

Seismic Rehabilitation of Semnan Citadel Gate By Utilizing Base Isolation

Kosar Zolfagharian^{1*}, Mahmood Golabchi², Mohammad Bagher Kabirsaber³, Peyman Homami^{4*}, Mahdi Golpayegani⁵

1- Msc of Strengthening of Historical Buildings, , Faculty of Architecture, Pars University of Art and Architecture, Tehran, Iran

2- Professor, Faculty of Architecture, Pars University of Art and Architecture, Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Architecture, College of Fine Arts, University of Tehran, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

5-MSc of Structural Engineering, Islamic Azad University, Semnan, Iran

ABSTRACT

Attention to the historical and valuable buildings that are considered as part of the culture and national identity of every country holds a special place. Most countries spend significant costs to preserve, maintain, and protect such heritage against earthquakes and other destructive factors, as often, historical structures do not meet the requirements of modern seismic design codes and need to appropriate actions to improve performance and reduce seismic vulnerability. One of the historical buildings in the country is the historical gate of Semnan city, called Arg Gate. In recent years, the minarets of Arg Gate in Semnan have been strengthened. The purpose of this research is to improve the seismic behavior of Arg Gate and retrofit it against severe earthquakes. For this purpose, nonlinear time history analysis of the numerical model of the structure has been performed in ABAQUS software. The structure's behavior against strong earthquakes evaluated and its vulnerability assessed. In addition, another numerical model has been prepared by adding a set of Lead Rubber Bearing (LRB) seismic isolators, which have been considered as a method of retrofitting to reduce the vulnerability of the structure. Both models have been evaluated against 7 earthquake records. The records used have been scaled according to the Iranian Standard 2800 and the behavior of the structure in these two models has been compared. The analysis results indicate that the use of seismic isolators significantly reduces building displacement, drift, and torsional irregularity, and effectively improves the structure's seismic behavior by absorbing earthquake energy. For instance, it is observed that the isolated structure should undergo up to 43% larger base shear compared to the fixed-base structure to reach to the same relative displacement. Superstructure drifts and accelerations reduced by 46% and 78% respectively.

ARTICLE INFO

Receive Date: 01 May 2024

Revise Date: 17 June 2024

Accept Date: 29 September 2024

Keywords:

Arg Gate Semnan

Seismic improvement

Strengthening Historical Buildings

Seismic isolation

Nonlinear time history Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.436691.3336>

*Corresponding author: Peyman Homami.

Email address: homami@khu.ac.ir

طرح بهسازی لرزه‌ای دروازه ارگ سمنان با استفاده از جداسازی پایه

کوثر ذوالفقاریان^۱، محمود گلابچی^۲، محمداقبر کبیرصابر^۳، پیمان همای^{۴*}، مهدی گلپایگانی^۵

۱- کارشناس ارشد استحکام بخشی بناهای تاریخی، دانشکده معماری، دانشگاه هنر و معماری پارس، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده معماری، دانشگاه هنر و معماری پارس، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده معماری، دانشکده‌گان هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

۵- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده

توجه به بناهای تاریخی و با ارزش که به عنوان بخشی از فرهنگ و هویت ملی هر کشور محسوب می‌شوند دارای جایگاه ویژه‌ای است. غالب کشورها نیز هزینه‌های زیادی را برای حفظ، مرمت و مراقبت از این‌گونه آثار در برابر زلزله و دیگر عوامل مخرب صرف می‌کنند زیرا اغلب سازه‌های تاریخی، نیاز آیین‌نامه‌های نوین طراحی در برابر زلزله را برطرف نمی‌کنند و نیازمند اقدامات مناسب برای بهبود عملکرد و کاهش آسیب پذیری لرزه‌ای هستند. یکی از بناهای تاریخی کشور، دروازه تاریخی شهر سمنان با نام دروازه ارگ می‌باشد. در سال‌های گذشته مناره‌های دروازه ارگ سمنان استحکام بخشی شده‌اند. هدف از این پژوهش، بهبود رفتار لرزه‌ای دروازه ارگ و بهسازی آن در مقابل زمین لرزه‌های شدید می‌باشد. بدین منظور جهت بررسی رفتار سازه در مقابل زلزله‌های قوی و ارزیابی میزان آسیب پذیری آن با کمک تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی از مدل عددی سازه در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. علاوه بر مدل سازه موجود، مدل عددی دیگری با اضافه کردن مجموعه‌ای از جداسازهای لرزه‌ای هسته سربی (LRB) که بعنوان روش بهسازی و کاهش آسیب پذیری در نظر گرفته شده‌اند، تهیه شده است. هر دو مدل در برابر ۷ رکورد زلزله ارزیابی شدند. رکوردهای مورد استفاده طبق استاندارد ۲۸۰۰ ایران مقیاس شده و رفتار سازه در این دو مدل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در نتایج تحلیل مشاهده شد استفاده از جداساز لرزه-ای کرنش، جابجایی و نامنظمی پیچشی ساختمان را به‌نحو چشمگیری کاهش می‌دهد و جذب انرژی زلزله توسط جداساز لرزه‌ای بنحو مؤثری رفتار سازه را بهبود می‌بخشد، چنان‌که مشاهده شد برای بروز تغییر مکان نسبی سازه جداسازی شده در حد آنچه در سازه‌ی پایه ثابت رخ می‌دهد، در یکی از رکوردها، برش پایه تا ۴۳ درصد باید بزرگ‌تر شود. جداسازی لرزه‌ای بیش از ۴۶ درصد جابجایی نسبی بام و بیش از ۷۸ درصد، شتاب روسازه را کاهش داده است.

کلمات کلیدی: دروازه ارگ سمنان، بهسازی لرزه‌ای، استحکام بخشی بنای تاریخی، جداسازی لرزه‌ای، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.436691.3336	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2024.436691.3336	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۵/۰۸	۱۴۰۳/۰۵/۰۸	۱۴۰۳/۰۳/۲۸	۱۴۰۳/۰۲/۱۲
پیمان همای homami@khu.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

شهرسمنان از مقاصد تاریخی با قدمتی بالا و کمتر شناخته شده کشور ایران است. تاریخچه طولانی این شهر، جاذبه های زیادی را به ارمغان آورده است. یکی از مشهورترین جاذبه های شهر سمنان، دروازه ارگ آن می باشد. دروازه ای که تبدیل به نماد شهر شده و نقش و نگارهایی حیرت انگیزی دارد. دروازه ارگ سمنان مربوط به دوره قاجار می باشد. این اثر در تاریخ ۳۰ خرداد ۱۳۵۸ با شماره ثبت ۳۹۵ به عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. بنای اصلی ارگ سمنان در زمان حکومت حاجی بهمن میرزا بها الدوله، فرزند فتحعلی شاه قاجار، در سال ۱۲۶۴ هجری شمسی احداث گردیده است. علت نامگذاری این دروازه به نام ارگ را به دلیل همجواری اش با ساختمان های دولتی وقت (که مجموعه ای بزرگ از ابنیه و اماکن موردنیاز اداره شهر بوده است) می دانند. ارگ سمنان بنایی بزرگ و چشمگیر بوده است به نحوی که ساختمان های اداری چون تلگراف خانه و ساختمان های دیگری مانند آب انبار، حمام را در خود جای داده بود. همچنین در داخل دیوارهای ضخیم ارگ اتاق هایی برای نگهبانی تعبیه شده بود. این ارگ بزرگ که دارای ۱۲ برج متفاوت بود به عنوان مرکز حکومتی شهر سمنان به شمار می رفته است [۱].

سیستم جداساز با انعطاف پذیری افقی که بین روسازه و زیرسازه ایجاد می کند ساختمان یا روسازه را از مؤلفه های افقی حرکت زمین جدا می سازد. این عمل سیستمی را به وجود می آورد که فرکانس اصلی نوسان طبیعی آن نسبتاً پایین تر از فرکانس های غالب زمین لرزه و نیز فرکانس پایه همان ساختمان با پایه گیردار می باشد. برای درک بهتر این موضوع، عملکرد یک سیستم جداسازی شده در مقایسه با سیستم معمولی با پایه گیردار در شکل (۱) نشان داده شده است. سازه فوقانی در هر دو سیستم یکسان بوده و هر دو تحت اثر زلزله مشابه قرار گرفته اند. همان طور که ملاحظه می شود در سیستم معمولی با پایه های گیردار کل حرکت لرزه ای زمین به سازه فوقانی منتقل شده است. در این سیستم برای تحمل بار جانبی از رفتار غیرالاستیک (شکل پذیری) سازه استفاده شده است. به هر حال شتاب تشدید شده طبقات و تغییر مکان های نسبی بزرگ بین طبقات مختلف باعث شکست اعضای سازه ای و غیرسازه ای خواهد شد. در سیستم جداسازی شده هیچکدام از مسائل مربوط به سیستم با پایه گیردار مشاهده نمی شود. و سازه فوقانی تقریباً به صورت یک جسم صلب روی جداگرها تغییر مکان داده است. و این خود باعث جذب قسمت عمده انرژی زلزله در تراز جداگرها می گردد [۲].



