



University Of Qom

Evaluation of Near-Field Earthquake-Induced Pounding in Building with Friction Pendulum Bearing Considering Seismic Gap of 360 Standard

Ayoub Shakouri¹, Gholamreza Ghodrati Amiri², Ali Asghar Kaviani³

1. Natural Disasters Prevention Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: m_shakoori@alumni.iust.ac.ir
2. Corresponding author, Natural Disasters Prevention Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: ghodrati@iust.ac.ir
3. Natural Disasters Prevention Research Center, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: AliasgharKaviani021@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 20 Mar 2023

Revised 11 Aug 2023

Accepted 15 Aug 2023

Keywords:

Base Isolation,
Seismic pounding,
Double and Triple Friction Pendulum Bearing,
The 360 Standard,
Nonlinear Time History Analysis.

ABSTRACT

In this paper, the effect of seismic pounding of adjacent structures on buildings isolated by double (DFPB) and triple friction pendulum bearings (TFPB) is investigated. The seismic gaps between buildings are calculated based on the Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, standard No. 360 of Iran, which is not considered for friction pendulum bearings in the previous studies. To this end, a three-dimensional single-story building model is created in the MATLAB program considering two scenarios including the case without pounding and the case with it. In addition, fifteen different TFPBs and six DFPBs are utilized as seismic isolators to cover a wide range of fundamental periods of the isolation system. Finally, nonlinear time history analyses with seven pairs of ground motion records are conducted to obtain some of the seismic responses of buildings including base shear, drift, story acceleration and maximum displacement of the isolation system. The results show that the seismic pounding considerably increases responses of base-isolated buildings. For example, the floor acceleration and the drift ratio of isolated building with TFPB increased 2 and 6 fold because of seismic pounding. It shows that the seismic gaps calculated by the formula of standard No. 360 may not be sufficient to prevent severe seismic poundings and increase of seismic responses.

Cite this article: Shakouri, Ayoub., Ghodrati Amiri, Gholamreza., & Kaviani, Ali Asghar. (2023). Evaluation of near-field earthquake-induced pounding in building with friction pendulum bearing considering seismic gap of 360 standard. *Civil Infrastructure Researches*, 9(2), 125-140. <https://doi.org/10.22091/cer.2023.9269.1468>



ارزیابی اثر ضربه سازه‌های مجاور بر ساختمان مجهز به جداساز لرزه‌ای اصطکاکی قوسی با فواصل لرزه‌ای طبق نشریه ۳۶۰ تحت حرکت نزدیک گسل

ایوب شکوری^۱، غلامرضا قدرتی امیری^۲، علی اصغر کاویانی^۳

۱. مرکز مطالعات مخاطرات طبیعی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: m_shakoori@alumni.iust.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، مرکز مطالعات مخاطرات طبیعی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: ghodrati@iust.ac.ir

۳. مرکز مطالعات مخاطرات طبیعی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: AliasgharKaviani021@gmail.com

چکیده

هدف این مقاله، بررسی اثر ضربه ساختمان مجاور بر پاسخ‌های ساختمان جداسازی شده لرزه‌ای با جداسازهای آونگی اصطکاکی دو و سه‌قوسی با در نظر گرفتن فواصل لرزه‌ای دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه شماره ۳۶۰) است. بررسی کفایت فواصل لرزه‌ای محاسبه شده طبق نشریه ۳۶۰ برای ساختمان‌های جداسازی شده با جداسازهای اصطکاکی قوسی در پژوهش‌های پیشین انجام نشده است. برای رسیدن به این هدف، ابتدا مدل سه‌بعدی ساختمان‌های جداسازی شده در دو حالت با برخورد به سازه مجاور و بدون برخورد ایجاد شد. برای هریک از مدل‌های ذکر شده، ۶ جداساز آونگی اصطکاکی دو‌قوسی و ۱۵ جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی با ابعاد و ضرایب اصطکاک متفاوت، جهت در نظر گرفتن گستره‌ای مناسب از دوره تناوب‌ها به کار برده شد. سپس از روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای محاسبه پاسخ‌های لرزه‌ای مدل‌ها استفاده گردید. بدین منظور، هفت شتابنگاشت از پایگاه داده معتبر انتخاب و به ساختمان‌ها اعمال شد. پاسخ‌های لرزه‌ای هریک از مدل‌ها شامل شتاب طبقات، جابه‌جایی بیشینه سیستم جداسازی، جابه‌جایی نسبی بین طبقات و برش پایه سازه محاسبه و تحلیل شد. نتایج نشان می‌دهد ضربه لرزه‌ای، برخی پاسخ‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. به عنوان مثال، شتاب طبقه و تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای برای ساختمان با جداساز سه‌قوسی بر اثر ضربه به ترتیب ۲ و ۶ برابر شده است. در نتیجه، ممکن است مقدار فواصل لرزه‌ای محاسبه شده براساس نشریه ۳۶۰ کافی نباشد و باعث ایجاد ضربه و افزایش پاسخ‌های ساختمان به میزان قابل توجهی گردد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

کلیدواژه‌ها:

جداسازی لرزه‌ای،
ضربه ساختمان مجاور،
جداساز آونگی اصطکاکی
دوقوسی و سه‌قوسی،
نشریه ۳۶۰،
تحلیل تاریخچه زمانی
غیرخطی.

استناد: شکوری، ایوب؛ قدرتی امیری، غلامرضا؛ کاویانی، علی اصغر. (۱۴۰۲). ارزیابی اثر ضربه سازه‌های مجاور بر ساختمان مجهز به جداساز لرزه‌ای اصطکاکی قوسی با فواصل لرزه‌ای طبق نشریه ۳۶۰ تحت حرکت نزدیک گسل. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۹(۲)، ۱۲۵-۱۴۰.

<https://doi.org/10.22091/cer.2023.9269.1468>

۱- مقدمه

پدیده برخورد لرزه‌ای علاوه بر افزایش فاصله بین ساختمان‌های مجاور، که در برخی موارد امکان آن وجود ندارد، می‌توان از راهکارهایی از جمله به‌کار بردن اتصالات دائمی بین ساختمان‌های مجاور، به‌کار بردن مصالح جاذب انرژی بین ساختمان‌ها و استفاده از میراگرها به‌همراه جداسازهای لرزه‌ای بهره‌گرفت [۱-۳].

تسی^۱ از اولین نفراتی بود که در این زمینه به صورت تحلیلی تحقیق کرد. او این تحقیقات تحلیلی را بر روی سازه‌های با سیستم جداساز لرزه‌ای انجام داد و به بررسی احتمال برخورد آن‌ها به دیوار حائل اطراف شالوده پرداخت [۴]. ماتساگار و جنگید^۲، به‌صورت عددی و پارامتری برخورد سازه‌های جداسازی شده با سیستم چند درجه آزادی (MDOF^۳) را در سیستم‌های مختلف جداساز لرزه‌ای آزمایش کردند [۵]. پژوهشگران، تحقیقاتی به‌صورت تحلیل پارامتریک انجام داده‌اند که در آن تأثیرات برخورد یک سازه با سیستم جداساز لرزه‌ای با دیوار حائل اطراف را در نظر گرفتند. آن‌ها فقط سازه چهار طبقه فلزی را در کنار سازه‌های با پایه گیردار قرار داده و نحوه برخورد را مدل‌سازی کردند [۶]. پولیکارپو و کامادراماس^۴، نتیجه‌گیری کردند که محاسبه فاصله دو سازه از یکدیگر توسط رابطه ارائه شده در این پژوهش، برخورد دو سازه را در ۵۰٪ از زلزله‌های مورد بررسی کاهش می‌دهد [۷]. محققان جهت بررسی پدیده برخورد لرزه‌ای، یک قاب سه‌طبقه مجهز به جداساز آونگی اصطکاکی را به صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که نیروهای ناشی از برخورد می‌تواند منجر به تسلیم روسازه و افزایش شتاب طبقات شود [۸]. خوشنودیان و همتی، به بررسی پاسخ‌های مدل یک درجه آزادی با جداساز لغزشی دوقوسی تحت ضربه ساختمان مجاور در تراز زیرسازه

برخورد ساختمان‌های مجاور به یکدیگر از جمله خطرناکی است که حین وقوع زلزله ممکن است رخ دهد و همانند سایر خطرات ناشی از زلزله، گاهی می‌تواند در پاسخ سازه بسیار مؤثر و حتی فاجعه‌آمیز باشد. این پدیده بر اثر ارتعاش غیرهم‌فاز در ساختمان‌هایی که فاصله کافی از هم ندارند روی می‌دهد. ضربه سازه مجاور می‌تواند باعث تغییر رفتار اعضا از حوزه خطی به حوزه غیرخطی شده و در برخی موارد، سطوح عملکردی مورد انتظار سازه را تغییر دهد. خسارات ناشی از ضربه زدن ساختمان‌های مجاور به یکدیگر در هنگام زلزله که فاصله کافی از یکدیگر ندارند، مسئله‌ای است که در اکثر زلزله‌های بزرگ اتفاق افتاده است. این پدیده در مناطق شهری که به‌منظور استفاده بیشتر از زمین فاصله کافی مابین ساختمان‌ها رعایت نمی‌شود، نمود بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین پرداختن به این پدیده و راه‌های کاهش خسارت ناشی از آن حائز اهمیت خواهد بود. مطالعات گذشته اهمیت ضربه ساختمان مجاور بر ساختمان‌ها را روشن کرده است.

