

ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند قاب-هسته بتن آرمه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور

مقاله پژوهشی

محمد مهدی غریب^۱، حسین پهلوان^{۲*}، علی کیهانی^۲، علی کوشا^۴

۱- دانشجوی ارشد زلزله، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

چکیده: با افزایش ساخت‌وساز ساختمان‌های بلند در مناطق نزدیک به گسل‌ها، شناخت دقیق اثر ویژگی‌های زلزله‌های حوزه نزدیک بر آسیب‌پذیری این سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. اگرچه مطالعات متعددی به ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند پرداخته‌اند، بررسی مقایسه‌ای رفتار شکنندگی ساختمان‌های بلند با سیستم قاب-هسته بتن آرمه تحت زلزله‌های حوزه نزدیک و دور کمتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف این پژوهش، ارزیابی احتمالاتی و مقایسه آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک ساختمان ۳۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن آرمه و دیوارهای برشی کوپله تحت این دو گروه از زلزله‌هاست. برای این منظور، یک مدل سه‌بعدی غیرخطی در نرم‌افزار Perform-3D توسعه داده شد و تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) با استفاده از دو مجموعه رکورد زلزله حوزه نزدیک و حوزه دور انجام گرفت. حداکثر نسبت دریافت بین طبقه‌های به‌عنوان پارامتر تقاضای مهندسی انتخاب و منحنی‌های شکنندگی برای چهار سطح آسیب شامل جزئی، متوسط، گسترده و کامل استخراج شد. نتایج نشان داد که پاسخ و شکنندگی سازه تحت دو گروه رکورد تفاوت قابل‌توجهی دارد. مقادیر میانه شکنندگی برای زلزله‌های حوزه دور در چهار سطح آسیب به ترتیب 0.045g، 0.185g، 0.7g و 2.1g و برای زلزله‌های حوزه نزدیک 0.03g، 0.12g، 0.55g و 1.1g به دست آمد. همچنین، در سطح آسیب کامل، میانه شکنندگی تحت زلزله‌های حوزه نزدیک حدود ۵۵ درصد کاهش یافت که بیانگر افزایش احتمال وقوع خرابی در این شرایط است. یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن ویژگی حوزه نزدیک را در ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بلند قاب-هسته بتن آرمه نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: ساختمانهای بلند، زلزله‌های حوزه نزدیک، زلزله‌های حوزه دور، منحنی شکنندگی لرزه‌ای، تحلیل دینامیکی افزاینده

Probabilistic Seismic Performance Assessment of Tall Reinforced Concrete Frame-Core Buildings Under Near- and Far-Field Earthquakes

M. Gharib H. Pahlavan A. Keyhani A. Koosha

Abstract: As the construction of tall buildings increasingly expands in regions close to seismic faults, accurately assessing the effects of near-field ground motions on their seismic vulnerability has become important. Although numerous studies have investigated the seismic fragility of tall buildings, comparative assessment of tall reinforced concrete frame-core buildings under near-field and far-field earthquakes remains limited, particularly across different damage states. This study aims to probabilistically evaluate and compare the seismic vulnerability of a 35-story reinforced concrete building with a moment-resisting frame and coupled shear walls subjected to near-field and far-field earthquake records. A three-dimensional nonlinear model was developed in Perform-3D, and Incremental Dynamic Analysis (IDA) was conducted using two sets of ground-motion records. The maximum inter-story drift ratio was adopted as the primary engineering demand parameter, and fragility curves were developed for four damage states: slight, moderate, extensive, and complete. The results revealed substantial differences in the seismic response and fragility of the building under the two record sets. The median fragility values for far-field earthquakes were 0.045g, 0.185g, 0.7g, and 2.1g for the four damage states, respectively, whereas the corresponding values for near-field earthquakes were 0.03g, 0.12g, 0.55g, and 1.1g. At the complete damage state, the median fragility under near-field earthquakes decreased by approximately 55%, indicating a substantially higher probability of failure. The findings highlight the importance of considering near-field effects in the probabilistic seismic performance assessment of tall reinforced concrete frame-core buildings.

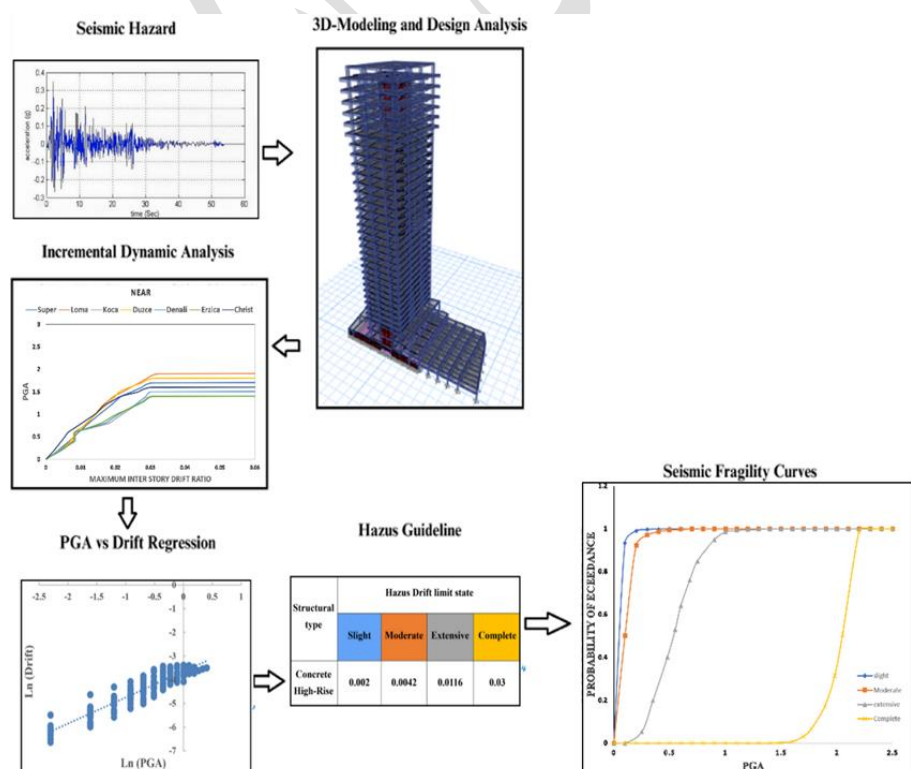
Keywords: High-rise buildings, Near-field earthquakes, Far-field earthquakes, Seismic fragility curves, Incremental dynamic analysis

با رشد روزافزون جمعیت در کلان‌شهرها و محدودیت فزاینده زمین، احداث ساختمان‌های بلندمرتبه به‌عنوان راهکاری کلیدی در مدیریت شهری مطرح شده است. ساختمان‌های بلند به دلیل جرم زیاد و ارتفاع قابل‌توجه، در برابر بارهای جانبی، به‌ویژه زلزله، رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. در میان سیستم‌های باربر جانبی، سیستم ترکیبی قاب محیطی و هسته مرکزی متشکل از دیوارهای برشی کوپله بتن‌آرمه به دلیل کارایی بالا در کنترل تغییر مکان‌های جانبی و تأمین سختی خمشی موردنیاز، جایگاه ویژه‌ای در مهندسی سازه دارد. در این سیستم، دیوارهای برشی که توسط تیرهای پیوند به یکدیگر متصل شده‌اند، با ایجاد مکانیزم کوپله، ممان‌های واژگونی را به نیروهای محوری کششی و فشاری در دیوارها منتقل کرده و در نتیجه، بازوی لنگر مقاوم سازه را افزایش می‌دهند. تیرهای کوپله در ساختمان‌های بلند بتن‌آرمه از اجزای اصلی سیستم مستهلک‌کننده انرژی محسوب می‌شوند. برخلاف سیستم‌های هیبریدی که از مقاطع فولادی مدفون استفاده می‌کنند، در سیستم‌های تمام‌بتنی، رفتار تیرهای پیوند به شدت تحت تأثیر جزئیات آرماتورگذاری، از جمله آرماتورهای قطری، و پدیده زوال بتن قرار دارد. عملکرد این تیرها باید به گونه‌ای باشد که پیش از وقوع آسیب جدی در دیوارهای برشی، با تشکیل مفاصل پلاستیک، بخش عمده‌ای از انرژی ورودی زلزله را جذب کنند. با این حال، کارایی این مکانیزم به شدت به ویژگی‌های جنبش زمین و محتوای فرکانسی زلزله وابسته است. یکی از چالش‌های جدی در تحلیل و طراحی ساختمان‌های بلند، در نظر گرفتن اثرات زلزله‌های حوزه نزدیک است. زلزله‌های حوزه نزدیک که معمولاً در فواصل کمتر از ۲۰ کیلومتری از گسل رخ می‌دهند، از نظر ویژگی‌های فیزیکی با زلزله‌های حوزه دور تفاوت‌های بنیادی دارند [۱]. این رکوردها اغلب حاوی پالس‌هایی با پریود بلند و دامنه زیاد در تاریخچه زمانی سرعت هستند که ناشی از پدیده جهت‌داری پیشرو (Forward Directivity) می‌باشند. این پالس‌ها انرژی قابل‌توجهی را در مدت‌زمان کوتاهی به سازه منتقل می‌کنند و می‌توانند موجب افزایش تقاضای جابه‌جایی در طبقات و تغییر در الگوی توزیع نیروهای داخلی شوند. در ساختمان‌های بلندمرتبه که دارای پریود طبیعی بالایی هستند، احتمال تداخل پریود سازه با پریود پالس زلزله (Resonance-like effect) وجود دارد که می‌تواند به ناپایداری‌های ناگهانی منجر شود. گانس و همکاران (۲۰۱۹) اثر حرکات زمین حوزه نزدیک با پالس‌های بزرگ، متوسط و کوچک را بر یک ساختمان بلندمرتبه دارای هسته دیوارهای برشی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نسبت مدت پالس به پریود اصلی سازه (T_p/T_1) نقش مهمی در کنترل پاسخ غیرخطی داشته و با تغییر مشخصات حرکت زمین، اثر مودهای بالاتر نیز افزایش می‌یابد. همچنین، ظرفیت خمشی هسته و توزیع نیروی برش پس از تشکیل پاسخ خمشی، تحت تأثیر نوع حرکت زمین به‌طور قابل‌توجهی تغییر می‌کند [۲]. ناکاتاک و همکاران (۲۰۱۶) با بررسی نمونه‌هایی از شهرهای توکیو، اوساکا و لس‌آنجلس نشان دادند که فعالیت‌های لرزه‌ای می‌تواند اثرات پریود بلندمدتی بر ساختمان‌های بلندمرتبه ایجاد کنند و ساختمان‌های مجهز به سیستم‌های پایش قادر به ثبت فرکانس‌های پایین قابل‌توجه هستند [۳]. ژونگ و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ارزیابی ساختمان‌های بلندمرتبه در نزدیکی گسل پرداختند؛ جایی که کمبود داده‌های ثبت‌شده از حرکات زمین قوی، یکی از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. برای رفع این محدودیت، از روش‌های شبیه‌سازی حرکت زمین پهن‌بند (BBP) برای تولید رکوردهایی با ویژگی‌های متناظر با محل وقوع زلزله‌های بزرگ استفاده کردند. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی‌های BBP می‌توانند مشکلات مربوط به شکل‌های غیرواقعی طیفی و تغییرات بیش‌ازحد محافظه‌کارانه در طیف پاسخ را برطرف کنند [۴]. ماهیلو و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی ویژگی‌های حرکات قوی زمین‌لرزه با فرض رفتار خطی مصالح و تغییر شکل‌های کوچک پرداختند. این مطالعه با تمرکز بر جنبه‌های اولیه حرکات زمین نزدیک گسل و تغییر شکل‌های سازه‌ای ناشی از آن، نقش چرخش‌های شدید زمین را بررسی کرد و نشان داد که در تحلیل و کنترل پاسخ سازه در برابر حرکات شدید زمین، در نظر گرفتن مؤلفه‌های چرخشی حرکت زمین و پاسخ سازه‌ای ضروری است [۵]. در مطالعه منیری (۲۰۱۷)، ویژگی‌های حرکات زمین نزدیک گسل و وجود پالس‌های با پریود بلند مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از

تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی (IDA) و نرم افزار OpenSees نشان داده شد که حرکات نزدیک منبع می توانند بخش عمده انرژی لرزه ای را در قالب یک پالس نسبتاً بلندمدت و یکپارچه و همراه با جابه جایی های دائمی زمین به سازه منتقل کنند [۶]. لین و همکاران (۲۰۱۴) پاسخ یک ساختمان بتن آرمه ۲۰ طبقه را تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی و با استفاده از مجموعه ای از حرکات زمین ثبت شده و شبیه سازی شده بررسی کردند. نتایج نشان داد که پاسخ سازه تحت حرکات زمین شبیه سازی شده و ثبت شده، در سطوح شدت پیش از وقوع فروپاشی، به طور کلی مشابه است؛ با این حال، با افزایش حساسیت ساختمان به اثرات مدت زمان حرکت زمین، اختلاف میان پاسخ های مشاهده شده، به ویژه در محدوده نزدیک به فروپاشی، افزایش می یابد [۷]. پوکرل و همکاران (۲۰۱۴) یک ساختمان نمونه ۴۰ طبقه با دیوارهای مرکزی بتن آرمه را به عنوان مطالعه موردی انتخاب کردند. تحلیل طیف پاسخ و تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی (NLRHA) به ترتیب برای مقایسه تقاضاهای الاستیک و غیرالاستیک سازه انجام شد. همچنین، دو روش انتخاب و مقیاس بندی حرکات زمین برای ساختمان های بلندمرتبه نزدیک گسل مقایسه شدند. نتایج نشان داد که روش (TBI (2010)، که مبتنی بر درک دقیق تری از خطرات لرزه ای نزدیک گسل است، در مقایسه با روش (ASCE 7 (2005)، تقاضای لرزه ای کمتری را برای این ساختمان ها به همراه دارد [۸]. جلال و همکاران (۲۰۰۷) تفاوت های حرکات زمین نزدیک گسل (NFE) و دور از گسل را بررسی کردند و نشان دادند که حرکات نزدیک گسل دارای سرعت زمین بالا و پالس های با پریود بلند هستند. همچنین، اثرات اندرکنش خاک-سازه (SSI) بر رفتار دینامیکی غیرخطی ساختمان های بلند بتن آرمه بررسی شد. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن SSI می تواند معیار مقیاس بندی حرکات زمین و شاخص های ارزیابی عملکرد لرزه ای را تغییر دهد [۹]. لی و همکاران (۲۰۱۹) زلزله ای با بزرگای $M_w=6.2$ را که در سال ۲۰۱۹ در سواحل شرقی تایوان رخ داد، مورد مطالعه قرار دادند. این زلزله با شدت غیرمعمول لرزش زمین در شمال تایوان همراه بود و مدل منبع آن با استفاده از شبیه سازی سه بعدی حرکت زمین مورد بررسی و تأیید قرار گرفت [۱۰]. انصاری و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر مؤلفه قائم زلزله بر پاسخ سازه ای ساختمان ها را بررسی کردند. نتایج نشان داد که حضور این مؤلفه می تواند موجب کاهش نیروی فشاری و افزایش نیاز برشی در ستون ها شود؛ به طوری که در شرایط بحرانی، کاهش نیروی فشاری تا ۸۴ درصد تحت حرکات زمین نزدیک گسل و افزایش ظرفیت برشی تا ۳۱ درصد مشاهده شد [۱۱]. کستلانی و همکاران (۲۰۱۸) تأثیر حرکات چرخشی ناشی از زلزله بر پاسخ ساختمان های بلندمرتبه را با تمرکز بر زلزله کرایست چرچ سال ۲۰۱۱ بررسی کردند. در این مطالعه، از رویکردهای نیمه تجربی و عددی برای مدل سازی حرکات چرخشی زمین و ارزیابی تأثیر آن ها بر ساختمان های بلندمرتبه استفاده شد [۱۲]. مهرآج وانی و همکاران (۲۰۲۳) اثرات زلزله با بزرگای $M_w=9.6$ در سال ۲۰۱۱ در سیکیم بر ساختمان های بتن آرمه را بررسی کردند. نتایج تحلیل های زمان-فرکانس نشان داد که خسارت گسترده به ساختمان های بتن آرمه عمدتاً ناشی از ساخت و سازهای غیرمهندسی و عدم رعایت الزامات آیین نامه های طراحی لرزه ای بوده است [۱۳]. چن و همکاران (۲۰۲۰) تأثیر حرکات زمین نزدیک گسل بر سازه های بتن آرمه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که پالس های ناشی از جهت داری پیشرو و گام های پرتابی می توانند موجب افزایش قابل توجه جابه جایی های گره ای و لنگرهای خمشی در بخش پایینی سازه شوند. همچنین، آسیب وارد شده به برج های ورودی تحت اثر تکان های شدید نزدیک گسل بیشتر گزارش شد. نتایج مقیاس بندی دامنه نیز نشان داد که پراکندگی پاسخ های لرزه ای کمتر بوده و معیار شدت IEPA برای مقیاس بندی حرکات نزدیک گسل، نسبت به PGA مناسب تر است [۱۴]. آمیکو و همکاران (۲۰۱۸) روش نیمه خودکار EBASCO را برای بازیابی حرکت تکتونیک ناشی از زلزله در نزدیکی منبع ارائه کردند. این روش برای بازسازی میدان جابه جایی زمین ناشی از زلزله ۳۰ اکتبر ۲۰۱۶ در مرکز ایتالیا به کار گرفته شد و نتایج آن با داده های ژئوتکنیکی، داده های سنجش از دور، شبیه سازی های حرکت زمین و مدل های تجربی موجود مقایسه گردید. نتایج نشان داد که EBASCO قادر است محتوای پریود بلند را در ثبت های حرکات قوی حفظ کرده و به عنوان شاخصی معتبر برای برآورد بیشینه جابه جایی زمین مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]. لو و همکاران (۲۰۲۰) حرکات زمین شبه پالسی در نزدیکی گسل را که می توانند موجب آسیب شدید به سازه های بزرگ شوند، بررسی کردند. نتایج نشان داد که ناهمواری های

لغزش در بخش شمالی صفحه گسل نقش مهم‌تری در ایجاد پالس‌های سرعت بزرگ دارند. همچنین، تفاوت پیک‌های حرکت زمین در دو سوی گسل نشان داد که مؤلفه عمودی گسل نسبت به مؤلفه افقی آن حساسیت بیشتری به زاویه شیب گسل دارد. تأثیر بزرگای مختلف زلزله بر پیک و توزیع پالس‌های سرعت نیز بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی‌ها به درک بهتر سازوکار شکل‌گیری این پالس‌ها کمک کرد [۱۶]. مطالعات گسترده‌ای به ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های بتن‌آرمه کوتاه‌مرتبه و میان‌مرتبه اختصاص یافته‌اند و از طریق توسعه منحنی‌های شکنندگی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای این سازه‌ها را به‌صورت کمی ارزیابی کرده‌اند [۱۷]–[۲۶]. در سال‌های اخیر، این رویکرد به ساختمان‌های بتن‌آرمه بلندمرتبه نیز گسترش یافته و مطالعات متعددی به ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای و آسیب‌پذیری این سازه‌ها پرداخته‌اند [۲۷]–[۳۷].

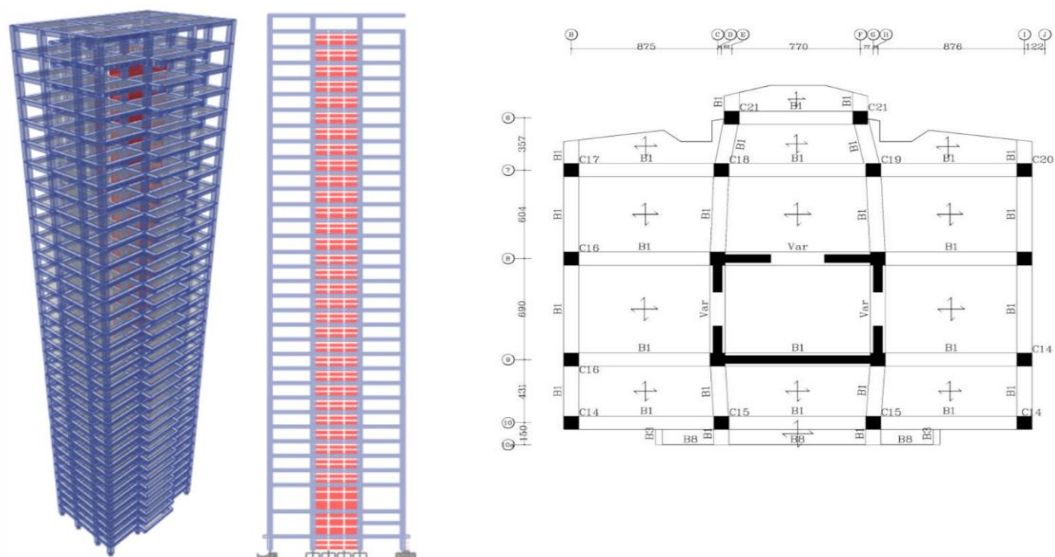
با وجود مطالعات گسترده در زمینه ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای ساختمان‌های بلند، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های پیشین بر بررسی کلی عملکرد این سازه‌ها متمرکز بوده و مقایسه نظام‌مند اثر رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور بر شکنندگی ساختمان‌های بلند با سیستم قاب-هسته بتن‌آرمه، به‌ویژه در سطوح مختلف آسیب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، خلأ موجود در شناخت میزان تغییرپذیری شکنندگی چنین سازه‌هایی در مواجهه با ویژگی‌های متفاوت حرکات زمین، همچنان نیازمند بررسی دقیق‌تر است. در این پژوهش، با هدف پر کردن این خلأ، آسیب‌پذیری لرزه‌ای یک ساختمان ۳۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه و دیوارهای برشی کوپله، تحت دو گروه رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور به‌صورت احتمالاتی ارزیابی و مقایسه می‌شود. برای این منظور، یک مدل سه‌بعدی غیرخطی در نرم‌افزار Perform-3D توسعه یافته و با بهره‌گیری از تحلیل دینامیکی افزایشی، منحنی‌های شکنندگی برای چهار سطح آسیب بر اساس حداکثر نسبت دریافت بین طبقه‌ای استخراج می‌شوند. نوآوری اصلی این پژوهش، ارائه یک ارزیابی مقایسه‌ای و کمی از اثر حوزه نزدیک و حوزه دور بر شکنندگی لرزه‌ای یک ساختمان بلند قاب-هسته بتن‌آرمه و تعیین میزان تغییر میانه شکنندگی در سطوح مختلف آسیب است. نتایج این مطالعه می‌تواند درک دقیق‌تری از حساسیت ساختمان‌های بلند قاب-هسته به ویژگی‌های حوزه نزدیک فراهم کرده و مبنایی برای ارزیابی واقع‌بینانه‌تر عملکرد لرزه‌ای این سازه‌ها در مناطق نزدیک گسل باشد. خلاصه‌ای از روش‌شناسی پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. فلوچارت مراحل انجام کار