ب- سازه دارای جداساز لرزه ای

(جابجایی نسبی بین طبقات کم است)

الف- سازه جداسازی نشده

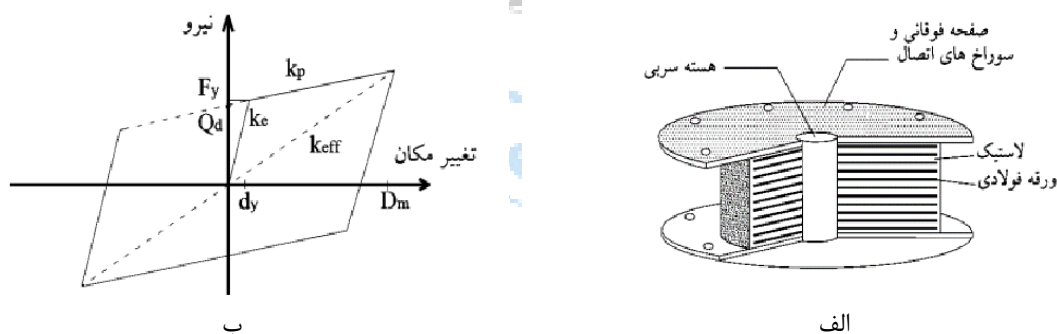
(جابجایی نسبی بین طبقات بزرگ است)

شکل ۱: مقایسه ساختمان با سیستم و بدون سیستم جداساز لرزه ای

از جداگرهای لرزه ای در ساختمان های متعددی در سراسر دنیا استفاده شده است. یکی از نخستین ساختمان های با جداسازی پایه جهان در مرکز حقوقی و قضایی فوت هیل^۱ که یک مرکز قضایی در بخش سن برناردینو^۲ در شهر رنچو کیوکامونگا^۳ در ۹۷ کیلومتری غرب مرز شهر لس آنجلس در آمریکا است می باشد. این ساختمان نه تنها نخستین ساختمان با جداسازی پایه در آمریکا به شمار می آید، بلکه نخستین ساختمان در جهان است که در آن از نشیمن های لاستیک طبیعی با میرایی بالا استفاده شده است. فاصله ساختمان از گسل

¹ Foothill Farms² San Bernardino³ Rancho Cucamonga

سن آندریاس^۴ ۲۱ کیلومتر است. این گسل می‌تواند در شاخه جنوبی خود، زمین لرزه‌های بسیار بزرگی تولید کند و به همین دلیل این بخش در طول سالبان متمادی دارای یکی از جامع ترین برنامه‌های آمادگی در برابر زمین لرزه در تمام ایالات متحده بوده است [۳]. همچنین از سیستم لاستیک با میرایی بالا برای ساختمان مرکز آتش‌نشانی و کنترل حریق لس آنجلس استفاده شده است. در این ساختمان رایانه‌ها و سیستم‌های ارتباط جمعی برای برنامه‌های خدمات اضطراری آتش سوزی نگهداری می‌شوند و بنابراین لازم است که این مرکز حین یک زمین لرزه شدید و بعد از آن به فعالیت خود ادامه دهد. پس از مقایسه طرح‌های متداول با طرح‌های جداسازی با درجه ایمنی برابر، تصمیم به استفاده از سیستم جداسازی پایه‌ای گرفته شد. هزینه طراحی با استفاده از جداسازی پایه ای در حدود ۶ درصد کمتر از طرح متداول تخمین زده شد، در حالی که در بیشتر پروژه‌ها هزینه جداسازی لرزه‌ای در حدود ۵ درصد بیشتر از روش‌های متفاوت آیین‌نامه‌ای می‌باشد. یکی از ساختمان‌های با جداسازی پایه در جهان، مرکز کامپیوتری پست غرب ژاپن^۵ می‌باشد که در ساندا در بخش اداری شهر کوبه قرار دارد. این ساختمان شش طبقه با مساحت ۴۷۰۰۰ مترمربع بر روی ۱۲۰ جداساز الاستومری^۶ با تعدادی میراگر فولادی^۷ و سربی^۸ قرار دارد. در ایتالیا ساختمان‌های متعددی با استفاده از جداسازی لرزه‌ای ساخته شده اند. یکی از این ساختمان‌ها، مرکز اداری شرکت ملی تلفن SIP در آنکونا^۹ می‌باشد که مجتمعی شامل ۵ ساختمان هفت طبقه می‌باشد. اخیرا در قالب یک پروژه آزمایشی، دو آپارتمان چهار طبقه کاملا مشابه، یکی با سیستم جداساز لرزه‌ای و دیگری طراحی شده به وسیله روش‌های متداول در مجاور هم در کالابریا^{۱۰} ساخته شده است [۴]. تکیه‌گاه لاستیکی طبیعی همانند تکیه‌گاه لاستیکی با میرایی کم، از لایه‌های لاستیکی تشکیل شده است و دارای تعدادی فیوز سربی است که درون سوراخ‌هایی قرار دارند. فیوزهای سربی درون تکیه‌گاه در تنش جاری شدن ۱۰ مگاپاسکال به‌طور فیزیکی تغییر شکل می‌دهند و باعث ایجاد پاسخ دوخطی تکیه‌گاه می‌شوند [۵]. حجم هسته سربی را حدود ۰/۰۱ بیشتر از حجم حفره می‌سازند و با فشار در آنجا قرار می‌دهند. صفحات فلزی به دلیل تماس مستقیم با هسته سربی، نیروی برشی را به آن انتقال داده و در آن تغییر شکل‌های برشی ایجاد می‌کنند. همچنین، سامانه جداساز لاستیکی هسته سربی از جداسازهای لاستیکی به‌شمار می‌رود که از چند لایه ورقه‌ای شامل لایه‌های فولادی و لاستیکی که به‌صورت یک درمیان قرار می‌گیرند، ساخته شده است. هسته سربی افزایش قابل ملاحظه‌ای در استهلاک ایجاد می‌کند، و همچنین مقاومت در برابر نیروهای ضعیف مانند باد را افزایش می‌دهد. سرب برخلاف فولاد می‌تواند چندین بار به حد جاری شدن برسد و دچار خستگی نشود [۶]. (شکل ۲).



شکل ۲: الف) شکل شماتیک اجزای جداساز لاستیکی هسته سربی ب) رفتار غیرخطی جداساز لاستیکی با هسته سربی [۷]

⁴ San Andreas Fault

⁵ West Japan Postal Computer Center

⁶ Natural Rubber Bearing

⁷ Steel damper

⁸ lead damper

⁹ Ancona

¹⁰ Calabria

۲- تاریخچه تحقیقات

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی بر روی سازه‌های تاریخی و جداسازهای لرزه‌ای انجام شده است. بررسی‌ها نشان داد که اکثر تحقیقات صورت گرفته بر روی سازه‌های تاریخی به شناسایی خسارت و یا به مراقبت بناهای تاریخی و استفاده از روش‌های دیگر مقاوم-سازی لرزه‌ای ساختمان‌ها پرداخته شده است.

زینعلیان و مرتضایی [۸] در سال (۱۳۹۶) شناسایی خسارت در بنای تاریخی مسجد جامع شهر سمنان با کمک روش تبدیل موجک را مورد بررسی قرار دادند. جهت بررسی اثر تئوری موجک در شناسایی خسارت در سازه، سناریوهای خرابی مختلفی برای این بنای تاریخی در نظر گرفته شده است. این سناریوهای خرابی به صورت ترک لحاظ گردیده است. از زلزله‌های بم، طبرس و منجیل برای تحلیل این بنا استفاده شده است. بنای تاریخی در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و از برنامه متلب برای نشان دادن خرابی در سازه استفاده شده است. آن-ها دریافتند که هرچه به سمت بالای سازه رفته، طیف دامنه فوریه سازه دچار بی‌نظمی بیشتری شده است که نشان‌دهنده خرابی در سازه می‌باشد.

وسترونی^{۱۱} و پائو^{۱۲} [۹] در سال (۲۰۱۳) به ارزیابی ارتعاش و نظارت ساختاری بر کلیسای ماکسنسیوس در رم پرداختند. به دلیل وجود یک ترک بزرگ بین دیوار و بدنه کلیسا که هنوز ناشناخته باقی مانده است. با استفاده از تحلیل مودال مشخصات مودال اثر تاریخی به وسیله یک مدل اجزای محدود ارزیابی شده است. نتایج جالبی از قبیل ارزیابی ارتعاش و توصیف پاسخ از آن بدست آمده است. سطح ارتعاش مقادیر مربوط به خرابی وارد محدوده متجاوز نشده است و نزدیک به سطح هشدار می‌باشد.