پیرامون برخورد لرزه‌ای در ساختمان‌های معمولی (غیرجداسازی شده)، مطالعات بسیار زیادی انجام پذیرفته و اطلاعات بسیاری به‌دست آمده که به‌صورت روابطی وارد استانداردها و آیین‌نامه‌های مختلف شده است. در مقایسه با تحقیقات زیادی که روی سازه‌های عادی و پل‌ها انجام شده مطالعات محدودتری پیرامون سازه‌های با سیستم جداساز لرزه‌ای انجام شده است. در ساختمان‌های جداسازی شده به علت افزایش جابه‌جایی ساختمان ناشی از عملکرد جداساز، احتمال برخورد با ساختمان‌های مجاور افزایش پیدا می‌کند. این برخوردها ممکن است به دیواره حائل یا ساختمان مجاور که در فاصله کمی از ساختمان جداسازی شده واقع است، اتفاق بیفتد. بدین ترتیب بررسی اثر ضربه ساختمان مجاور بر پاسخ‌های ساختمان جداسازی شده مورد توجه قرار می‌گیرد. برای مقابله با

¹- Tsai

²- Matsagar and Jangid

³- Multiple Degree-of-Freedom

⁴- Polycarpou and Komodromos

سه‌قوسی^۹ یکی از پرکاربردترین نوع جداسازهای لرزه‌ای به همراه جداساز الاستومری هسته سربی^{۱۰} هستند، لازم است رفتار لرزه‌ای آنها بر مبنای استاندارد مربوطه در ایران که نشریه ۳۶۰ است، مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور، معادلات حرکت ساختمان‌های جداسازی شده دو طبقه، در دو حالت همراه با ضربه ساختمان مجاور و بدون آن، برای تعدادی از جداسازهای آونگی اصطکاکی دوقوسی و سه‌قوسی به دست آورده شد. سپس مدل سه‌بعدی این ساختمان‌ها تحت هفت جفت شتابنگاشت مربوط به زلزله‌های نزدیک‌گسل و شدید گذشته، در نرم‌افزار متلب^{۱۱} مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفت و حداکثر پاسخ‌های لرزه‌ای هر یک از آنها محاسبه و ارزیابی شد.

۲- جداسازهای آونگی اصطکاکی دوقوسی و

سه‌قوسی

جداسازها دستگاه‌هایی هستند که با نصب در سازه‌ها از آسیب دیدن اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای آنها جلوگیری می‌کنند [۱۵-۱۷]. یک دسته مهم از جداسازهای لرزه‌ای انواع آونگی اصطکاکی آن است که ساختاری قوسی داشته و دارای صفحات و لغزنده‌های مختلفی است [۱۸]. در ادامه به معرفی دو نوع پرکاربرد این نوع جداسازها که در پژوهش حاضر مورد توجه قرار گرفته‌اند پرداخته می‌شود.

۲-۱- جداساز آونگی اصطکاکی دوقوسی

جداساز آونگی اصطکاکی دوقوسی شامل دو صفحه منحنی‌شکل ساخته شده از فولاد ضدزنگ است که در مقابل هم قرار می‌گیرند. این صفحات توسط یک غلتک جدا می‌شوند که در شکل ۱ نشان داده شده است. شعاع

پرداخته‌اند. ضربه ساختمان مجاور به صورت المان فتر خطی در فاصله مشخصی از ساختمان جداسازی شده مدل‌سازی گردید. ضربه در این مدل باعث افزایش برش پایه و کاهش جابه‌جایی روسازه شده است [۹]. ماورونیکلا^۵ و همکاران، اثر برخورد ساختمان جداسازی شده به دیوار حائل حین زلزله را بررسی کردند. آنها از جداسازهای هسته سربی به عنوان سیستم جداسازی بهره جستند [۱۰]. قدرتی امیری و همکاران، به بررسی اثر ضربه ساختمان مجاور بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان جداسازی شده با جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی پرداختند. فاصله لرزه‌ای در این پژوهش اعدادی ثابت بر مبنای ویژگی جداسازهای مورد استفاده در نظر گرفته شد و مقدار افزایش پاسخ‌های لرزه‌ای سازه یک طبقه بررسی شد [۱۱]. شکوری و همکاران، ساختمان چندطبقه مجهز به جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی هنگام برخورد به دیوار حائل با فاصله ثابت را در اوپنسیس^۶ مدل‌سازی و ارزیابی نمودند. پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان چندطبقه پس از برخورد با دیوار حائل افزایش قابل توجهی را نشان دادند [۱۲]. پژوهشگران اثر برخورد لرزه‌ای ساختمان‌های نامنظم جداسازی شده را تحت زلزله‌های نزدیک‌گسل در دو حالت شتابنگاشت دارای پالس و بدون پالس بررسی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد فاصله درز انقطاع^۷ در نظر گرفته شده در آیین‌نامه استفاده شده مناسب نبوده و باعث ایجاد ضربه شدید شده است [۱۳].

ارزیابی فاصله لرزه‌ای دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) برای ساختمان‌های جداسازی شده مجهز به جداسازهای اصطکاکی قوسی در هیچ پژوهشی مورد توجه قرار نگرفته است [۱۴]. با توجه به اینکه در حال حاضر، جداسازهای دوقوسی^۸ و

⁵- Mavronicola

⁶- OpenSees

⁷- Seismic gap

⁸- Double friction pendulum bearing

⁹- Triple friction pendulum bearing

¹⁰- Lead rubber bearing

¹¹- MATLAB

دوقوسی لغزش هم‌زمان بر هر دو صفحه بالا و پایین را میسر می‌سازد. بنابراین، ظرفیت جابه‌جایی کل جداساز برابر d_1+d_2 خواهد بود، در حالی که ظرفیت جابه‌جایی جداسازهای آونگی اصطکاکی ساده با شرایط مشابه، برابر d_1 یا d_2 است. رفتار این جداساز با فرض اینکه ضریب اصطکاک در دو سطح یکسان نباشد، در سه رژیم مختلف قابل بررسی است. این رژیم‌ها به صورت زیر می‌باشند [۱۹]:

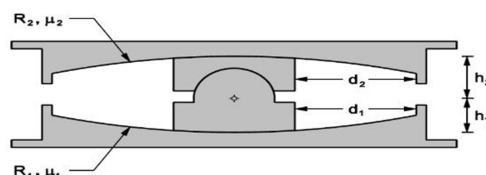
رژیم ۱: لغزش اولیه بر روی سطحی که اصطکاک کمتری دارد.

رژیم ۲: لغزش هم‌زمان بر هر دو سطح پس از آنکه نیروی اصطکاک از آستانه لغزش در سطح دیگر فراتر رود.

رژیم ۳: لغزش تنها در یکی از دو سطح در شرایطی که لغزش در سطح دیگر با تماس با محدودکننده جابه‌جایی متوقف شده است.

در مقاله حاضر، شش جداساز مختلف دوقوسی، با شعاع قوس، اصطکاک و ظرفیت جابه‌جایی متفاوت مورد استفاده قرار گرفته‌اند که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

انحنای صفحات پایین و بالا به ترتیب R_1 و R_2 هستند که می‌توانند نامساوی باشند. ظرفیت جابه‌جایی افقی صفحات پایین و بالا به ترتیب d_1 و d_2 است. ضریب اصطکاک لغزش برای این صفحات با μ_1 و μ_2 نشان داده می‌شود که لزوماً باهم برابر نیستند. شکل ۱، مکان نقطه‌ای را که غلتک حول آن دوران می‌کند را هم نشان می‌دهد، که به‌عنوان نقطه مفصلی شناخته می‌شود.



شکل ۱- مقطع جداساز آونگی اصطکاکی دوقوسی [۱۹]

پارامترهای h_1 و h_2 که در این شکل نشان داده شده، برابر فاصله شعاعی بین نقطه مفصلی و سطوح منحنی پایین و بالا می‌باشند و به‌عنوان ارتفاع غلتک شناخته می‌شوند. به این دلیل که نیروهای قائم و افقی که توسط جداساز منتقل می‌شود در نقطه مفصلی عمل می‌کنند، ارتفاع غلتک وارد معادلات تعادل می‌شود. به‌طوری که از شعاع انحنای مؤثر $R_{eff1}=R_1-h_1$ و $R_{eff2}=R_2-h_2$ در معادلات تعادل استفاده می‌شود. جداساز

جدول ۱- مشخصات جداسازهای دوقوسی

ضرایب اصطکاک سطوح		شعاع مؤثر سطوح (mm)		ظرفیت‌های جابه‌جایی (mm)			نام جداساز
μ_2	μ_1	R_{eff2}	R_{eff1}	d_{tot}	d_2	d_1	
۰/۰۸	۰/۰۶	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳۴۰	۱۷۰	۱۷۰	GC1 LF
۰/۱۳	۰/۰۷	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳۴۰	۱۷۰	۱۷۰	GC1 HF
۰/۰۸	۰/۰۶	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۲۰۰	GC2 LF
۰/۱۳	۰/۰۷	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۴۰۰	۲۰۰	۲۰۰	GC2 HF
۰/۰۸	۰/۰۶	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۴۶۰	۲۳۰	۲۳۰	GC3 LF
۰/۱۳	۰/۰۷	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۴۶۰	۲۳۰	۲۳۰	GC3 HF

جدا می‌شوند. پارامترهای نشان داده در این شکل، مشابه موارد معرفی شده برای جداساز دوقوسی است. روابط نیرو- جابه‌جایی جداسازهای آونگی اصطکاکی سه‌قوسی، همانند نوع دوقوسی آن، با تغییر نسبت ضرایب اصطکاک بین سطوح و ظرفیت جابه‌جایی آن‌ها، متفاوت خواهد بود.