۲. مشخصات سازه مورد بررسی

در این پژوهش، یک ساختمان بلندمرتبه بتن‌آرمه موجود با ارتفاع ۲۱۲ متر و دارای ۳۵ طبقه در شهر بابلسر، استان مازندران، به‌عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شد. این منطقه بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران در محدوده با خطر نسبی زیاد قرار دارد و خاک محل از نوع III در نظر گرفته شد. سیستم باربر جانبی سازه از نوع دوگانه، شامل قاب‌های خمشی بتن‌آرمه و دیوارهای برشی ویژه، است. طراحی اولیه سازه بر اساس الزامات مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران [۳۸] و استاندارد ۲۸۰۰ [۳۹] ایران انجام شد. در طراحی لرزه‌ای، ضریب اهمیت ساختمان ($I=1$)، ضریب رفتار ($R=7.5$)، شتاب مبنای طرح ($A=0.3g$) و سرعت موج برشی خاک ($V_s = 175-375 \text{ m/s}$) در نظر گرفته شدند. مقاومت فشاری بتن برای تیرها، ستون‌ها و دیوارهای برشی برابر 400 kg/cm^2 در نظر گرفته شد. آرماتورهای طولی از نوع AIII با تنش تسلیم 4200 kg/cm^2 و آرماتورهای عرضی از نوع AII با تنش تسلیم 3400 kg/cm^2 انتخاب شدند. مشخصات هندسی و جزئیات آرماتورگذاری اعضای سازه‌ای، شامل ابعاد مقاطع و آرماتورهای طولی تیرها و ستون‌ها و ضخامت دیوارهای برشی، مطابق طراحی اولیه سازه در مدل عددی لحاظ شده و در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، ابعاد هندسی تیرهای کوپله در جدول ۲ ارائه شده‌اند. پلان دیوار برشی در ۱۰ طبقه نخست و جزئیات آرماتورگذاری آن نیز به‌عنوان نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است. سقف طبقات به‌صورت دال دوطرفه مدل‌سازی و دیافراگم کف صلب فرض شد. پای ستون‌ها و دیوارهای برشی به‌صورت گیردار و اتصالات تیر به ستون و تیر به دیوار نیز به‌صورت گیردار در نظر گرفته شدند. بارهای ثقلی مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران [۴۰] اعمال شدند. پلان، نمای سه‌بعدی و برش مدل مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده‌اند و تأثیر بالقوه اندرکنش خاک و سازه (SSI) بر پاسخ مود بنیادی با استفاده از معیار پیشنهادی (TBI (2017) [۴۱] ارزیابی شد که به‌صورت رابطه $(\frac{h}{V_s T})$ تعریف می‌شود. در این رابطه، h تقریباً معادل دو سوم ارتفاع کل سازه، V_s سرعت موج برشی مؤثر خاک و T دوره تناوب بنیادی سازه با پایه ثابت است. از آنجا که مقدار این نسبت بدون‌بعد برای تمامی سازه‌های مورد بررسی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از ۰,۱ به دست آمد، مدل‌سازی صریح اندرکنش خاک و سازه ضروری تشخیص داده نشد و از این‌رو در تحلیل حاضر لحاظ نگردید.



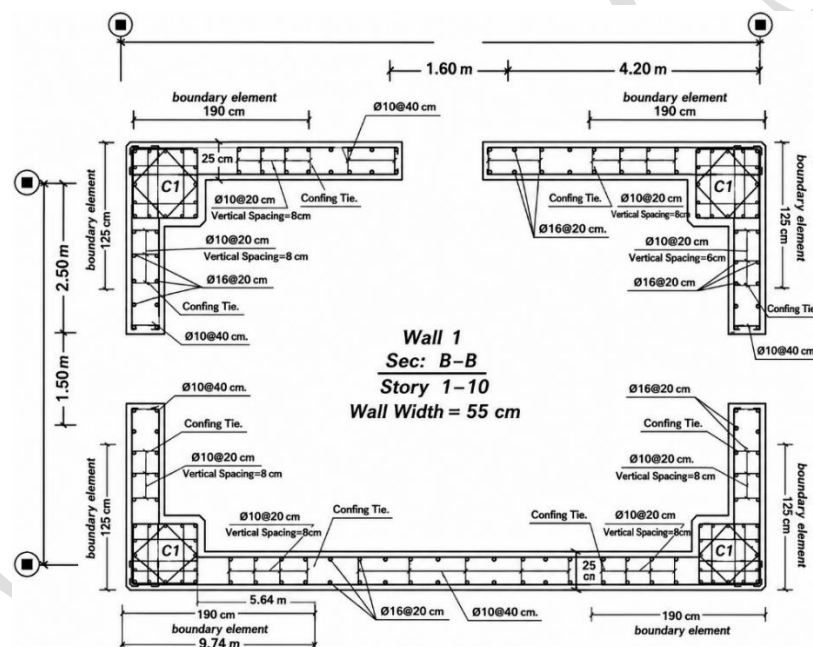
شکل ۲. چیدمان سازه

جدول ۱. مشخصات سازه ای ساختمان

Stories	Column dimension (cm)	Column rebar	Shear wall thickness (cm)	Beam dimensions width × height (cm)	Beam rebar	
					Top	Bottom
1-10	100	56φ25	55	90 × 70	8φ25	7φ25
11-15	90	48φ25	50	80 × 70	8φ25	7φ25
16-20	90	40φ25	40	70 × 70	7φ25	6φ25
21-25	80	32φ25	30	70 × 60	6φ25	5φ25
26-34	80	24φ25	20	60 × 60	5φ25	4φ25

جدول ۲. ابعاد تیرهای کوپله

story	Spandrel Lable	Section
1	SP1	55*110
3-4	SP2	55*300
5-20	SP3	55*104
21-25	SP4	50*130
26-28	SP5	40*130
29-30	SP6	30*130
31-34	SP7	20*130



شکل ۳. پلان دیوار برشی در ۱۰ طبقه نخست و جزئیات آرماتورگذاری آن

۳. مدل سازی غیرخطی مصالح و اجزای سازه ای در نرم افزار Perform-3D

برای شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح، رفتار فشاری بتن محصور و غیرمحصور بر اساس مدل تنش-کرنش مندر و همکاران (۱۹۸۸) [۴۲] تعریف شد. این مدل با در نظر گرفتن اثر محصورشدگی ناشی از آرماتورهای عرضی، افزایش مقاومت فشاری و ظرفیت کرنشی بتن محصور را نسبت به بتن غیرمحصور لحاظ می کند. مقاومت فشاری مشخصه بتن برابر با 400 kg/cm^2 در نظر گرفته شد. پارامترهای اصلی مدل، شامل ضریب اثربخشی محصورشدگی، نسبت حجمی آرماتورهای عرضی و تنش تسلیم آرماتورهای عرضی، در تعیین مقاومت و ظرفیت کرنشی بتن محصور لحاظ شدند. منحنی های تنش-کرنش بتن محصور و غیرمحصور حاصل از این مدل در شکل ۴ ارائه شده اند. رابطه تنش-کرنش بتن محصور بر اساس مدل مندر و همکاران [۴۲] به صورت رابطه (۱) بیان می شود:

$$f_c \varepsilon_c = \frac{cf'_{cc} \cdot \varepsilon}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^r + \varepsilon_{cc} + 1} \quad (1)$$

که در آن f_c تنش فشاری بتن، f'_{cc} مقاومت فشاری بیشینه بتن محصور، ε_c کرنش فشاری بتن، ε_{cc} کرنش متناظر با مقاومت فشاری بیشینه، و r پارامتر شکل منحنی تنش-کرنش است.

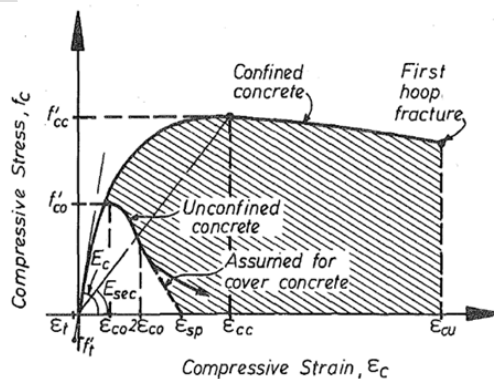
مقاومت فشاری بتن محصور و کرنش متناظر با آن با در نظر گرفتن فشار جانبی ناشی از آرماتورهای عرضی تعیین می‌شوند. فشار محصورشدگی مؤثر به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$f_l = f_{yh} \cdot \rho_s \cdot k_e \quad (2)$$

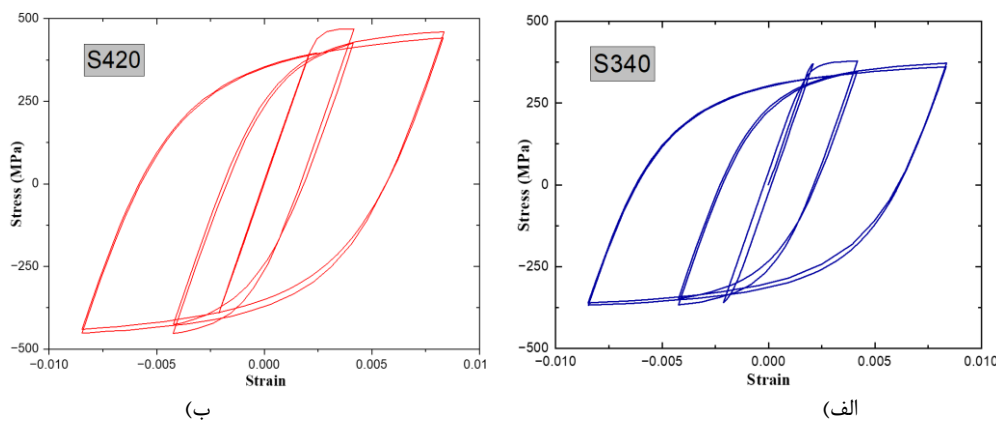
که در آن f_l فشار محصورشدگی مؤثر، k_e ضریب اثربخشی محصورشدگی، ρ_s نسبت حجمی آرماتورهای عرضی و f_{yh} تنش تسلیم آرماتورهای عرضی است. بدین ترتیب، اثر مقدار و آرایش آرماتورهای عرضی بر افزایش مقاومت و شکل‌پذیری بتن در مدل مصالح لحاظ شد. رفتار کششی بتن نیز با استفاده از روابط ترک‌خوردگی و سخت‌شوندگی کششی (Tension Stiffening) موجود در Perform-3D لحاظ شد.