پژوهشی توسط لاموس^{۱۳} و همکاران [۱۰] در سال (۲۰۱۳) انجام شده است. آن‌ها نظارت بر سلامت ساختار دینامیکی کلیسای سنت تورکاتو را انجام دادند. ساختمان دارای آسیب‌های متوسط روبه خطرناکی بوده است که دارای ترک‌های بزرگ در ورودی اصلی می‌باشد. این ترک در عرض از پایین تا بالا افزایش یافته و در درون نیز قابل مشاهده است. برخی از ترک‌ها در پایین برج‌ها مشاهده شده که احتمالاً مربوط به تمرکز تنش فشاری ناشی از بارگذاری برون مرکزی می‌باشد. بیشتر منطقه آسیب دیده در قسمت جلویی ساختمان جایی که ترک‌های موجود به عرضی بیشتر از ۵۰ میلی‌متر می‌رسند، وجود دارد. این ترک‌ها در قسمت سرود سرایان عرضی بیش از ۳۰ میلی‌متر دارند. یک سیستم نظارتی دینامیکی در کلیسا نصب شد و نشان داد در طولانی مدت مفید بوده و شناسایی دینامیکی تنها راهی است که می‌تواند سازه را در یک راه غیر مخرب اندازه‌گیری کند.

تجملیان و خوشنودیان [۱۱] در سال (۱۳۹۶)، رفتار لرزه‌ای سازه‌های نامتقارن جداسازی شده با جداگرهای آونگی اصطکاکی سه-گانه تحت اثر پالس‌های ساده شده زلزله‌های حوزه نزدیک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد پیچش ناشی از خروج از مرکزیت جرمی روسازه بیشترین اثر در تشدید پاسخ‌های زلزله حوزه نزدیک را نشان می‌دهد. در صورت وجود خروج از مرکزیت همزمان جرمی و جداگر این اثر کاهش می‌یابد. اثر خروج از مرکزیت جداگرها بصورت مجزا نیز تأثیر کمتری در افزایش پاسخ‌ها نسبت به دو حالت فوق‌الذکر دارد. در سازه‌های جداسازی شده در محدوده امواج حوزه نزدیک با سرعت بالا، برخورد جداگر با جداره‌های اطراف خود باعث افزایش دررفت به مقدار زیادی می‌گردد. بنابراین لازم است تا در کنترل مقدار مجاز آیین‌نامه‌ای دررفت به امکان وقوع پیچش در سازه نیز توجه داشت.

۳- مدل مورد بررسی

دروازه ارگ سمنان باقی‌مانده ارگ حکومتی دوره قاجار در سمنان است که در حال حاضر در وسط یک میدان‌گاهی در خیابان طالقانی سمنان قرار گرفته است. موقعیت فعلی و محل قرارگیری آن در بافت شهری، عوامل و ساختار درونی و همچنین عوامل محیطی باعث آسیب دیدگی‌های متعددی در بدنه این بنا شده است. دروازه‌ی شمالی ارگ تنها بازمانده ارگ قدیم است و از دروازه‌ی جنوبی، جز

¹¹ Vestroni

¹² Pau

¹³ Lamos

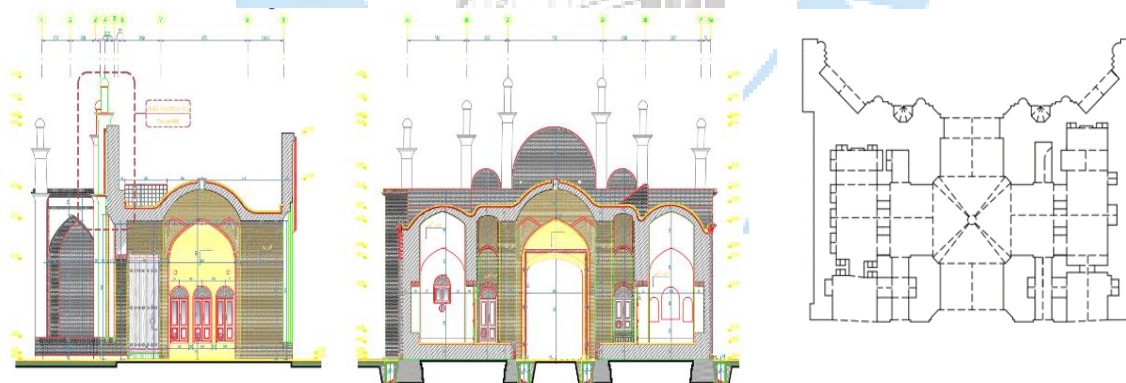
چند عکس، چیزی به یادگار نمانده است. دروازه‌ی شمالی ارگ، دارای دو نمای شمالی و جنوبی می‌باشد. نمای جنوبی دارای دو حجره در طرفین و به صورت قرینه، دو راهروی کوچک، ایوان‌هایی در جلوی حجره‌ها و مدخل اصلی، که محل عبور و مرور بوده، می‌باشد. نمای شمالی در مقایسه با نمای جنوبی، تزئینات کاشی‌کاری پرکارتر و مفصل‌تری دارد. در تزئین نمای جنوبی ارگ، کاشی‌های هفت‌رنگ، شش‌گلدسته‌ی زیبا، نقوش هندسی و نگاره‌های اساطیری و نظامی، به کار رفته است [۱۲]. برای ترسیم دروازه از نرم‌افزار اتوکد^{۱۴} [۱۳]، نسخه ۲۴ و برای تحلیل نرم‌افزاری از برنامه آباکوس^{۱۵} [۱۴] نسخه ۲۰۱۹ استفاده شده است.



ب

الف

شکل ۳: تصاویر وضع موجود دروازه ارگ سمنان.



ج - برش دروازه ارگ

ب - نمای جنوبی

الف - پلان معماری

شکل ۴: نقشه‌های جزئیات

¹⁴ Autodesk AutoCAD

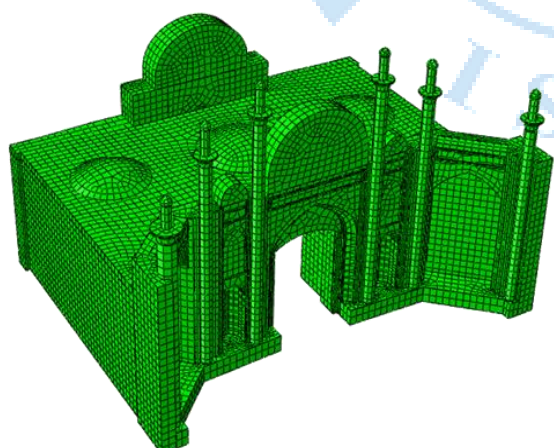
¹⁵ Simulia Abaqus

۳-۱- معرفی مدل عددی

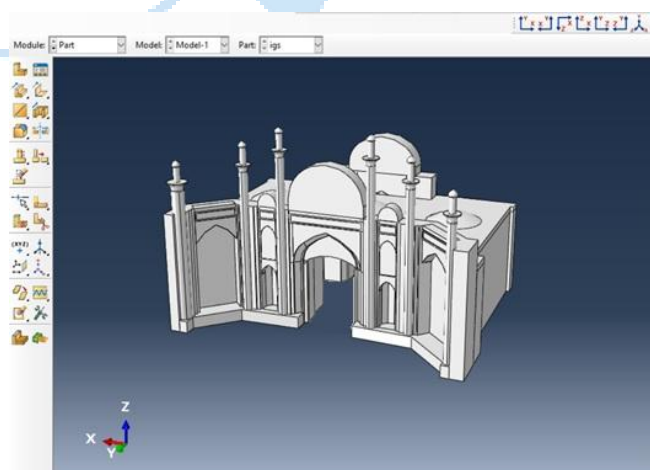
برای تهیه مدل عددی برای تحلیل های مورد نیاز در این مطالعه، ابتدا اقدام به تهیه فایل ترسیم سه بعدی در نرم افزار اتوکد نسخه ۲۴ شده است. سپس مدل ترسیم شده سه بعدی دروازه ارگ سمنان برای تحلیل به نرم افزار آباکوس [۱۴] نسخه ۲۰۱۹ منتقل شده است. سازه مورد نظر با استفاده از مش بندی Structured با استفاده از Mesh Topology از پیش تعریف شده، به شبکه ای از اجزای محدود تقسیم شده است. در یک مش Structured، تمامی المان ها یا از نوع المان های (Brick Hexahedral) هستند و یا مخلوطی از المان های مکعبی و هرمی هستند [۱۵، ۱۶، ۱۷]. مش بندی سازه به نحوی انجام و اصلاح شد که مشکلات عددی در فرآیند تحلیل بروز نکند و نرم افزار بتواند تحلیل را انجام دهد. بدین منظور از ۴ نوع مدل با ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا حالت بهینه به دست آید. همچنین برای بررسی تأثیر نوع المان بر پاسخ سازه تنش ماکزیمم به عنوان معیار برای همگرایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج همگرایی نشان داد که استفاده از ابعاد ۳۰۰ میلی متر برای مش بندی می تواند نتایج قابل قبولی را نشان دهد و ابعاد کمتر از این مقدار برای مش بندی تأثیر چندانی بر نتایج ندارد و تنها زمان تحلیل افزایش می یابد. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی مصالح مفروض دروازه ارگ آورده شده است [۱۸]. در شکل ۵-الف مدل سازی سه بعدی در نرم افزار آباکوس نشان داده است و شکل ۵-ب مش بندی سازه را نشان می دهد.