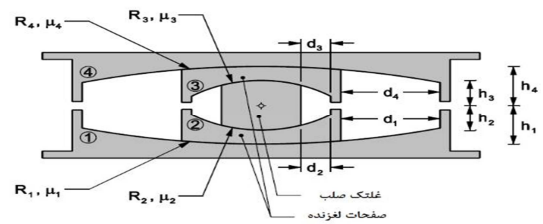
۲-۲- جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی

جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی نشان داده شده در شکل ۲، شامل دو صفحه منحنی شکل ساخته‌شده از فولاد ضدزنگ می‌باشد که در مقابل هم قرار می‌گیرند. این صفحات، توسط مجموعه‌ای از غلتک‌های تودرتو از هم

ضرایب اصطکاک سطوح باعث می‌شود که جداساز در ابتدای حرکت سختی زیاد از خود نشان دهد و زمانی که جابه‌جایی زیاد شود سختی جانبی جداساز کاهش می‌یابد. این جداساز دارای پنج رژیم حرکتی است که در مرجع [۱۹] به آنها اشاره شده است.

جداسازهای سه‌قوسی مورد استفاده در مطالعه حاضر، ۱۵ عدد که ترکیبی از پنج شعاع و ظرفیت جابه‌جایی و سه اصطکاک متفاوت می‌باشند. مشخصات این جداسازها در جدول ۲ ارائه گردیده است. لازم به ذکر است حروف اختصاری GC بیانگر اندازه شعاع جداساز است که با افزایش عدد مقابل آن، شعاع انحنای سطوح جداساز افزایش پیدا می‌کند. همچنین حروف اختصاری LF، MF و HF به ترتیب بیانگر ضریب اصطکاک کم، متوسط و زیاد برای هر یک از جداسازها می‌باشد.

به عبارت دیگر، روابط نیرو- جابه‌جایی برای جداسازهای سه‌قوسی به نوع پیکربندی جداساز وابستگی دارد.



شکل ۲- مقطع جداساز آونگی اصطکاکی سه‌قوسی [۱۹]

برای اینکه این جداساز تطبیق‌پذیرترین پیکربندی را داشته باشد باید پارامترهای آن روابطی مانند $R_{eff1}=R_{eff4} \gg R_{eff2}=R_{eff3}$ برای شعاع‌های مؤثر و $\mu_2=\mu_3 < \mu_1 < \mu_4$ داشته باشد. به‌عنوان مثال، مورد دو بدین معناست که ضرایب اصطکاک سطوح داخلی ۲ و ۳ برابر با هم و کوچک‌تر از ضریب اصطکاک سطح ۱، و ضریب اصطکاک این سطح نیز کوچک‌تر از ضریب سطح ۴ است. چنین انتخابی برای

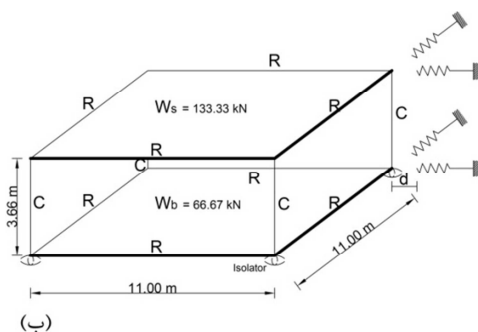
جدول ۲- مشخصات جداسازهای سه‌قوسی

ضرایب اصطکاک سطوح			شعاع مؤثر سطوح (mm)		ظرفیت‌های جابه‌جایی (mm)			نام جداساز
μ_4	$\mu_2=\mu_3$	μ_1	$R_{eff4}=R_{eff1}$	$R_{eff3}=R_{eff2}$	d_{tot}	$d_1=d_4$	$d_2=d_3$	
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۷۵۰	۱۵۰	۲۶۰	۱۰۰	۳۰	GC1 LF
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۷۵۰	۱۵۰	۲۶۰	۱۰۰	۳۰	GC1 MF
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۷۵۰	۱۵۰	۲۶۰	۱۰۰	۳۰	GC1 HF
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۱۵۰۰	۳۵۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC2 LF
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۱۵۰۰	۳۵۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC2 MF
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۱۵۰۰	۳۵۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC2 HF
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۲۰۸۵	۴۹۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC3 LF
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۲۰۸۵	۴۹۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC3 MF
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۲۰۸۵	۴۹۵	۴۹۰	۱۸۰	۶۵	GC3 HF
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۳۰۰۰	۷۰۰	۵۵۰	۱۹۰	۸۵	GC4 LF
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۳۰۰۰	۷۰۰	۵۵۰	۱۹۰	۸۵	GC4 MF
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۳۰۰۰	۷۰۰	۵۵۰	۱۹۰	۸۵	GC4 HF
۰/۱	۰/۰۲	۰/۰۴	۳۸۲۵	۹۰۰	۶۸۰	۲۳۰	۱۱۰	GC5 LF
۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶	۳۸۲۵	۹۰۰	۶۸۰	۲۳۰	۱۱۰	GC5 MF
۰/۱۴	۰/۰۲	۰/۰۷	۳۸۲۵	۹۰۰	۶۸۰	۲۳۰	۱۱۰	GC5 HF

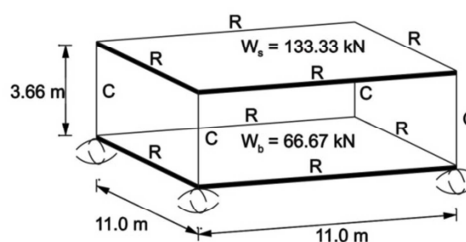
مدل مورد استفاده که در شکل ۳ نمایش داده شده، در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته و

۳- معرفی مدل سازه و ضربه

ستون‌ها است. خصوصیات هریک از ستون‌ها طوری در نظر گرفته شده که دوره تناوب اصلی سازه بدون در نظر گرفتن جداسازی برابر 0.2 ثانیه در هر دو جهت اصلی شود. مرکز جرم زیرسازه به‌طور دقیق زیر مرکز جرم روسازه واقع شده است و در نتیجه در سازه پیش‌پیش‌نداریم. میرایی روسازه برابر 0.25 درصد در نظر گرفته شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۳- مدل ساختمان جداسازی شده، (الف) بدون المان ضربه [۱۹] و (ب) با المان ضربه

در این مقاله از روش نیرو مینا و مدل فنر خطی استفاده شده است. ساختمان مجاور به‌وسیله یک عنصر برخوردکننده که با یک فنر خطی که در فاصله d از تراز زیرسازه و روسازه واقع شده است، مدل‌سازی می‌شود [۹]. برخورد زمانی اتفاق می‌افتد که مقدار جابه‌جایی مطلق زیرسازه و روسازه (u) در زمان اعمال بار جانبی زلزله از فاصله بین ساختمان جداسازی شده و ساختمان مجاورش (d) تجاوز کند. مقادیر d بر مبنای نشریه ۳۶۰ برای تمام جداسازها در بخش ۵-۲ ارائه شده است. مقدار نیروی ناشی از برخورد به کمک روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌گردد:

$$F_{rbx} = K_{rb} (|u_{bx}| - d) \text{sign}(u_{bx}) H(|u_{bx}| - d) \quad (1)$$

$$F_{rsx} = K_{rs} (|u_{sx}| - d) \text{sign}(u_{sx}) H(|u_{sx}| - d) \quad (2)$$

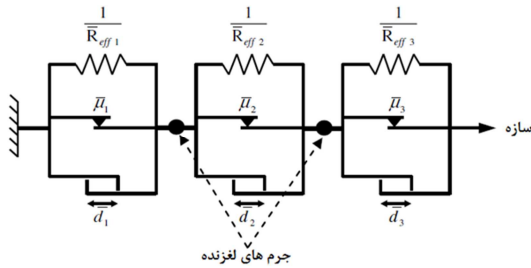
در روابط فوق، k_{rb} و k_{rs} سختی سازه مجاور به ترتیب در تراز روسازه و تراز پایه، u_{bx} و u_{sx} جابه‌جایی مطلق در دو تراز و d فاصله المان ضربه برای ساختمان مجاور است. همچنین $H(*)$ بیانگر تابع هویساید است. روابط فوق برای مدل در جهت y هم به همین صورت است. لازم

مشخصات و جزئیات آن معرفی شده است [۱۱، ۱۲] و [۱۹]. همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود، این مدل شامل یک روسازه و زیرسازه صلب است که تحت زلزله با دو مؤلفه افقی قرار گرفته است. مجموع وزن سازه برابر ۲۰۰ کیلونیوتن است که دو- سوم آن در روسازه و یک- سوم در زیرسازه متمرکز شده و از وزن سایر اعضا صرف‌نظر شده است. سختی جانبی سازه تنها ناشی از

به‌طور کلی دو روش نیرو مینا و مکانیکی برای مدل‌سازی ضربه وجود دارد. در روش مکانیکی، فرض می‌شود ضربه به صورت ناگهانی و لحظه‌ای اتفاق می‌افتد و از قانون تکانه پیروی می‌کند. این روش در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفت [۲۰-۲۲]. در روش نیرو مینا برای مدل‌سازی ضربه از یک فنر با سختی مشخص استفاده می‌شود. در این روش وقتی ضربه بین سازه‌ها اتفاق می‌افتد فنر فعال می‌شود. مدل‌های مختلفی برای این روش ارائه شده‌اند که اولین آن مدل فنر خطی است. در این مدل، رفتار پلاستیک و اتلاف انرژی در زمان ضربه در نظر گرفته نمی‌شود. مدل دیگر، مدل ویسکوالاستیک خطی است که برای در نظر گرفتن اتلاف انرژی یک میراکننده به موازات فنر به کار برده می‌شود [۲۳ و ۲۴]. این مدل توسط تحقیقات زیادی اصلاح شد [۲۵ و ۲۶]. مدل غیرخطی هرگز از دیگر مدل‌ها است که در مطالعات پیشین مورد استفاده قرار گرفت. موتوکومار و دی راجرز^{۱۲} مدل غیرخطی Hertzdamp را معرفی نمودند [۲۷].

