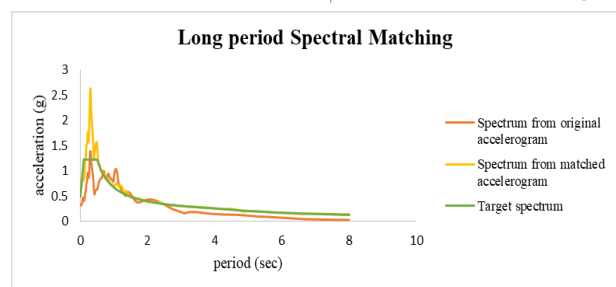


Fig. 9. Scaled record of the Bam earthquake.

### ۳-۵-۲- کنترل سطح عملکرد سازه‌ها

طبق جدول (۱) در این تحقیق فرض شده است که سازه‌های جداسازی شده در سطح خطر ۱ (زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله)، از سطح عملکرد IO و در سطح خطر ۲ (زلزله با دوره بازگشت ۲۴۷۵ ساله)، از سطح عملکرد LS فراتر نروند.

بعد از انجام تحلیل تاریخچه زمانی، مشخص شد که در سطح خطر ۱، تقریباً هیچ مفصلی در سازه‌ها شکل نگرفته (که این موضوع با انجام تحلیل بارافزون پیش‌بینی شده بود) و در سطح خطر ۲، تقریباً سازه‌ها تحت همه‌ی رکوردهای حوزه دور از سطح عملکرد IO و تحت رکوردهای حوزه نزدیک از سطح عملکرد LS فراتر نرفتند. به عنوان نمونه تشکیل مفصل در سازه ۱۰ طبقه با پای ثابت و سازه جداسازی شده تحت رکورد زلزله گزلی<sup>۲</sup>، در شکل‌های (۱۰ و ۱۱) نشان داده شده است.

### ۳-۵-۳- نتایج تحلیل سازه‌ها

به منظور بررسی دقت روش تعادل انرژی در طراحی جداسازها، پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی، خروجی‌ها (تغییر مکان

شکل ۱۲. مقایسه تغییر مکان هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۵ طبقه): (A) جهت X، (B) جهت Y

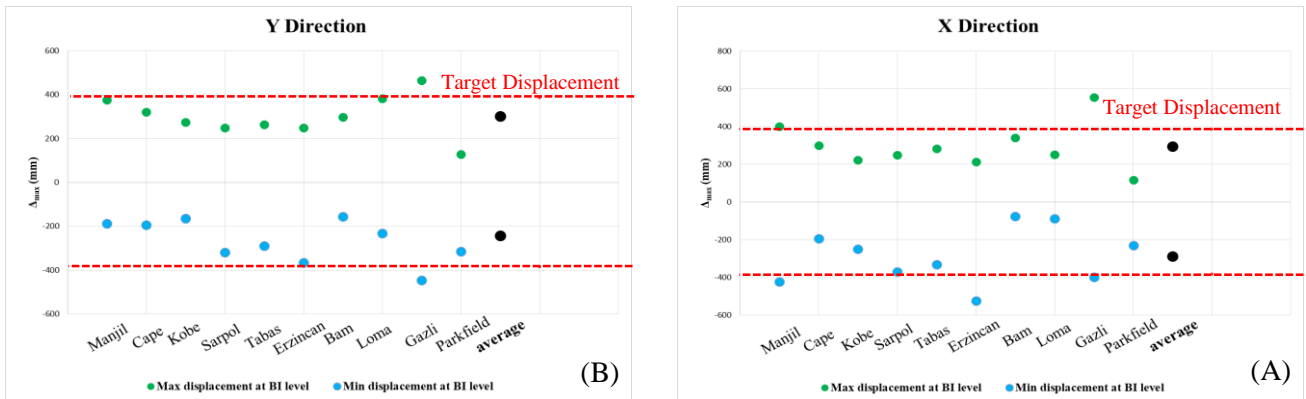


Fig. 12. Comparison of the target displacement of isolator with the results obtained from 10 records (5 story structure): A) X direction B) Y direction

شکل ۱۳. مقایسه برش هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۵ طبقه): (A) جهت X، (B) جهت Y

