

Probabilistic Evaluation of Collapse Risk for a Base-Isolated Structure

Ali Akbar Shaikhzadeh¹, Abbas Karamodin^{2*}

1- PhD Candidate, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran
2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

ABSTRACT

This study investigates the probabilistic collapse behavior of a benchmark base-isolated structure, focusing specifically on the failure mechanisms of its isolation system. Numerical simulations were performed using the OpenSEES software, incorporating both traditional Friction Pendulum Systems (FPS) and advanced Triple Friction Pendulum Isolators (TFPI) to evaluate their performance under the influence of far-field and near-fault ground motions. The assessment of displacement capacity and system reliability adheres to FEMA P695 guidelines. Furthermore, Incremental Dynamic Analysis (IDA) and FEMA P695 procedures were employed to analyse the collapse probability of isolators and to evaluate the adequacy of current seismic design practices outlined in ASCE 7-22. The findings highlight that isolators designed based on ASCE 7-22 provisions often fail to meet the reliability requirements, particularly under critical conditions. The study emphasizes the necessity for significantly increased displacement capacities of isolators to achieve reliability objectives across various risk categories. This need becomes even more pronounced in near-fault ground motions characterized by pulse-like shaking, which impose unique demands on isolator design. In addition, the results reveal the critical role of torsional effects in increasing the collapse probability of isolation systems. Neglecting these effects, even at minimum levels specified by the code, leads to underestimations of collapse risks and compromises structural safety. The findings of this research underscore the urgency of revisiting current seismic design methodologies for base-isolated structures. Improvements should include enhancing isolator capacities, adopting advanced analytical methods, and accurately accounting for the effects of near-fault motions and torsional behavior to achieve the desired levels of safety and reliability.

ARTICLE INFO

Receive Date: 18 January 2025

Revise Date: 12 March 2025

Accept Date: 06 April 2025

Keywords:
probabilistic collapse
benchmark building
fragility curve
sliding isolator
FEMA P695

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.498699.3624

*Corresponding author: Abbas Karamodin
Email address: a-karam@um.ac.ir

ارزیابی احتمالاتی خطر فروریزش در یک سازه جداسازی شده لرزه‌ای

علی اکبر شیخ زاده^۱، عباس کرم الدین^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

این پژوهش به بررسی فروریزش احتمالاتی سازه‌ی مبنا با جداگر لرزه‌ای و کفایت ضوابط طراحی موجود در آیین‌نامه *ASCE 7-22* با تمرکز بر شکست سیستم جداساز می‌پردازد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار *OpenSEES* انجام شده و در آن از جداگر اصطکاکی پاندولی (*FPS*) و جداگر اصطکاکی پاندولی سه‌سطحی (*TFPI*) استفاده گردیده است. قابلیت اطمینان ظرفیت جابجایی سیستم جداگر تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک و میدان‌دور، بر اساس ضوابط *FEMA P695*، ارزیابی شده است. همچنین، از روش تحلیل دینامیکی افزایشی (*IDA*) و فرآیندهای *FEMA P695* برای تحلیل فروریزش احتمالاتی جداگرها و ارزیابی کفایت ضوابط موجود در آیین‌نامه *ASCE 7-22* بهره گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی‌های مبتنی بر ضوابط *ASCE 7-22* اغلب نمی‌توانند الزامات قابلیت‌اطمینان را برآورده کنند. بررسی‌ها تأکید دارند که برای دستیابی به اهداف قابلیت‌اطمینان در گروه‌های خطر مختلف، ظرفیت جابجایی جداگر باید به‌طور قابل توجهی فراتر از مقادیر محاسبه‌شده طبق آیین‌نامه افزایش یابد. این موضوع به‌ویژه در مورد شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک که دارای رفتار ضربه‌مانند و لرزش‌های پالس‌گونه هستند اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. علاوه بر این، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که اثرات پیچشی به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در افزایش احتمال فروریزش سیستم جداگر عمل می‌کنند. نادیده گرفتن این اثرات می‌تواند به تخمین‌های نادرست و کاهش ایمنی سازه منجر شود. یافته‌های این تحقیق بر ضرورت بازنگری در شیوه‌های طراحی لرزه‌ای کنونی تأکید کرده و نشان می‌دهد که طراحی‌های فعلی برای دستیابی به ایمنی و قابلیت اطمینان مطلوب نیازمند اصلاحات جدی هستند. این اصلاحات می‌توانند شامل افزایش ظرفیت‌های جداگر، استفاده از روش‌های پیشرفته تحلیل و در نظر گرفتن دقیق اثرات میدان‌نزدیک و پیچش باشند.

کلمات کلیدی: فروریزش احتمالاتی، سازه‌ی مبنا، منحنی شکنندگی، جداگر اصطکاکی، *FEMA P695*

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.498699.3624	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.498699.3624	۱۴۰۴/۱۰/۳۰	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۴/۰۱/۱۷	۱۴۰۳/۱۲/۲۲	۱۴۰۳/۱۰/۲۹
عباس کرم الدین a-karam@um.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

تضمین قابلیت اطمینان^۱ و ایمنی سازه‌های حیاتی در برابر زمین لرزه‌های شدید، یکی از اهداف اساسی در طراحی سازه‌های لرزه‌ای است. این فرآیند شامل طراحی سازه‌هایی است که قادر به تحمل نیروهای شدید ناشی از چنین زلزله‌هایی بدون ایجاد آسیب‌های عمده یا فروریزش^۲ باشند. قابلیت اطمینان به‌طور کمی به عنوان احتمال عملکرد صحیح یک ساختمان در شدیدترین شرایط لرزه‌ای پیش‌بینی شده تعریف شده که معمولاً از طریق حداکثر زلزله محتمل^۳ MCE_R ارزیابی می‌گردد. با رعایت آیین‌نامه‌های دقیق طراحی، مانند آنچه در [۱] ASCE ۷-۲۲ آمده است، مهندسان تلاش دارند تا احتمال خرابی را به حداقل رسانده و اطمینان حاصل کنند که حتی در زلزله‌های شدید، سازه‌ها یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کرده و برعلاوه‌ی تأمین ایمنی ساکنان تأثیرات مالی را نیز کاهش دهند. همچنین استفاده از سیستم‌های پیشرفته، بهره‌گیری از تکنیک‌های نوآورانه در ساخت و ساز، و انجام آزمایش‌های دقیق، قابلیت اطمینان سازه‌ها را افزایش داده و آنها را در برابر نیروهای شدید لرزه‌ای مقاوم‌تر می‌سازد.

جداسازی لرزه‌ای^۴ روش بسیار مؤثری برای افزایش مقاومت سازه‌ها در برابر زلزله است. جداسازی لرزه‌ای با استفاده از جداگرهایی مانند جداگر اصطکاکی^۵ در بین فونداسیون و سازه فوقانی^۶ آن، انتقال نیروهای حرکتی زمین به سازه را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. این اثر به سازه امکان می‌دهد به جای تحمل نیروی کامل زلزله، به آرامی با موج‌های لرزه‌ای نوسان پیدا کند. در نتیجه، جداسازی لرزه‌ای، آسیب سازه را به حداقل می‌رساند، از بخش‌های غیرسازه‌ای محافظت می‌کند و امنیت ساکنین را در حین زلزله تضمین می‌نماید. چندین بررسی تجربی، میدانی و تحلیلی، تأثیر سیستم‌های جداساز لرزه‌ای در کاهش آسیب سازه‌ای و غیرسازه‌ای که توسط شتاب‌نگاشت‌های^۷ مختلف ایجاد شده‌اند را نشان داده‌اند (به [۱۱-۲] مراجعه کنید). علاوه‌براین، سازه‌هایی که به جداساز لرزه‌ای مجهز شده‌اند، بعد از زمین لرزه، همچنان قابل استفاده بوده و باعث کاهش ضرر اقتصادی می‌شوند. این فناوری برای زیرساخت‌های حیاتی مانند بیمارستان‌ها، مراکز واکنش اضطراری و ساختمان‌های تاریخی که حفظ عملکرد و یکپارچگی ساختاری آنها اهمیت بالایی دارد سودمند است.

یک دغدغه‌ی مهم در طراحی عملی سازه‌های جداسازی شده‌ی لرزه‌ای تضمین موضوع دستیابی به قابلیت اطمینان مدنظر با احتمال فروریزش^۸ قابل قبول است. این خرابی می‌تواند از خرابی کلی سازه‌ی فوقانی یا خرابی سیستم جداساز نشأت بگیرد. بنابراین، نقش بسیار مهم جداگرها در حفظ عملکرد و ایمنی کلی سازه‌های حیاتی بر لزوم ارزیابی کامل و دقیق قابلیت اطمینان سیستم جداساز تأکید می‌کند. در حال حاضر ضوابط موجود در آیین‌نامه [۱] ASCE ۷-۲۲ چنین بیان می‌کند که درصد احتمال فروریزش سازه، زمانیکه در معرض زلزله MCE_R قرار می‌گیرد برای گروه‌های خطر^۹ I و II باید کمتر از ۱۰٪، برای گروه خطر III، ۵٪ و برای گروه خطر IV ۲/۵٪ باشد. این احتمالات به عنوان اهداف قابلیت اطمینان شناخته می‌شوند.

براساس فرآیند طراحی مقدماتی که در فصل ۱۷ آیین‌نامه [۱] ASCE ۷-۲۲ بیان شده است، حداکثر جابجایی افقی قابل تحمل یک جداگر به عنوان تقاضای حداکثر جابجایی جداگر (DTM) تعریف می‌شود. این مقدار براساس جابجایی میانگین حاصل شده از تحلیل تاریخچه پاسخ (RHA^{۱۰}) مجموعه‌ای از هفت شتاب‌نگاشت MCE_R بدون در نظر گرفتن مستقیم احتمال فروریزش محاسبه می‌شود. به همین دلیل، بسیاری از شتاب‌نگاشت‌ها باعث می‌شوند که جداگرها از محدودیت اهداف قابلیت اطمینان یا همان درصد احتمال فروریزش تعیین شده در آیین‌نامه فراتر روند [۱۲، ۱۳].

¹ Reliability

² Collapse

³ Risk-targeted maximum considered earthquake

⁴ Seismic isolation

⁵ Friction isolator

⁶ Upper structure

⁷ Ground motion

⁸ Probability of collapse

⁹ Risk category

¹⁰ Response history analysis

بنابراین، ظرفیت جابجایی جداگرها باید بیشتر از میزان محاسبه شده توسط ضوابط آیین‌نامه ۷-۲۲ ASCE (میانگین تقاضای MCE_R) باشد تا تغییرپذیری و عدم قطعیت‌های موجود در تقاضاهای بارگذاری در چنین شرایطی را در نظر بگیرند. اگرچه فرآیند طراحی کنونی ممکن است ایمنی سازه فوقانی را تضمین کند، اما کفایت لازم برای تأمین ایمنی سیستم جداساز لرزه‌ای را نداشته و این امر می‌تواند ایمنی کلی سازه جداسازی شده لرزه‌ای را نیز به خطر بیندازد.