¹²- Muthukumar and DesRoches

خطی با سختی $1/R_e$ ، یک المان اصطکاکی معادل با ضریب اصطکاک μ و یک المان گپ برای شبیه‌سازی ظرفیت جابه‌جایی جداساز برای هر سطح قوسی است. خلاصه پارامترهای موردنیاز برای مدل‌سازی این سه جداساز تک‌قوسی در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۴- مجموعه سری برای شبیه‌سازی جداساز سه‌قوسی

جدول ۳- مشخصات المان‌های تک قوسی جهت شبیه‌سازی جداساز سه‌قوسی

شماره المان	پارامتر سرعت	ظرفیت جابه‌جایی	شعاع انحنا	ضریب اصطکاک
المان ۱	$\bar{a}_1 = \frac{(a_2 + a_3)}{4}$	$\bar{d}_1 = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4) + (\bar{d}_2 + \bar{d}_3)$	$\bar{R}_{eff1} = R_{eff2} + R_{eff3}$	$\bar{\mu}_1 = \mu_2 = \mu_3$
المان ۲	$\bar{a}_2 = \frac{R_{eff1}}{R_{eff1} - R_{eff2}} \times a_1$	$\bar{d}_2 = \frac{R_{eff1} - R_{eff2}}{R_{eff1}} \times d_1$	$\bar{R}_{eff2} = R_{eff1} - R_{eff2}$	$\bar{\mu}_2 = \mu_1$
المان ۳	$\bar{a}_3 = \frac{R_{eff4}}{R_{eff4} - R_{eff3}} \times a_4$	$\bar{d}_3 = \frac{R_{eff4} - R_{eff3}}{R_{eff4}} \times d_4$	$\bar{R}_{eff3} = R_{eff4} + R_{eff3}$	$\bar{\mu}_3 = \mu_4$

در رابطه فوق، Y جابه‌جایی تسلیم، A ، γ و β مقادیر بی‌بعدی هستند که شکل پاسخ هیستریزس را کنترل می‌کنند. مقادیر پیشنهادشده برای این پارامترها که در [۱۹] ارائه شده است به صورت زیر است:

$$Y = 0.25 \text{ mm}, A = 1, \beta = 0.9, \gamma = 1$$

ضرایب اصطکاک سطوح جداساز وابسته به سرعت در نظر گرفته شد و طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\bar{\mu}_i = \mu_{\max} - (\mu_{\max} - \mu_{\min}) e^{-a|u_i|} \quad (5)$$

در معادله فوق، μ_{\max} ضریب اصطکاک در سرعت زیاد، μ_{\min} ضریب اصطکاک در سرعت پایین، u سرعت نسبی المان نام از مجموعه جداسازهای سری و a پارامتر سرعت است که تغییرات بین ضریب اصطکاک حداکثر و حداقل را کنترل می‌کند.

رفتار دینامیکی مدل را می‌توان با استفاده از ۴ درجه آزادی توصیف کرد که عبارت‌اند از u_1 و u_2 ، u_b ، u_s

به ذکر است سختی‌های k_{rs} و k_{rb} به ترتیب برابر و ۱۰ برابر سختی روسازه ساختمان جداسازی شده در نظر گرفته شد.

۴- معادلات حرکت

۴-۱- معادلات مدل با جداساز سه‌قوسی

رفتار هیستریزس جداسازهای سه‌قوسی به کمک سه لینک جداساز تک‌قوسی شبیه‌سازی شد. همانطور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، این سه لینک جداساز تک قوسی به صورت سری با دو جرم کوچک نقطه‌ای m_1 و m_2 به هم متصل شده‌اند [۱۹]. هر لینک شامل یک فنر

نیروی ایجاد شده توسط هر یک از المان‌های فوق به رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$F_i = \frac{W}{R_{eff}} u_i + \bar{\mu}_i W Z_i + K_i (|u_i| - \bar{d}_i) \text{sign}(u_i) H(|u_i| - \bar{d}_i) \quad (3)$$

در این رابطه که برای هر دو راستای X و Y حل می‌شود، W وزن تحمل شده توسط هر جداساز، u_i برابر جابه‌جایی نسبی المان نام از مجموعه سری جداسازهای تک‌قوسی، K_i سختی قسمت محدودکننده جابه‌جایی جداساز (که باید عددی بزرگ در نظر گرفته شود) و Z یک متغیر بدون بعد است که برای دو راستا به کمک معادله دیفرانسیل مطابق با رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$Y \begin{Bmatrix} \dot{Z}_{ix} \\ \dot{Z}_{iy} \end{Bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} |Z_{ix}|^2 [\gamma \text{sign}(\dot{u}_{ix} Z_{ix}) + \beta] & Z_{ix} Z_{iy} [\gamma \text{sign}(\dot{u}_{iy} Z_{iy}) + \beta] \\ Z_{ix} Z_{iy} [\gamma \text{sign}(\dot{u}_{ix} Z_{ix}) + \beta] & |Z_{iy}|^2 [\gamma \text{sign}(\dot{u}_{iy} Z_{iy}) + \beta] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{ix} \\ u_{iy} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\{\dot{x}\} = [A]\{x\} + \{B\} \quad (7)$$

که بردار $\{x\}$ با رابطه (۸) تعریف می‌شود:

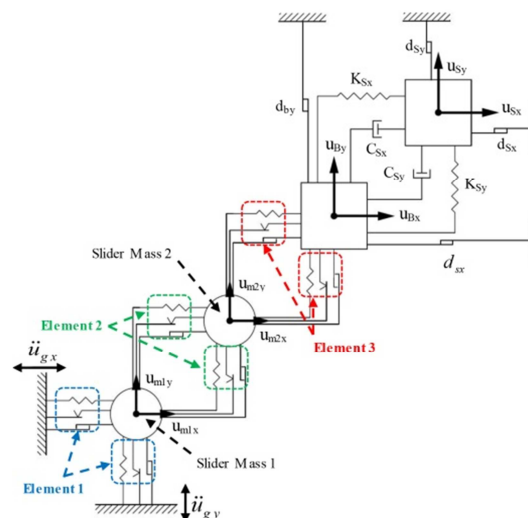
$$\{x\} = \begin{Bmatrix} u_{m1x} & u_{m1y} & u_{m2x} & u_{m2y} & u_{bx} & u_{by} \\ u_{sx} & u_{sy} & \dot{u}_{m1x} & \dot{u}_{m1y} & \dot{u}_{m2x} & \dot{u}_{m2y} & \dot{u}_{bx} & \dot{u}_{by} \\ \dot{u}_{sx} & \dot{u}_{sy} & Z_{1x} & Z_{1y} & Z_{2x} & Z_{2y} & Z_{3x} & Z_{3y} \end{Bmatrix}^T \quad (8)$$

با توجه به تعداد درایه‌های بردار $\{x\}$ تعداد ۲۲ معادله دیفرانسیل مرتبه اول معمولی به دست می‌آید. این ۲۲ معادله دیفرانسیل معمولی مرتبه اول، به‌طور هم‌زمان و با استفاده از تحلیلگر او.دی.ای. ۱۵ اس^{۱۳} در نرم‌افزار متلب، حل می‌شود. این تحلیلگر، الگوریتم چندمرحله‌ای است با مرتبه متغیر، که برای حل مجموعه معادلات دیفرانسیل سخت مناسب است. برای مشاهده پیاده‌سازی مدل مورد استفاده در این مطالعه به‌صورت کد در نرم‌افزار متلب (مدل با جداساز آونگی اصطکاکی دوقوسی و بدون در نظر گرفتن ضربه) به مرجع [۱۹] مراجعه شود. این کد را می‌توان برای جداساز سه‌قوسی نیز تعمیم داد که برای انجام این کار باید از مشخصات و روابط ارائه شده در جدول ۳ استفاده نمود. همچنین برای در نظر گرفتن اثر ضربه می‌توان از رابطه (۶) مقاله حاضر استفاده نمود. برای صحت‌سنجی معادلات و کد نوشته شده، مدل آزمایشگاهی [۱۹] در متلب مدل‌سازی و نتایج در شکل ۶ ارائه شد. با توجه به این شکل و اینکه حداکثر جابه‌جایی مربوط به کد نوشته شده برابر ۱۶۵/۰ میلی‌متر محاسبه شد، تطبیق مناسبی بین نتایج کد و آزمایش قابل‌مشاهده است.