مشخصات مکانیکی واحد آجر کاری (مجموعه آجر و ملات)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	چگالی (kg/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	ضریب پواسون
۲۷۳۰	۱۵۲۰	۲۷۷۳	۰.۲۷	۰.۱۷	

جدول ۱: مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی مفروض در این مطالعه [۱۸]



ب



الف

شکل ۵: الف) مدل سازه سه بعدی در نرم افزار آباکوس ب) مش بندی مدل سازه در نرم افزار آباکوس.

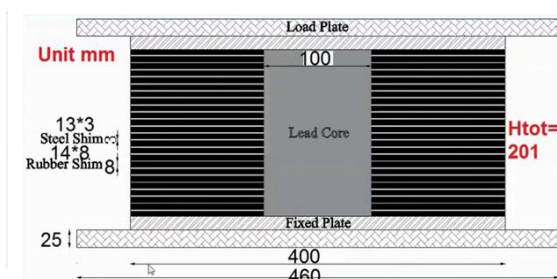
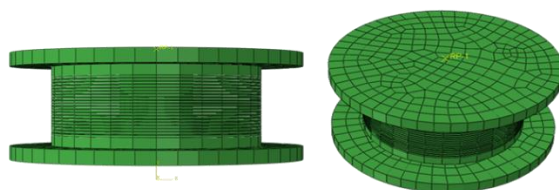
۲-۳- مشخصات جداساز

به منظور انجام تحلیل‌های عددی جداسازهای لرزه‌ای [۱۹] از جداساز لرزه‌ای هسته سربی LRB، استفاده شده است. شکل ۵ جداساز مدل شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. لاستیک‌های به کار رفته در این جداساز دارای میرایی کم و به صورت المان هایبرید C3D8RH مدل شده‌اند. سرب به کار رفته در جداساز دارای مدول یانگ ۱۶ مگاپاسکال و تنش تسلیم ۱۰ مگاپاسکال بوده که به صورت یک مدل دو خطی با رفتار پلاستیک کینماتیک در نظر گرفته شده است. صفحات فولادی به صورت یک ماده ایزوتروپیک با مدول یانگ ۲۱۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ فرض شده است. المان حجمی C3D8R برای صفحات فولادی لحاظ شده است. برای طراحی جداساز لرزه‌ای از نشریه ۵۲۳ [۲۰] استفاده شده است. ارتفاع جداساز ۲۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای تحلیل ابتدا سازه مورد تحلیل استاتیکی^{۱۶} قرار گرفته است، سپس سازه تحت تحلیل دینامیکی^{۱۷} از نوع Explicit قرار گرفته است. جداگرهای هسته سربی یا (LRB) ویژگی‌های خاصی دارند که آن‌ها را از سایر جداسازها متمایز می‌کند. از جمله ظرفیت بالای اتلاف انرژی که هسته سربی جداگر، تحت تنش برشی تغییرشکل پلاستیک می‌دهد و انرژی زلزله را به گرما تبدیل می‌کند که باعث کاهش نوسانات سازه می‌شود. سختی اولیه بالای جداگرها به ثبات سازه در شرایط عادی کمک می‌کند. در هنگام زلزله پس از شروع تغییرشکل پلاستیک سختی جداگر کاهش می‌یابد و این امکان را فراهم می‌سازد که سازه به خوبی ارتعاشات زلزله را جذب کند. یکی دیگر از توانایی‌های جداساز در بازگشت به موقعیت اولیه پس از وقوع زلزله می‌باشد. این ویژگی به کاهش نیاز به تعمیرات پس از زلزله کمک می‌کند و بهره‌وری سازه را افزایش می‌دهد. جداگرهای هسته سربی به دلیل طراحی خاص و استفاده از مواد با کیفیت بالا، دارای دوام و قابلیت اطمینان بالایی می‌باشند. این جداگرها در برابر تغییرات دما و شرایط محیطی مقاوم هستند و می‌توانند برای مدت طولانی بدون نیاز به تعمیرات عمل کنند. در نهایت می‌توان بیان کرد دلیل انتخاب جداگر با هسته سربی در مقایسه با سایر انواع جداگرها مانند جداگرهای اصطکاکی یا جداگرهای الاستومری بدون هسته سربی به طور قابل توجهی مؤثرتر در اتلاف انرژی و کاهش نوسانات سازه عمل می‌کنند می‌باشد [۲۱].

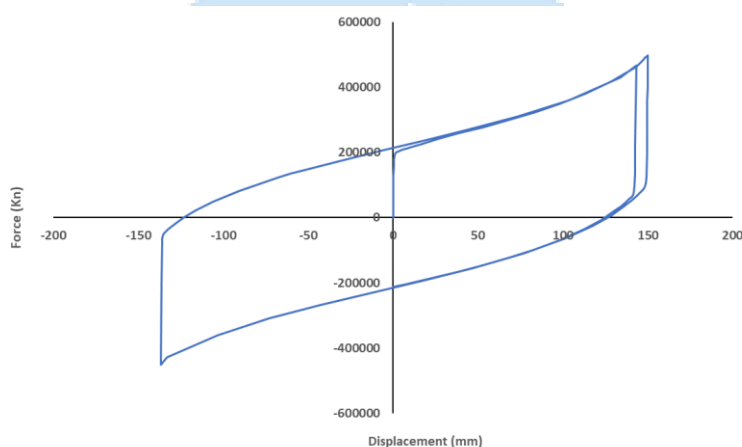
جدول ۲: مشخصات اجزای تشکیل دهنده جداساز LRB

مشخصات جداساز لاستیکی هسته سربی	
ابعاد (میلی‌متر)	۴۶۰ × ۴۶۰
مدول برشی (مگاپاسکال)	۰/۷۸
ارتفاع جداساز (میلی‌متر)	۲۰۱
تعداد لاستیک	۱۴
ضخامت لایه‌های لاستیک (میلی‌متر)	۸
تعداد لایه‌های فولاد	۱۳
ضخامت یک لایه فولاد (میلی‌متر)	۳
ضخامت هسته سربی (میلی‌متر)	۲۵

¹⁶ Static¹⁷ Dynamic



الف- جزئیات مدل عددی (ابعاد بر حسب میلیمتر)

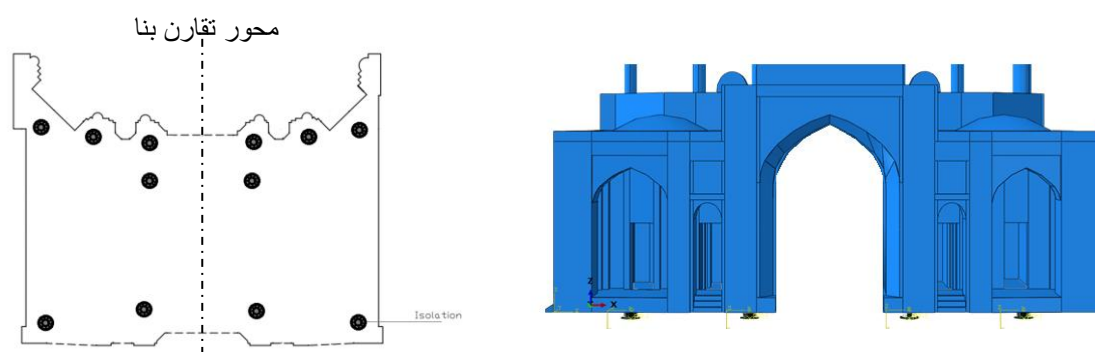


ب) رفتار غیرخطی جداساز لاستیکی با هسته سربی

شکل ۶: جداساز مدل شده در نرم افزار آباکوس

تعداد و ظرفیت باربری قائم جداسازها باید چنان باشد که وزن سازه فوقانی و اضافه بار قائم ناشی از اثر واژگونی در هنگام زلزله را بخوبی تحمل نماید. همچنین جانمایی آن ها باید چنان باشد که در طول بهره برداری دسترسی مناسب برای نگهداری، تعمیر و تعویض وجود داشته باشد. بر این اساس، انتخاب تعداد مناسب و جانمایی مناسب جداگرها نیازمند بررسی تحلیلی و اجرایی است. در این پژوهش تعداد جداسازهای مورد استفاده پس از آزمون و خطا، ۱۲ جداساز هسته سربی تعیین شده است. در شکل ۷ جانمایی جداسازها در نمای روبرو و پلان آورده شده است.