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی و چرخه‌ای آرماتورهای فولادی، از مدل منگوتو-پینتو [۴۳] استفاده شد. این مدل با تعریف انتقال تدریجی بین شاخه الاستیک و پلاستیک، رفتار هیستریزیسی فولاد تحت بارگذاری چرخه‌ای، سخت‌شوندگی و تغییرات سختی و مقاومت ناشی از بارگذاری معکوس را مطابق با شکل ۵ بازنمایی می‌کند.

تیرها، ستون‌ها با المان‌های فایبر مدل‌سازی شدند تا توزیع تنش و کرنش در مقطع و همچنین گسترش رفتار غیرالاستیک در طول اعضا در تحلیل لحاظ شود. این رویکرد امکان شبیه‌سازی مستقیم تسلیم خمشی و انتشار نواحی غیرالاستیک در طول اعضا را فراهم می‌کند. دیوارهای برشی به صورت فایبر مدل‌سازی شدند تا رفتار خمشی و توزیع غیرخطی مصالح در طول دیوارها به طور مناسب در تحلیل لحاظ شود. با توجه به نسبت دهانه به عمق کم و رفتار غالباً برشی تیرهای کوپله، این اعضا با استفاده از مفصل‌های برشی غیرخطی متمرکز در ناحیه میانی دهانه مدل شدند. مشخصات این مفصل به گونه‌ای تعریف شد که تسلیم برشی، رفتار پس از تسلیم، کاهش سختی تحت بارگذاری چرخه‌ای و اتلاف انرژی تیرهای کوپله را بازنمایی کند [۴۴]. بنابراین، در مدل‌سازی تیرها، ستون‌ها و دیوارهای برشی از رویکرد پلاستیسیته توزیع شده استفاده شده، در حالی که رفتار غیرخطی برشی تیرهای کوپله با مفصل برشی متمرکز شبیه‌سازی شده است. در تمامی تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی، اثر P-Delta لحاظ شد. همچنین، نسبت میرایی یکنواخت ۲٫۵ درصد با استفاده از میرایی رایلی اعمال گردید. حل غیرخطی بر مبنای فرآیند تکراری تعادل انجام شد و کنترل گام زمانی برای حفظ همگرایی و پایداری عددی تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۴. منحنی‌های تنش-کرنش برای بتن محصور شده و محصور نشده، مطابق با مدل مندر و همکاران [۴۲]

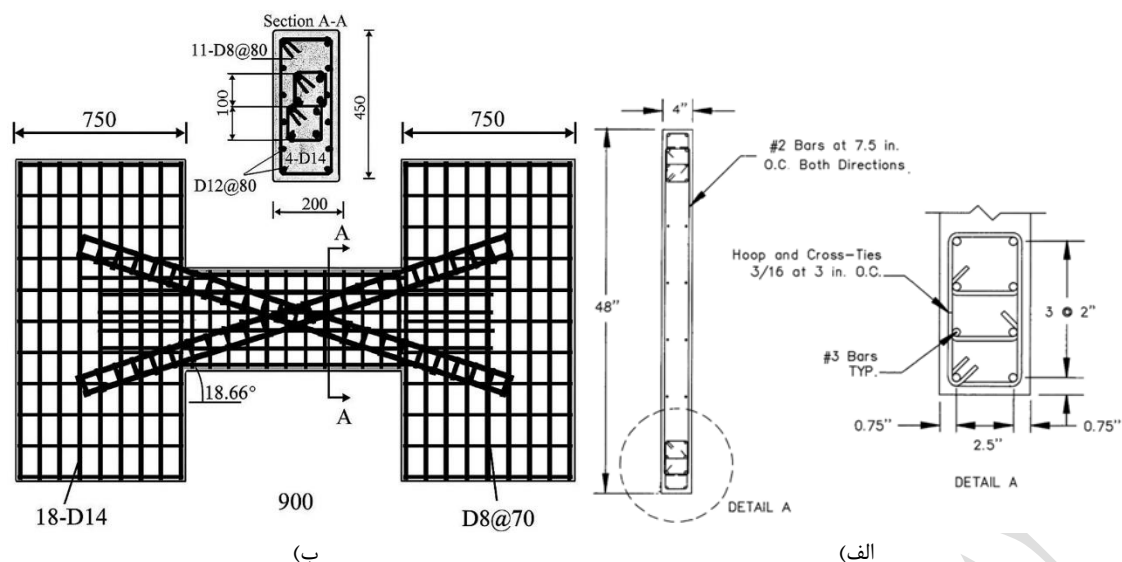


شکل ۵. مدل رفتاری منگوتو-پینتو مورد استفاده در این پژوهش: (الف) آرماتورهای عرضی و (ب) آرماتورهای طولی [۴۳]

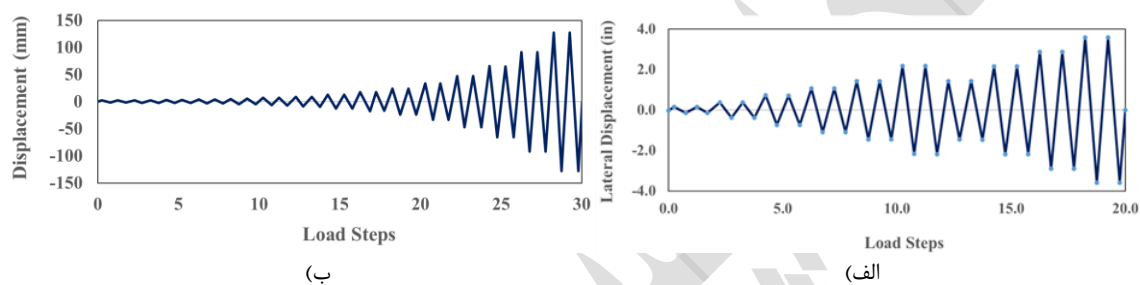
۴. صحت سنجی

به منظور ارزیابی قابلیت اطمینان روش مدل سازی عددی مورد استفاده در این پژوهش، یک نمونه آزمایشگاهی دیواربرشی بتن آرمه که پیش تر توسط والاس و همکاران [۴۴] مورد مطالعه قرار گرفته بود، به عنوان نمونه مرجع در نرم افزار-Perform 3D مدل سازی و تحلیل شد. هدف از این صحت سنجی، ارزیابی توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار غیرخطی و چرخه های دیوارهای برشی بتن آرمه تحت بارگذاری لرزه ای بود. نمونه آزمایشگاهی دارای المان های مرزی محصور شده و جزئیات آرماتورگذاری لرزه ای بود که با مشخصات سازه های مورد مطالعه در این پژوهش سازگاری داشت. هندسه و ابعاد کلی دیوار در شکل ۶ (الف) نشان داده شده است. نمونه تحت بار محوری ثابت و بارگذاری جانبی چرخه ای قرار گرفت که پروتکل آن با هدف شبیه سازی تقاضای لرزه ای مطابق شکل ۷ (الف) اعمال شد. مقاومت فشاری مشخصه بتن برابر 4 ksi و تنش تسلیم آرماتورهای فولادی برابر 60 ksi بود. ارتفاع، عرض و ضخامت دیوار به ترتیب ۱۴۴، ۴۸ و ۲٫۵ اینچ در نظر گرفته شد. نتایج عددی و آزمایشگاهی در قالب منحنی های هیستریزس در شکل ۸ (الف) مقایسه شده اند. تطابق مناسب پاسخ عددی و آزمایشگاهی از نظر مقاومت، ظرفیت تغییر شکل و رفتار چرخه ای در هر دو جهت بارگذاری، قابلیت مدل عددی در شبیه سازی پاسخ غیرخطی دیوارهای برشی بتن آرمه را تأیید می کند.

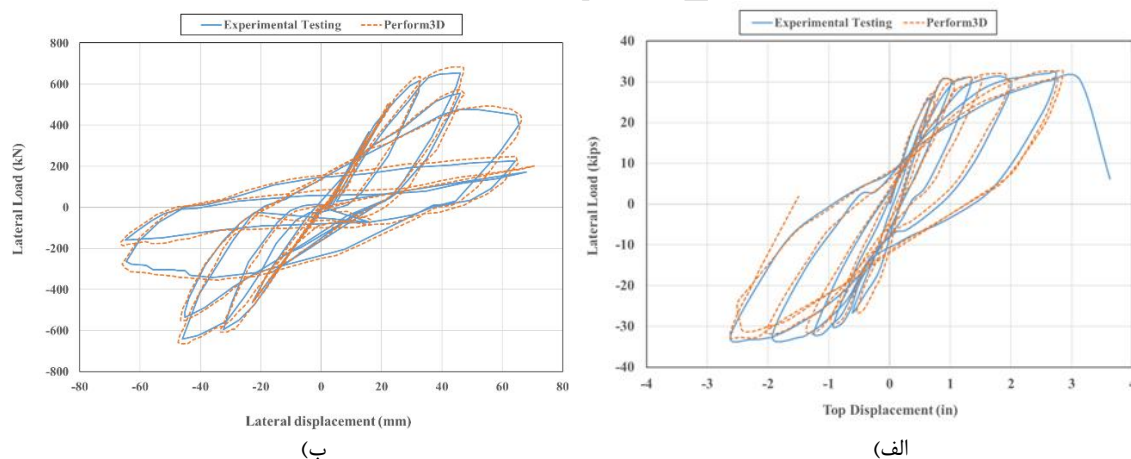
به منظور تکمیل فرآیند صحت سنجی و ارزیابی قابلیت مدل سازی اعضای کوپله، یک تیر کوپله بتن آرمه با آرماتورگذاری قطری که به صورت آزمایشگاهی توسط سزلی و همکاران [۴۵] بررسی شده بود، نیز در Perform-3D مدل سازی شد. هدف از این بخش، ارزیابی توانایی مدل عددی در بازتولید رفتار چرخه ای، مقاومت برشی و ظرفیت تغییر شکل تیرهای کوپله تحت بارگذاری رفت و برگشتی بود. نمونه مورد نظر با مقیاس نصف، تحت بارگذاری شبه استاتیکی چرخه ای معکوس و فشار محوری ثابت قرار داشت. مقاومت فشاری مشخصه بتن برابر 30 MPa و تنش تسلیم آرماتورهای فولادی برابر 420 MPa بود. هندسه و آرایش آرماتورهای نمونه در شکل ۶ (ب) و پروتکل بارگذاری چرخه ای در شکل ۷ (ب) ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل عددی با پاسخ هیستریزسی آزمایشگاهی در شکل ۸ (ب) مقایسه شده اند. تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی از نظر مقاومت برشی، ظرفیت تغییر شکل و رفتار چرخه ای، قابلیت مدل سازی عددی تیرهای کوپله در بازتولید پاسخ غیرخطی این اعضا را تأیید می کند.



