



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

The effects of mass irregularity percentage in height in a Low rise building of flexural frame with regard to soil-structure interaction

Maryam Kiani¹, Houshyar Eimani Kalehsar^{2*}

1-Master's degree in civil engineering-structure, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

2*-Associate Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 08 April 2024; Revised: 14 May 2024 ; Accepted: 16 May 2024; Published: 22 July 2024

Abstract

This article investigated the seismic performance of low-rise steel intermediate moment resistance frame with different percentages of mass irregularity. The irregularity of structures considered according to Iranian standard code No.. 2800 and ASCE7. For this purpose, a 3-story structure that is located on soil type 2 of Iranian standard 2800 (soil type C of ASCE7) with the high-risk level hazard seismic category (region of Tehran), has been studied. The investigated structure had been subjected to nonlinear o time-history analysis under 22 records far-field ground motions considering soil-structure interaction and various mass irregularities at design basis earthquake level of Iranian standard No. 2800. This structure was simulated via OpenSees finite element software that the nonlinear behavior of geometry and materials is considered. The results showed that the drift and absolute acceleration responses of structures with flexible foundations did not have the same pattern compared to structures with rigid foundations. The considered irregularity of structures can be increased the drift value about 30 percent compared to rigid base structure. Also, the maximum absolute acceleration responses can increase about 40 percent with exciting irregularity compared to rigid base structure. In addition, the mean of absolute acceleration responses can increase about 22 percent with exciting irregularity compared to rigid base structure.

Keywords: Seismic performance, Mass irregularity, Soil-structure interaction, Nonlinear dynamic analysis, Steel moment-resistance frame

Cite this article as Kiani,M and Eimani Kalehsar,H . (2024). The effects of mass irregularity percentage in height in a Low rise building of flexural frame with regard to soil-structure interaction. Civil and Project journal, 6(5), 47-57. doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.456462.1289>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2023 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: hek@uma.ac.ir



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

آثار درصد نامنظمی جرمی در ارتفاع در ساختمان کوتاه مرتبه قاب خمشی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه

مریم کیانی^۱، هوشیار ایمانی کله سر^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۲۰ فروردین ۱۴۰۳ ؛ تاریخ بازنگری: ۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۲۷ اردیبهشت ۱۴۰۳ ؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ مرداد ۱۴۰۳

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان قاب خمشی متوسط فولادی کوتاه مرتبه دارای درصدهای مختلف نامنظمی جرمی که مطابق با آیین‌نامه‌های ایران و معتبر خارجی طراحی شده، می‌پردازد. بدین منظور، سازه‌ای ۳ طبقه که بر روی خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ (نوع C آیین‌نامه ASCE7) و برای منطقه تهران که دارای منطقه با پهنه‌بندی خطر زلزله خیلی زیاد واقع شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. سازه مورد بررسی، تحت ۲۲ رکورد دور از گسل با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و نامنظمی-های مختلف جرمی در ارتفاع تحت سطح خطر زلزله ۱ (زلزله طرح) مورد مورد تحلیل تاریخیچه-زمانی قرار گرفته است. این سازه در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees شبیه‌سازی که در آن رفتار غیرخطی هندسه و مصالح در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که به‌طور کلی پاسخ‌های جابجایی نسبی و شتاب مطلق سازه‌های با پایه انعطاف‌پذیر در مقایسه با سازه‌های با پایه صلب الگوی یکسانی ندارند. شدت مختلف نامنظمی‌ها در بیشینه‌ترین حالت، مقادیر جابجایی نسبی را در حالت پایه صلب وقتی افزایش جرم در طبقه میانی اعمال شده، به صورت میانگین ۳۰ درصد افزایش داده است. همچنین شدت مختلف نامنظمی‌ها در بیشینه-ترین مقدار، در حالت پایه انعطاف‌پذیر وقتی افزایش جرم در طبقه میانی بوده، به صورت میانگین ۴۰ درصد افزایش مقادیر شتاب را به همراه دارد. با لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه در بیشینه‌ترین حالت، مقدار شتاب با در نظر گرفتن افزایش جرم در طبقه میانی، به صورت میانگین ۲۲ درصد افزایش یافته است.