لازم به ذکر است که جانمایی مناسب جداسازها از نقطه نظر پاسخ پیچشی روسازه بسیار حائز اهمیت است. با جانمایی مناسب، می توان مرکز سختی سیستم جداسازها را به مرکز جرم سازه نزدیک نمود تا خروج از مرکزیت پیچشی کاهش یابد. همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود، تقارن جانمایی جداگرها، نسبت به محور تقارن روسازه، رعایت شده است. در همین حال، تجمع جداگرها در سمت نمای اصلی ارگ سمنان، بدلیل تمرکز جرم، دیوارهای قطور و سنگین تر بودن آن بخش از سازه است. بدین ترتیب، توزیع سختی قائم و افقی در تراز تکیه گاه جداسازی شده، متناسب با توزیع جرم در پلان شده که موجب کاهش پاسخ پیچشی سازه می شود.



شکل ۷: محل قرارگیری جداسازها متناسب با توزیع جرم در پلان در نظر گرفته شده است.

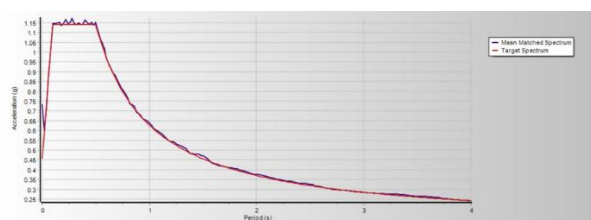
۳-۳- انتخاب شتاب نگاشت

در مطالعه اثر زلزله بر بنای ارگ سمنان از تحلیل دینامیکی غیر خطی استفاده شده است و تاریخچه جابجایی، شتاب، نیرو و برش پایه ساختمان در طول مدت اعمال بار زلزله استخراج شده است. تحلیل‌های تاریخچه‌زمانی معمولاً روندی طولانی و وقت‌گیر دارند اما برای تحلیل سازه‌های خاص و بسیار پراهمیت ضروری هستند [۲۲]. جهت انجام تحلیل تاریخچه‌زمانی غیرخطی از ۷ رکورد زلزله استفاده شده است. مطابق استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش ۴ [۲۳] زوج شتاب‌نگاشت‌ها به حداکثر خود مقیاس شده‌اند. طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب شده و یک طیف ترکیبی واحد برای هر زوج ساخته شد. هر زوج شتاب-نگاشت به گونه‌ای مقیاس شد که برای پیوند در محدوده ۰/۲ الی ۱/۵ برابر پیوند طبیعی سازه، مقدار متوسط طیف جذر مجموع مربعات مربوط به تمام زوج مولفه‌ها، بیش از ده درصد از ۱/۳ برابر طیف طرح کمتر نشود. ضریب مقیاس تعیین شده در شتاب نگاشت‌های مقیاس شده ضرب شد [۲۴]. باتوجه به نتایج تحلیل، زمان تناوب اصلی دروازه ارگ قبل از جداسازی برابر با ۰/۳۵۴ ثانیه و بعد از جداسازی برابر با ۳/۶۱ ثانیه به دست آمده است.

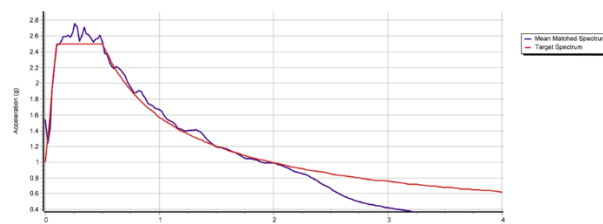
بر اساس مطالعات مرجع [۲۵] ژرفای سنگ بستر لرزه‌ای در شهر سمنان بین ۵ تا ۳۰ متر اندازه‌گیری شده است. میانگین سرعت موج برشی تا عمق ۳۰ متر، بین ۴۲۷ تا ۸۰۴ متر بر ثانیه است. بر پایه نتایج به دست آمده، نوع زمین در شهر سمنان طبق استاندارد ۲۸۰۰ در گروه II قرار می‌گیرد و منطقه‌ای با مساحت تقریبی ۲/۵ کیلومتر مربع در گروه I دسته‌بندی می‌شود. در این بررسی تپ خاک II در نظر گرفته شده است که خاک نسبتاً سخت بشمار می‌آید. در خاک نوع سخت و در سازه‌های کوتاه، آثار اندرکنش خاک و سازه نسبتاً کم اهمیت هستند از این رو، از مدل سازی خاک در زیر سازه صرف نظر شده است.

جدول ۳: زلزله‌های مورد استفاده برای تحلیل دروازه ارگ سمنان

نام زلزله	ایستگاه	تاریخ وقوع	مقیاس گشتاوری (ریشتر)	فاصله تا گسل (Km)	بیشترین شتاب زمین (g)	بیشترین سرعت زمین (cm/s)
Erzincan Turkey	Erzincan	۱۹۹۲	۶/۷	۴/۴	۰/۵	۹۵
Loma Prieta, CA	Corralitos	۱۹۸۹	۶/۹	۳/۹	۰/۵	۴۵
Superstition Hills, CA	Parachute Test Site	۱۹۸۷	۶/۵	۱/۰	۰/۵	۱۰۷
Imperial Valley, CA	EC Meloland Overpass FF	۱۹۷۹	۶/۵	۰/۱	۰/۴	۱۱۵
Kobe, Japan	Takatori	۱۹۹۵	۶/۹	۱/۵	۰/۷	۱۵۰
Chi Chi, Taiwan	Tcu052	۱۹۹۹	۷/۶	۰/۷	۰/۴	۱۶۹
Kocaeli, Turket	Yarimca	۱۹۹۹	۷/۴	۴/۸	۰/۳	۴۸



الف- بعد از جداسازی پایه

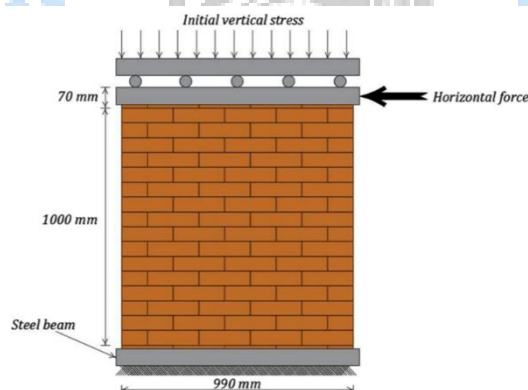


الف- قبل از جداسازی پایه

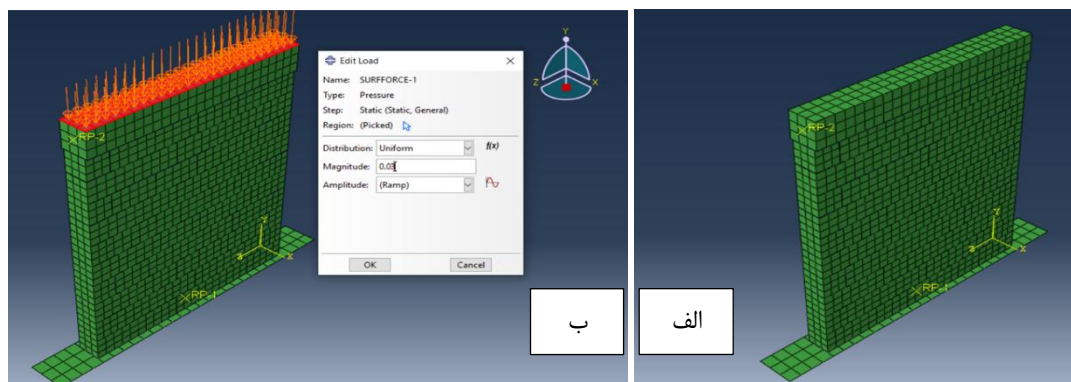
شکل ۸: هم‌پایه کردن میانگین رکوردهای زلزله با طیف آیین‌نامه در نرم‌افزار SeismoMatch.