مطالعات متعددی به بررسی این مسائل پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، شائو [۱۴] قاب‌های دوبعدی ساختمان را با دو نوع مختلف شامل قاب مهاربندی همگرا معمولی (OCBF) و قاب خمشی ویژه (SMRF) با استفاده از نرم‌افزار OpenSees شبیه‌سازی کرد. این مطالعه با استفاده از ۴۴ شتاب‌نگاشت میدان‌دور^۱ مقیاس‌شده از [۱۵] FEMA-P۶۹۵ تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام داده است. نتایج نشان دادند که احتمال فروریزش در حدود ۴۰ تا ۴۵ درصد بوده که به‌طور قابل توجهی از حدود تعیین شده در آیین‌نامه‌ها فراتر می‌رود.

در مطالعه‌ای دیگر که توسط شوما کیتایاما و مایکل سی. کنستانتینو [۱۳] انجام شد، سه ساختمان شش طبقه فولادی مورد بررسی قرار گرفت که قاب‌های محیطی آنها به‌صورت قاب‌های مهاربندی همگرا ویژه، قاب‌های خمشی ویژه و قاب‌های مهاربندی همگرا معمولی طراحی شده بودند. این تحقیق احتمال فروریزش این سازه‌ها را با استفاده از سه نوع جداگر اصطکاکی سه‌سطحی^۲ (TFPI) و دو نوع جداگر اصطکاکی دوسطحی مورد ارزیابی قرار داد. تحلیل دینامیکی غیرخطی این سازه‌ها با استفاده از ۴۴ شتاب‌نگاشت میدان‌دور استفاده شده در [۱۵] FEMA-P۶۹۵ انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای که براساس حداقل معیارهای [۱۶] ASCE ۷-۱۶ طراحی شده‌اند، احتمال فروریزش بالایی دارند. علاوه‌براین، تحقیقات نشان دادند که افزایش مقاومت سازه فوقانی با کاهش ضریب تغییر شکل R_1 به‌تنهایی عملکرد فروریزش را بهبود نمی‌بخشد، مگر اینکه افزایش متناسبی در ظرفیت جابجایی جداگرها ایجاد شود.

یو بائو [۱۷] از یک مدل عددی که رفتار ضربه و بلندشدگی^۳ جداگرهای اصطکاکی را شبیه‌سازی می‌کرد، برای ارزیابی احتمال فروریزش قاب‌های خمشی و قاب‌های مهاربندی همگرا مجهز به جداگرهای اصطکاکی پاندولی تحت شرایط بارگذاری شدید استفاده کرد. این مطالعه تأثیر قابل توجه سختی سازه فوقانی بر ریسک کلی فروریزش این سازه‌ها را نشان داد. یافته‌ها نشان دادند که افزایش مقاومت قاب‌های خمشی حاشیه ایمنی در برابر خرابی جداگرها را بهبود می‌بخشد. در مقابل، برای قاب‌های مهاربندی همگرا که با سختی بالاتری شناخته می‌شوند، این رویکرد نیازمندی‌های شکل‌پذیری قابل توجهی را بر سازه فوقانی تحمیل می‌کند و منجر به احتمال فروریزش غیر قابل قبولی در مقایسه با قاب‌های خمشی می‌شود.

در مطالعه دیگری عملکرد فروریزش یک ساختمان بتن‌آرمه با سیستم جداساز لرزه‌ای که براساس حداقل الزامات آیین‌نامه [۱۶] ASCE ۷-۱۶ طراحی شده است، با استفاده از منحنی‌های شکنندگی^۴ تولید شده مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۸]. برخی از نتایج کلیدی این پژوهش عبارتند از: (۱) احتمال فروریزش در سطح MCE_R برابر با ۲۸/۸٪ بود، (۲) کاهش مقدار D_{TM} باعث افزایش احتمال فروریزش به ۱۹/۱٪ شد، و (۳) افزایش D_{TM} به میزان ۱/۲۵ برابر، احتمال فروریزش را به ۶/۳۶٪ کاهش داد که به این ترتیب الزامات ایمنی برای دسته‌های خطر I و II برآورده شد.

در مطالعه‌ای که توسط مسرور و موسکدا [۱۹] انجام شد و در آن از مدل‌هایی مشابه تحقیقات پیشین [۲۰، ۲۱] استفاده شده، نمونه‌هایی از ساختمان‌های جداسازی‌شده لرزه‌ای مطابق با [۱۵] FEMA-P۶۹۵ بررسی شده است. در این پژوهش، مدل‌های سه‌بعدی ساختمان همراه با یک مدل بهبود یافته از جداگر دارای جدار حفاظتی^۵ و تحریکات لرزه‌ای دوطرفه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که ساختمان‌ها دارای درصد احتمال فروریزش قابل قبول بودند، البته به شرط آنکه جداگرها به اندازه کافی بزرگ طراحی شده باشند تا از خرابی جلوگیری کنند. با این حال، زمانی که جدار حفاظتی جداگر با حداقل ظرفیت جابجایی موردنیاز در سطح MCE_R طراحی شد، درصد

¹ Far-field ground motion

² Triple friction pendulum isolator

³ uplift

⁴ Fragility curve

⁵ Moat wall

احتمال‌های محاسبه‌شده فروریزش به‌سختی قابل‌قبول بودند.

مطالعه‌ی حاضر به بررسی کفایت ضوابط فعلی موجود در [۱] ASCE ۷-۲۲ برای طراحی اولیه ظرفیت جابجایی جداگرها می‌پردازد. در این مطالعه یک ساختمان مینای^۱ سه‌بعدی با جداساز لرزه‌ای که برای موقعیتی در کالیفرنیا طراحی شده است، در نظر گرفته شده است. این ساختمان با استفاده از OpenSEES مدل‌سازی شده است. پنج جداگر اصطکاکی سه‌سطحی (TFPI) با ظرفیت جابجایی مختلف، ولی ویژگی‌های مکانیکی و شعاع‌های یکسان و همچنین مجموعه‌ای از هفت جداگر سیستم اصطکاکی پاندولی (FPS^۲) با ظرفیت جابجایی متفاوت ولی ویژگی‌های مکانیکی و شعاع‌های انحنای مشابه با TFPI، در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA^۳) [۲۲] با استفاده از ۲۲ جفت شتاب‌نگاشت میدان‌دور و ۱۴ جفت شتاب‌نگاشت میدان‌نزدیک^۴ از [۱۵] FEMA-P۶۹۵ برای استخراج منحنی‌های شکنندگی سیستم جداساز استفاده شده است. علاوه‌براین، تأثیرات پیچش حداقل الزام شده در آیین‌نامه نیز بروی درصد احتمال فروریزش سازه مورد بررسی قرار گرفته است.

با توجه به اینکه تجاوز میزان جابجایی از ظرفیت سیستم جداساز می‌تواند منجر به شکست جداگرها و در نتیجه فروپاشی سازه فوقانی شود، لذا در این مطالعه شکست سیستم جداساز به عنوان فروریزش کل سازه در نظر گرفته شده است.

۲- سازه‌ی مینا جداسازی شده

ساختمان مینای مورد بررسی یک ساختمان هشت طبقه با قاب فولادی مهاربندی‌شده و جداسازی پایه است که طول آن ۸۲/۴ متر و عرض آن ۵۴/۳ متر می‌باشد و مشابه ساختارهای موجود در لس‌آنجلس، کالیفرنیا است [۲۶-۲۳]. این ساختمان تا طبقه ششم دارای طبقات به‌صورت L شکل است که به تدریج به یک پیکربندی مستطیلی برای طبقات باقی‌مانده تغییر می‌کند (شکل ۱). سازه فوقانی دارای زمان تناوب متوسط ۰/۸۵ ثانیه در هر دو جهت بوده و از یک قاب فولادی مهاربندی در هر دو جهت تشکیل شده است [۲۳]. مهاربندهای ساختمان در محیط آن قرار دارند و سقف‌های آن با شبکه‌ای از تیرهای فولادی همراه با دال بتنی بصورت کامپوزیت ساخته شده‌اند [۲۳].

فرضیات کلیدی در نظر گرفته شده برای سیستم سازه‌ای عبارت‌اند از: (۱) سازه فوقانی تحت بارگذاری زلزله به صورت خطی باقی می‌ماند، (۲) طبقات به عنوان اجسام صلب در نظر گرفته می‌شوند و جرم‌ها در مراکز جرم آن‌ها متمرکز هستند، (۳) هر طبقه دارای سه درجه آزادی (DOF^۵) در مرکز جرم می‌باشد، (۴) سازه با حالت تکیه‌گاه‌های گیردار با ۲۴ درجه آزادی مدل‌سازی شده است که تمامی موده‌های مرتبط در تحلیل گنجانده شده‌اند. وزن کل سازه ۲۰۲،۰۰۰ کیلو نیوتن است [۲۳].

با توجه به اینکه در این پژوهش به بررسی کفایت ضوابط آیین‌نامه در تعیین ظرفیت جابجایی جداگرها و در نتیجه بررسی منحنی‌های شکنندگی سیستم جداساز پرداخته شده است، پاسخ‌های سازه‌ی فوقانی مورد توجه نبوده و لذا یک مدل ساده شده سه‌بعدی الاستیک (میل‌های) برای سازه‌ی مینا در نرم‌افزار OpenSEES توسعه داده شده است. رفتار برشی کلی هر طبقه با استفاده از المان‌های تیر-ستون الاستیک شبیه‌سازی شده، به‌طوری که ویژگی‌های مقطع برای مطابقت با سختی جانبی هر طبقه کالیبره گردیده است. جرم هر طبقه در گره‌های مربوطه تجمیع گردیده است. برای سیستم جداساز لرزه‌ای، از یک المان جداگر با ویژگی‌های معادل سیستم جداساز بهره‌گیری شده است.