کلمات کلیدی: عملکرد لرزه‌ای، نامنظمی جرمی، اندرکنش خاک-سازه، تحلیل دینامیکی غیرخطی، قاب خمشی فولادی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hek@uma.ac.ir

۱- مقدمه

قاب‌های مقاوم خمشی از تیر و ستون‌هایی تشکیل شده‌اند که با اتصالات جوشی یا پیچی قوی یا هر دو به هم متصل شده‌اند (Naeim, 1989). مقاومت جانبی و پایداری قاب‌های خمشی بر صلبیت خمشی تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون متکی است (Scawthorn & Chen, 2002). استفاده از قاب‌های فوق به جهت آزادی انتخاب دیوارهای داخلی و فضای کافی به لحاظ معماری قابل توجه است (Naeim, 1989). اندرکنش خاک-سازه به‌عنوان یک پدیده مهم در رفتار سازه‌ها مطرح می‌شود. نقش انعطاف‌پذیری خاک و تأثیر فونداسیون در اثرات اندرکنش خاک-سازه به‌طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که تمرکز بسیاری از مطالعات بر روی تأثیرات محلی اندرکنش بر فونداسیون‌های سطحی و عمیق قرار دارد و در اعضای سازه کمتر توجه شده است. در بررسی آثار اندرکنش بر رفتار دینامیکی سازه‌ها، می‌توان از دو مورد شناخته‌شده‌تر نسبت به آثار دیگر، یعنی افزایش دوره‌ی تناوب سازه و میرایی آن، اشاره کرد. این آثار سبب ورود روابطی برای تعیین میزان این تغییرات به آیین‌نامه‌ها شده است. همچنین آثار اندرکنش بر پاسخ سازه‌های سخت بسیار تعیین‌کننده است، تا جایی که می‌تواند سبب تغییر در توزیع نیروها در این نوع سازه‌ها شود.

به طور کلی، تاکنون مطالعات محدودی را می‌توان یافت که به بررسی کیفی و کمی آثار اندرکنش بر روی عملکرد سازه‌ها اختصاص یافته باشد و نیاز به مطالعه‌ی دقیق‌تر آثار اندرکنش خاک-سازه بر روی عملکرد سازه‌ها کاملاً احساس می‌شود (Eimani kalehsar & Kiani, 2023). همچنین پدیده‌ای دیگر در پاسخ سازه‌های تحت بارهای جانبی می‌تواند موثر باشد، اثرات نامنظمی سازه‌ها است. یک نوع از نامنظمی‌های مورد نظر مطابق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران، نامنظمی جرمی است. مطابق این استاندارد، در صورتی که جرم یکی از طبقات، به جزء جرم بام و خرپشته نسبت به جرم طبقه پیرامون خود بیشتر از ۵۰ درصد تغییر داشته باشد؛ سازه دارای نامنظمی جرم در ارتفاع است (IBC Standard, 2013). با توجه به این اهمیت، اثرات نامنظمی به شکل‌های مختلف در سازه در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

اغلب سازه‌های ساخته‌شده مسکونی در مناطق مختلف کشور از نوع کوتاه مرتبه هستند. همچنین با توجه به اینکه امکان آسیب بیشتری در صورت وجود نامنظمی جرمی در سازه‌ها تحت بارهای جانبی وجود دارد و همین‌طور سازه‌ها در واقعیت بر روی بستر خاک قرار می‌گیرند. در تحقیقات گذشته آثار نامنظمی به همراه آثار اندرکنش خاک-سازه در سازه‌ها به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق به بررسی یک ساختمان نامنظم جرمی ۳ طبقه با لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه پرداخته شده است. آثار درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در طبقه میانی سازه ۳ طبقه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور طراحی و شبیه‌سازی سازه‌ی مورد نظر به ترتیب در نرم‌افزارهای ETABS و OpenSees، انجام می‌شود. تحلیل‌های تاریخیچه زمانی، تحت ۲۲ رکورد دور از گسل انجام می‌شود. در پایان نتایج جابجایی نسبی طبقات و شتاب‌های مطلق سازه مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۱-۱- تاریخچه تحقیق