۴-۳- صحت‌سنجی

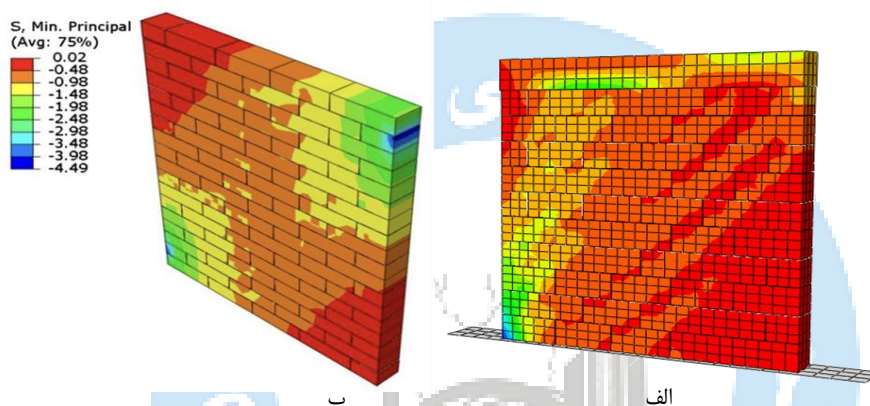
در این پژوهش برای صحت‌سنجی از مقاله عبدالله^{۱۸} و همکاران [۲۶] استفاده شده است. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان نتایج مدل عددی را با مرجع مذکور مقایسه نمود. دیوار مورد بررسی دارای ۹۰۰ میلی‌متر طول، ۱۰۰۰ میلی‌متر ارتفاع و ۱۰۰ میلی‌متر ضخامت می‌باشد. ابعاد آجر ۲۱۰ میلی‌متر طول، ۵۲ میلی‌متر ارتفاع و ۱۰۰ میلی‌متر ضخامت بود. دیوار تحت تنش فشاری قائم مورد آزمایش قرار گرفت. مدول الاستیسیته آجر برابر ۱۶۷۰۰ مگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۱۵ برای حالت الاستیک در نرم‌افزار لحاظ شده است. مقاومت کششی برابر با ۲ مگاپاسکال و مقاومت برشی برابر با ۲/۸ مگاپاسکال برای دیوار آزمایش شده تحت بار در صفحه لحاظ شده است. با توجه به شکل ۱۱ که کانتورهای تنش اصلی حداقل را با علامت مثبت نشان‌دهنده تنش کششی و علامت منفی که نشان‌دهنده تنش فشاری می‌باشد می‌توان بیان کرد در سمت چپ- بالا و راست پایین در هر دو مدل تنش اصلی حداقل کششی اتفاق افتاده است. همچنین در قسمت چپ- پایین و راست - بالا تنش اصلی حداقل فشاری رخ داده است. با توجه به نتایج تحلیل مقدار تنش اصلی حداقل کششی در مدل مرجع ۰/۰۲ مگاپاسکال و در مدل نرم‌افزاری ۰/۰۱۷۲ مگاپاسکال قابل مشاهده است. که ۱۴ درصد تفاوت در نتایج عددی را نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود نتایج در حد مناسبی به نتایج مقاله مرجع نزدیک و قابل قبول می‌باشد.



شکل ۹: مشخصات دیوار مدل‌سازی شده در مقاله.



شکل ۱۰: الف) مدل سازی و مش بندی دیوار مورد نظر در آباکوس ب) بار وارد شده به دیوار در نرم افزار آباکوس.



شکل ۱۱: مقایسه تنش در الف) دیوار مدل سازی شده در آباکوس ب) دیوار مقاله مرجع.

۴- بررسی نتایج

نام گذاری مدل ها در جدول ۴، معرفی شده است و در ادامه، نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی مورد بررسی قرار گرفته است.

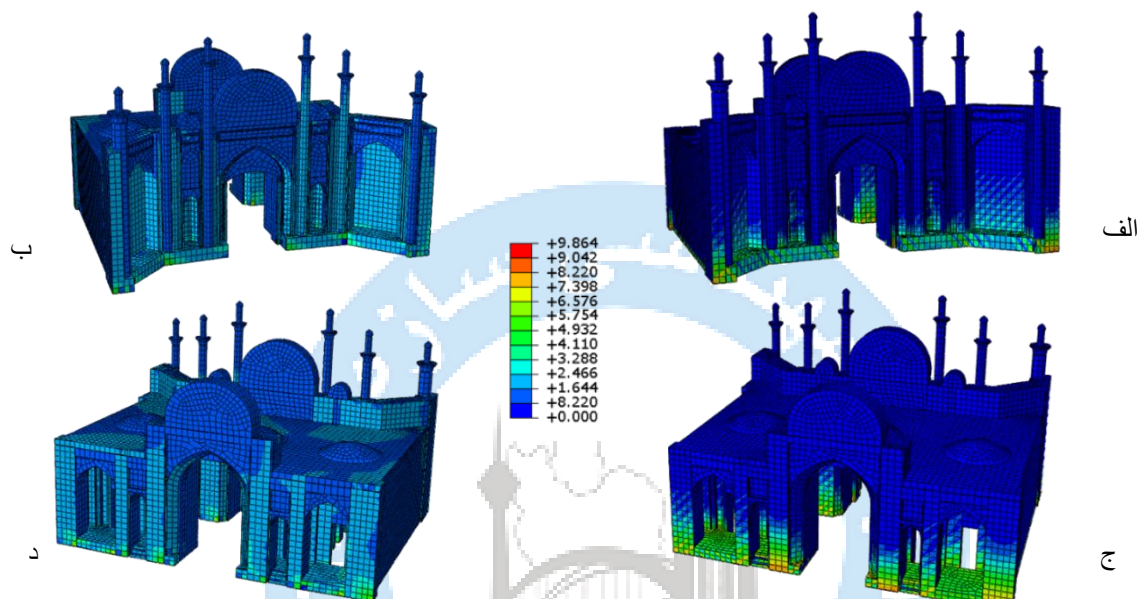
جدول ۴: حالت های در نظر گرفته شده برای نتایج تحلیل ها

نام	تعریف
S	در این حالت نتایج تحلیل برای سازه بدون جداساز می باشد.
S-I	در این حالت نتایج تحلیل برای سازه دارای جداساز می باشد.

۴-۱- کنترل کرنش

نمونه ای از نتایج در شکل ۱۲ ارائه شده اند. در شکل های ۱۲-الف و ۱۲-ج، بیشترین پاسخ سازه موجود از دو نمای شمالی و جنوبی نمایش داده شده است. در شکل های ۱۲-ب و ۱۲-د، بیشترین پاسخ سازه دارای جداساز از دو نمای شمالی و جنوبی نمایش داده شده است. مشاهده می شود که در سازه بدون جداساز بیشترین کرنش ایجاد شده ۹/۸۶۴ درصد می باشد که در نمای شمالی سازه در شکل

نشان داده شده است. همچنین می‌توان بیان کرد که تمرکز خسارت‌ها بصورت ترک خوردگی در پایه ساختمان است و ترک از آن قسمت شروع و به سمت دیواره‌ها حرکت می‌کند که باعث خسارت گسترده در سازه می‌شود. با توجه به شکل ۱۲-ب کرنش در سازه با جداساز E^{-4} در نمای شمالی را نشان می‌دهد. همچنین جداساز، کرنش در قسمت پایه ساختمان را کاهش داده و از خرابی‌های موجود در سازه بدون جداساز کاسته است. با توجه به شکل ۱۲-ج در سازه بدون جداساز بیشترین کرنش ایجاد شده $9/864$ می‌باشد. می‌توان بیان کرد که در نمای جنوبی سازه کرنش‌ها از قسمت پایه سازه شروع و به سمت دیواره سازه شروع به حرکت کرده است که نشان از شروع خرابی در سازه می‌باشد. با توجه به شکل ۱۲-د با قرار دادن جداساز بر زیر پایه ساختمان باعث کاهش کرنش در مقایسه با سازه بدون جداساز شده است. که بیشترین کرنشی که ایجاد شده مقدار $3/25E^{-4}$ می‌باشد.