انرژی اتلافی در سیستم جداساز در تحلیل تاریخچه پاسخ با مدل‌سازی میرایی هیسترتیک^۷ از طریق یک رابطه دقیق غیرخطی نیرو-جابجایی گنجانده شده است. میرایی ویسکوز در سازه فوقانی با استفاده از میرایی ریلی، با نسبت‌های میرایی مودال ۱٪ و ۲٪ به ترتیب

^۱ Benchmark building

^۲ Friction pendulum system

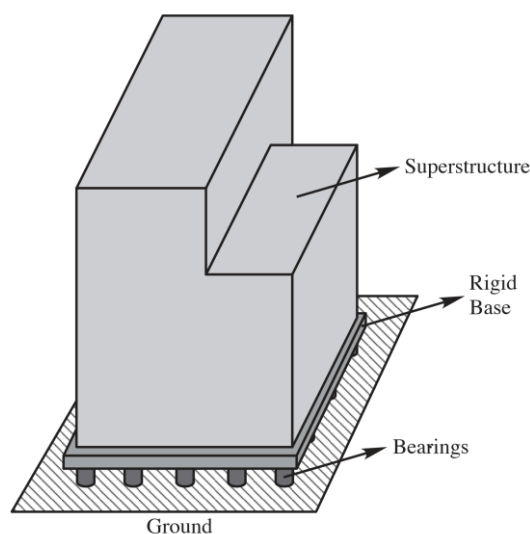
^۳ Incremental dynamic analysis

^۴ Near-fault ground motion

^۵ Degree of freedom

^۶ stick

^۷ Hysteresis damping



شکل ۱: تصویر سازه‌ی مبنا دارای جداگر لرزه‌ای

برای مود اول و پنجم، به منظور محاسبه ضرایب میرائی ریلی شبیه سازی گردیده است.

در مدل ساده شده مورد استفاده در این مطالعه، تغییرات بار محوری بر روی جداگرها به دلیل لنگرهای واژگونی و همچنین جابجایی‌های عمودی جداگرها محدود شدند. با این حال، از آنجا که از یک جداگر به عنوان نماینده کل سیستم جداساز استفاده شده است، وزن کلی توزیع شده در جداگرها تحت تأثیر اثرات واژگونی قرار نگرفته و این فرض که بار محوری روی جداگر ثابت است، توجیه می‌شود. علاوه بر این، از اثرات شتاب عمودی زمین نیز در این شبیه سازی صرف نظر گردیده است. علیرغم این ساده سازی‌ها، مدل الاستیک برای ثبت پاسخ کلی سیستم جداساز مناسب تلقی می‌شود، زیرا توانسته است رفتار کلی سیستم را در محدوده‌ای قابل قبول تقریب بزند.

این مطالعه ساختمان مورد نظر را تحت اثرات شتاب‌نگاشت دوجهته^۱ و حداقل اثرات پیچشی الزام شده در آیین نامه ۷-۲۲ ASCE شبیه سازی کرده است. مطابق با مقررات آیین نامه، به منظور در نظر گرفتن اثرات پیچش حداقل، جابجایی حداکثر کل (DTM) برابر ۱/۱۵ جابجایی (DM) در نظر گرفته شده است. این رویکرد سطحی از محافظه کاری را در تحلیل تضمین می‌کند بدون اینکه نامنظمی‌های چرخشی به طور صریح مدل سازی شوند. این روش نه تنها باعث کاهش پیچیدگی محاسباتی می‌شود، بلکه اطمینان می‌دهد که نتایج تحلیل از نظر ایمنی در محدوده‌ای قابل قبول قرار دارند.

با این حال، باید توجه داشت که این ساده سازی‌ها ممکن است برخی از جزئیات رفتاری سیستم را نادیده بگیرند. به ویژه، اثرات شتاب عمودی زمین و تغییرات بار محوری ناشی از حرکات شدید زمین می‌توانند در شرایط واقعی تأثیراتی هرچند اندک بر عملکرد جداگرها داشته باشند. بنابراین، توصیه می‌شود در مطالعات آینده این عوامل به طور دقیق تر مورد بررسی قرار گیرند تا دقت مدل سازی افزایش یابد و نتایج به شرایط واقعی نزدیک تر شوند. همچنین، بررسی تأثیر نامنظمی‌های چرخشی به صورت صریح می‌تواند به درک بهتر رفتار سیستم تحت شرایط پیچیده کمک کند.

¹ Biaxial

جدول ۱: شتاب‌نگاشت‌های میدان دور استفاده شده [15]

نام رکورد	اندازه	سال	ایستگاه
Northridge	6.7	1994	Beverly Hills - Mulhol
Northridge	6.7	1994	Canyon Country-WLC
Duzce, Turkey	7.1	1999	Bolu
Hector Mine	7.1	1999	Hector
Imperial Valley	6.5	1979	Delta
Imperial Valley	6.5	1979	El Centro Array #11
Kobe, Japan	6.9	1995	Nishi-Akashi
Kobe, Japan	6.9	1995	Shin-Osaka
Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Duzce
Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Arcelik
Landers	7.3	1992	Yermo Fire Station
Landers	7.3	1992	Coolwater
Loma Prieta	6.9	1989	Capitola
Loma Prieta	6.9	1989	Gilroy Array #3
Manjil, Iran	7.4	1990	Abbar
Superstition Hills	6.5	1987	El Centro Imp. Co.
Superstition Hills	6.5	1987	Poe Road (temp)
Cape Mendocino	7	1992	Rio Dell Overpass
Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	CHY101
Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	TCU045
San Fernando	6.6	1971	LA - Hollywood Stor
Friuli, Italy	6.5	1976	Tolmezzo

۳- شتاب‌نگاشت

۳-۱ شتاب‌نگاشت‌های منتخب

مطالعه حاضر از داده‌های شتاب‌نگاشت‌های موجود در روش [۱۵] FEMA-P۶۹۵ استفاده کرده است. جدول ۱ فهرست شتاب‌نگاشت‌های میدان دور مورد استفاده را ارائه می‌دهد. این داده‌ها شامل مجموعه‌ای متنوع از شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه هستند که با دقت انتخاب شده‌اند تا دامنه وسیعی از شدت‌های لرزه‌ای، فرکانس‌ها، مدت‌زمان‌ها و شرایط محل را پوشش دهند. در این پژوهش علاوه بر شتاب‌نگاشت‌های میدان دور از شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک نیز بهره‌جویی شده است. شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک با لرزش‌های با شدت بالا، مدت‌زمان کوتاه و پالس‌ها شناخته می‌شوند. در مقابل، شتاب‌نگاشت‌های میدان دور با لرزش‌هایی با شدت کمتر اما مدت زمان طولانی‌تر همراه هستند که تأثیر قابل توجهی بر آسیب تجمعی به ساختمان‌ها دارند. جدول ۲ فهرست شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک را که در این مطالعه در نظر گرفته شده‌اند، نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک نیازمند بررسی‌های تخصصی و جداگانه هستند، این مطالعه آن‌ها را فقط برای مقایسه کلی با شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و تأثیر احتمالی تفاوت‌ها در پاسخ سیستم جداساز مورد استفاده قرار داده است.

جدول ۲: شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک استفاده شده [15]

نام رکورد	اندازه	سال	ایستگاه
Imperial Valley-06	6.5	1979	El Centro Array #6
Imperial Valley-06	6.5	1979	El Centro Array #7
Irpinia, Italy-01	6.9	1980	Sturmo
Superstition Hills-02	6.5	1987	Parachute Test Site
Loma Prieta	6.9	1989	Saratoga - Aloha
Erzican, Turkey	6.7	1992	Erzincan
Cape Mendocino	7	1992	Petrolia
Landers	7.3	1992	Lucerne
Northridge-01	6.7	1994	Rinaldi Receiving Sta
Northridge-01	6.7	1994	Sylmar - Olive View
Kocaeli, Turkey	7.5	1999	Izmit
Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	TCU065
Chi-Chi, Taiwan	7.6	1999	TCU102
Duzce, Turkey	7.1	1999	Duzce

۲-۳ مقیاس شتاب‌نگاشت‌ها

سازه‌ی مینا با سیستم جداساز لرزه‌ای، در کلاس خاک پیش‌فرض^۱ در سان فرانسیسکو، کالیفرنیا (عرض جغرافیایی ۳۷/۷۸۳ درجه، طول جغرافیایی ۱۲۲/۳۹۲- درجه) واقع شده و مقادیر شتاب طیفی MCE_R برای $SM_S = 1/68 g$ و $SM_1 = 1/70 g$ برگرفته از سامانه آنلاین ASCE 7، مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق با [۱] ASCE 7-22، در این پژوهش از طیف چند دوره‌ای^۲ MCE_R (شکل ۲) که اکنون جایگزین طیف دو دوره‌ای^۳ در ویرایش قبلی آیین‌نامه گردیده، استفاده شده است.

شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از روش مقیاس‌سازی دامنه^۴ که در [۱] ASCE 7-22 شرح داده شده است، مقیاس شده‌اند. در این روش، برای هر جفت از شتاب‌نگاشت‌های افقی، طیف $RotD_{100}$ (که به آن طیف جهت حداکثری نیز گفته می‌شود) از دو مولفه افقی ساخته می‌شود. طیف $RotD_{100}$ بیشینه شتاب طیفی یک شتاب‌نگاشت که با چرخش دو مولفه افقی آن در تمام زاویه‌های ممکن به دست می‌آید، را نشان می‌دهد. به این ترتیب، از آنجا که روش مقیاس‌سازی دامنه اکنون نیاز به ساخت طیف $RotD_{100}$ برای هر شتاب‌نگاشت به صورت جداگانه دارد، این طیف از پایگاه داده [۲۷] PEER NGA-West 2 برای هر یک از شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده در این پژوهش استخراج گردیده است.

فرآیند مقیاس‌سازی دامنه با ویرایش‌های قبلی استاندارد هماهنگ است، اما تغییرات زیر را شامل می‌شود: (۱) مقیاس‌سازی اکنون براساس طیف $RotD_{100}$ به جای طیف $SRSS^5$ انجام می‌شود که این تغییر اطمینان از انسجام را فراهم می‌آورد، زیرا شتاب‌نگاشت MCE_R به‌طور صریح به عنوان حرکت در جهت حداکثری تعریف شده است. (۲) الزام اینکه طیف میانگین «زیر طیف هدف نرود» به دو بخش تغییر یافته است: (الف) طیف میانگین «با طیف هدف هماهنگ می‌شود» و (ب) طیف میانگین نباید برای هیچ زمان تناوبی در محدوده زمان‌های تناوب مورد نظر، کمتر از ۹۰٪ طیف هدف باشد. این مورد، دقت اضافی لازم برای اینکه طیف میانگین در هر زمان تناوبی از هدف فراتر رود