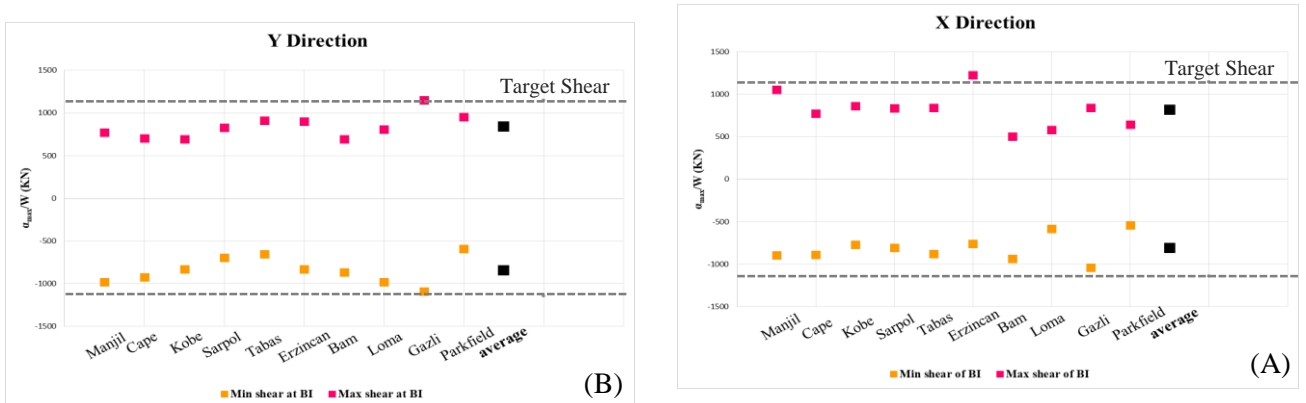


Fig. 13. Comparison of the target shear of isolator with the results obtained from 10 records (5 story structure): A) X direction B) Y direction

شکل ۱۴. مقایسه تغییر مکان هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۱۰ طبقه): (A) جهت X، (B) جهت Y

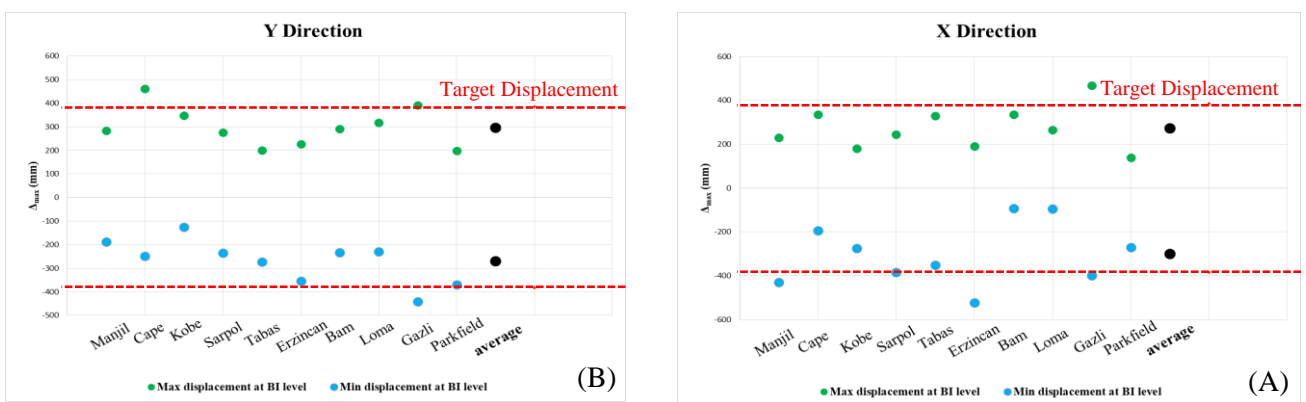


Fig. 14. Comparison of the target displacement of isolator with the results obtained from 10 records (10 story structure): A) X direction B) Y direction

شکل ۱۵. مقایسه برش هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۱۰ طبقه): (A) جهت X (B) جهت Y