العلی و کراوینکلر در سال ۱۹۹۹ میلادی، آثار نامنظمی ارتفاع در توزیع نیاز لرزه‌ای در ارتفاع سازه را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها سازه‌های مورد نظر که ده طبقه بودند را با حالات مختلف توزیع جرم، مقاومت و سختی به‌صورت جدا و ترکیب باهم را با استفاده از روش دینامیکی خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نامنظمی ترکیبی سختی و مقاومت، نامنظمی مقاومت، نامنظمی سختی و در آخر نامنظمی جرم به ترتیب بیشترین آثار افزایش نیاز لرزه‌ای را در نتایج داشته‌اند. همین‌طور، نامنظمی در ارتفاع، تأثیر زیادی در تغییر مکان بام ندارد (Al-Ali, 1999). در تحقیق دیگر، فراگادکیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی، روشی را برای تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی دارای نامنظمی از نوع جرم، سختی و مقاومت با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فراینده (IDA)^۱ پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی می‌تواند محدوده کامل

¹ Incremental Dynamic Analysis (IDA)

عملکرد سازه از طریق یک متد تحلیلی با دقت مناسب با لحاظ آثار نوع نامنظمی را لحاظ نماید. آن‌ها نشان دادند که آثار نامنظمی در ارتفاع بر روی سطح عملکرد سازه به نوع نامنظمی، محل وقوع نامنظمی (طبقه مورد نظر) و مهم‌تر از همه میزان شدت زلزله بستگی دارد. در محدوده رفتاری الاستیک و ابتدای غیر الاستیک، بیشتر نتایج پژوهش‌های قبل تایید شده ولی با افزایش سطح آسیب ایجاد شده در سازه، نتایج قبلی برقرار نیست. همچنین آن‌ها نشان دادند که بیشترین تأثیر نامنظمی بر پاسخ سازه را ترکیب نامنظمی سختی و مقاومت، مقاومت، سختی و جرم به ترتیب دارند. همچنین آثار نامنظمی به شدت وابسته به نوع رکورد لرزه‌ای است (Michalis et al., 2006).

در ادامه لیترانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ میلادی، رفتار لرزه‌ای سیستم قاب خمشی فولادی ویژه و دارای نامنظمی‌های مقاومت سختی و جرمی را با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی خطی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که محدودیت‌ها و الزامات تجربی و تجویزی آیین‌نامه‌ها برای سازه‌های نامنظم در ارتفاع، می‌بایست متناسب با محل وقوع نامنظمی و تعداد طبقات نامنظم سازه، اعمال شود (Le- Trung et al., 2012). همچنین پیری زاده و شکیب در سال ۲۰۱۳ میلادی، به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی ویژه دارای نامنظمی‌های جرم، مقاومت و سختی با استفاده از روش تحلیل IDA پرداختند. بر اساس مهندسی زلزله عملکردی احتمالاتی، آثار نامنظمی در ارتفاع را بر روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی ویژه بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که توزیع غیریکنواخت مقاومت جانبی در ارتفاع، به‌طور مستقیم بر عملکرد لرزه‌ای سازه (به‌خصوص در مرحله حالت حدی تا خرابی سازه) تأثیرگذار است که حتی ممکن است منجر به ایجاد ناپایداری کلی در سیستم شود. این آثار ممکن است بر روی ظرفیت شکل‌پذیری سازه و یا ظرفیت شدت لرزه‌ای، با توجه به موقعیت نامنظمی تأثیر داشته باشد (Pirizadeh & Shakib, 2013).

با توجه به اهمیت اندرکنش خاک-سازه، گرتاس و مایلوناکیز در سال ۱۹۹۸ میلادی، لحاظ آثار اندرکنش خاک-پی-سازه را موجب ایجاد رفتار واقعی‌تری از سازه بیان کردند. آن‌ها بیان کردند که وجود خاک نرم در زیر سازه موجب کاهش سختی سیستم و در پی آن افزایش زمان تناوبی کل سازه شده است (Gazetas, 1998). در ادامه گرتاس و آپوستلو در سال ۲۰۰۴ میلادی، یک بلوک صلب (سازه گونه) را بر روی خاک الاستوپلاستیک مدل کردند و به‌منظور لحاظ اندرکنش خاک-سازه به بررسی آثار تسلیم خاک و جداسدگی پی از خاک، پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تحت شرایط خاصی که وابسته به زمان تناوب مود اول سازه و خصوصیات حرکت‌های زمین است، جداسدگی پی می‌تواند کاملاً برای روسازه مفید باشد و بارهای لرزه‌ای ایجاد شده در سازه را کاهش دهد. یکی دیگر از نتایج آن‌ها این بود که با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و تحت بعضی از شرایط بارگذاری جانبی لرزه‌ای، با لحاظ ضریب اطمینان واژگونی کمتر از عدد یک، ممکن است واژگونی رخ ندهد. ماهیت بارگذاری جانبی لرزه‌ای (مخصوصاً وجود توالی سیکل‌های بارگذاری طولانی مدت و محتوای فرکانسی آن) از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها است (Gazetas & Apostolou, 2004).