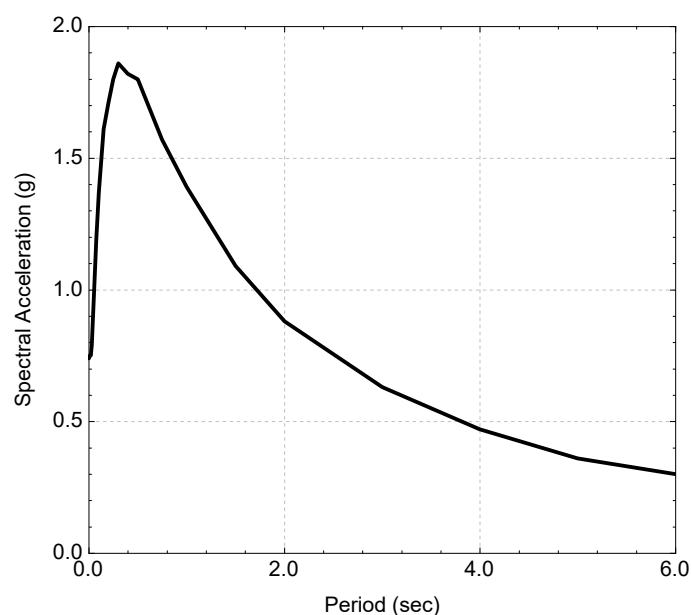
¹ Default soil class

² Multi-period spectrum

³ Two-period spectrum

⁴ Amplitude scaling

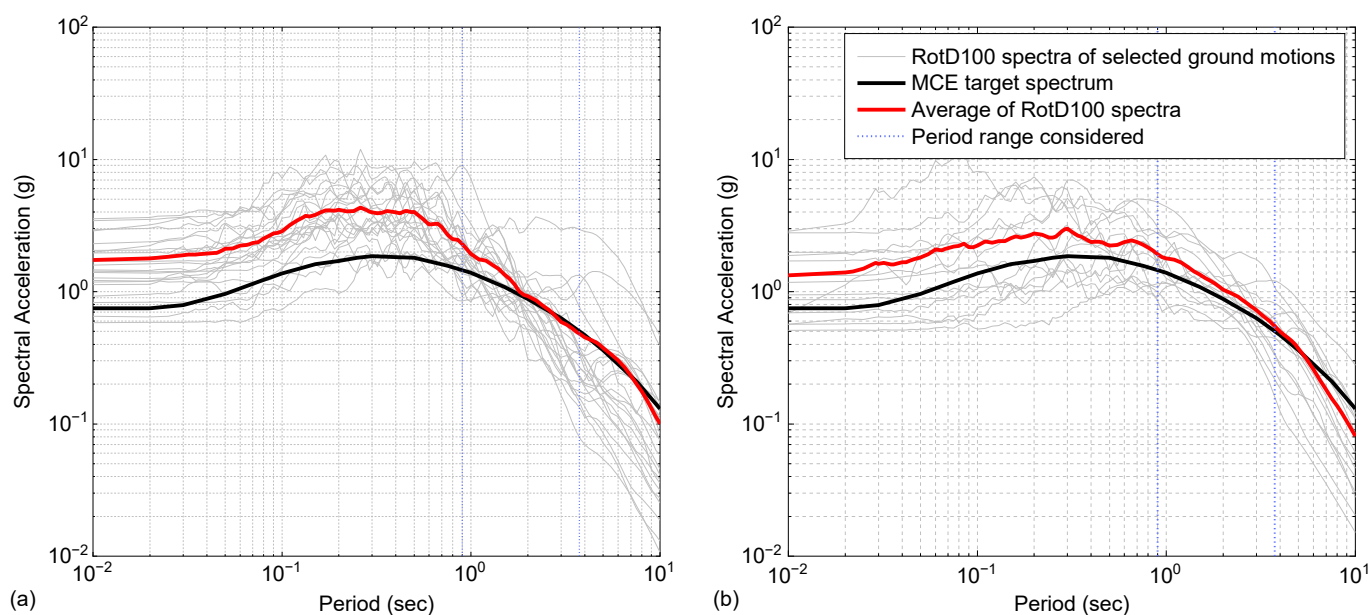
⁵ Square roof of sum of squares



شکل ۲: طیف طراحی چند دوره‌ای استخراج شده برای سازه مورد مطالعه [۱]

را از بین می‌برد [۱].

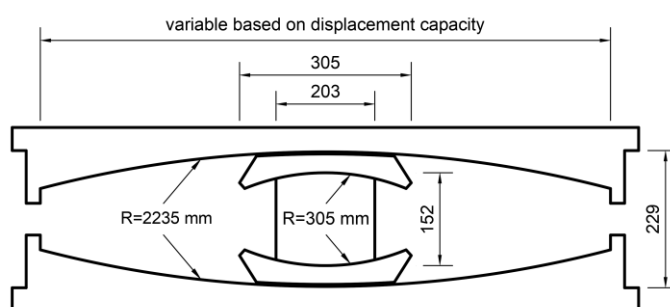
هر دو مولفه افقی یک شتاب‌نگاشت با ضریب مشابه مقیاس‌بندی شده، به طوری که میانگین طیف‌های جهت حداکثری تمام شتاب‌نگاشت‌ها با طیف پاسخ هدف در محدوده زمان‌های تناوب تعریف شده تطابق یافته یا از آن فراتر رود (شکل ۳). محدوده زمان‌های تناوب باید از حد پایین که مشارکت ۹۰ درصدی جرم را در هر جهت افقی اصلی تضمین کند، شروع شود و به حد بالایی که حداقل ۱/۲۵



شکل ۳: طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده و طیف پاسخ هدف: (الف) میدان دور و (ب) میدان نزدیک

جدول ۳: ظرفیت محاسبه شده جداگرها براساس ضوابط آیین‌نامه ASCE 7-22

نوع شتاب‌نگاشت	میانگین پاسخ بیشینه جابجایی ۷ شتاب‌نگاشت (m)	ظرفیت جابجایی استفاده شده در جداگرها (D _{TM}) (m)
میدان دور	0.48	0.50
میدان نزدیک	0.74	0.75



شکل ۴: هندسه کلی جداگرهای TFPI شبیه‌سازی شده

برابر T_M باشد، برسد که در آن T_M زمان تناوب مؤثر سیستم جداساز است که براساس ویژگی‌های مکانیکی حد پایین جداگر محاسبه می‌شود [۱]. با توجه به اینکه زمان تناوب سیستم جداساز در این پژوهش ۳ ثانیه در نظر گرفته شده است، محدوده زمانی که برای مقیاس‌بندی شتاب‌نگاشت‌ها در این مطالعه استفاده شده از ۰/۹ تا ۳/۷۵ ثانیه می‌باشد.

۳- جداگرهای مورد مطالعه

برای تعیین ظرفیت جابجایی مورد نیاز جداگرهای اصطکاکی در این مطالعه، براساس ضوابط [۱] ASCE ۷-۲۲، پس از در نظر گرفتن هفت شتاب‌نگاشت و با در نظر گرفتن اثرات پیچش حداقل، حداکثر جابجایی برای هر دو مولفه افقی هر یک از هفت شتاب‌نگاشت محاسبه گردید. در گام دوم برای هر شتاب‌نگاشت حداکثر جابجایی مورد نیاز جداگر با استفاده از جزر مجموع مربعات (SRSS) پاسخ دو مولفه آن بدست آمد. پس از آن میانگین این هفت پاسخ (جابجایی حداکثر هر یک از ۷ شتاب‌نگاشت) محاسبه گردیده و به عنوان ظرفیت جابجایی مورد نیاز جداگر (D_{TM}) مورد استفاده قرار گرفت. این فرآیند به‌طور جداگانه برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و میدان نزدیک انجام شده که جزئیات در جدول ۴ ارائه گردیده است.

برای ارزیابی پاسخ‌ها، از پنج جداگر TFPI و یک جداگر FPS با ظرفیت‌های مختلف بهره‌وری شده است. شعاع لغزش ۲/۲۳ متر که معادل زمان تناوب جداسازی ۳/۰ ثانیه است، مورد استفاده قرار گرفته که با هندسه جداگرها در مطالعات قبلی [۱۳] نیز مطابقت دارد. شکل ۴ و جدول ۴ اطلاعات دقیق‌تری در مورد این جداگرها ارائه می‌دهند. ۱-TFPI با ظرفیتی معادل D_{TM} (۰/۵ متر برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و ۰/۷۵ متر برای شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک) طراحی شده است، در حالی که ظرفیت جابجایی برای هر جداگر TFPI بعدی به میزان ۲۵٪ افزایش می‌یابد. این افزایش توسط ضرایب افزایش ظرفیت جابجایی جداگر، α و β به ترتیب برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و

جدول ۴: جداگرهای استفاده شده در این مطالعه

ضریب افزایش ظرفیت جابجایی طراحی شده برای رکوردهای میدان نزدیک، β	ضریب افزایش ظرفیت جابجایی طراحی شده برای رکوردهای میدان دور، α	ضریب افزایش ظرفیت جابجایی طراحی شده برای رکوردهای میدان نزدیک، β	ضریب افزایش ظرفیت جابجایی طراحی شده برای رکوردهای میدان دور، α	جداگر
ظرفیت جابجایی نهایی، $D_{ultimate}$ (m)	ظرفیت جابجایی طراحی، D_{TM} (m)	ظرفیت جابجایی نهایی، $D_{ultimate}$ (m)	ظرفیت جابجایی طراحی، D_{TM} (m)	
--	1.00	0.66	0.50	TFPI-1
--	1.25	0.78	0.62	TFPI-2
1.00	1.50	0.93	0.75	TFPI-3
1.25	1.75	1.03	0.87	TFPI-4
1.50	2.00	1.17	1.00	TFPI-5
--	1.00	0.50	0.50	FPS-1
--	1.25	0.62	0.62	FPS-2
1.00	1.50	0.75	0.75	FPS-3
1.25	1.75	0.87	0.87	FPS-4
1.50	2.00	1.00	1.00	FPS-5
2.00	3.00	1.50	1.50	FPS-6
2.66	4.00	2.00	2.00	FPS-7

میدان نزدیک، در جدول ۴ نشان داده شده است. به عنوان مثال، TFPI-۱ و TFPI-۳ به ترتیب با ضریب ظرفیت جابجایی $\alpha=1/0.0$ و $\beta=1/0.0$ نشان می‌دهد که ظرفیت جابجایی آنها معادل جابجایی محاسبه شده توسط ضوابط آیین‌نامه (DTM) در نظر گرفته شده است. در مقابل، TFPI-۵ دارای ضرایب ظرفیت جابجایی $\alpha=2/0.0$ و $\beta=1/0.5$ می‌باشد که معادل دو برابر D_{TM} برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و $1/5$ برابر D_{TM} برای شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک است.

علت انتخاب جداگرهای TFPI توانایی بیشتر این جداگر در پذیرش جابجایی‌های بزرگ و سازگاری با شدت‌های مختلف زلزله می‌باشد. مطالعات نشان داده‌اند که جداگرهای TFPI به‌طور قابل توجهی نیروهای لرزه‌ای منتقل شده به سازه را کاهش داده و پایداری و ایمنی کلی را در هنگام زلزله بهبود می‌بخشند. علاوه بر این، این جداگرها ظرفیت جابجایی و توانایی اتلاف انرژی بهتری نسبت به جداگرهای سنتی ارائه می‌دهند و مکانیزم چندمرحله‌ای آنها عملکرد بهتری را تحت نیازهای لرزه‌ای متغیر فراهم می‌کند [۲۸-۳۴].