۴-۲- معادلات برای مدل با جداساز دوقوسی

رفتار هیستریزس جداسازهای دوقوسی به وسیله دو لینک جداساز تک‌قوسی مطابق شکل ۷ شبیه‌سازی شد. این دو لینک جداساز تک‌قوسی به صورت سری با یک جرم کوچک نقطه‌ای m_1 به هم متصل شده‌اند.

که به ترتیب برابر جابه‌جایی روسازه، جابه‌جایی زیرسازه و جابه‌جایی جرم‌های لغزنده ۲ و ۱ می‌باشند [۱۱]. در شکل ۵ این درجات آزادی در قالب مدل ریاضی به‌کار برده شده نشان داده شده است.



شکل ۵- مدل ریاضی ساختمان با جداساز سه‌قوسی و ضربه

[۱۲]

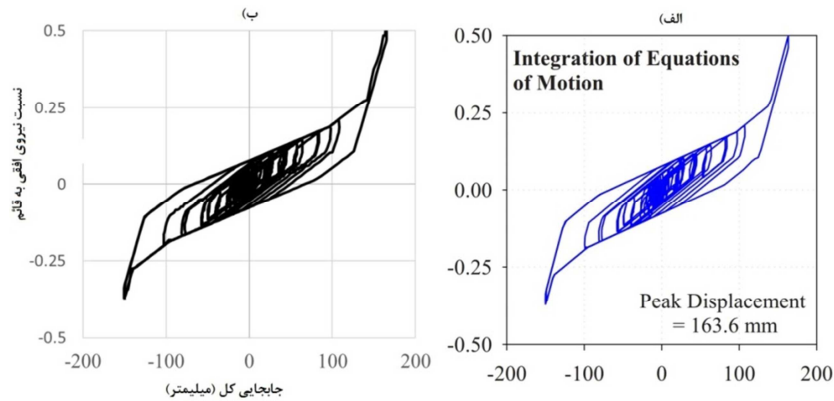
معادلات حرکت برای مدل که تحت اثر زلزله قرار گرفته، در جهت x ، به‌صورت رابطه (۶) است:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{sx} \\ \ddot{u}_{bx} \\ \ddot{u}_{lx} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{sx} & -C_{sx} & 0 \\ -C_{sx} & C_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{sx} \\ \dot{u}_{bx} \\ \dot{u}_{lx} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} K_{sx} & -K_{sx} & 0 \\ -K_{sx} & K_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{sx} \\ u_{bx} \\ u_{lx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \ddot{u}_{gx} - \begin{Bmatrix} F_{rsx} \\ F_{rbx} + F_{lx} \\ F_{2x} - F_{lx} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

در معادله فوق، m_1 و m_2 جرم‌های بسیار کوچک لغزنده، K_{sx} و C_{sx} سختی و ضریب میرایی روسازه، \ddot{u}_{gx} مؤلفه افقی شتاب‌نگاشت در جهت x ، نیرو در تاقین المان جداساز، F_{rsx} و F_{rbx} نیروهای وارده به ساختمان بر اثر ضربه ساختمان مجاور در ترازهای روسازه و زیرسازه در جهت x ، می‌باشند.

معادلات حرکت سیستم را با ترکیب دو جهت x و y می‌توان به‌صورت معادلات دیفرانسیل معمولی مرتبه اول مطابق با رابطه (۷) بازنویسی کرد:

¹³- Ode15s solver



شکل ۶- اعتبارسنجی کد متلب با نمودار نیرو- جابه‌جایی، (الف) نمونه آزمایشگاهی [۱۹] و (ب) کد متلب

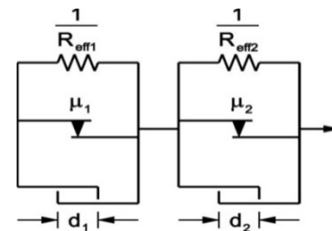
در پژوهش حاضر از هفت شتابنگاشت متفاوت از نظر منشأ، مکانیسم، شدت و مدت زمان استفاده شده است. اکثر این زمین‌لرزه‌ها پیش از این در [۹] برای بررسی ضربه ساختمان مجاور با ساختمان با جداساز لرزه‌ای دوقوسی استفاده شده است. دو شتابنگاشت مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ ایران، بم و طبس، جایگزین دو شتابنگاشت استفاده شده در مقاله مذکور شده است. ویژگی‌های اصلی این شتابنگاشت‌ها که از سایت اطلاعات پییر^{۱۴} گرفته شده‌اند، در جدول ۴ ارائه شده است.

۵-۲- فواصل لرزه‌ای

براساس نشریه ۳۶۰ عرض درز انقطاع در ساختمان جداسازی شده طبق بند ۱۰-۲-۷-۳-۲ نباید کمتر از کل تغییرمکان حداکثر (D_{TM}) باشد. در این پژوهش به دلیل اینکه در مدل‌سازی ما، سازه کاملاً متقارن است و برون‌محوری و پیچش ایجاد نمی‌شود. کافی است تغییرمکان حداکثر با رابطه (۱۰) محاسبه شده و طبق نشریه ۳۶۰ در عدد ثابت ۱/۱ ضرب شود:

$$D_M = \left[\frac{g}{4\pi^2} \right] \frac{S_{x1} T_M}{B_1} \quad (10)$$

که در آن S_{x1} مقدار شتاب طیفی در زمان تناوب یک ثانیه برای زلزله سطح خطر ۲، T_M دوره تناوب مؤثر در تغییرمکان حداکثر و B_1 پارامتری وابسته به درصد میرایی



شکل ۷- مجموعه سری برای شبیه‌سازی جداساز دوقوسی

[۱۹]

تفاوت مدل‌های دارای جداساز دوقوسی با مدل‌های دارای جداساز سه‌قوسی این است که رفتار دینامیکی در حالت استفاده از جداساز دوقوسی با سه درجه آزادی تعریف می‌شود که شامل u_s ، u_b و u_1 ، که به ترتیب برابر جابه‌جایی روسازه، جابه‌جایی زیرسازه و جابه‌جایی جرم لغزنده ۱ هستند؛ در نتیجه، پارامترهای مربوط به جرم ۲ حذف می‌گردد و معادلات حرکت در جهت x برای این مدل‌ها مطابق با رابطه (۹) می‌شود:

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{sx} \\ \ddot{u}_{bx} \\ \ddot{u}_{1x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{sx} & -C_{sx} & 0 \\ -C_{sx} & C_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{sx} \\ \dot{u}_{bx} \\ \dot{u}_{1x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{sx} & -K_{sx} & 0 \\ -K_{sx} & K_{sx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{sx} \\ u_{bx} \\ u_{1x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} m_s & 0 & 0 \\ 0 & m_b & 0 \\ 0 & 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \ddot{u}_{gx} - \begin{Bmatrix} F_{rsx} \\ F_{rbx} + F_{1x} \\ F_{2x} - F_{1x} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

۵- شتابنگاشت‌ها و فواصل لرزه‌ای

۵-۱- انتخاب شتابنگاشت‌ها

¹⁴- PEER ground motion database

مؤثر سیستم جداساز در تغییر مکان حداکثر است، که از جدول ۱۰-۱ نشریه به دست می‌آید. مقادیر D_M برای هریک از جداسازهای دوقوسی و سه‌قوسی محاسبه و ۱/۱ برابر آن به‌عنوان درز لرزه‌ای در نظر گرفته شد. همچنین پارامترهای مربوط به جداسازهای دوقوسی و سه‌قوسی به ترتیب در جدول ۵ و ۶ ارائه شده‌اند.

جدول ۴- شتابنگاشت‌های انتخاب شده

زلزله	ایستگاه	بزرگا (M_w)	سال وقوع	مؤلفه	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
Bam	Bam	۶/۶	۲۰۰۳	عمودی موازی	۰/۸۱۰ ۰/۶۳۰	۱۲۴/۱۲ ۶۰/۱۵	۳۳/۹۴ ۲۳/۱۵
Cape Mendocino	Petrolia	۷/۰	۱۹۹۲	عمودی موازی	۰/۵۹۰ ۰/۶۲۲	۸۱/۹۰ ۶۰/۴۰	۲۵/۵۰ ۲۶/۰۰
Erzincan	Erzincan	۶/۷	۱۹۹۲	عمودی موازی	۰/۵۱۵ ۰/۴۹۶	۱۰۷/۱۴ ۷۸/۱۶	۳۱/۹۹ ۲۸/۰۴
Kobe	Takarazuka	۶/۹	۱۹۹۵	عمودی موازی	۰/۶۹۳ ۰/۶۹۴	۸۶/۲۵ ۶۸/۴۰	۲۰/۸۴ ۲۶/۶۷
Northridge	Newhall	۶/۷	۱۹۹۴	عمودی موازی	۰/۵۸۳ ۰/۵۹۰	۱۲۰/۱۰ ۴۹/۹۰	۳۵/۱۰ ۱۶/۲۰
Northridge	Sylmar	۶/۷	۱۹۹۴	عمودی موازی	۰/۶۰۴ ۰/۸۴۳	۱۳۰/۳۰ ۹۳/۳۰	۵۴/۰۰ ۵۳/۳۰
Tabas	Tabas	۷/۴	۱۹۷۸	عمودی موازی	۰/۸۵۰ ۰/۸۶۰	۱۱۸/۳۰ ۷۹/۶۰	۹۶/۸۰ ۴۲/۱۰

جدول ۵- درز لرزه‌ای برای ساختمان با جداسازهای دوقوسی

نام جداساز	T	B	B_1	S	D_M
GC1LF	۲/۸۴	۱۳	۱/۳۵	۰/۳۳۹	۱۷۷/۳۳
GC1HF	۲/۶۸	۱۷	۱/۴۱	۰/۳۵۲	۱۶۶/۰۹
GC2LF	۳/۴۷	۱۷	۱/۴۱	۰/۳۰۱	۱۸۴/۳۶
GC2HF	۳/۱۹	۲۲	۱/۵۲	۰/۳۱۱	۱۶۶/۰۶
GC3LF	۴/۰۱	۲۱	۱/۵۰	۰/۲۷۹	۱۸۵/۰۴
GC3HF	۳/۸۸	۲۶	۱/۶۲	۰/۲۸۳	۱۶۸/۷۲

۶- ارائه و تحلیل نتایج

شد.