شکل ۶. هندسه و آرایش آرماتورگذاری نمونه‌های مورد استفاده برای صحت‌سنجی: (الف) دیوار برشی بتن‌آرمه [۴۴]؛ (ب) تیر کوپله بتن‌آرمه با آرماتورگذاری قطری [۴۵]



شکل ۷. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای به کاررفته در برنامه آزمایشگاهی: (الف) دیوار برشی [۴۴]؛ (ب) تیر کوپله [۴۵]



شکل ۸. مقایسه منحنی‌های هیستریزس آزمایشگاهی و عددی: (الف) دیوار برشی [۴۴]؛ (ب) تیر کوپله [۴۵]

مقادیر زمان تناوب سازه در دو مدل ساخته‌شده در نرم‌افزارهای ETABS و Perform-3D مورد مقایسه قرار گرفته است، چراکه زمان تناوب سازه یکی از پارامترهای اساسی و وابسته به ویژگی‌های کلی مدل‌سازی و سختی سازه به شمار می‌رود. مقادیر زمان تناوب‌های استخراج‌شده در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اختلاف بسیار ناچیز میان زمان تناوب‌های دو مدل نشان‌دهنده تطابق مناسب و همخوانی قابل قبول مدل‌های سازه در هر دو نرم‌افزار است. بر این اساس، می‌توان نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام‌شده را معتبر و قابل اتکا دانست.

جدول ۳. مقادیر زمان تناوب سازه استخراج شده در نرم افزار Etabs و Perform-3D

Mode No.	Etabs	Perform3D
	Period (sec)	Period (sec)
1	3.988	3.999
2	3.804	3.835
3	1.905	2.135
4	0.916	0.988
5	0.906	0.956
6	0.592	0.629
7	0.469	0.527
8	0.414	0.442
9	0.319	0.355
10	0.293	0.303
11	0.263	0.248
12	0.238	0.261
13	0.213	0.225
14	0.201	0.216
15	0.188	0.201
16	0.172	0.181
17	0.166	0.178
18	0.156	0.163
19	0.140	0.148
20	0.135	0.145

۵. ویژگی های رکورد زلزله

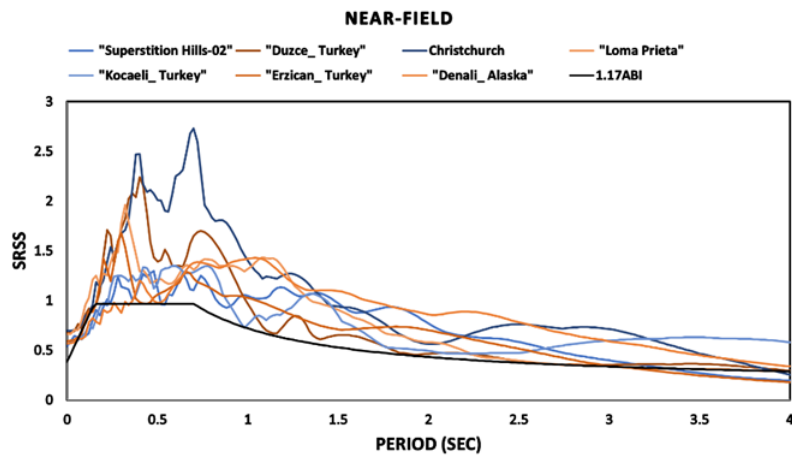
در تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA)، انتخاب و طبقه‌بندی شتاب‌نگاشت‌ها نقشی تعیین‌کننده در دقت و قابلیت اعتماد نتایج ایفا می‌کند. در این پژوهش، ۱۴ رکورد زلزله پیشنهادی FEMA P-695 [۴۶] انتخاب شدند که از نظر ویژگی‌های ساختگاهی و لرزه‌ای با شرایط ساختگاه مورد مطالعه سازگاری داشتند. مطابق الزامات ASCE 7-22 [۴۷] انتخاب رکوردها بر اساس سازگاری با شرایط ساختگاه از نظر بزرگای زلزله، نوع خاک، فاصله منبع تا ساختگاه و سازوکار گسلش انجام شد. همچنین، ویژگی‌های محتوای فرکانسی و وجود مؤلفه‌های پالس‌گونه در رکوردهای حوزه نزدیک مورد بررسی قرار گرفت. رکوردهای منتخب به دو گروه حوزه نزدیک و حوزه دور تقسیم شدند و مشخصات لرزه‌ای و فاصله آن‌ها از گسل در انتخاب و طبقه‌بندی رکوردها مورد توجه قرار گرفت. رکوردهای حوزه نزدیک شامل شتاب‌نگاشت‌هایی با فاصله کمتر از ۱۰ کیلومتر از گسیختگی گسل و رکوردهای حوزه دور شامل شتاب‌نگاشت‌هایی با فاصله ۱۰ کیلومتر و بیشتر از گسیختگی گسل در نظر گرفته شدند. به‌منظور انجام تحلیل IDA، رکوردهای منتخب بر اساس شتاب بیشینه زمین (PGA) مقیاس شدند. مقیاس کردن رکوردها با افزایش‌های 0.1، از 0.1 g تا 2.5 g، انجام شد تا پاسخ سازه در دامنه‌ای پیوسته از شدت‌های لرزه‌ای، از رفتار خطی تا سطوح شدید غیرخطی و نزدیک به فروپاشی، مورد ارزیابی قرار گیرد. تمامی شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal پردازش شدند. همچنین، طیف دامنه فوری و ویژگی‌های محتوای فرکانسی رکوردها مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات کامل رکوردهای منتخب، شامل بزرگا، فاصله از گسل، سازوکار گسلش، نوع ساختگاه و سایر مشخصات لرزه‌ای، در جداول (۵) و (۶) ارائه شده و طیف پاسخ متناظر آن‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۴. زلزله های دور از گسل انتخاب شده در این مطالعه

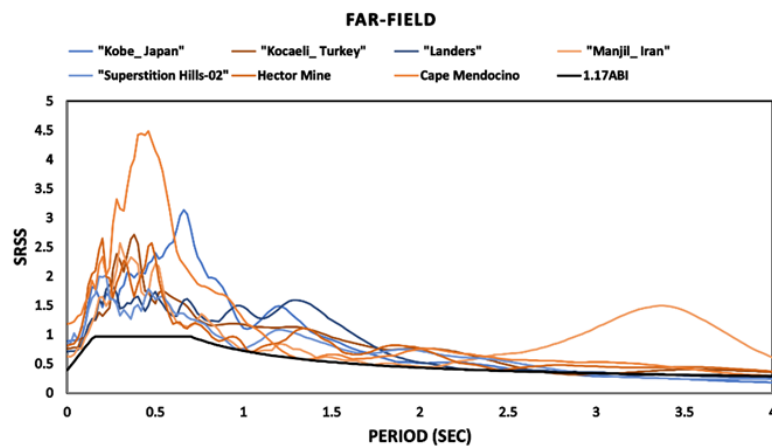
Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Mechanism	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/sec)	Lowest Useable Frequency (Hz)	PGA	PGV	T_g
"Kobe_ Japan"	1995	"Shin-Osaka"	6.9	strike slip	19.14	19.15	256	0.125	0.23	31.33	0.38
"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.51	strike slip	13.6	15.37	281.86	0.1	0.36	58.87	0.38
"Landers"	1992	"Yermo Fire Station"	7.28	strike slip	23.62	23.62	353.63	0.07	0.	51.12	0.68
"Manjil_ Iran"	1990	"Abbar"	7.37	strike slip	75.58	75.58	302.64	0.25	0.21	20.71	0.3
"Superstition Hills- 02"	1987	"El Centro Imp. Co. Cent"	6.54	strike slip	18.2	18.2	192.05	0.0875	0.36	48.08	0.46
Hector Mine	1999	Hector	7.13	strike slip	61.2	61.2	370.08	0.08	0.077	7.76	0.46
Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass	7.01	Reverse	16.54	20.41	355.18	0.0625	0.33	38.05	0.48

جدول ۵. زلزله های نزدیک گسل انتخاب شده در این مطالعه

Earthquake Name	Year	Station Name	Magnitude	Mechanism	R_{jb} (km)	R_{rup} (km)	V_{s30} (m/sec)	Lowest Useable Frequency (Hz)	PGA	PGV	T_g
"Superstition Hills- 02"	1987	"Parachute Test Site"	6.54	strike slip	0.95	0.95	348.69	0.15	0.43	134.29	0.64
"Duzce_ Turkey"	1999	"Duzce"	7.14	strike slip	0	6.58	281.86	0.1	0.51	84.23	0.79
"Christchurch_ New Zealand"	2011	"Papanui High School "	6.2	Reverse Oblique	9.05	9.06	263.2	0.05	0.21	48.74	0.7
"Loma Prieta"	1989	"Saratoga - W Valley Coll."	6.93	Reverse Oblique	8.48	9.31	347.9	0.125	0.33	46.91	0.82
"Kocaeli_ Turkey"	1999	"Yarimca"	7.51	strike slip	1.38	4.83	297	0.0875	0.32	71.89	0.52
"Erzican_ Turkey"	1992	"Erzican"	6.69	strike slip	0	4.38	352.05	0.125	0.5	107.14	0.96
"Denali_ Alaska"	2002	"TAPS Pump Station #10"	7.9	strike slip	0.18	2.74	329.4	0.13	0.33	115.72	1.1



(الف)



(ب)

شکل ۹. طیف پاسخ رکوردهای لرزه‌ای منتخب در دو دسته: (الف) حوزه نزدیک به گسل و (ب) حوزه دور از گسل

۶. سطوح آسیب

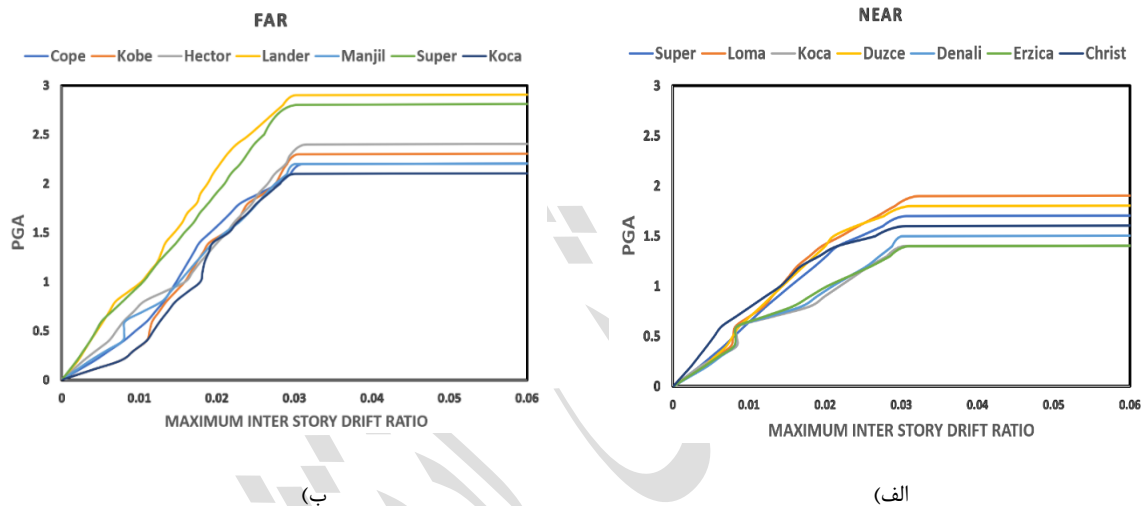
میزان آسیب دیدگی سازه، از دستورالعمل HAZUS-MH MR-5 [۴۸] استفاده شده است. این استاندارد، چهار سطح آسیب مجزا شامل: خرابی ناچیز، متوسط، گسترده و کامل را تبیین می‌نماید. مقادیر بیشینه دریافت بین طبقه‌ای متناظر با هر یک از این سطوح عملکردی، که به طور اختصاصی برای سازه‌های بتن‌آرمه با شکل‌پذیری ویژه تدوین شده است، در جدول (۶) ارائه گردیده است.