مشخصات مکانیکی جداگرهای TFPI تحت شرایط سرعت بالا براساس گزارش فنی ویلیام جی. مک‌ویتی و همکاران [۳۵] انتخاب شده است. این گزارش، روش‌های تعیین و اعمال ضرایب اصلاح مشخصات مکانیکی را برای جبران تغییرات در ویژگی‌های جداگر ناشی از تغییرات دما، پیری، نرخ بارگذاری، و سایر شرایط محیطی و عملیاتی توضیح می‌دهد.

با توجه به اینکه این پژوهش بر پاسخ‌های سیستم جداساز تمرکز دارد نه پاسخ‌های روسازه، لذا تنها از ویژگی‌های اصطکاکی حد پایین^۱ استفاده شده است. در شبیه‌سازی، ضریب اصطکاک $0.42/0$ برای سطوح لغزشی بیرونی و $0.15/0$ برای سطوح لغزشی داخلی به کار گرفته شده است [۳۵]. برای جداگر FPS، ضریب اصطکاک برابر با ضریب اصطکاک سطوح بیرونی جداگرهای TFPI، یعنی $0.42/0$ ، در نظر گرفته شده است.

^۱ Lower-bound frictional properties

۵- ارزیابی فروریزش

تمرکز پژوهش حاضر بر قابلیت اطمینان سیستم جداساز می‌باشد. بنابراین، جابجایی فراتر از ظرفیت تعیین شده جداگر به عنوان شکست سیستم جداساز تعریف می‌شود. معیار خرابی یا فروریزش سازه فوقانی به عوامل مختلفی بستگی دارد. اما با توجه به اینکه حتی اگر سازه فوقانی به خوبی طراحی شده و ایمن باشد، شکست سیستم جداساز می‌تواند منجر به فروریزش سازه فوقانی شود، لذا این مطالعه شکست سیستم جداساز را معادل خرابی کل سازه در نظر می‌گیرد.

روش‌های احتمالاتی مختلفی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های سازه‌ای تحت اثر زلزله وجود دارد [۳۶، ۱۲]. در این پژوهش از روش ارزیابی [۱۵] FEMA-P695 که به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی مقاومت مورد نیاز و احتمال فروریزش سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده شده است. برای بررسی پاسخ‌ها و بدست آوردن نمودارهای شکنندگی سیستم جداساز، تحلیل دینامیکی افزایشی [۳۰] (IDA) تحت تحریک دو محوره با استفاده از ۲۲ جفت شتاب‌نگاشت میدان دور و ۱۴ جفت شتاب‌نگاشت میدان نزدیک، برگرفته شده از [۱۵] FEMA-P695، انجام شده است.

علاوه‌براین، روش [۱۵] FEMA-P695 از معادله (۱) برای ارزیابی عدم قطعیت^۱ کلی سازه استفاده می‌کند. عدم قطعیت کلی، که اغلب با نماد β_{TOT} نشان داده می‌شود، به صورت جزر مجموع مربعات (SRSS) مؤلفه‌های مختلف عدم قطعیت محاسبه می‌شود. این مؤلفه‌ها شامل β_{RTR} (تغییرپذیری ناشی از تفاوت در شتاب‌نگاشت‌های زلزله)، β_{DR} (عدم قطعیت‌های مربوط به طراحی و تحلیل و انحرافات احتمالی در روش‌های پیش‌بینی پاسخ سازه)، β_{TD} (تغییرپذیری و نواقص احتمالی داده‌های آزمایشی مورد استفاده برای اعتبارسنجی و کالیبره کردن مدل‌های سازه‌ای)، و β_{MDL} (عدم قطعیت در تغییرپذیری مدل و تفاوت‌ها و خطاهای احتمالی ناشی از استفاده مدل‌های سازه‌ای مختلف)، می‌باشد.

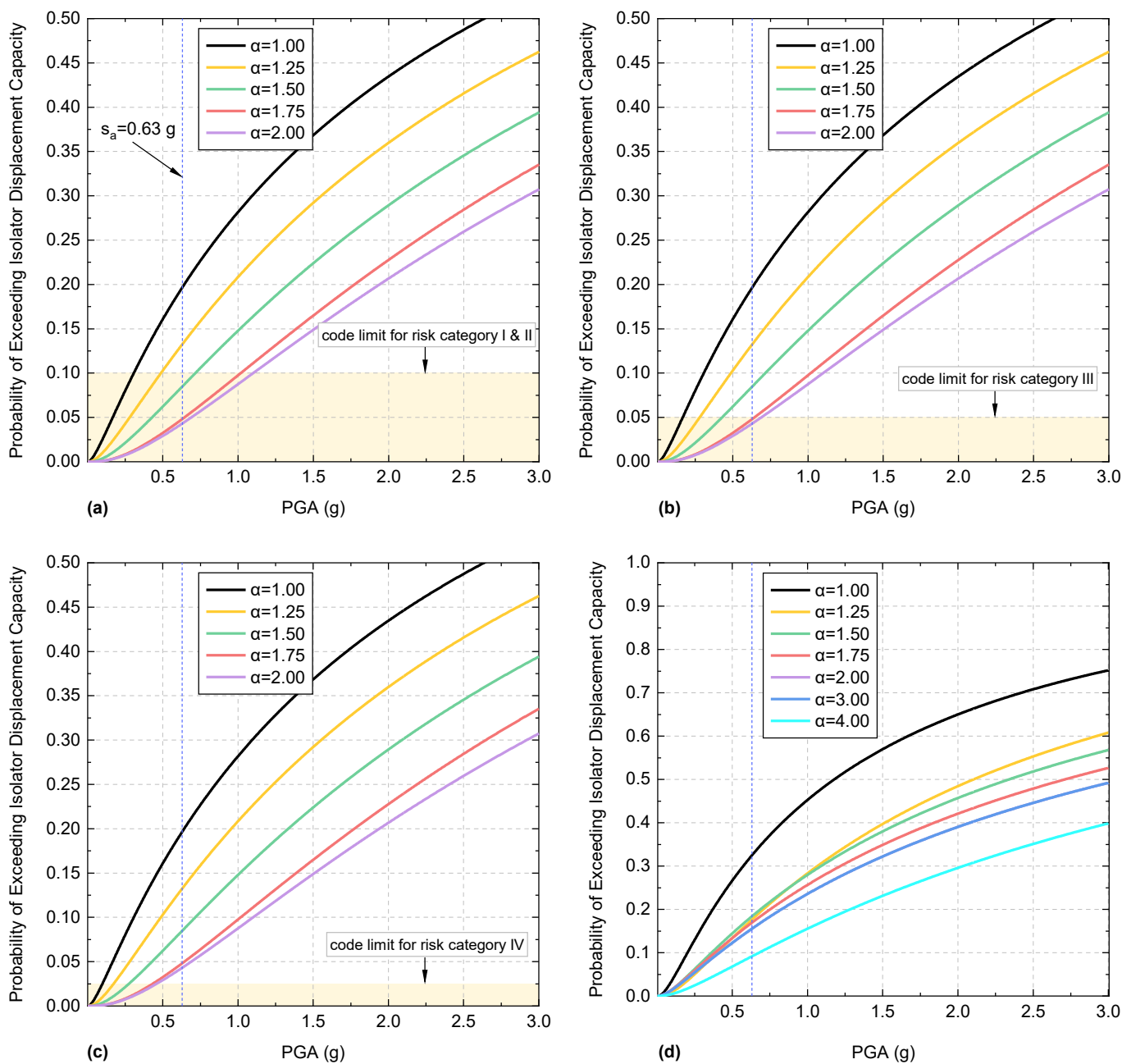
$$\sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (1)$$

در این مطالعه، رتبه بندی‌های کیفی و عدم قطعیت‌های مرتبط به شرح زیر اعمال شده است: رتبه "خوب" با $\beta_{MDL}=0/2$ برای مدل‌سازی، رتبه "خوب" با $\beta_{TD}=0/2$ برای داده‌های آزمایشی، و رتبه "عالی" با $\beta_{DR}=0/1$ برای الزامات طراحی. این فرضیات با موارد ذکر شده در مراجع [۳۷، ۱۹، ۱۳] نیز سازگار است.

در رابطه با تأثیرات شکل طیفی^۲، کیتایاما و همکاران [۱۳] مقادیر را برای در نظر گرفتن تأثیرات شکل طیفی با استفاده از روش‌های [۱۵] FEMA-P695 تنظیم کردند. پژوهش آن‌ها نشان داد که عوامل تصحیح برای تأثیرات شکل طیفی ارائه شده در [۱۵] FEMA-P695 برای سازه‌های دارای جداساز لرزه‌ای مناسب نیست و بر لزوم مطالعات تخصصی برای تعیین دقیق تأثیر شکل طیفی تأکید داشت. علاوه‌براین، مطالعه اخیر شائو و همکاران [۱۴] این تأثیرات را در نظر نگرفت، زیرا روش ساده‌سازی شده در [۱۵] FEMA-P695 برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای با زمان‌های تناوب بزرگ کاربردی ندارد. بنابراین، در این مطالعه نیز تأثیرات شکل طیفی لحاظ نشده و لذا ممکن است درصد احتمال فروریزش کمی دست بالا محاسبه شود.