۶-۱- پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان با جداساز سه‌قوسی

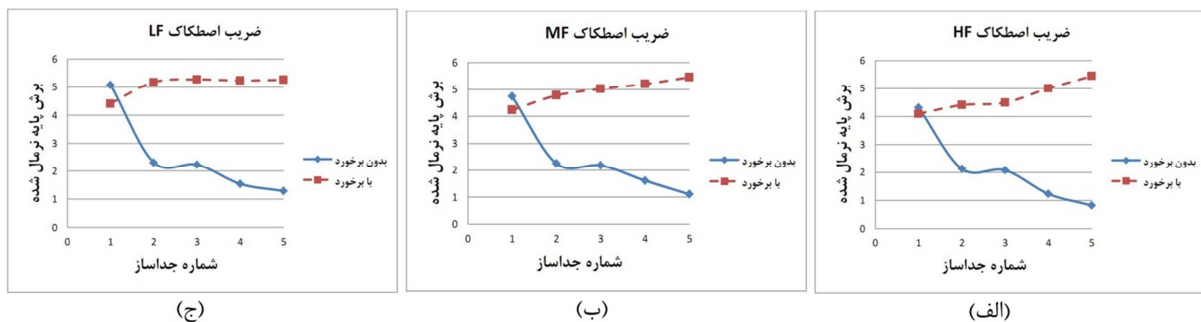
مقادیر میانگین حداکثر برش پایه نرمال شده برای مدل‌ها با ۱۵ جداساز مختلف و در دو حالت بدون ضربه و همراه با ضربه سازه مجاور محاسبه و در شکل ۸ به تصویر کشیده شد. با توجه به نتایج می‌توان ملاحظه نمود پدیده برخورد باعث افزایش مقدار برش پایه شده است. این افزایش در تمامی حالت‌های جداسازها به‌جز جداسازهای

ساختمان‌های مدل شده تحت ۷ جفت شتابنگاشت انتخاب‌شده مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفت و تعدادی از پاسخ‌های لرزه‌ای آنها شامل شتاب روسازه، برش پایه، تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای و بیشینه جابه‌جایی سیستم جداسازی ارزیابی شد. حداکثر مقدار هریک از پاسخ‌ها برای هر شتابنگاشت محاسبه و مقدار میانگین آن‌ها به دست آورده و در این بخش ارائه

GC1 وجود دارد که البته آن هم مقدار کمی است. علت تفاوت این جداساز از کل حالتها نیز ابعاد کوچک این جداساز و محدود شدن حرکت جانبی آن در محل جداسازی شده است.

جدول ۶- درز لرزه‌ای برای ساختمان با جداسازهای سه‌قوسی

نام جداساز	T	B	B _I	S	D _M
GC1LF	۱/۹۷	۱۵	۱/۳۵	۰/۴۳۱	۱۵۶/۳۱
GC1MF	۱/۹۱	۱۷	۱/۴۱	۰/۴۴۰	۱۴۸/۲۷
GC1HF	۱/۸۶	۱۶	۱/۴۷	۰/۴۴۹	۱۴۱/۱۱
GC2LF	۲/۷۶	۱۵	۱/۳۵	۰/۳۴۵	۱۷۵/۴۰
GC2MF	۲/۶۹	۱۷	۱/۴۱	۰/۳۵۱	۱۶۶/۳۲
GC2HF	۲/۶۲	۱۸	۱/۴۴	۰/۳۵۷	۱۶۱/۲۷
GC3LF	۳/۰۸	۱۸	۱/۴۴	۰/۳۲۳	۱۷۱/۶۹
GC3MF	۲/۹۹	۱۹	۱/۴۷	۰/۳۲۹	۱۶۶/۱۸
GC3HF	۲/۹۲	۲۰	۱/۵۰	۰/۳۳۴	۱۶۱/۳۴
GC4LF	۳/۴۸	۱۹	۱/۴۷	۰/۳۰۱	۱۷۷/۰۶
GC4MF	۳/۳۸	۲۱	۱/۵۲	۰/۳۰۶	۱۶۹/۰۹
GC4HF	۳/۲۹	۲۱	۱/۵۲	۰/۳۱۱	۱۶۷/۱۶
GC5LF	۳/۹۰	۲۰	۱/۵۰	۰/۲۸۳	۱۸۲/۶۵
GC5MF	۳/۷۸	۲۱	۱/۵۲	۰/۲۸۸	۱۷۷/۶۷
GC5HF	۳/۶۹	۲۱	۱/۵۲	۰/۲۹۱	۱۷۵/۲۴

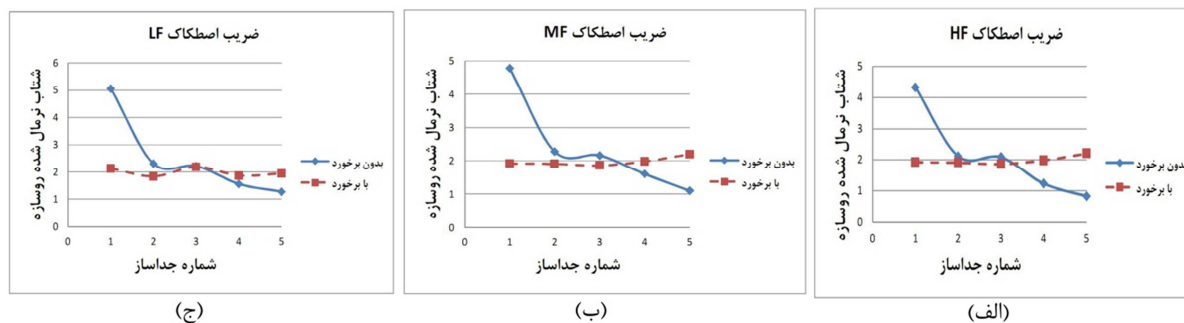


شکل ۸- میانگین حداکثر برش پایه ساختمان با جداساز سه‌قوسی با ضرایب اصطکاک، (الف) HF، (ب) MF و (ج) LF

افزایش ابعاد جداساز شتاب کاهش یافته است، اما در مقایسه حالت بدون برخورد و با برخورد می‌توان مشاهده نمود که در ابعاد کوچکتر جداساز مقدار شتاب در حالت بدون برخورد بیشتر از حالت با برخورد است؛ و در ابعاد بزرگتر جداساز این رابطه برعکس می‌شود. در جداساز GC1MF مقدار شتاب در حالت بدون برخورد نسبت به حالتی که برخورد اتفاق می‌افتد ۲/۵۶ برابر، و در جداساز GC5HF مقدار شتاب در حالتی که برخورد اتفاق می‌افتد نسبت به حالت بدون برخورد ۲/۶۸ برابر است.

در جداساز GC5HF مقدار برش پایه در حالت برخورد نسبت به حالتی که برخورد اتفاق نمی‌افتد مقدار قابل‌ملاحظه‌ای می‌باشد که ۶/۶۱ برابر است. در کل میانگین مقدار برش پایه در حالت برخورد نسبت به حالت عدم برخورد حدود ۳ برابر است که افزایش چشمگیر برش پایه در حالت برخورد را نشان می‌دهد.