الغنائینی و النجار در سال ۲۰۰۹ میلادی، به بررسی عملکرد ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه تحت بارهای دینامیکی پرداختند. در این مطالعه به ارزیابی پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه دارای پایه صلب و پایه انعطاف‌پذیر پرداخته شد. در این مطالعه دو نوع زمین سخت و نرم برای لحاظ اندرکنش خاک-سازه در نظر گرفته شده است. آن‌ها نشان دادند که آثار اندرکنش خاک-سازه موجب افزایش نیاز تغییرشکل و کاهش نیاز مقاومت سازه می‌شوند ولی لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه افزایش نیاز مقاومت و شکل‌پذیری را به همراه دارد. در پایان بیان کردند که آثار اندرکنش خاک-سازه با تغییر نیاز شکل‌پذیری و نیاز مقاومت سازه، تأثیر در هر دو محدوده رفتار خطی و غیرخطی سازه‌ها می‌گذارد (El Ganainy & El Naggar, 2009). در ادامه تحقیقات محققان مختلف به مقایسه روش‌های عددی و روش‌های زیرسازه برای بررسی اندرکنش خاک-سازه پرداخته‌اند (Sbartaï, 2016) (Chen, 2016) (Sameti & Ghannad, 2016).

اکبری و همکاران در سال ۱۳۹۹ به بررسی عملکرد سازه‌های فولادی با مهاربند همگرا ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در سه حالت خاک مختلف با استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی تحت ۳ زلزله نزدیک به گسل پرداختند. نتایج نشان داد که لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش دقت پاسخ‌های سازه‌ای می‌شود (Akbari et al., 2020).

پورامینیان و همکاران در سال ۲۰۲۱ به تجزیه و تحلیل خطی مبتنی بر قابلیت اطمینان قاب‌های کم ارتفاع RC تحت زلزله پرداختند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ارتفاع ساختمان، ضریب اطمینان در هر طبقه حدود ۳/۵ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بعد ستون‌ها در طبقات پایین و دهانه‌های قاب، تأثیر قابل توجهی بر رانش بین طبقاتی دارند ولی بارهای گرانشی (بارهای مرده و زنده) و وزن خود قاب تأثیر جزئی بر رانش بین طبقه دارند (Pouraminian et al., 2021). رهگذر و همکاران در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی لرزه‌ای مبتنی بر قابلیت اطمینان هسته‌های فولادی گهواره‌ای کنترل شده پرداختند. آن‌ها نشان دادند که روش طراحی قابل اعتماد است و ایمنی CRSC ها ارائه شده است. با این حال، احتمال شکست برای CRSC های متوسط بیشتر از الگوهای کم ارتفاع است (Rahgozar et al., 2021).

صابونی‌اقدم و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی متداول آیین‌نامه دارای شکل‌پذیری متوسط با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. آن‌ها سه سازه ۳، ۶ و ۹ طبقه را تحت بارهای لرزه‌ای از روش تحلیل IDA مورد بررسی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که سازه‌های میان مرتبه طراحی شده با آیین‌نامه‌های داخل ایران، دارای مقاومت بیشتر و خسارت پذیری کمتری در مقابل بارهای زلزله دارند. همچنین لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه می‌تواند باعث کاهش آسیب‌پذیری در سازه‌ها در مقابل بارهای زلزله و افزایش انعطاف‌پذیری سازه، می‌شود (Sabouniaghdam et al., 2022). در ادامه بروجردیان و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان دادند در صورتی که نوع خاک لحاظ شده در طراحی متفاوت از خاک محل باشد، می‌تواند در هنگام زلزله، کاهش یا افزایش آسیب‌پذیری سازه راه به همراه داشته باشد. در صورتی که خاک محل سخت‌تر از خاک مورد نظر طراحی باشد، احتمال آسیب سازه کاهش می‌یابد و اگر خاک محل نرم‌تر از خاک مورد نظر طراحی باشد، احتمال آسیب افزایش می‌یابد (Broujerdian et al., 2023).