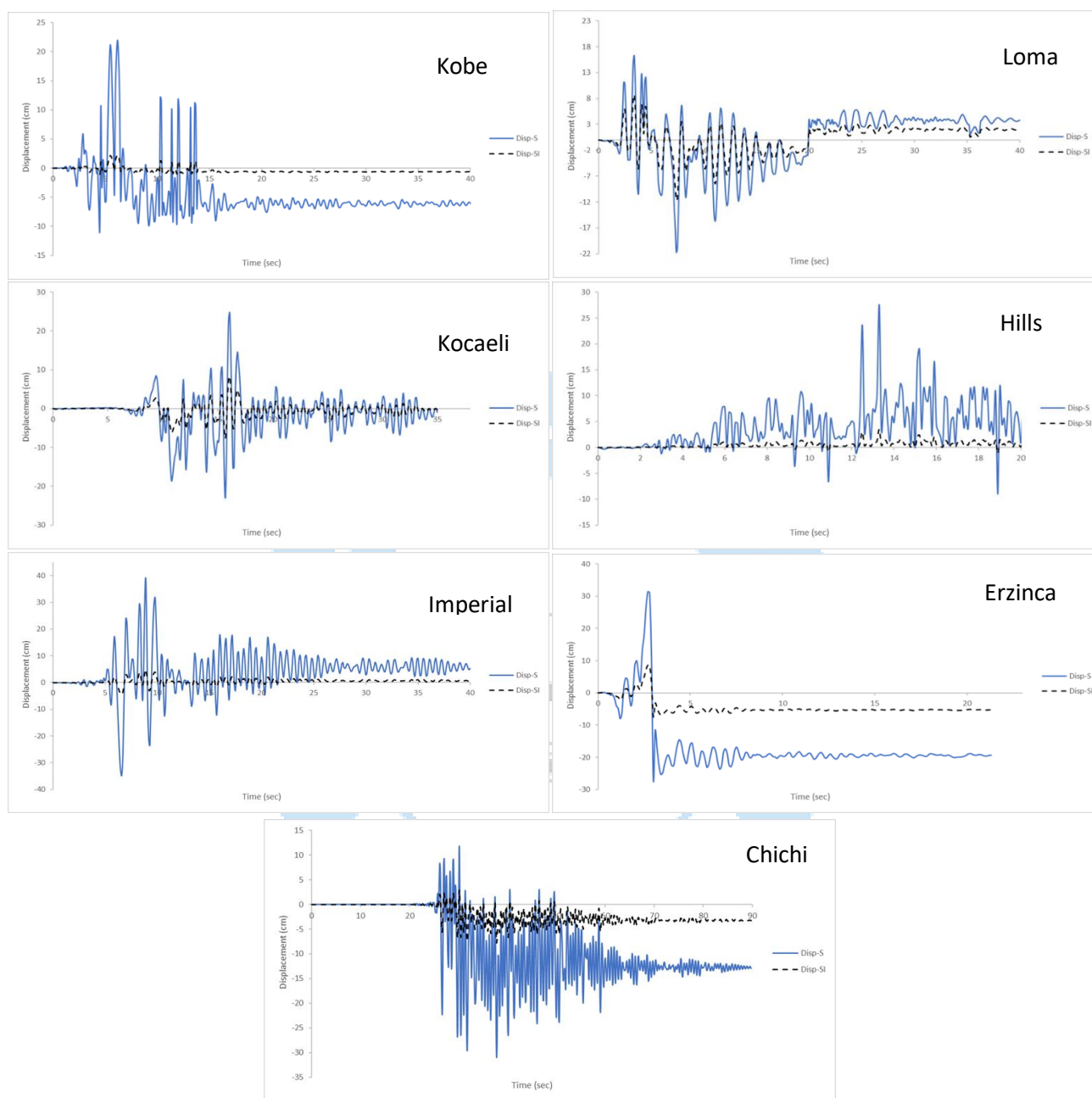
شکل ۱۲: کنترل کرنش در سازه (الف) بدون جداساز - نمای شمالی (ب) با جداساز - نمای شمالی (ج) بدون جداساز - نمای جنوبی (د) با جداساز - نمای جنوبی.

۲-۴- بررسی جابجایی

در این پژوهش در سازه بدون جداساز، جابجایی بام و در سازه با جداساز، جابجایی نسبی در سازه با کم کردن تغییرشکل برشی جداساز از جابجایی بام محاسبه شده است.

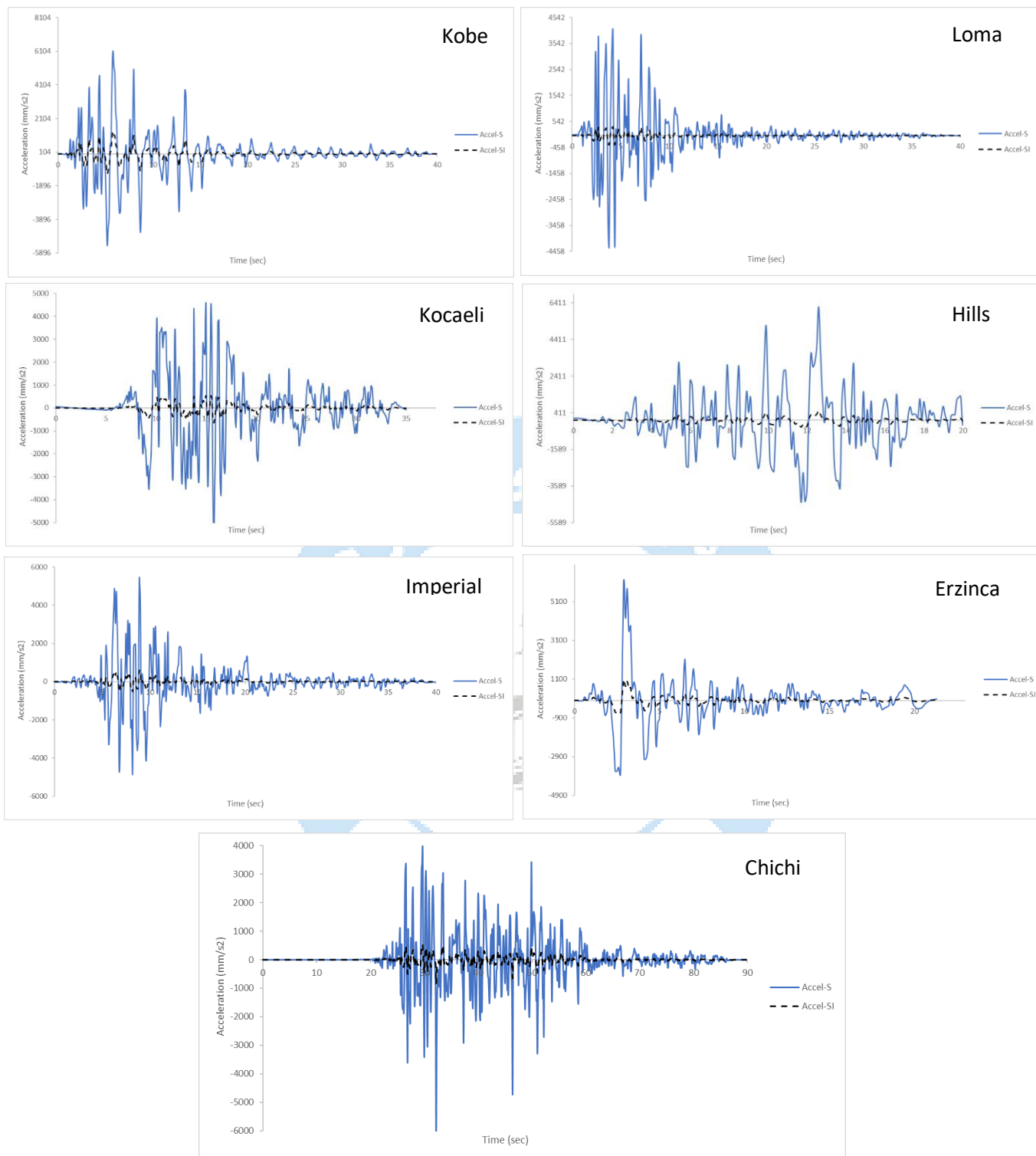
با توجه به شکل ۱۳ برای زلزله Loma می‌توان بیان کرد با وجود جداساز جابجایی نسبی در سازه بسیار کاهش می‌یابد. جابجایی نسبی در سازه بدون جداساز در زمان $7/4$ ثانیه می‌باشد که $21/66$ سانتی‌متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $11/64$ سانتی‌متر شده است که کاهش 46% را نشان می‌دهد. در زلزله Kobe می‌توان بیان کرد بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $6/2$ ثانیه می‌باشد که $21/97$ سانتی‌متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $2/19$ سانتی‌متر شده است که کاهش 90% را نشان می‌دهد. برای زلزله Hills بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $13/3$ ثانیه می‌باشد که $27/53$ سانتی‌متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $3/43$ سانتی‌متر شده است که کاهش 87% را نشان می‌دهد برای زلزله Kocaeli بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $16/1$ ثانیه می‌باشد که $24/73$ سانتی‌متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی 8 سانتی‌متر شده است که کاهش 67% را نشان می‌دهد. برای زلزله Erzincan می‌توان بیان کرد بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $2/8$

ثانیه می باشد که $31/03$ سانتی متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $8/4$ سانتی متر شده است که کاهش 73% را نشان می دهد.



شکل ۱۳: مقایسه جابجایی نسبی بام در سازه با جداساز و بدون جداساز.

برای زلزله Imperial بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $8/9$ ثانیه می باشد که $39/18$ سانتی متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $4/89$ سانتی متر شده است که کاهش 87% را نشان می دهد. برای زلزله Chi Chi بیشترین جابجایی در سازه بدون جداساز در زمان $37/8$ ثانیه می باشد که $30/91$ سانتی متر سازه جابجایی داشته است. با وجود جداساز جابجایی $7/76$ سانتی متر شده است که کاهش 75% را نشان می دهد.



شکل ۱۴: مقایسه شتاب در سازه با جداساز و بدون جداساز.