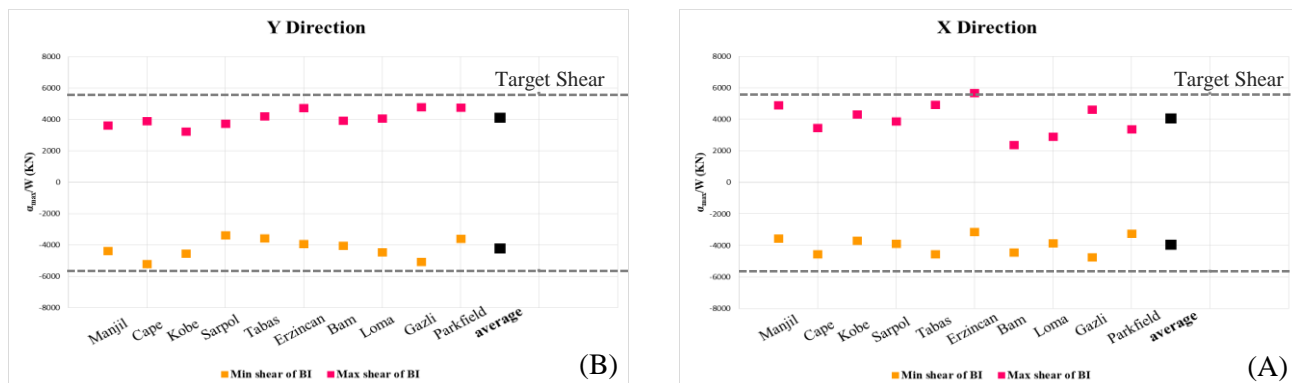


Fig. 15. Comparison of the target shear of isolator with the results obtained from 10 records (10 story structure): A) X direction B) Y direction

شکل ۱۶. مقایسه تغییر مکان هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۱۵ طبقه): (A) جهت X (B) جهت Y

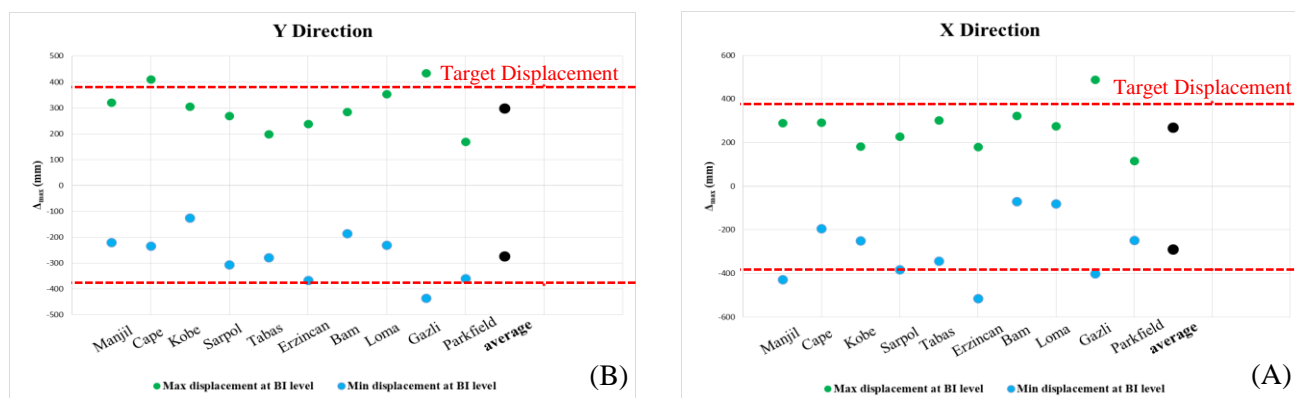


Fig. 16. Comparison of the target displacement of isolator with the results obtained from 10 records (15 story structure): A) X direction B) Y direction

شکل ۱۷. مقایسه برش هدف جداساز با نتایج بدست آمده تحت ۱۰ رکورد (سازه ۱۵ طبقه): (A) جهت X (B) جهت Y