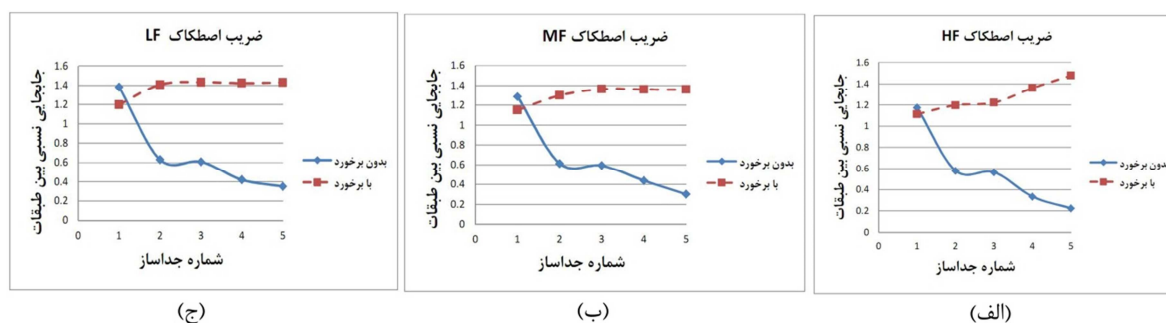
مقادیر میانگین حداکثر شتاب نرمال شده طبقه در شکل ۹ به تصویر کشیده شده است. با توجه به نمودارها مقدار شتاب طبقه در حالت بدون برخورد با سازه مجاور با



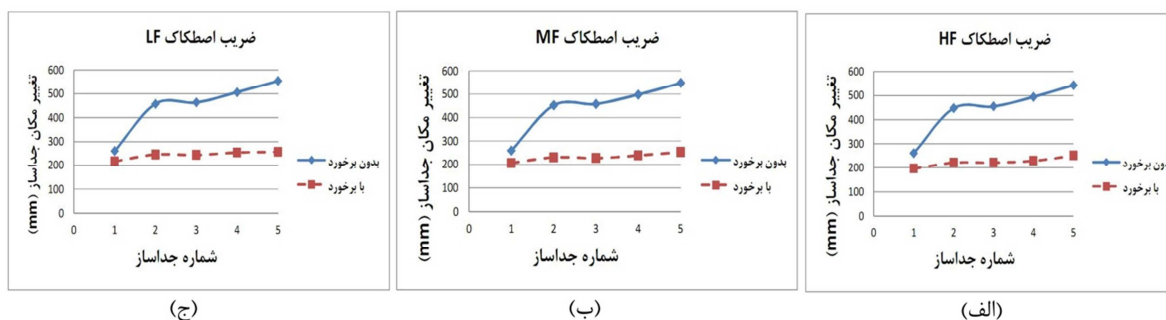
شکل ۹- میانگین حداکثر شتاب روسازه ساختمان با جداساز سه‌قوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF، (ب) MF و (ج) LF

قرار گرفته و پاسخ‌های میانگین هفت شتابنگاشت آن در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در نمودارها مشخص است المان برخورد باعث محدود نگه‌داشتن جابه‌جایی جداساز شده است و جداساز نمی‌تواند عملکرد مناسب خود را در کاهش پاسخ‌های ساختمان نشان دهد. در جداساز GC5HF مقدار جابه‌جایی بیشینه جداساز در حالت بدون برخورد نسبت به حالت برخورد $2/2$ برابر است. به‌طور کلی، میانگین نتایج جابه‌جایی بیشینه جداساز در حالت با برخورد تقریباً نصف میانگین نتایج حالت بدون برخورد حاصل شده است.

در شکل ۱۰، مقادیر میانگین حداکثر جابه‌جایی جانبی نسبی بین طبقه‌های (نسبت دریافت) به تصویر کشیده شده است. در حالت با برخورد نه‌تنها دریافت کاهش پیدا نکرده، بلکه در مواردی افزایش جزئی آن مشاهده شده است. با فرض یک جداساز ثابت برای ساختمان، مقدار دریافت در حالت با برخورد نسبت به بدون برخورد به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است؛ به‌عنوان مثال در جداساز GC5HF مقدار نسبت دریافت در حالت برخورد به حالت عدم برخورد $6/2$ برابر می‌باشد. حداکثر جابه‌جایی سیستم جداسازی به‌عنوان آخرین پاسخ مدل‌های با جداساز سه‌قوسی مورد ارزیابی



شکل ۱۰- میانگین حداکثر دریافت ساختمان با جداساز سه‌قوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF، (ب) MF و (ج) LF



شکل ۱۱- میانگین حداکثر جابه‌جایی سیستم جداساز سه‌قوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF، (ب) MF و (ج) LF

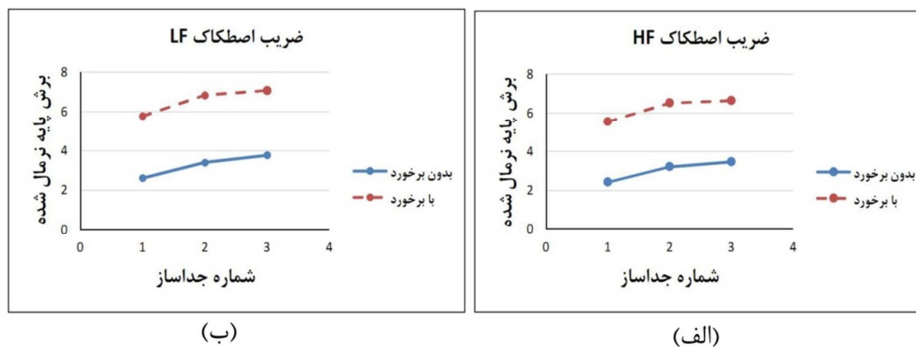
میانگین حداکثر برش پایه نرمال شده برای مدل‌ها

۲-۶- پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان با جداساز دوقوسی

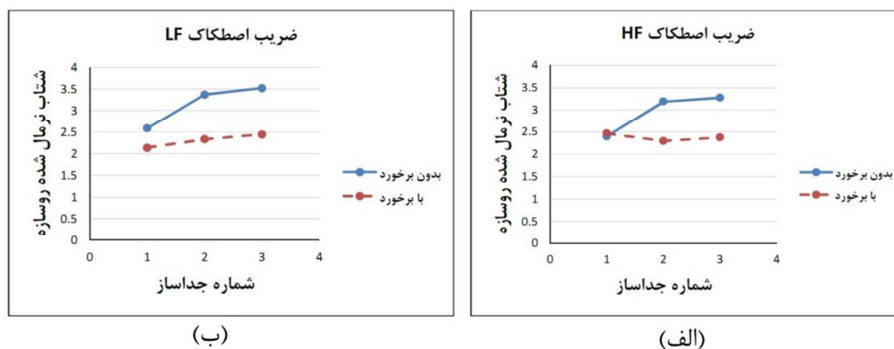
حالت بدون برخورد و همراه با برخورد می‌توان مشاهده نمود که در جداساز GC2HF مقدار شتاب نسبی در حالت بدون برخورد نسبت به حالتی که برخورد اتفاق می‌افتد حدود ۱/۵ برابر است و در حالت کلی، نتایج شتاب در حالت عدم برخورد نسبت به حالت برخورد ۳۲ درصد بیشتر است.

با ۶ جداساز، در دو حالت بدون برخورد و با برخورد به سازه مجاور محاسبه و در شکل ۱۲ ارائه شد. به‌طور کلی، میانگین مقدار برش پایه در حالت برخورد نسبت به حالت عدم برخورد حدود ۲ برابر است.

مقادیر میانگین حداکثر شتاب نرمال شده طبقه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در نمودارهای مربوط به شتاب مشخص است، با مقایسه



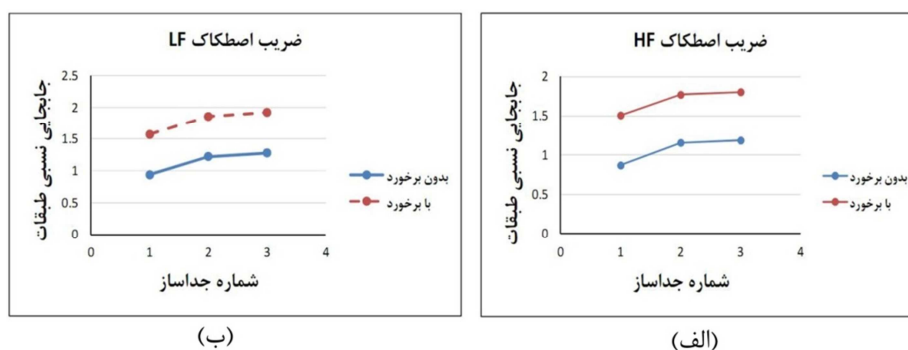
شکل ۱۲- میانگین حداکثر برش پایه ساختمان با جداساز دوقوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF و (ب) LF



شکل ۱۳- میانگین حداکثر شتاب روسازه ساختمان با جداساز دوقوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF و (ب) LF

جابه‌جایی نسبی بین طبقه‌ای در حالت برخورد نسبت به حالت عدم برخورد ۷۴ درصد بیشتر می‌باشد. مقدار افزایش میانگین کل جداسازها نیز ۵۷ درصد محاسبه شده است.

در شکل ۱۴، مقادیر میانگین حداکثر جابه‌جایی جانبی نسبی بین طبقه‌ای (دریفت) به تصویر کشیده شده است. پدیده برخورد باعث افزایش این جابه‌جایی نسبی شده است. به‌عنوان مثال در جداساز GC1HF مقدار



شکل ۱۴- میانگین حداکثر دریفت ساختمان با جداساز دوقوسی با ضرایب اصطکاک (الف) HF و (ب) LF

۷- نتیجه‌گیری

به جداسازهای دوقوسی و سه‌قوسی به ترتیب حدود ۲ و ۳ برابر نسبت به حالت بدون برخورد است.