جدول ۶. حدود دریافت متناظر با سطوح آسیب سازه‌های بتن‌آرمه ویژه بر اساس HAZUS-MH MR-5 [۴۸]

نوع سازه	دریافت در آستانه خرابی			
	خرابی ناچیز	خرابی متوسط	خرابی زیاد	خرابی کامل
کوتاه	۰/۰۰۴	۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۳۲	۰/۰۶
متوسط	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۵۶	۰/۰۱۵۴	۰/۰۴
بلند	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴۲	۰/۰۱۱۶	۰/۰۳

۷. تحلیل دینامیکی افزایشی

پس از مدل سازی ساختمان ۳۵ طبقه در نرم افزار Perform-3D و اعمال رکوردهای منتخب، تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) به منظور ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه انجام شد. در این روش، رکوردهای لرزه‌ای با گام‌های افزایشی 0.1g تا حداکثر شدت 2.5g مقیاس شدند و پاسخ سازه تحت هر دو گروه رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور مورد ارزیابی قرار گرفت. در هر سطح شدت، پاسخ غیرخطی سازه استخراج و بر اساس نتایج حاصل، منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تعیین شدند. همان گونه که در منحنی‌های IDA ارائه شده در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، گذار رفتار سازه از محدوده الاستیک به ناحیه غیرخطی به وضوح قابل تشخیص است. نتایج نشان می‌دهد که دریافت بین طبقه‌ای تحت رکوردهای حوزه نزدیک به طور قابل توجهی بیشتر از رکوردهای حوزه دور است. همچنین، سازه تحت حرکات حوزه نزدیک در سطوح پایین تری از PGA به آستانه فروپاشی کلی (Global Collapse) می‌رسد. این رفتار بیانگر حساسیت بیشتر ساختمان بلندمرتبه مورد مطالعه به ویژگی‌های پالسی و پریود بلند حرکات زمین حوزه نزدیک و در نتیجه، افزایش آسیب پذیری لرزه‌ای آن تحت این نوع تحریکات است.



شکل ۱۰. تحلیل دینامیکی افزایشی در زلزله‌های الف (نزدیک و ب) دور از گسل

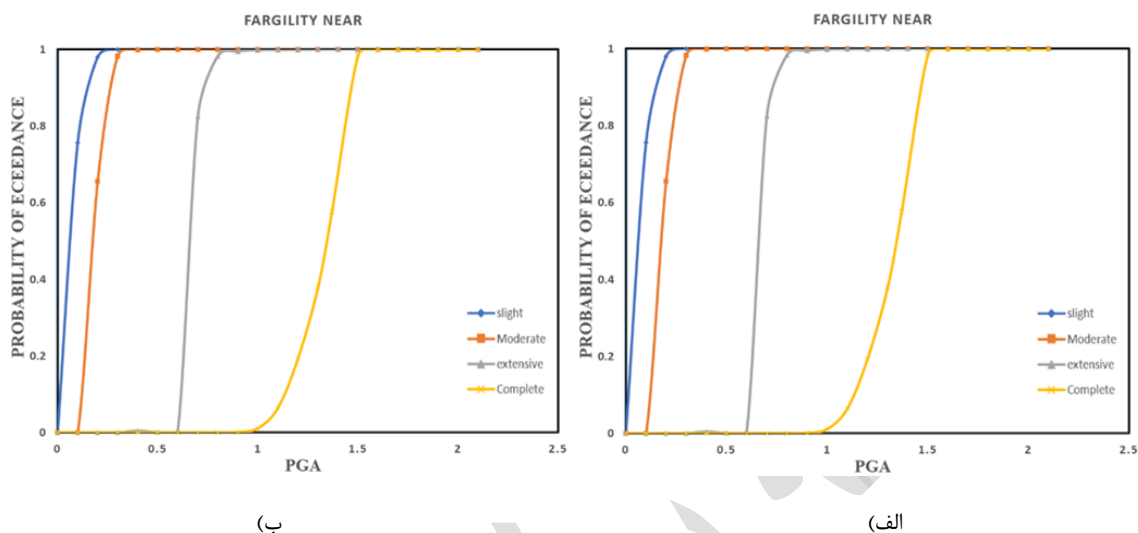
۸. منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای

منحنی‌های شکست، ابزاری قدرتمند و احتمالاتی جهت ارزیابی آسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌ها فراهم می‌کنند که در آن احتمال فراگذشت از سطوح آسیب مشخص، به صورت تابعی از پارامتر شدت زلزله بیان می‌شود. در این پژوهش، منحنی‌های مذکور بر اساس پارامترهای تقاضای مهندسی (EDP) استخراج شده از تحلیل‌های IDA و با فرض توزیع لگ نرمال توسعه یافته‌اند. با توجه به اینکه ظرفیت سازه و تقاضای لرزه‌ای از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند، طبق قضیه حد مرکزی، نسبت آن‌ها (که بیانگر احتمال شکست است) از توزیع لگ نرمال پیروی خواهد کرد که در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$p(c \leq D) = \Phi \left(\frac{\ln \left(\frac{S_d}{S_c} \right)}{\beta_{Sd}} \right) \quad (3)$$

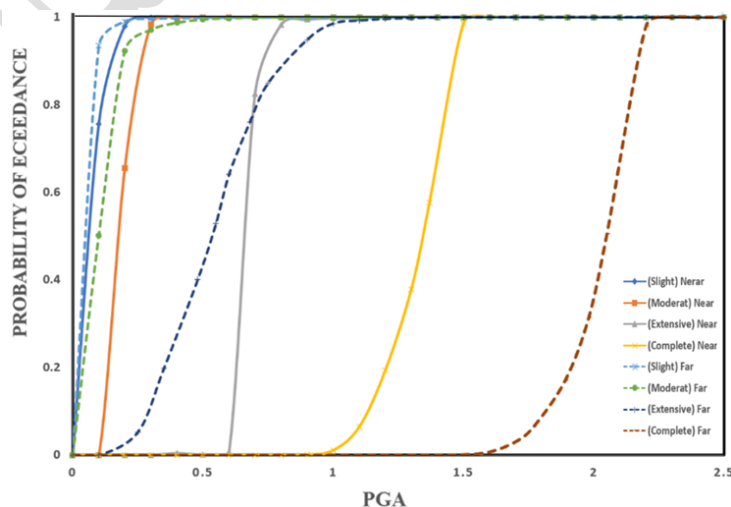
در این رابطه، p بیانگر احتمال تجمع فراگذشت از دریافت غیرخطی بیشینه طبقات است. همچنین S_d انحراف لگاریتم طبیعی تقاضا و S_c مقدار میانه ظرفیت سازه در سطوح مختلف آسیب (مطابق جدول ۶) می‌باشد.

مطابق منحنی‌های شکنندگی ارائه شده در شکل ۱۱، آسیب‌پذیری ساختمان ۳۵ طبقه تحت تأثیر نوع رکورد لرزه‌ای، شامل حوزه نزدیک و حوزه دور، تفاوت قابل توجهی نشان می‌دهد. به طور مشخص، سازه تحت اثر حرکات حوزه نزدیک، در تمامی سطوح آسیب، احتمال فراگذشت بیشتری نسبت به حرکات حوزه دور دارد. این تفاوت در سطوح آسیب پایین‌تر محدودتر بوده و با افزایش شدت زلزله افزایش می‌یابد؛ به گونه‌ای که بیشترین اختلاف در سطح آسیب کامل مشاهده می‌شود. این نتایج نشان‌دهنده تشدید آسیب‌پذیری لرزه‌ای ساختمان بلندمرتبه تحت اثر رکوردهای حوزه نزدیک است.



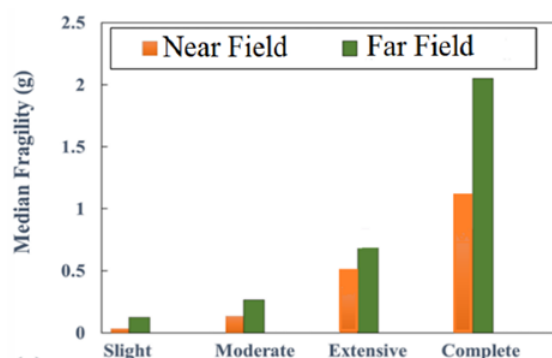
شکل ۱۱. منحنی شکنندگی لرزه‌ای در زلزله‌های الف (نزدیک و ب) دور از گسل

برای ارزیابی اثر تفاوت ویژگی‌های لرزه‌ای حرکات زمین حوزه نزدیک و حوزه دور، منحنی‌های شکنندگی حاصل از هر دو گروه رکورد به صورت هم‌زمان ترسیم شدند تا امکان مقایسه مستقیم آسیب‌پذیری سازه فراهم شود. این منحنی‌ها احتمال فراگذشت از سطوح مختلف آسیب را در برابر PGA نشان می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، ساختمان ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، در تمامی سطوح آسیب، احتمال فراگذشت بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور نشان می‌دهد. در نتیجه، حرکات حوزه دور در مقایسه با رکوردهای حوزه نزدیک، منجر به کاهش قابل توجه شکنندگی لرزه‌ای سازه در تمامی سطوح آسیب می‌شوند.



شکل ۱۲. مقایسه منحنی شکنندگی لرزه‌ای زلزله‌های نزدیک و دور از گسل

برای مقایسه کمی تر منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای، میانه شکنندگی به‌عنوان شاخصی از شدت لرزه‌ای متناظر با احتمال ۵۰ درصد برای فراگذشت از هر سطح آسیب محاسبه شد. مقادیر این پارامتر برای سطوح مختلف آسیب در شکل ۱۳ ارائه شده‌اند و امکان مقایسه مستقیم آسیب‌پذیری سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور را فراهم می‌کنند.