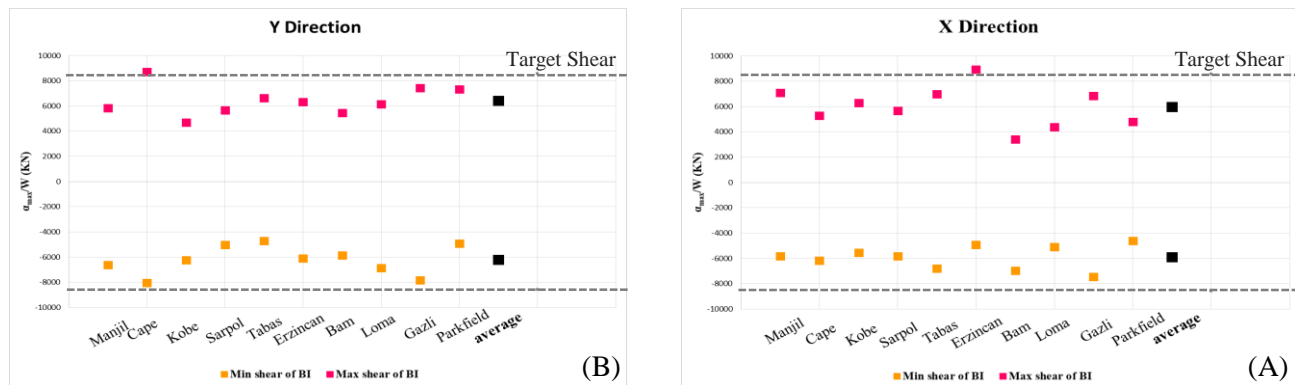


Fig. 17. Comparison of the target shear of isolator with the results obtained from 10 records (15 story structure): A) X direction B) Y direction

مرتبه هم استفاده کرد چون نشان داده شد که در سازه ۱۵ طبقه نیز تغییر مکان و برش جداساز از مقدار فرض اولیه فراتر نرفته است. البته به منظور کارایی مطلوب‌تر جدا ساز در سازه‌های بلند، افزایش صلبیت (سختی بیشتر و شکل‌پذیری کمتر) ضرورت می‌یابد. در نتیجه باید تعداد دهانه‌های مهاربندی را (در این مطالعه خاص) در قاب‌ها افزایش دهیم که این موضوع ممکن است از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نباشد.

#### ۵- اعلام تعارض منافع

در این مقاله هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

#### ۶- حمایت‌های مالی

این پژوهش هیچ کمک هزینه خاصی از هیچ مؤسسه سرمایه‌گذار در بخش عمومی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

#### مراجع

1. AIJ. Design recommendations for seismically isolated buildings. Architectural Institute of Japan (AIJ). 2016.
2. Higashino S, Kitamura H. Energy-balance based seismic response prediction methods for seismic isolated buildings with rubber bearings and viscous dampers. *J Struct Constr Eng (Transactions AIJ)*. 2005;70(588):79–86.
3. Baratta A, Corbi I. Optimal design of base-isolators in multi-storey buildings. *Comput Struct*. 2004;82(23–26):2199–209.
4. Chiba Y, Satsukawa K, Kitamura H, Koyama Y. Energy balance-based seismic response prediction methods for seismic isolated buildings with rubber bearings, dampers and low friction elastic sliding bearings. *J Struct Constr Eng (Transactions AIJ)*. 2004;69(575):65–72.
5. Hu JW. Response of seismically isolated steel frame buildings with sustainable lead-rubber bearing (LRB) isolator devices subjected to near-fault (NF) ground motions. *Sustain*. 2015;7(1):111–37.
6. Matsagar VA, Jangid RS. Base isolation for seismic retrofitting of structures. *Pract Period Struct Des Constr*. 2008;13(4):175–85.

با توجه به نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های (۱۲ تا ۱۷)، مشاهده می‌شود که به طور میانگین هر سه سازه چه در تغییر مکان و چه در برش (مربوط به جدا ساز)، نزدیک به مقدار هدف (فرض اولیه) قرار گرفته‌اند ضمن اینکه از مقدار حداکثر فراتر نرفته‌اند.

به طور کلی برای بررسی دقت طراحی جداساز به روش تعادل انرژی نباید به پاسخ بدست آمده تحت اثر یک رکورد بسنده شود. به عبارت دیگر باید میانگین پاسخ (تغییر مکان در تراز جداساز و برش آن) حاصل از چند رکورد، در محدوده مجاز فرض شده در ابتدای طراحی قرار گیرند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی جداساز LRB به روش تعادل انرژی انجام شد و دقت آن روی سه سازه فولادی ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه، تحت ۱۰ جفت شتابنگاشت زلزله با مشخصات لرزه‌ای متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، دوره تناوب سازه‌ها، تغییر مکان حداکثر جداساز و برش حداکثر جدا ساز در هر دو جهت X و Y بررسی شد. از نتایج مهم بدست آمده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- دوره تناوب هر سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه تقریباً همان مقدار فرض شده‌ی اولیه در منحنی عملکردی (۵ ثانیه) بدست آمد.
- طبق پیش‌بینی صورت گرفته در تحلیل بارافزون انجام شده روی سازه‌ها با پای ثابت، در سطح خطر ۱ (زلزله با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله) تقریباً هیچگونه مفصلی در اعضا تشکیل نشد.
- میزان تغییر مکان و برش حداکثر جدا ساز (در هر دو جهت X و Y) در میانگین ۱۰ رکورد وارده، در هیچ یک از سازه‌ها از مقدار هدف تجاوز نکرد و نزدیک به مقدار هدف (فرض اولیه) قرار گرفت.
- به طور معمول از جداسازها در سازه‌های کوتاه و میان‌مرتبه استفاده می‌شود ولی با طراحی جداساز LRB به روش تعادل انرژی، می‌توان از جداسازی پایه در سازه‌های بلند