کاظمی و همکاران در سال ۲۰۲۳، به بررسی اثر میان‌قاب با مصالح بنایی بر روی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی تحت رکوردها دور از گسل پرداختند. آن‌ها نشان دادند که با تغییر موقعیت دیوار میان‌قاب با مصالح بنایی در قاب‌های خمشی، می‌تواند حالت حدی ظرفیتی لرزه‌ای قاب خمشی مورد نظر را با دو حالت لحاظ و عدم لحاظ اندرکنش خاک-سازه، افزایش دهد. همچنین میان‌قاب با مصالح بنایی می‌تواند نقش اساسی در بهبود عملکرد لرزه‌ای داشته باشد (Kazemi et al., 2023). در تحقیق دیگر، کاظمی و ژانکوفسکی، به پیش‌بینی رفتار سازه‌های قاب‌های خمشی فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و با استفاده روش یادگیری ماشین تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل با و بدون پالس پرداختند (Kazemi & Jankowski, 2023). در ادامه، آن‌ها به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با رفتار اتصالات صلب و نیمه صلب با لحاظ اندرکنش خاک-سازه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که کاهش صلبیت اتصال مقادیر میانه منحنی IDA را کاهش می‌دهد. نیز لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه مقادیر شتاب طیف مود اول سازه را کاهش داده است (Kazemi & Jankowski, 2023).

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل سازه‌ای مورد بررسی

سیستم سازه‌ای مورد بررسی در این مطالعه قاب خمشی متوسط فولادی است. در ضمن این سازه برای شهر تهران، که از نظر پهنه‌بندی زلزله، جز مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد ($A=0.35$) است (IBC Standard, 2013)، طراحی و کاربری ساختمان مسکونی و نوع خاک زمین از نوع ۲ در نظر گرفته شده است. در تحلیل و طراحی اولیه سازه و نیز شبیه‌سازی لرزه‌ای، مصالح فولادی مورد استفاده از نوع فولاد نرمه ساختمانی و بتن مورد استفاده از نوع بتن (با مقاومت فشاری ۲۵ مگاپاسگال) می‌باشد. در جداول ۱ و ۲، مشخصات این مصالح آورده شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد

ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	E (MPa)	ν	f_y (MPa) ستون	f_y (MPa) تیر	f_u (MPa)	ϵ_y	ϵ_u
۷۸۵۰	2×10^5	۰/۳	۲۴۰	۲۴۰	۳۷۰	۰	۰/۲۵

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن

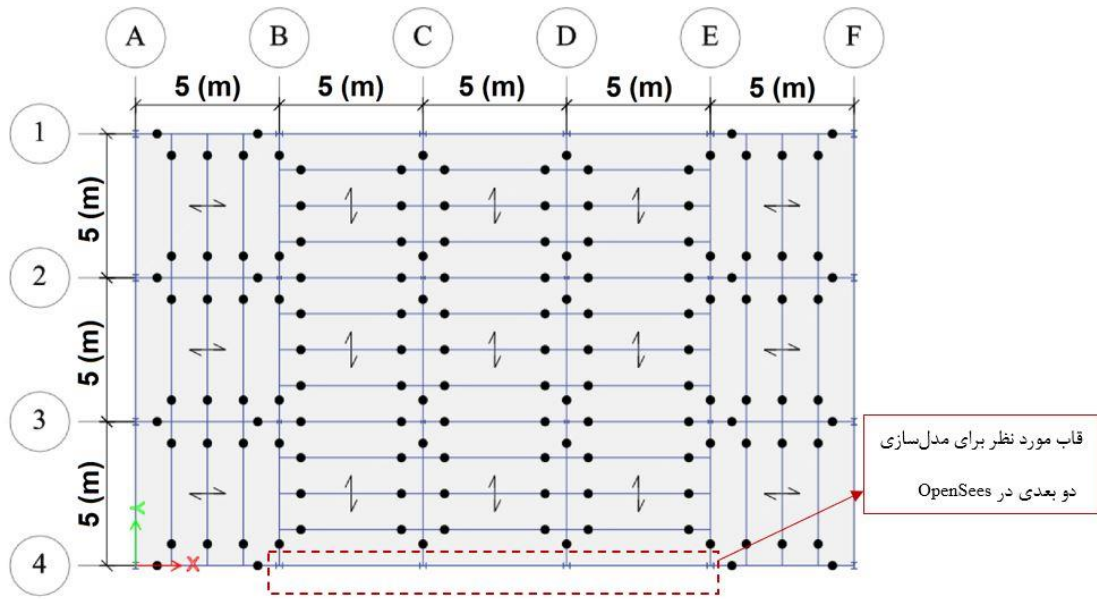
$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	E (MPa)	ν
۲۴۰۰	2×10^4	۰/۱۵