¹ Uncertainty

² Spectral shape

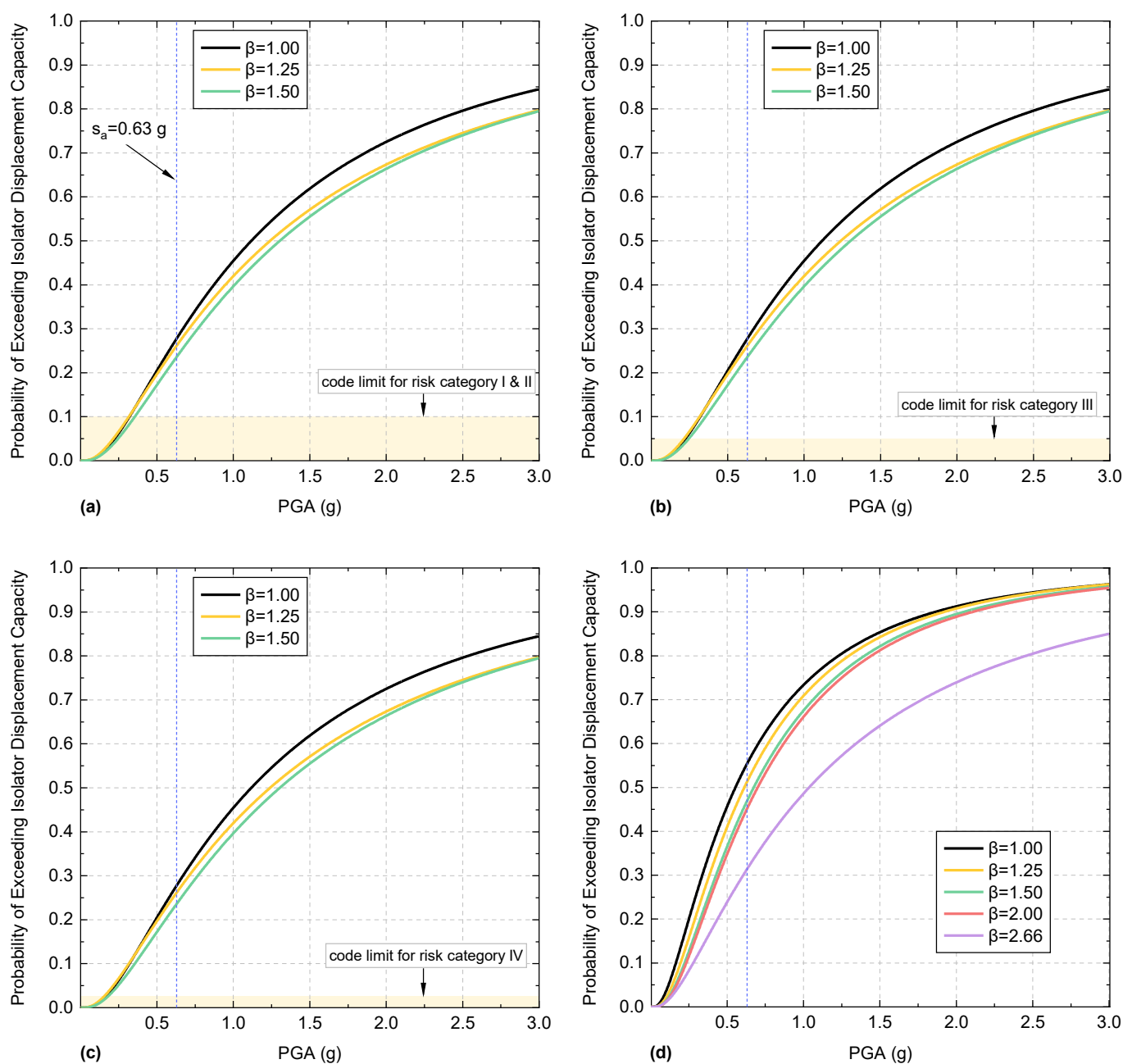


شکل ۵: منحنی شکست سیستم جداساز در معرض شتاب‌نگاشت میدان دور برای: (a)، (b)، و (c) TFPI و (d) FPS

۶- بحث و نتیجه‌گیری

۱-۶ شتاب‌نگاشت میدان دور

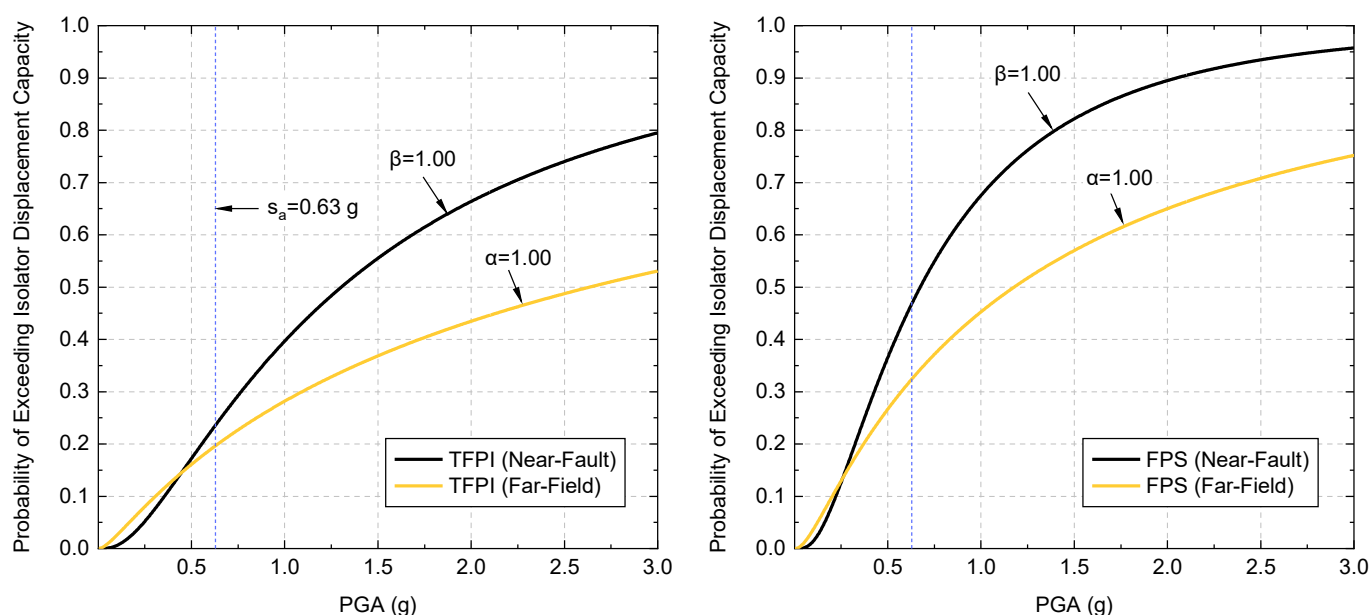
شکل ۵ منحنی‌های شکنندگی یا احتمال خرابی سیستم جداساز در سازه مورد مطالعه را تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های میدان دور نشان می‌دهد. مشخص است که هرگاه $\alpha=1/100$ (ظرفیت جابجایی جداگر معادل ظرفیت جابجایی طراحی شده براساس ضوابط آیین‌نامه) باشد، احتمال فروریزش در $S_a = 0/63$ g حدود ۲۰٪ است. این مقدار به میزان قابل توجهی از آستانه ۱۰٪ مجاز توسط [۱] ASCE ۷-۲۲ حتی



شکل ۶: منحنی شکست سیستم جداساز در معرض شتاب‌نگاشت میدان نزدیک برای: (a)، (b)، و (c) TFPI و (d) FPS

برای گروه‌های خطر I و II نیز بیشتر است. این یافته به وضوح نشان می‌دهد که ظرفیت جابجایی طراحی براساس آیین‌نامه برای جداگرها ناکافی است.

علاوه بر این، آیین‌نامه [۱] ASCE 7-22 برای تعیین ظرفیت جابجایی طراحی جداگرها، تفاوتی بین گروه‌های خطر قائل نمی‌شود. بخش‌های (a)، (b) و (c) در شکل ۵ محدودیت احتمال فروریزش آیین‌نامه‌ای را به ترتیب برای گروه‌های خطر I و II، III، و IV نشان می‌دهند. داده‌ها به وضوح نشان می‌دهند که برای دستیابی به احتمال فروریزش ایمن برای گروه خطر I و II، باید حداقل $\alpha = 1/100$ باشد، در حالی که برای دسته ریسک III باید $\alpha = 1/75$ باشد. بخش (c) از شکل ۵ نشان می‌دهد که حتی با $\alpha = 2/100$ ، احتمال فروریزش سیستم



شکل ۷: مقایسه‌ی منحنی‌های شکست جداگرهای TFPI و FPS تحت شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور و میدان‌نزدیک

جداساز برای سازه‌های گروه خطر IV همچنان ناکافی است و نیاز به تحقیقات بیشتر دارد.

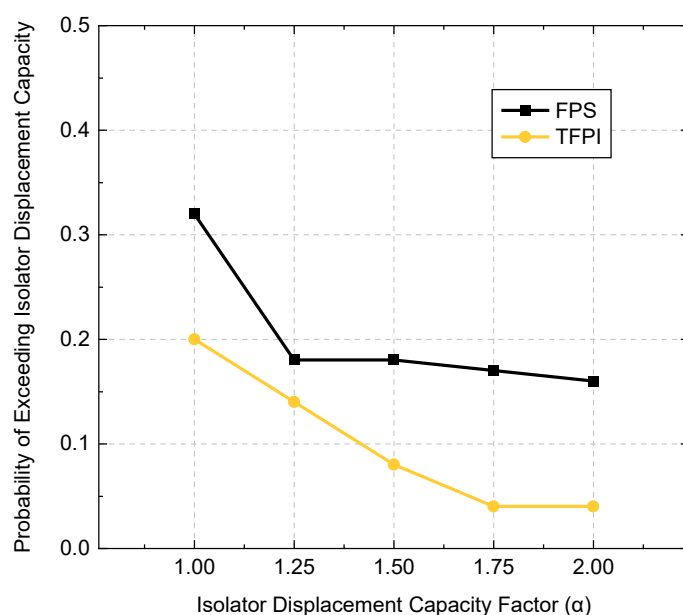
برای جداگر FPS سنتی، بخش (d) از شکل ۵ نشان می‌دهد که وقتی $\alpha=1/0.0$ باشد، احتمال فروریزش حدود ۳۳٪ است، که نشان می‌دهد برای دستیابی به احتمال فروریزش مجاز برای دسته‌های ریسک I و II باید حداقل $\alpha=4/0.0$ باشد. برای دسته‌های ریسک III و IV مقادیر بالاتری از α لازم است. بعبارتی استفاده از جداگر FPS منجر به افزایش درصد احتمال فروریزش زیادی می‌شود. بنابراین، استفاده از جداگرهای FPS به دلیل نیاز به مقدار غیرعملی α (جداگر با اندازه خیلی بزرگ) که برای بیشتر پروژه‌های واقعی نامناسب است، توصیه نمی‌شود.

در یک مقایسه کلی، جداگر TFPI عملکرد بهتری نسبت به جداگر FPS تحت شتاب‌نگاشت میدان‌دور نشان می‌دهد. این رفتار بهبود یافته به دلیل ویژگی‌های حرکت چند مرحله‌ای و سخت‌شوندگی TFPI است. با این حال، باید توجه داشت که برای گروه‌های مختلف خطر، نیاز به ظرفیت بیشتر برای TFPI فراتر از ظرفیت جابجایی محاسبه شده براساس آیین‌نامه وجود دارد.

۶-۲ شتاب‌نگاشت میدان‌نزدیک

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ویژگی‌های منحصر به فرد شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک با ماهیت ضربه‌ای نیاز به بررسی‌های ویژه و مطالعات جداگانه دارند. بنابراین، این مطالعه، شتاب‌نگاشت میدان‌نزدیک را تنها برای مقایسه کلی با رکوردهای میدان‌دور مورد بررسی قرار داده است. شکل ۶ اطلاعات مشابهی با شکل ۵ را برای شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک به جای میدان‌دور ارائه می‌دهد.