7. Architectural Institute of Japan. Structural Design. In: Design recommendations for seismically isolated buildings. 2016. p. 149–54.
8. Austin MA, Lin W-J. Energy balance assessment of base-isolated structures. *J Eng Mech*. 2004;130(3):347–58.
9. Office of National Regulation and Building Control, Deputy Minister of Housing, Ministry of Roads and Urban Development. Seismic design guide for buildings equipped with dampers and seismic isolators (in press),(in persian). 2021.
10. Bazrafshan A, Khaji N. Seismic response of base-isolated high-rise buildings under long period ground motions (in persian). *Modares Civ Eng J*. 2016;16(2):41–52.
11. Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings: Standard No.2800 (in persian). 4th ed. Road, Housing and Urban Development Research Center; 2014.
12. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. 2017. 1–889 p.
13. <https://opensees.berkeley.edu/>.
14. PEER Ground Motion Database - PEER Center [Internet]. [cited 2021 Sep 30]. Available from: <https://ngawest2.berkeley.edu/>
15. Supervision Office of Deputy for Strategic Department of Technical Affairs. Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (in persian). 2013.

## Design of lead-rubber isolators with energy method and evaluating its accuracy for very important steel structures

Sahar Ebrahimi<sup>1</sup>, Seyed Mehdi Zahrai<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. student of Earthquake Engineering, School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran

2- Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Iran

mzahrai@ut.ac.ir

### Abstract

Base isolation is an effective technology for reducing seismic damage to structural and non-structural components as well as building contents, allowing buildings to maintain their function during and after a rare, high-intensity earthquake. This makes it an ideal seismic response correction system for importance buildings. The main advantage of isolated structures is that seismic responses can be easily and effectively reduced by prolonging the period and increasing damping. Therefore, the natural period of the structure isolated from the base is longer. In this paper, a new energy balance method is used to design a lead rubber bearing (LRB) isolator. Energy balance method is an analysis method to evaluate seismic resistance based on the balance of seismic energy input to buildings due to ground motion and energy absorbed by the building. In other words, the energy balance method is a response prediction method to approximate the seismic response of buildings isolated from the foundation. This method is effective for determining the relationship between ground motion, seismic isolation period and the effect of reducing the reaction of dampers. In this method, the specifications of the isolation system, including stiffness, yield shear force and viscous damping ratio, are adjusted in such a way that the maximum shear and maximum displacement in the isolation system do not exceed a certain value determined by the designer. This allows the designer to limit the maximum displacement at the isolation level to a certain amount when there is a constraint on the supply of separation distance around the building and the isolated level. Also, by limiting the maximum shear of the isolators, it is possible to use the base isolation system for retrofitting the existing structures that have a certain lateral capacity.

This design method was first proposed and used in Japan. This method has been recently proposed in the Iranian regulations (which is being drafted) and has not been used much in this country so far. Its advantages include no need for trial and error in the design process, the possibility of designing a rubber and frictional type of seismic isolator, the possibility of using a viscous or hysteretic damper, or a combination of both at the isolator installation site. To evaluate the accuracy of this method, three 5, 10 and 15-story steel structures with an ordinary concentric braced frames in both directions for clinic usage have been modeled and under ten near and far-field earthquakes in the by the nonlinear time-history analysis method have been analyzed. The results obtained from the time-history analysis are in good agreement with the estimated results of the energy balance method. The error percentage related to the displacement of isolator compared to the value assumed at the beginning of the design for 5, 10 and 15-story structures is 0.6%, 0.11% and 0.74%, respectively. Also, the percentages of error related to the maximum shear of isolator compared to the value obtained from the performance curve for 5, 10 and 15-story structures are 12.63%, 13.32% and 14.67%, respectively.

**Keywords:** Base isolation, energy balance method, 3-D steel structure, near and far-field earthquakes in, nonlinear time-history analysis