با توجه به در اختیار داشتن مشخصات خاک‌ها و پارامترهای طراحی می‌توان فونداسیون هر یک از قاب‌های مورد مطالعه را طراحی نمود. با توجه به دوبریدی بودن قاب‌ها، فونداسیون تمامی قاب‌ها به شکل نواری و ابعاد متغیر به صورت پهنای ۱ متر و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر، طول ۱۶ متر و عمق قرارگیری فونداسیون ۱/۲ برای ساختمان ۳ طبقه طراحی شده است (Sabouniaghdam et al., 2022). عمق یخبندان در نظر گرفته شده برای فونداسیون‌های سازه ۵۰ سانتی‌متر است (Sabouniaghdam et al., 2022). همچنین، مشخصات خاک مورد مطالعه که از نوع خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ (IBC Standard, 2013) یا همان نوع خاک C آیین‌نامه ASCE7 (ASCE7-10, 2010) است و در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات خاک نوع C

پارامتر مورد بررسی	خاک نوع C
سرعت موج برشی (V_s)	۳۶۱ m/s
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	۴۲ درجه
ضریب چسبندگی (c)	۰
ضریب پواسون (ν)	۰/۳۵
مدول برشی (G)	۷۸۰ MPa
وزن مخصوص (γ)	۲۱ kN/m ³

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ETABS 2016 و مقاطع مرسوم فولادی استاندارد، ساختمان ۳ طبقه به روش LRFD (مطابق ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شد. مطابق شکل ۱، سطح اشغال بنا ۳۷۵ مترمربع (۲۵ متر در ۱۵ متر) دارای ۵ دهانه ۵ متری در جهت x و ۳ دهانه ۵ متری در جهت y است. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. بارگذاری ساختمان مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (INBC Part 6th, 2013) صورت گرفته است (مطابق بارهای جدول ۴) و همچنین ملاحظات لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ (IBC Standard, 2013) (از روش تحلیل طیفی) مدنظر قرار گرفته است. مقاطع سازه‌ی طراحی شده در جدول ۵ نشان داده شده است. قاب‌های پیرامونی از نوع باربر جانبی و قاب‌های میانی از نوع باربر ثقلی به خاطر جلوگیری از اثر زلزله‌های دو جهت متعامد در یک قاب در نظر گرفته شده است. موقعی که قاب‌های پیرامونی به صورت خمشی باشند و قاب‌های میانی به صورت ثقلی، قاب‌های پیرامونی فقط در یک جهت در برابر بارهای لرزه‌ای مقاومت نشان می‌دهند و از این رو مدل‌سازی این قاب‌ها به صورت دو بعدی صحیح است ولی در صورتی که قاب‌های خمشی در دو جهت متعامد و متصل به هم باشند، مدل‌سازی آن‌ها به صورت دوبریدی با خطا مواجه است، زیرا این قاب‌ها در دو جهت بارهای لرزه‌ای را باید تحمل کنند و مورد ارزیابی قرار گیرند. نقاط موجود در پلان شکل ۱ مفصل انتهایی اعضا را نشان می‌دهد. برای انجام تحلیل‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت مدل دوبریدی، قاب مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. برای اطلاعات بیشتر از روش‌های طراحی سازه‌ها می‌توان به مقالات (Sabouniaghdam et al., 2022) و (Broujerdian et al., 2023) مراجع کرد.