۳-۴- بررسی شتاب در سازه

با توجه به شکل ۱۴ برای زلزله Loma می‌توان بیان کرد با وجود جداساز، شتاب در سازه کاهش چشم‌گیری داشته است. بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۴/۴ ثانیه می‌باشد که ۴۲۸۲ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است. سازه با وجود جداساز شتاب ۳۴۹ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۹۲٪ را نشان می‌دهد. در زلزله Kobe می‌توان بیان کرد بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۵/۸ ثانیه می‌باشد که ۶۱۰۳ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه می‌باشد. با وجود جداساز شتاب ۱۳۳۶ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۷۸٪ را نشان می‌دهد. برای زلزله Hills بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۱۲/۶ ثانیه می‌باشد که ۶۱۹۰ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه شتاب داشته است. با وجود جداساز شتاب ۵۲۰ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۹۱٪ را نشان می‌دهد. برای زلزله Kocaeli بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۱۵/۸ ثانیه می‌باشد که ۵۳۷۴ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه شتاب داشته است. با وجود جداساز شتاب ۶۴۰ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۸۸٪ را نشان می‌دهد. برای زلزله Erzincan می‌توان بیان کرد بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۲/۹ ثانیه می‌باشد که ۶۱۵۹ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه شتاب داشته است. با وجود جداساز شتاب ۱۰۴۴ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۸۳٪ را نشان می‌دهد. برای زلزله Imperial بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۸/۹ ثانیه می‌باشد که ۵۳۴۳ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه شتاب داشته است. با وجود جداساز شتاب ۵۷۸ میلی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۸۹٪ را نشان می‌دهد. برای زلزله Chi Chi بیشترین شتاب در سازه بدون جداساز در زمان ۳۲/۲ ثانیه می‌باشد که ۶۲۰۳ میلی‌متر بر مجذورثانیه سازه شتاب داشته است. با وجود جداساز شتاب ۸۵۷ سانتی‌متر بر مجذورثانیه شده است که کاهش ۸۶٪ را نشان می‌دهد.

۹- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارآیی جداسازی لرزه‌ای بر رفتار لرزه‌ای بنای تاریخی (دروازه ارگ سمنان) تحت اثر هفت رکورد زلزله با مقایسه نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سازه بدون جداساز و سازه با جداساز (LRB) مورد بررسی قرار گرفته است. مصالح سازه‌های تاریخی ترد و غیر شکل پذیر هستند و این نوع سازه‌ها بسیار حساس به تغییر شکل می‌باشند. مقایسه کرنش مصالح و جابجایی نسبی در دو سازه با و بدون جداساز لرزه‌ای ارائه شده است. بطور کلی نتایج حاکی از کارآیی بسیار زیاد جداساز لرزه‌ای دارند و می‌توان نکات زیر را بعنوان جمع بندی ذکر نمود:

۱. در سازه بدون جداساز در نمای شمالی بیشترین کرنش ایجاد شده ۹/۸۶۴ درصد است. انتظار می‌رود کرنش در پای دیوارها بیشترین نمود را داشته باشد و ترک خوردگی از این محل به سمت دیوارها توسعه پیدا کند. با جداسازی لرزه‌ای، جابجایی نسبی نیاز در مقابل زلزله‌های مورد بررسی، افت پیدا می‌کند و نتیجتاً کرنش در پایه ساختمان بطور مؤثری کاهش می‌یابد و ترک و خرابی مشاهده نمی‌شود.
۲. عدم تقارن سازه در پلان و تمرکز جرم در ضلع شمالی، احتمال بروز پیچش در سازه موجور را فراهم می‌کند. جانمایی مناسب جداسازها، موجب شده است که مرکز سختی و مرکز جرم سازه پس از جداسازی به هم نزدیک شوند و عملاً این نقطه ضعف در سازه برطرف شده است. بر این اساس می‌توان جداسازی لرزه‌ای را به عنوان برای کاهش پیچش سازه به نحو مناسب بکار بست و می‌تواند به کاهش پاسخ‌های تغییرشکل نسبی سازه جداسازی شده کمک شایانی نماید.
۳. جابجایی نسبی در سازه با جداساز کاهش چشمگیری داشته است که نشان می‌دهد جداساز تأثیر مناسبی در جذب نیروی زلزله داشته است. که بیشترین کاهش مربوط به زلزله Kobe با مقدار کاهش ۹۰٪/کاهش را نشان داده است و کمترین کاهش جابجایی مربوط به زلزله Loma با کاهش ۴۶٪ می‌باشد.
۴. با مقایسه شتاب در سازه می‌توان دریافت که جداسازی لرزه‌ای منجر به کاهش چشمگیر پاسخ شتاب سازه شده است. به طوری که این کاهش تا ۹۲ درصد برای زلزله Loma رخ داده است.

۵. مقایسه پاسخ سازه جداسازی شده در زلزله‌های مورد بررسی نشان داد که با افزایش ۴۳٪ ضریب مقیاس زلزله، (به‌طور متناسب افزایش اسمی برش پایه) خسارت مشابه با سازه موجود (بر روی پایه ثابت) مشاهده می‌شود.
۶. مجموعه نتایج نشان می‌دهند که استفاده از جداساز لرزه‌ای در پایه سازه تاریخی دروازه ارگ سمنان دارای عملکرد بسیار مناسبی جهت بهسازی و حفاظت این بنای تاریخی است.

مراجع

- [1] Chenjeh Bashi, A. Zamani, P. (2016). Studying the tiling motifs of Semnan Citadel gate. *International Conference on Art, Architecture and Applications*, Tehran, Iran.
- [2] Hosseinzadeh, N. (1993). *Essential Idea, Programs, Benefits and Disadvantages*. *Journal of the International Seismology and Earthquake Engineering Institute*, No.1.
- [3] Komodromos, P. (2000). *Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures*. Southampton, UK: WIT Press, 60-80.
- [4] Ashtiani, M. and Naeem, F. and Ershad, H. (2003). Designing buildings with seismic isolators from theory to practice. *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering*, Tehran, Iran. 25-96.
- [5] Valeh, S. Bahar, A. and Rashidi, M. (2015). Semi-active control of separate floor tanks containing fluid with LRB seismic separator and MR damper, *2nd International Conference on Geotechnical & Urban Earthquake Engineering*, Tabriz, Iran.
- [6] Ansari Fard, H. and Naseri, H. (2014). types of seismic isolation systems; from past to present, *2nd international congress of structure, architecture and urban development*, Tabriz, Iran.
- [7] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington, D.C. Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [8] Zainalian, J. Mortezaei, A. (2016). Damage identification in the historic building of Jame Mosque in Semnan city with the help of wavelet transform method. In: *The 6th National Conference and the 2nd International Conference on Civil Engineering Materials and Structures*. City: Yazd, Iran.
- [9] Vestroni, F. and Pau, A. (2013). Vibration assessment and structural monitoring of the Basilica of Maxentius in Rome. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 41(1-2), 454-466.
- [10] Lamos, L. Aguilar, R. Lourenço, P. Moreira, S. (2013). Dynamic structural health monitoring of Saint Torcato church. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2), 1-15.
- [11] Tajammolian, H. Khoshnoudian, F. (2017). Seismic behavior of asymmetric structures supported on TCFP bearings subjected to simplified near-fault pulses. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(1), 48-57.
- [12] Jabari, A. (2016). Examining the motifs of the seven-colored tiles of Semnan Citadel gate. *Qoms Culture*, 58(19), 67-88.
- [13] Commercial computer-aided design (CAD) and drafting. (2024). *Autodesk*.
- [14] SIMULIA Abaqus FEA. (2019). *Dassault Systèmes Société Anonyme*.
- [15] Rahnavard, R. and Siahpolo, N. (2017). Function comparison between moment frame and moment frame with centrally braces in high-rise steel structure under the effect of progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4), 42-57.
- [16] Rahnavard, R. Hassanipour, A. Suleiman, M. Mokhtari, A. (2017). Evaluation on eccentrically braced frame with single and double shear panels, *Journal of Building Engineering*, 10: 13-25.
- [17] Rahnavard, R. Hassanipour, A. Mounesi, A. (2016). Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 121, Pages 441-456.
- [18] Hejazi, M., Moayedian, S. M., Daei, M. (2015). Structural Analysis of Persian Historical Brick Masonry Minarets under Wind Load. *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 5(1), 165-176.
- [19] Mahmoodi, R., Tajmir Riahi, H. Zare, M. R. (2020). Investigating the Effective Parameters on the Performance of hybrid lead rubber bearing system with shape memory alloy. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(3), 581-600.
- [20] Guideline for Design and Practice of Base Isolation Systems in Buildings. (2010). No. 523.
- [21] Kamrava, A. (2015). Seismic Isolators and their Types. *Current World Environmen*, 10(1):27-32.
- [22] Mortezaei, A. Golpayegani, M. & Bahari, H. (2023). Evaluation of Scaling of Ground Motion Records Based on Seismic Design Standards and Regulations. *Civil Infrastructure Researches*, 9(1), 121-138.
- [23] Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (standard 2800). (2014). 4th Edition.
- [24] Mortezaei, A. Golpayegani, M. (2017). The effect of moment redistribution on the stability of reinforced concrete moment resisting frame buildings under the ground motion. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(2), 68-84.

[25] Javdanian, H. Hadad, A. Mirnezhad, A. (2018). Geotechnical zoning of Semnan city based on the geophysical tests, *Geography and Territorial Saptial Arrangement Journal*, Vol 26, Pages 107-122.

[26] Abdulla, K. Cunningham, L. Gillie, M. (2017). Simulating masonry wall behaviour using a simplified micro-model approach. *Engineering Structures*, 151: 349-365.