۲- برخورد لرزه‌ای باعث ایجاد مقادیر بیشتر تغییرمکان بین طبقه‌ای در ساختمان‌های جداسازی شده نسبت به حالت بدون برخورد می‌شود. حداکثر افزایش این پاسخ در حالت همراه با برخورد نسبت به حالت بدون برخورد برابر ۷۴ درصد برای جداساز دوقوسی و ۶۰۰ درصد برای جداساز سه‌قوسی است.

۳- پدیده ضربه سازه مجاور در هنگام زلزله به ساختمان جداسازی شده باعث افزایش شتاب طبقات در جداسازهای با ابعاد بزرگ‌تر (دوره تناوب بیشتر) می‌شود. این افزایش تا حدود ۲ برابر برای جداسازهای سه‌قوسی مشاهده می‌شود.

۴- در حالت برخورد با سازه مجاور، سیستم جداسازی موفق به جابه‌جایی کامل در هنگام زلزله نشده و مقدار جابه‌جایی حداکثر آن محدود می‌شود. در نتیجه، عملکرد مناسب جداساز در ساختمان مشاهده نمی‌گردد. در حالت بدون برخورد میزان حداکثر جابه‌جایی جداساز سه‌قوسی تا ۲/۲ برابر حالت با برخورد می‌شود.

۵- براساس مطالعات فوق، فاصله درز انقطاع ارائه شده در نشریه ۳۶۰ برای ساختمان‌های جداسازی شده مناسب نیست و در زلزله‌های شدید باعث ایجاد برخورد به سازه مجاور شده و در عملکرد سیستم جداسازی اختلال ایجاد می‌کند.

در این مقاله، اثر ضربه ساختمان یا سازه مجاور بر عملکرد ساختمان‌های جداسازی شده با جداسازهای لرزه‌ای آونگی اصطکاکی دوقوسی و سه‌قوسی مورد بررسی قرار گرفت. برای رسیدن به این هدف، مدل سه‌بعدی ساختمان جداسازی شده در دو حالت بدون برخورد به سازه مجاور و همراه با برخورد ایجاد شد. جداسازهای سه‌قوسی با ۵ پیکربندی و ۳ ضریب اصطکاک متفاوت (در مجموع ۱۵ عدد) و جداسازهای دوقوسی با ۳ پیکربندی و ۲ ضریب اصطکاک مختلف مورد استفاده قرار گرفتند، تا گستره قابل‌توجهی از دوره تناوب‌ها را پوشش دهند. فاصله سازه مجاور بر مبنای نشریه ۳۶۰ محاسبه و در مدل‌ها در نظر گرفته شد. معادلات حرکت مدل‌های مذکور در نرم‌افزار متلب ایجاد شد و تحت هفت زوج شتابنگاشت زلزله مورد تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قرار گرفت. حداکثر برخی از پاسخ‌های لرزه‌ای ساختمان از جمله برش پایه، شتاب طبقه، تغییرمکان نسبی بین طبقه‌ای و جابه‌جایی سیستم جداسازی محاسبه و ارزیابی شد. براساس پاسخ‌های به‌دست آمده می‌توان نتایج اصلی زیر را بیان نمود:

۱- در ساختمان بدون برخورد، با افزایش دوره تناوب جداسازها مقدار برش پایه کاهش پیدا می‌نماید، اما در حالت بدون برخورد با افزایش دوره تناوب جداسازها، برش پایه حتی همراه با افزایش جزئی نیز است. همچنین با یک جداساز ثابت، افزایش قابل‌توجه در مقدار برش پایه در حالت برخورد نسبت به حالت بدون برخورد مشاهده می‌شود. مقدار میانگین این افزایش برای ساختمان مجهز

References

- [1] Raheem, S. E. A. (2014). Mitigation measures for earthquake induced pounding effects on seismic performance of adjacent buildings. *Bullin of Earthquake Engineering*, 12(4), 1705-1724. doi: 10.1007/s10518-014-9592-2
- [2] Elwardany, H., Seleemah, A., & Jankowski, R. (2017). Seismic pounding behavior of multi-story buildings in series considering the effect of infill panels. *Engineering Structures*, 144, 139-150. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.01.078

- [3] Stanikzai, M. H., Elias, S., Matsagar, V. A., & Jain, A. K. (2019). Seismic response control of base-isolated buildings using multiple tuned mass dampers. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 28(3), e1576. doi: 10.1002/tal.1576
- [4] Tsai, H. C. (1997). Dynamic analysis of base-isolated shear beams bumping against stops. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 26(5), 515-528. doi: 10.1002/(SICI)1096-9845(199705)26:5<3C515::AID-EQE654%3E3.0.CO;2-C
- [5] Matsagar, V. A., & Jangid, R. S. (2003). Seismic response of base-isolated structures during impact with adjacent structures. *Engineering Structures*, 25(10), 1311-1323. doi: 10.1016/S0141-0296(03)00081-6
- [6] Komodromos, P., Polycarpou, P. C., Papaloizou, L., & Phocas, M. C. (2007). Response of seismically isolated buildings considering poundings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 36(12), 1605-1622. doi: 10.1002/eqe.692
- [7] Polycarpou, P. C., & Komodromos, P. (2010). Earthquake-induced poundings of a seismically isolated building with adjacent structures. *Engineering Structures*, 32(7), 1937-1951. doi: 10.1016/j.engstruct.2010.03.011
- [8] Masroor, A., & Mosqueda, G. (2012). Experimental simulation of base-isolated buildings pounding against moat wall and effects on superstructure response. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 41(14), 2093-2109. doi: 10.1002/eqe.2177
- [9] Khoshnoudian, F., & Hemmati T, A. (2014), Impact of structures with double concave friction pendulum bearings on adjacent structures, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 167(1), 41-53. doi: 10.1680/stbu.12.00001
- [10] Mavronicola, E. A., Polycarpou, P. C., & Komodromos, P. (2017). Spatial seismic modeling of base-isolated buildings pounding against moat walls: effects of ground motion directionality and mass eccentricity. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 46(7), 1161-1179. doi: 10.1002/eqe.2850
- [11] Amiri, G. G., Shakouri, A., Veismoradi, S., & Namiranian, P. (2017). Effect of seismic pounding on buildings isolated by triple friction pendulum bearing. *Earthquakes and Structures*, 12(1), 35-45. doi: 10.12989/eas.2017.12.1.035
- [12] Shakouri, A., Amiri, G. G., Miri, Z. S., & Lak, H. R. (2021). Seismic poundings of multi-story buildings isolated by TFPB against moat walls. *Earthquakes and Structures*, 20(3), 295-307. doi: 10.12989/eas.2021.20.3.295
- [13] Mazza, F., & Labernarda, R. (2022). Effects of near-fault acceleration and non-acceleration pulses on pounding between in-plan irregular fixed-base and base-isolated buildings. *Structural Control and Health Monitoring*, 29(9), e2992. doi: 10.1002/stc.2992
- [14] Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. (2014). Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (Code No. 360). Tehran, Iran. [In Persian]
- [15] Shakouri, A., Amiri, G. G., & Salehi, M. (2021). Effects of ductility and connection design on seismic responses of base-isolated steel moment-resisting frames. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 143, 106647. doi: 10.1016/j.soildyn.2021.106647
- [16] Hosseini, P., Hosseini, M., & Omranizadeh, S. M. (2019). The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators. *Civil Infrastructure Researches*, 5(1), 35-49. doi: 10.22091/cer.2019.4899.1180 [In Persian]
- [17] Jalali, Y., Amiri, G. G., & Shakouri, A. (2021). Comparative response assessment of base-isolated braced-frame buildings considering effects of ductility design. *Journal of Building Engineering*, 43, 103110. doi: 10.1016/j.jobe.2021.103110
- [18] Hamidia, M., Toozandejani, F., & Mahdavian, A. (2022). Evaluation of ASCE7 simplified procedure for estimating maximum seismic displacement of structures with friction pendulum isolators under near-field earthquakes. *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), 145-156. doi: 10.22091/cer.2021.7377.1300 [In Persian]
- [19] Fenz, D. M. (2008). Development, implementation and verification of dynamic analysis models for multi-spherical sliding bearings. *PhD Thesis*, University of buffalo.
- [20] Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Plevris, N., & Bitzarakis, S. (1991). A Lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 20(11), 981-998. doi: 10.1002/eqe.4290201102
- [21] Malhotra, P. K. (1998). Dynamics of seismic pounding at expansion joints of concrete bridges. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(7), 794-802. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:7(794)
- [22] DesRoches, R., & Muthukumar, S. (2002). Effect of pounding and restrainers on seismic response of multiple-frame bridges. *Journal of Structural Engineering*, 128(7), 860-869. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:7(860)
- [23] Anagnostopoulos, S. A. (1988). Pounding of buildings in series during earthquakes. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(3), 443-456. doi: 10.1002/eqe.4290160311

- [24] Anagnostopoulos, S. A. (2004). Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 33(8), 897-902. doi: 10.1002/eqe.377
- [25] Pant, D. R., Wijeyewickrema, A. C., & Ohmachi, T. (2010). Seismic pounding between reinforced concrete buildings: A study using two recently proposed contact element models. *Proceedings of the 14ECEE*, Ohrid, Macedonia.
- [26] Mahmoud, S., & Jankowski, R. (2011). Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering*, 35(1), 51-62. doi: 10.22099/IJSTC.2012.656
- [27] Muthukumar, S., & DesRoches, R. (2006). A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(7), 811-828. doi: 10.1002/eqe.557