شکل ۱: پلان ساختمان طراحی شده مدنظر این تحقیق

جدول ۴: بارگذاری ثقلی سازه

طبقه	بار مرده کف	بار زنده پارتیشن بندی	بار زنده کف	بار برف
	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²	kgf/m ²
بام	۵۰۰	۰	۱۵۰	۱۰۵
سایر طبقات	۴۸۰	۱۰۰	۲۰۰	۰

جدول ۵: مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۳ طبقه طراحی شده مدنظر این تحقیق

طبقات			اعضا
۳	۲	۱	
IPB220	IPB280	IPB320	ستون قاب‌های خمشی
IPB140	IPB160	IPB180	ستون قاب‌های ثقلی
IPE330	IPE360	IPE400	تیرهای قاب‌های خمشی
IPE330	IPE330	IPE330	تیرهای قاب‌های ثقلی
IPE220	IPE220	IPE220	تیرهای فرعی

۲-۲- شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای

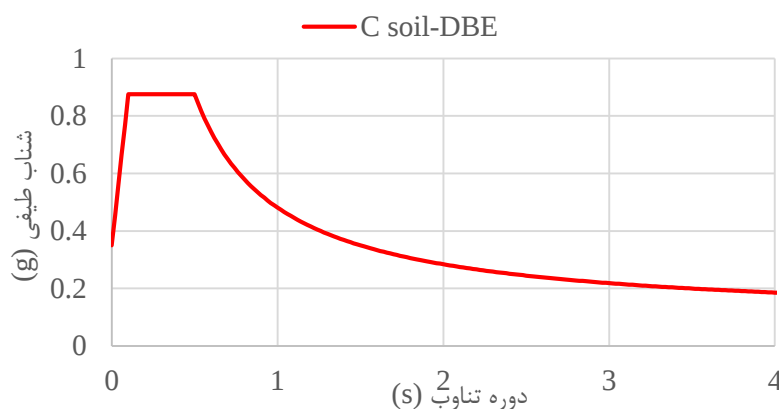
شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای اعمالی به سازه‌ها توسط مراجع مختلف مورد توجه است. یکی از مراجع معتبر و مورد استفاده در تحقیق و پژوهش‌ها آیین‌نامه FEMA P695 می‌باشد. آیین‌نامه FEMA P695 شتاب‌نگاشت‌های زلزله را به دودسته دور از گسل و نزدیک به گسل تقسیم کرده است. در این مجموعه شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ای که در فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر از محل گسل، ثبت شده‌اند را به عنوان شتاب‌نگاشت دور از گسل و شتاب‌نگاشت‌هایی که در فاصله‌ی نزدیک‌تر از ۱۰ کیلومتر ثبت شده

باشند را شتاب‌نگاشت‌های نزدیک به گسل شناخته است. در این دستورالعمل مجموعه‌ای از ۲۲ زوج زلزله‌ی دور از گسل که بزرگی آن‌ها بین ۶/۵ تا ۷/۵ ریشتر و فاصله‌ی آن‌ها بیش از ۱۰ کیلومتر از گسل می‌باشد، ارائه شده است (FEMA, 2009). در جدول ۶ مشخصات شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای مدنظر آمده است.

جدول ۶: شتاب‌نگاشت‌های دور از گسل مورد بررسی این تحقیق (FEMA, 2009)