مشخص است که در تمام بخش‌های شکل ۶، حتی وقتی $\beta=1/5.0$ (ظرفیت جداگر ۵۰٪ بیشتر از ظرفیت جابجایی محاسبه شده براساس آیین‌نامه) برای جداگر PFPI و $\beta=2/6.6$ برای جداگر FPS باشد، احتمال فروریزش برای تمام گروه‌های خطر همچنان به حد مجاز تعیین شده در آیین‌نامه نمی‌رسد. برای مثال، بخش‌های (a)، (b)، و (c) شکل ۶ نشان می‌دهند که هرگاه $\beta=1/0.0$ باشد، احتمال فروریزش به میزان بالای ۲۸٪ است و حتی با $\beta=1/5.0$ ، احتمال فروریزش غیر قابل قبول حدود ۲۴٪ به دست می‌آید. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که بررسی ویژه شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک در طراحی ظرفیت جابجایی جداگرها ضروری است.



شکل ۸: تأثیر α بر احتمال فروریزش (شکست سیستم جداساز)

علاوه بر این، بخش (d) شکل ۶ وضعیت بدتری برای جداگر FPS مشابه آنچه در شتاب‌نگاشت میدان دور مشاهده شد را نشان می‌دهد. حتی با مقدار $\beta = 2/66$ احتمال فروریزش برای جداگر FPS به عدد غیر قابل قبول ۳۱٪ می‌رسد.

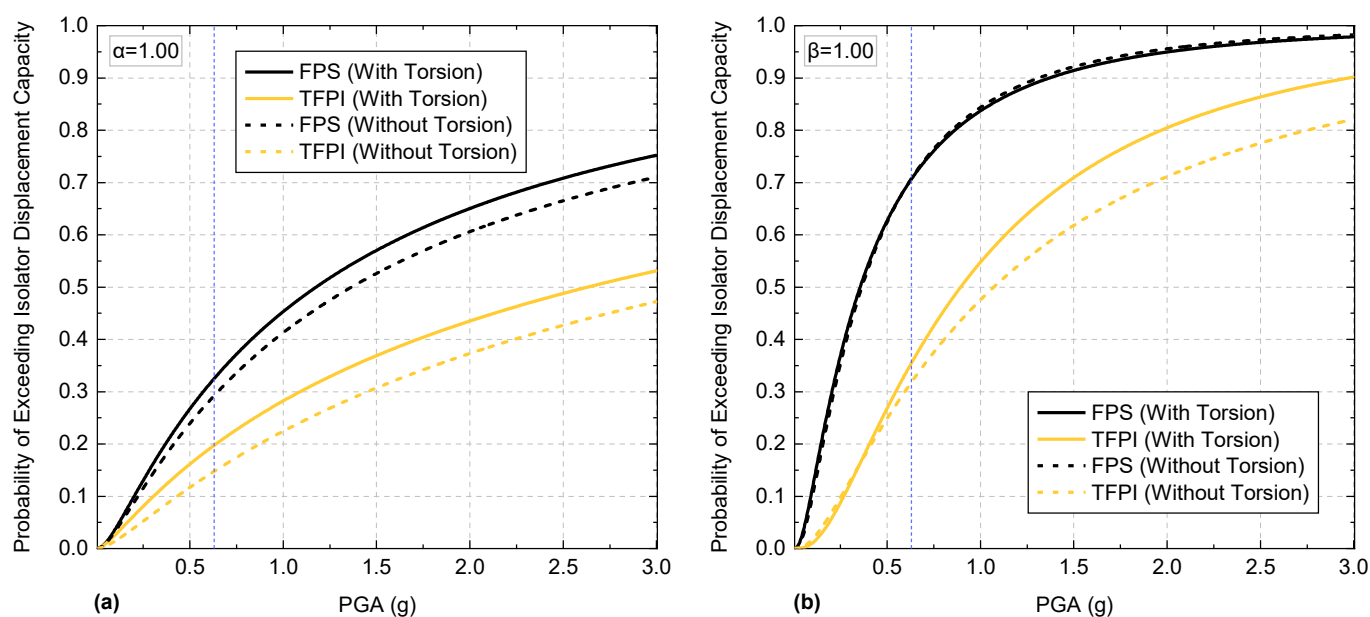
برای ارائه تمایز واضح‌تر بین احتمال فروریزش تحت اثر شتاب‌نگاشت میدان دور و میدان نزدیک، شکل ۷ برای جداگرهای TFPI و FPS ترسیم شده است. شکل ۷ نشان می‌دهد که برای مقادیر کمتر از $PGA = 0.5g$ ، تفاوت قابل توجهی در احتمال فروریزش تحت اثر شتاب‌نگاشت میدان دور یا میدان نزدیک در جداگر TFPI مشاهده نمی‌شود. با این حال، با افزایش PGA، این تفاوت به سرعت افزایش یافته و توجه ویژه به شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک در مناطق با زلزله‌های شدید و گروه‌های خطر بحرانی را نشان می‌دهد. روند مشابهی برای جداگر FPS مشاهده می‌شود، به طوری که مقدار آستانه PGA، پیش از آنکه هر دو نوع شتاب‌نگاشت نتایج تقریباً یکسانی ارائه دهند، حدود $0.3g$ است، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است.

۶-۳ تأثیر α بر احتمال فروریزش

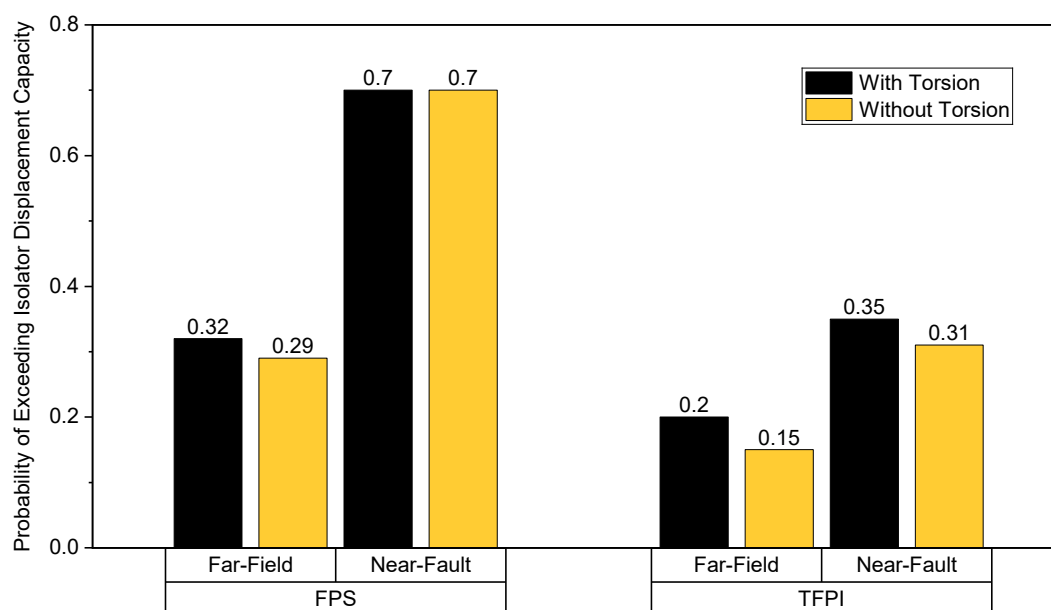
نتایج ترسیم‌شده در شکل ۵ به وضوح نشان می‌دهند که برای دستیابی به احتمال فروریزش کمتر، نیاز به افزایش ظرفیت جابجایی جداگر می‌باشد. شکل ۸ این رابطه را به صورت شفاف‌تر برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور، نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که برای جداگر TFPI، با افزایش ضریب ظرفیت جابجایی، α ، احتمال فروریزش به سرعت کاهش می‌یابد. در مقابل، برای جداگر FPS، اگرچه کاهش اولیه احتمال فروریزش با افزایش α سریع است، اما افزایش‌های بعدی در ضریب α تنها تغییرات جزئی در احتمال فروپاشی ایجاد می‌کند. این موضوع بیشتر بر عدم کارایی استفاده از جداگرهای FPS در مناطقی با زلزله‌های با شدت بالا تأکید می‌کند.

۶-۴ تأثیر پیچش بر احتمال فروریزش

در این پژوهش سازه مبنا دارای جداساز لرزه‌ای به صورت سه‌بعدی با در نظر گرفتن تحریک‌های دو محوره و اثرات پیچش حداقل الزام شده در آیین‌نامه شبیه‌سازی شده است. برای نشان دادن اهمیت اثرات پیچش بر احتمال فروپاشی، شکل ۹ و شکل ۱۰ ترسیم شده‌اند. این شکل‌ها داده‌هایی را برای شتاب‌نگاشت‌های میدان دور و میدان نزدیک با مقادیر $\alpha = 1/100$ و $\beta = 1/100$ ارائه می‌دهند، که نشان‌دهنده عدم



شکل ۹: تأثیر پیچش بر احتمال شکست سیستم جداساز برای شتاب‌نگاشت‌های (a) میدان‌دور و (b) میدان‌نزدیک



شکل ۱۰: مقایسه‌ی مقادیر احتمال شکست سیستم جداساز با و بدون در نظر گرفتن حداقل پیچش الزام شده در آیین‌نامه

افزایش اندازه جداگر فراتر از ظرفیت جابجایی طراحی شده براساس آیین‌نامه است.

در حالی که شکل ۹ نمودارهایی با و بدون در نظر گرفتن پیچش را برای مقادیر مختلف PGA نمایش می‌دهد، شکل ۱۰ مقادیر مشخصی را برای $S_a = 0.63g$ و برای سایت و سازه مبنا مورد بررسی ارائه می‌کند.

شکل ۱۰ نشان می‌دهد که نادیده گرفتن اثرات پیچش حداقل در شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور باعث ایجاد خطای کم‌برآوردی ۹/۴٪ برای جداگرهای FPS می‌شود، در حالی که این خطا برای جداگرهای TFPI به‌طور قابل توجهی به ۲۵٪ افزایش می‌یابد. با این حال، برای شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک، خطای کم‌برآوردی برای جداگرهای FPS برابر صفر و برای جداگرهای TFPI تقریباً ۱/۴٪ است، که اهمیت در نظر گرفتن اثرات پیچشی را تقویت می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

این مطالعه بر لزوم بازنگری در ضوابط طراحی موجود در آیین‌نامه ASCE 7-22 برای سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای و عدم کفایت این ضوابط در تامین میزان جابجایی مورد نیاز سیستم جداساز در زلزله‌های شدید تأکید می‌کند. از تحلیل IDA و روش ارزیابی FEMA P695 برای مطالعه احتمال فروریزش و بدست آوردن منحنی‌های شکنندگی سازه مورد مطالعه تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور و میدان‌نزدیک، استفاده شده است. یافته‌ها به‌طور واضح نشان می‌دهند که ظرفیت‌های جابجایی جداگر طراحی شده براساس ضوابط آیین‌نامه، مانند آنچه در ASCE 7-22 آمده است، اغلب ناکافی هستند. ضرورت استفاده از جداگرهایی با ظرفیت جابجایی بیشتر برای دستیابی به احتمال فروریزش قابل قبول، عدم کفایت روش‌های طراحی کنونی را نشان می‌دهد.