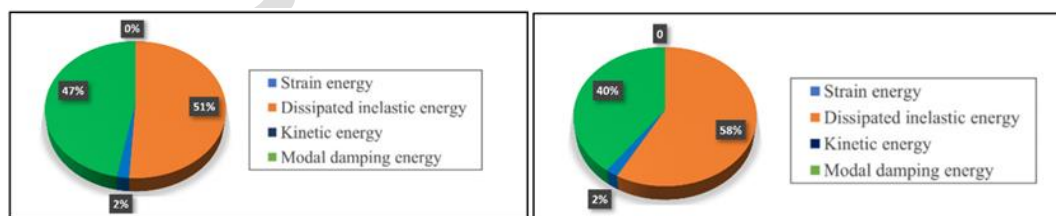


شکل ۱۳. مقایسه میانه شکنندگی لرزه‌ای

همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، فاصله افقی میان منحنی‌های حوزه نزدیک و حوزه دور در ساختمان ۳۵ طبقه، بیانگر کاهش PGA متناظر با هر سطح آسیب تحت رکوردهای پررود بلند است. در شتاب‌های کمتر از $0.2g$ ، تفاوت محسوسی در احتمال فراگذشت از سطوح آسیب بین دو گروه رکورد مشاهده نمی‌شود؛ با این حال، با افزایش شدت لرزه‌ای فراتر از این تراز، احتمال فراگذشت تحت رکوردهای حوزه نزدیک با نرخ بیشتری افزایش می‌یابد. پارامتر میانه شکنندگی نیز برای تمامی مدل‌ها محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه ظرفیت لرزه‌ای سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حساسیت بیشتر ساختمان‌های بلندمرتبه به این نوع حرکات زمین است. همچنین، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین شکنندگی لرزه‌ای در سطوح آسیب جزئی، متوسط، گسترده و کامل به‌ترتیب $0.49g$ ، $0.33g$ ، $0.55g$ و کمتر از حالت زمین‌لرزه‌های حوزه دور است. این اختلاف نشان می‌دهد که سازه‌های بلندمرتبه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، در سطوح مختلف آسیب، با مقادیر پایین‌تری از PGA به شرایط آسیب متناظر می‌رسند.

۹. استهلاک انرژی لرزه‌ای سازه

نمودارهای دایره‌ای توزیع انرژی سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور در شکل ۱۴ ارائه شده‌اند. انرژی ورودی زلزله در این تحلیل به چهار مؤلفه شامل انرژی کرنشی، انرژی میرایی مودال، انرژی مستهلک‌شده غیرخطی و انرژی جنبشی تفکیک شده است. سهم هر یک از این مؤلفه‌ها در پاسخ سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور در شکل ۱۴ نشان داده شده و امکان مقایسه نحوه جذب و استهلاک انرژی لرزه‌ای در دو گروه رکورد را فراهم می‌کند.



(ب)

(الف)

شکل ۱۴. نمودار اتلاف انرژی سازه (الف) حوزه نزدیک و (ب) حوزه دور

شکل ۱۴ سهم مؤلفه‌های مختلف انرژی را در فرآیند جذب و استهلاک انرژی ناشی از زلزله نشان می‌دهد و امکان مقایسه مستقیم پاسخ سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور را فراهم می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که میزان استهلاک انرژی

در ساختمان مورد بررسی تحت رکوردهای حوزه نزدیک و حوزه دور به ترتیب ۵۸٪ و ۵۱٪ است. بنابراین، سهم استهلاک انرژی سازه تحت رکوردهای حوزه نزدیک ۷٪ بیشتر از رکوردهای حوزه دور بوده است که بیانگر مشارکت بیشتر رفتار غیرخطی سازه در استهلاک انرژی ورودی تحت این نوع حرکات زمین است.

۱۰. نتیجه گیری

هدف این پژوهش، ارزیابی احتمالاتی عملکرد لرزه‌ای ساختمان بلندمرتبه قاب-هسته بتن‌آرمه تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور و تبیین تفاوت آسیب‌پذیری آن‌ها با استفاده از منحنی‌های شکنندگی است. بدین منظور، ابتدا مدل سه‌بعدی ساختمان ۳۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه و هسته متشکل از دیوارهای برشی کوپله در نرم‌افزار ETABS طراحی و سپس در Perform-3D برای تحلیل‌های غیرخطی آماده‌سازی شد. شتاب‌نگاشت‌های منتخب در بازه شدت 0.1g تا 2.5g مقیاس شده و تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) تحت رکوردهای حوزه نزدیک و دور انجام گرفت. در ادامه، با استخراج حداکثر دررفت بین‌طبقه‌ای در هر سطح شدت، منحنی‌های IDA و سپس منحنی‌های شکنندگی لرزه‌ای تعیین شدند. نتایج حاصل، تفاوت ظرفیت و آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه تحت دو گروه حرکات زمین را با تمرکز بر اثر ویژگی‌های رکوردهای حوزه نزدیک نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل دینامیکی افزایشی نشان داد که ساختمان ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، دررفت بین‌طبقه‌ای بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور تجربه می‌کند. همچنین، سازه تحت حرکات حوزه نزدیک در PGA پایین‌تری به آستانه فروپاشی کلی می‌رسد که بیانگر ظرفیت لرزه‌ای پایین‌تر سازه در برابر این نوع حرکات زمین است.

مقایسه منحنی‌های شکنندگی نشان داد که ساختمان ۳۵ طبقه تحت رکوردهای حوزه نزدیک، در تمامی سطوح آسیب احتمال فراگذشت بیشتری نسبت به رکوردهای حوزه دور دارد. این اختلاف با افزایش شدت لرزه‌ای افزایش یافته و در سطوح آسیب بالاتر محسوس‌تر می‌شود.

مقایسه میانه شکنندگی نشان داد که در ساختمان ۳۵ طبقه، این پارامتر در سطوح آسیب جزئی، متوسط، گسترده و کامل تحت رکوردهای حوزه نزدیک، به ترتیب ۶۹٪، ۴۹٪، ۳۳٪ و ۵۵٪ کمتر از رکوردهای حوزه دور است. این کاهش بیانگر آن است که سازه تحت حرکات حوزه نزدیک، در سطوح شدت پایین‌تری به سطوح آسیب متناظر می‌رسد.

بررسی توزیع انرژی نشان داد که سهم انرژی مستهلک‌شده در ساختمان مورد مطالعه تحت رکوردهای حوزه نزدیک ۵۸٪ و تحت رکوردهای حوزه دور ۵۱٪ است. بنابراین، میزان استهلاک انرژی تحت رکوردهای حوزه نزدیک ۷ درصد بیشتر از رکوردهای حوزه دور بوده است که نشان‌دهنده مشارکت بیشتر پاسخ غیرخطی سازه در جذب انرژی ورودی تحت این نوع حرکات زمین است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در ساختمان‌های بلندمرتبه دارای سیستم قاب خمشی بتن‌آرمه و دیوارهای برشی کوپله، آسیب‌پذیری لرزه‌ای تحت رکوردهای حوزه نزدیک به گسل به مراتب بیشتر از رکوردهای حوزه دور است. این تفاوت در تمامی سطوح آسیب مشاهده شده و بیانگر حساسیت بیشتر سازه به ویژگی‌های حرکات زمین حوزه نزدیک است. با توجه به محدودیت توجه آیین‌نامه‌های موجود به اثرات ویژه این نوع حرکات بر ساختمان‌های بلندمرتبه، نتایج این پژوهش می‌تواند در ارزیابی و بهبود رویکردهای طراحی لرزه‌ای این سازه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

- [1] K. Koketsu and H. Miyake, "A seismological overview of long-period ground motion," *J. Seismol.*, vol. 12, no. 2, pp. 133–143, 2008.
- [2] N. Güneş and Z. Ç. Ulucan, "Nonlinear dynamic response of a tall building to near-fault pulse-like ground motions," *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 17, pp. 2989-3013, 2019.
- [3] M. Çelebi, H. S. Ulusoy, and N. Nakata, "Responses of a tall building in Los Angeles, California, as inferred from local and distant earthquakes," *Earthquake Spectra*, vol. 32, no. 3, pp. 1821-1843, 2016.
- [4] K. Zhong et al., "Tall building performance-based seismic design using SCEC broadband platform site-specific ground motion simulations," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, vol. 50, no. 1, pp. 81-98, 2021.
- [5] M. D. Trifunac, "The role of strong motion rotations in the response of structures near earthquake faults," *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, vol. 29, no. 2, pp. 382-393, 2009.
- [6] H. Moniri, "Evaluation of seismic performance of reinforced concrete (RC) buildings under near-field earthquakes," *Int. J. Adv. Struct. Eng.*, vol. 9, pp. 13-25, 2017.
- [7] N. Bijelic, T. Lin, and G. Deierlein, "Seismic response of a tall building to recorded and simulated ground motions," 2014.
- [8] M. Pokhrel, P. Warnitchai, and T. Ornthammarath, "The effect of ground motion selection procedure and hazard spectra on design seismic demand of near-fault reinforced concrete tall buildings," in *Proc. 5th Asia Conf. Earthquake Eng. (SACEE)*, Taipei, Taiwan, 2014.
- [9] K. Galal and M. Naimi, "Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near-fault earthquakes," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 17, no. 3, pp. 541-562, 2008.
- [10] S.-J. Lee et al., "Strong ground motion over a large area in northern Taiwan caused by the northward rupture directivity of the 2019 Hualien earthquake," *J. Asian Earth Sci.*, vol. 192, p. 104095, 2020.
- [11] M. Ansari, M. Ansari, and A. Safiey, "Evaluation of seismic performance of mid-rise reinforced concrete frames subjected to far-field and near-field ground motions," *Earthquakes Struct.*, vol. 15, 2018.
- [12] R. Guidotti, A. Castellani, and M. Stupazzini, "Near-field earthquake strong ground motion rotations and their relevance on tall buildings," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 108, no. 3A, pp. 1171-1184, 2018.
- [13] F. M. Wani, J. Vemuri, and R. Chenna, "Evaluation of ground motion parameters and seismic response of reinforced concrete buildings from the Mw 6.9, 2011 Sikkim earthquake," *Geohazard Mech.*, vol. 1, no. 2, pp. 162-178, 2023.
- [14] X. Chen et al., "Seismic response analysis of intake tower structure under near-fault ground motions with forward-directivity and fling-step effects," *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, vol. 132, p. 106098, 2020.
- [15] M. D'Amico et al., "Fling effects from near-source strong-motion records: Insights from the 2016 Mw 6.5 Norcia, central Italy, earthquake," *Seismol. Res. Lett.*, vol. 90, no. 2A, pp. 659-671, 2019.
- [16] Q. Luo et al., "Simulating the near-field pulse-like ground motions of the Imperial Valley, California, earthquake," *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, vol. 138, p. 106347, 2020.
- [17] A. Naseri, H. Pahlavan, and G. Ghodrati Amiri, "Probabilistic seismic assessment of RC frame structures in North of Iran using fragility curves," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 58–78, 2018, (In Persian), doi: 10.22065/jsce.2017.78827.1095.
- [18] H. Tajmir Riahi and S. M. Ommizadeh, "Study of the seismic vulnerability of steel moment-resisting frames designed based on the Tenth Code of the Iranian National Building Regulations using fragility curves," *Ferdowsi Civ. Eng.*, vol. 28, no. 1, pp. 13–28, 2017, (In Persian), doi: 10.22067/civil.v28i1.15811.
- [19] A. H. Gorji, E. Darvishan, and H. Babajanian Bisheh, "A study on the effect of aleatory and epistemic uncertainties on fragility curves of steel moment frames," *Ferdowsi Civ. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp. 1–15, 2020, (In Persian), doi: 10.22067/civil.v33i3.85472.