علاوه‌براین، نادیده گرفتن اثرات پیچش حداقل منجر به کم‌برآورد قابل توجهی در محاسبه احتمال فروریزش می‌شود که ضرورت استفاده از روش‌های مدل‌سازی جامع را به‌طور بیشتر تقویت می‌کند. ارتباط میان ظرفیت جابجایی جداگر و احتمال فروریزش به‌وضوح نمایان است و نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت جابجایی برای تقویت قابلیت‌اطمینان و ایمنی سازه‌های جداسازی شده لرزه‌ای ضروری است.

خلاصه‌ای از نتایج به‌دست آمده به شرح زیر است:

- ۱) احتمال خرابی TFPI تحت شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور در تمام گروه‌های خطر از حد مجاز آیین‌نامه فراتر می‌رود.
- ۲) استفاده از جداگرهایی با ظرفیت جابجایی بیشتر برای دستیابی به درصد احتمال‌های فروریزش مطابق با آیین‌نامه ضروری است.
- ۳) برای TFPI، حداقل ضریب ظرفیت جابجایی (α) معادل ۱/۵۰ برای گروه‌های خطر I و II، ۱/۷۵ برای گروه خطر III و حتی بیشتر برای گروه خطر IV مورد نیاز است.
- ۴) جداگرهای FPS نیاز به ضریب α بالایی دارند که استفاده از آنها را برای بیشتر پروژه‌ها نامناسب می‌کند.
- ۵) جداگر TFPI به دلیل ویژگی‌های حرکت چند مرحله‌ای و سخت‌شوندگی، رفتار بهتری را در مقایسه با جداگرهای FPS از خود نشان می‌دهد.
- ۶) شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک منجر به درصد احتمال فروریزش بالاتر برای جداگرهای طراحی شده براساس ضوابط آیین‌نامه می‌شوند.
- ۷) شتاب‌نگاشت‌های میدان‌نزدیک به دلیل ویژگی‌های خاص و ضربه‌ای خود نیاز به ملاحظات ویژه‌ای در طراحی جداگرها دارند.
- ۸) تفاوت‌های احتمال فروریزش بین شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور و میدان‌نزدیک با افزایش مقادیر PGA به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.
- ۹) نادیده گرفتن حتی اثرات پیچش حداقل الزام شده در آیین‌نامه نیز منجر به کم‌برآورد قابل توجه احتمال فروریزش می‌شود.
- ۱۰) کم‌برآورد محاسبه احتمال فروریزش، به دلیل نادیده گرفتن اثرات پیچش حداقل، می‌تواند تا ۲۵٪ برای جداگرهای TFPI و ۹/۴٪ برای جداگرهای FPS زمانی که تحت شتاب‌نگاشت‌های میدان‌دور قرار می‌گیرند، باشد.

۸- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده

جداسازی لرزه‌ای به‌عنوان یک رویکرد تحول‌آفرین برای افزایش تاب‌آوری سازه‌ها در برابر نیروهای زلزله ظهور کرده است. با این حال، همان‌طور که در این مطالعه نشان داده شد، شکاف‌های قابل توجهی در ضوابط و روش‌های طراحی موجود در آیین‌نامه وجود دارد. بر اساس مشاهدات و محدودیت‌های شناسایی شده در این مقاله، پیشنهادات زیر برای هدایت مطالعات آینده ارائه می‌شود:

- (۱) گسترش دامنه سیستم‌های جداسازی و انواع سازه‌ها
- (۲) توسعه مدل‌های عددی پیشرفته‌تر برای در نظر گرفتن اثرات عمودی شتاب عمودی زمین و بار محوری
- (۳) بررسی دقیق رفتار و منحنی‌های شکنندگی برای شتاب‌نگاشت‌های میدان نزدیک
- (۴) در نظر گرفتن اثرات پیچش در مدل‌های سه‌بعدی
- (۵) ادغام فناوری‌های جداسازی تطبیق‌پذیر و هوشمند

مراجع

- [1] ASCE, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, in ASCE 7-22. 2022, American Society of Civil Engineers: VA, USA.
- [2] Aiken, I.D., et al. (1993). *Testing of passive energy dissipation systems*. Earthquake spectra, **9**(3): p. 335-370.
- [3] Kikuchi, M. and I.D. Aiken. (1997). *An analytical hysteresis model for elastomeric seismic isolation bearings*. Earthquake engineering & structural dynamics, **26**(2): p. 215-231.
- [4] Tajirian, F.F., J.M. Kelly, and I.D. Aiken. (1990). *Seismic isolation for advanced nuclear power stations*. Earthquake Spectra, **6**(2): p. 371-401.
- [5] Clark, P.W., I.D. Aiken, and J.M. Kelly, *Experimental studies of the ultimate behavior of seismically-isolated structures*. 1997: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- [6] Constantinou, M., A. Mokha, and A. Reinhorn. (1990). *Teflon Bearings in Base Isolation II: Modeling*. Journal of Structural Engineering, **116**(2): p. 455-474.
- [7] Kelly, J.M. (1990). *Base isolation: linear theory and design*. Earthquake spectra, **6**(2): p. 223-244.
- [8] Morgan, T.A. and S.A. Mahin. (2010). *Achieving reliable seismic performance enhancement using multi-stage friction pendulum isolators*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **39**(13).
- [9] Yang, T., D. Konstantinidis, and J.M. Kelly. (2010). *The influence of isolator hysteresis on equipment performance in seismic isolated buildings*. Earthquake Spectra, **26**(1): p. 275-293.
- [10] Shaikhzadeh, A.A. and A. Karamoddin. (2016). *Effectiveness of sliding isolators with variable curvature in near-fault ground motions*. The Structural Design of Tall and Special Buildings, **25**(6): p. 278-296.
- [11] Pourmasoud, M.M., et al. (2022). *Multi-Directional Base Isolation System for Coupled Horizontal and Vertical Seismic Excitations*. Journal of Earthquake Engineering, **26**(3): p. 1145-1170.
- [12] Shao, B. and S.A. Mahin. (2020). *A Probabilistic Design Method to Achieve Targeted Levels of Reliability for Seismically Isolated Structures*. Earthquake Spectra, **36**(2).

- [13] Kitayama, S. and M.C. Constantinou. (2018). *Collapse performance of seismically isolated buildings designed by the procedures of ASCE/SEI 7*. Engineering Structures, **164**.
- [14] Shao, B., S.A. Mahin, and V. Zayas. (2019). *Achieving targeted levels of reliability for low-rise seismically isolated structures*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, **125**.
- [15] Federal Emergency Management, A., *Quantification of Building Seismic Performance Factors*. 2009, Washington, D.C.
- [16] ASCE, *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures*. 2017, American Society of Civil Engineers.
- [17] Bao, Y. and T.C. Becker. (2018). *Effect of Design Methodology on Collapse of Friction Pendulum Isolated Moment-Resisting and Concentrically Braced Frames*. Journal of Structural Engineering, **144**(11).
- [18] Güneş, N. and Z.Ç. Ulucan. *Collapse probability of code-based design of a seismically isolated reinforced concrete building*. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [19] Masroor, A., M. Eeri, and G. Mosqueda, *Assessing the collapse probability of base isolated buildings considering pounding to moat walls*.
- [20] Erduran, E., N.D. Dao, and K.L. Ryan. (2011). *Comparative response assessment of minimally compliant low-rise conventional and base-isolated steel frames*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **40**(10).
- [21] Sayani, P.J., E. Erduran, and K.L. Ryan. (2011). *Comparative response assessment of minimally compliant low-rise base-isolated and conventional steel moment-resisting frame buildings*. Journal of Structural Engineering, **137**(10): p. 1118-1131.
- [22] Vamvatsikos, D. and C.A. Cornell. (2002). *Incremental dynamic analysis*. Earthquake engineering & structural dynamics, **31**(3): p. 491-514.
- [23] Narasimhan, S., et al. (2006). *Smart base-isolated benchmark building. Part I: problem definition*. Structural Control and Health Monitoring, **13**(2-3): p. 573-588.
- [24] Erkus, B. and E.A. Johnson. (2006). *Smart base-isolated benchmark building Part III: a sample controller for bilinear isolation*. Structural Control and Health Monitoring, **13**(2-3): p. 605-625.
- [25] Nagarajaiah, S. and S. Narasimhan. (2006). *Smart base-isolated benchmark building. Part II: phase I sample controllers for linear isolation systems*. Structural Control and Health Monitoring, **13**(2-3): p. 589-604.
- [26] Narasimhan, S., S. Nagarajaiah, and E.A. Johnson. (2008). *Smart base-isolated benchmark building part IV: Phase II sample controllers for nonlinear isolation systems*. Structural Control and Health Monitoring, **15**(5): p. 657-672.
- [27] Ancheta, T.D., et al., *PEER NGA-West2 Database, PEER Report 2013-03*. 2013, Pacific Earthquake Engineering Research Center: University of California, Berkeley, CA.
- [28] Becker, T.C., Y. Bao, and S.A. Mahin. (2017). *Extreme Behavior in a Triple Friction Pendulum Isolated Frame*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **46**(15).
- [29] Bhasker Rao, P. and R. Jangid. (2001). *Performance of sliding systems under near-fault motions*. Nuclear Engineering and Design, **203**(2): p. 259-272.
- [30] Fenz, D.M., *Development, Implementation and Verification of Dynamic Analysis Models for Multi-spherical Sliding Bearings*. 2008: ProQuest.
- [31] Fenz, D.M. and M.C. Constantinou. (2008). *Spherical sliding isolation bearings with adaptive behavior: Theory*. Earthquake engineering & structural dynamics, **37**(2): p. 163-183.
- [32] Fenz, D.M. and M.C. Constantinou. (2008). *Spherical Sliding Isolation Bearings with Adaptive Behavior: Experimental Verification*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **37**(2).

- [33] Lu, L.Y., et al. (2021). *Theory and Experimental Verification of a Double Sliding Isolator with Variable Curvature*. Engineering Structures, **238**.
- [34] Rahgozar, A., H.E. Estekanchi, and S.A. Mirfarhadi. (2023). *On optimal triple friction pendulum base-isolation design for steel moment-frame buildings employing value-based seismic design methodology*. Journal of Building Engineering, **63**: p. 105494.
- [35] McVitty, W.J. and M.C. Constantinou. (2015). *Property modification factors for seismic isolators: design guidance for buildings*. MCEER report, **242**.
- [36] Cardone, D., G. Perrone, and V. Plesco. (2019). *Developing collapse fragility curves for base-isolated buildings*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, **48**(1): p. 78-102.
- [37] Güneş, N. (2022). *Risk-targeted design of seismically isolated buildings*. Journal of Building Engineering, **46**: p. 103665-103665.