- [20] M. Maddahi, M. Gerami, and H. Naderpour, "Seismic performance of rehabilitated moment frame with steel shear wall by considering structural uncertainties," *Ferdowsi Civ. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 87–104, 2019, (In Persian), doi: 10.22067/v32i4.78335.
- [21] A. Koosha, & M. Naghipour, (2022). Numerical investigation of the behavior of side connections with side plates in composite steel-concrete frames. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(7), 226–246. (In Persian). <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.326910.2711>
- [22] H. Pahlavan, A. Naseri, and A. Einollahi, "Probabilistic seismic vulnerability assessment of RC frame structures retrofitted with steel jacketing," *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 585–598, 2019, (In Persian), doi: 10.22060/ceej.2018.13692.5459.
- [23] H. Pahlavan, M. Shayanfar, G. Ghodrati Amiri, and M. Pahlavan, "Probabilistic seismic vulnerability assessment of the structural deficiencies in Iranian in-filled RC frame structures," *J. Vibroeng.*, vol. 17, no. 5, pp. 2444-2454, 2015.
- [24] M. H. Razmkhah, M. Shamekhi Amiri, and H. Pahlavan, "Performance seismic assessment of steel frame structures having torsional irregularity subjected to mainshock-aftershock," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 8, no. 8, pp. 249–265, 2021, (In Persian), doi: 10.22065/jsce.2020.183112.1842.
- [25] H. Kouhestanian, H. Pahlavan, J. Shafaei, and M. Shamekhi Amiri, "Probabilistic seismic assessment of RC buildings considering soft and extreme soft story irregularities subjected to main shock-aftershock sequences," *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 53, no. 2, pp. 113–116, 2021, (In Persian), doi: 10.22060/ceej.2019.15385.5906.
- [26] H. Kouhestanian, M. H. Razmkhah, J. Shafaei, H. Pahlavan, and M. Shamekhi Amiri, "Probabilistic evaluation of seismic performance of steel buildings with torsional irregularities in plan and soft story under mainshock-aftershock sequence," *Shock Vib.*, vol. 2023, p. 9549121, 2023, doi: 10.1155/2023/9549121.
- [27] A. Zarif Moghadam Basefat, H. Pahlavan, M. Shamekhi Amiri, and J. Shafaei, "Investigating the influence of near-field excitations on the seismic performance of special tall RC moment frame structures," *Bull. Earthquake Sci. Eng.*, 2024, (In Persian), doi: 10.48303/bese.2024.2033212.1181.
- [28] A. Koosha, H. Pahlavan, and M. Shamekhi Amiri, "Probabilistic seismic performance assessment of tall RC frame-core buildings having hybrid coupled shear walls considering long-period earthquakes," *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 2025, doi: 10.1002/tal.70053.
- [29] A. Zarif Moghadam Basefat, H. Pahlavan, and J. Shafaei, "Probabilistic seismic performance assessment of tall RC special moment-resisting frame buildings equipped with buckling-restrained braces under near-field excitations," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 524–542, 2024, doi: 10.3311/PPci.20914.
- [30] A. Zarif Moghadam Basefat, H. Pahlavan, M. Shamekhi Amiri, and P. Namiranian, "Probabilistic seismic performance assessment of tall buildings having special RC moment frames equipped with buckling restrained braces (BRB)," *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 8, no. Special Issue 1, pp. 230–250, 2021, (In Persian), doi: 10.22065/jsce.2020.198620.1929.
- [31] N. Dorrinia, H. Pahlavan, M. Shamekhi Amiri, and M. Sirjani, "Seismic assessment of RC tall core-frame buildings considering soil structure interaction (SSI)," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, 2025, doi: 10.1007/s40996-025-01837-y.
- [32] A. Zarif Moghadam Basefat, H. Pahlavan, M. Shamekhi Amiri, and J. Shafaei, "Probabilistic seismic performance assessment of tall RC buildings equipped with energy dissipator devices," *Structures*, vol. 75, p. 108834, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.108834.
- [33] H. Pahlavan, M. Soleimani, M. Shamekhi Amiri, and N. Dorrinia, "Evaluation of settlement and seismic response of high-rise buildings considering soil-structure interaction based on static loading results and continuum modeling," *Amirkabir J. Civ. Eng.*, vol. 57, no. 7, 2025, (In Persian), doi: 10.22060/ceej.2025.23821.8221.
- [34] N. Armion Nejad, H. Pahlavan, and M. Shamekhi Amiri, "Evaluation of the seismic performance of existing high-rise buildings with a special reinforced concrete core-frame system according to TBI2017 seismic criteria

under long-period earthquake records (case study of a 35-story tower),” *Ferdowsi Civ. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 1–22, 2025, (In Persian), doi: 10.22067/jfcei.2025.90819.1330.

[35] A. Koosha, H. Pahlavan, and M. Shamekhi Amiri, “Probabilistic seismic assessment of tall RC core-wall systems featuring different coupling beams under short- and long-period ground motions,” *J. Struct. Integr. Maint.*, vol. 11, no. 2, p. 2616867, 2026, doi: 10.1080/24705314.2026.2616867.

[36] N. Dorrinia, H. Pahlavan, M. Shamekhi Amiri, and M. Sirjani, “Fragility-based seismic assessment of reinforced concrete frame-tube tall buildings incorporating soil-structure interaction,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, doi: 10.3311/PPci.42490.

[37] A. Shamabadi, H. Pahlavan, J. Shafaei, and A. Koosha, “Comparative probabilistic seismic performance assessment of tall CFT and RC moment-resisting frame systems under long-period ground motions,” *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, doi: 10.1142/S0219455427503238.

[38] Iranian National Building Regulations. (2013). Chapter 9: Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings, 4th ed., Iran Building and Housing Research Center, Tehran, Iran. (In Persian).

[39] Iranian Building Codes and Standards. (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (4th ed.). Road, Housing and Urban Development Research Center, Tehran, Iran.

[40] Iranian National Building Regulations. (2013). Chapter 6: Loads on Buildings, 3rd ed., Iran Building and Housing Research Center, Tehran, Iran. (In Persian).

[41] TBI Guidelines Working Group. (2017). Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings (Version 2.03). Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), University of California, Berkeley.

[42] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, “Theoretical stress strain model for confined concrete,” *J. Struct. Eng.*, vol. 114, pp. 1804–1826, 1988.

[43] M. Menegotto and P. E. Pinto, “Method of analysis of cyclically loaded RC plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under normal force and bending,” in *Preliminary Report, IABSE*, vol. 13, 1973.

[44] J. H. Thomsen IV and J. W. Wallace, “Displacement-based design of slender reinforced concrete structural walls—Experimental verification,” *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 4, pp. 618–630, 2004.

[45] Sesli, H., & Husem, M. (2021). Experimental investigation on cyclic behavior of reinforced concrete coupling beams under quasi-static loading. *International Journal of Civil Engineering*, 19(3), 381–400. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00573-w>

[46] FEMA. (2009). Quantification of building seismic performance factors (FEMA P695). Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

[47] ASCE. (2022). Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22). American Society of Civil Engineers, Reston, VA.

[48] FEMA (2003). Multi-hazard loss estimation methodology: Earthquake model (HAZUS-MH MR5). Department of Homeland Security, Washington, DC.

Near-field earthquakes: زلزله‌های حوزه نزدیک

Far-field earthquakes: زلزله‌های حوزه دور

Forward Directivity: جهت‌داری پیشرو

Pulse period: پریود پالس

Fundamental period: پریود بنیادی

Resonance-like effect: اثر شبه‌تشدید

Inter-story drift ratio: نسبت دررفت بین‌طبقه‌ای

Maximum inter-story drift ratio: حداکثر نسبت دررفت بین‌طبقه‌ای

Engineering Demand Parameter (EDP): پارامتر تقاضای مهندسی

Incremental Dynamic Analysis (IDA): تحلیل دینامیکی افزایشی

Fragility curve: منحنی شکنندگی

Median fragility: میانه شکنندگی

Damage states: سطوح آسیب

Slight damage: آسیب جزئی

Moderate damage: آسیب متوسط

Extensive damage: آسیب گسترده

Complete damage: آسیب کامل

Peak Ground Acceleration (PGA): شتاب بیشینه زمین

Peak Ground Velocity (PGV): سرعت بیشینه زمین

Rupture distance (Rrup): فاصله از گسیختگی گسل

Joyner-Boore distance (Rjb): فاصله جویئر-بور

Shear wave velocity (Vs): سرعت موج برشی

Soil type III: خاک نوع سه

Moment-resisting frame: قاب خمشی

Coupled shear walls: دیوارهای برشی کوپله

Coupling beams: تیرهای کوپله

Frame-core system: سیستم قاب-هسته

Dual system: سیستم دوگانه

Special reinforced concrete: بتن آرمه ویژه

Fiber element: المان فایبر

Distributed plasticity: پلاستیسیته توزیع‌شده

Concentrated shear hinge: مفصل برشی متمرکز

P-Delta effect: اثر پی-دلتا

Rayleigh damping: میرایی رابلی

Confined concrete: بتن محصور

Unconfined concrete: بتن غیرمحصور

Stress-strain relationship: رابطه تنش-کرنش

Cyclic behavior: رفتار چرخه‌ای

Hysteresis curve: منحنی هیستریزس

Boundary elements: المان‌های مرزی

Diagonal reinforcement: آرماتورگذاری قطری

Transverse reinforcement: آرماتور عرضی

Longitudinal reinforcement: آرماتور طولی

Soil-Structure Interaction (SSI): اندرکنش خاک-سازه

TBI Guidelines: دستورالعمل TBI

Lognormal distribution: توزیع لگ-نرمال

Central Limit Theorem: قضیه حد مرکزی

Nonlinear energy dissipation: استهلاک انرژی غیرخطی

Modal damping energy: انرژی میرایی مودال

Kinetic energy: انرژی جنبشی

Global collapse: فروپاشی کلی

Higher-mode effects: اثرات مدهای بالاتر

Permanent ground displacement: جابجایی دائمی زمین

Velocity pulse: پالس سرعت

Long-period ground motion: حرکات زمین پریود بلند

Seismic vulnerability: آسیب‌پذیری لرزه‌ای

Probabilistic assessment: ارزیابی احتمالاتی

Performance-based design: طراحی بر اساس عملکرد

Response modification factor (R): ضریب رفتار

Importance factor (I): ضریب اهمیت

Design base acceleration (A): شتاب مبنايي طرح

Compressive strength: مقاومت فشاری

Yield strength: تنش تسلیم

Span-to-depth ratio: نسبت دهانه به عمق

Overturning moment: ممان واژگونی

Axial force: نیروی محوری

Flexural stiffness: سختی خمشی

Energy dissipation capacity: ظرفیت مستهلک‌کننده انرژی

Nonlinear time-history analysis: تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

Fourier amplitude spectrum: طیف دامنه فوریه

Frequency content: محتوای فرکانسی

Intensity measure (IM): پارامتر شدت