ID	زلزله	سال	ایستگاه	M_w	R_{JB} (km)	PGA_{max} (g)	PGV_{max} (cm/s)	نوع خاک	RSN
1	Northridge	1994	Beverly Hills – Mulhol	6.7	9.4	0.52	63	D	953
2	Northridge	1994	Canyon Country-WLC	6.7	11.4	0.48	45	D	960
3	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.1	12	0.82	62	D	1602
4	Hector Mine	1999	Hector	7.1	10.4	0.34	42	C	1787
5	Imperial Valley	1979	Delta	6.5	22	0.35	33	D	169
6	Imperial Valley	1979	El Centro Array #11	6.5	12.5	0.38	42	D	174
7	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	7.1	0.51	37	C	1111
8	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.9	19.1	0.24	38	D	1116
9	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.5	13.6	0.36	59	D	1158
10	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.5	10.6	0.22	40	C	1148
11	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	23.6	0.24	52	D	900
12	Landers	1992	Coolwater	7.3	19.7	0.42	42	D	848
13	Loma Prieta	1989	Capitola	6.9	8.7	0.53	35	D	752
14	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.9	12.2	0.56	45	D	767
15	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.4	12.6	0.51	54	C	1633
16	Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co.	6.5	18.2	0.36	46	D	721
17	Superstition Hills	1987	Poe Road (temp)	6.5	11.2	0.45	36	D	725
18	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass	7.0	7.9	0.55	44	D	829
19	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.6	10	0.44	115	D	1244
20	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.6	26	0.51	39	C	1485
21	San Fernando	1971	LA - Hollywood Stor	6.6	22.8	0.21	19	D	68
22	Friuli, Italy	1973	Tolmezzo	6.5	15	0.35	31	C	125

برای مقیاس سازی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب شده، مولفه با شتاب بیشتر انتخاب می‌شود. سپس طیف‌های رکوردهای لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر را g مقیاس می‌شود. طیف‌های رکوردها را در محدوده زمان تناوبی $0.2T$ الی $1.5T$ ، به طیف سطح خطر طراحی آیین‌نامه مورد نظر مقیاس می‌شوند (T معرف زمان تناوب اصلی سازه مورد نظر برای تحلیل دینامیکی است). لازم به ذکر است در محدوده تعیین شده، باید ضریب مقیاس طوری تعیین شود که طیف سازه‌ها بالاتر از طیف آیین‌نامه قرار گیرد. ضریب مقیاس تعیین شده باید در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس شده ضرب شود و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد (FEMA, 2009). به عنوان نمونه، طیف پاسخ طراحی در سطح زلزله DBE در شکل ۲ نشان داده شده است.

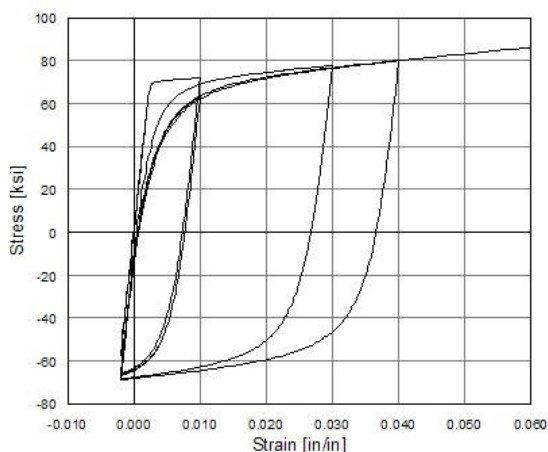


شکل ۲: طیف پاسخ طراحی در سطح زلزله DBE

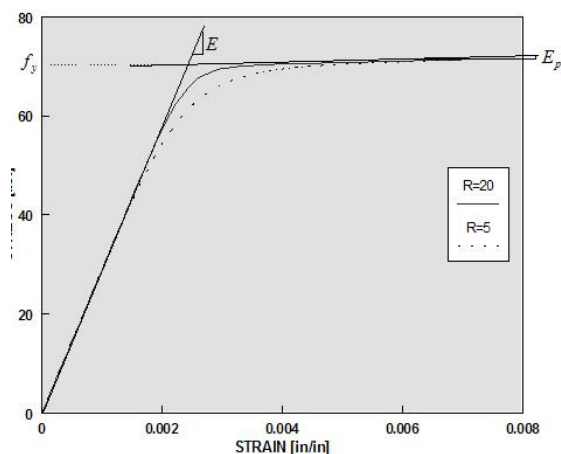
۲-۳- روش مدل سازی در نرم افزار OpenSees

مدل سازی سیستم خاک-فونداسیون، توسط روش وینکلر انجام گرفته است. مدل فونداسیون غیرخطی وینکلر (BNWF) می‌تواند رفتار سیستم خاک و فونداسیون را تعیین کند. همچنین هر دو حالت رفتار غیرخطی و غیر الاستیک خاک (غیر خطی ماده‌ای) و بلندشدگی (غیر خطی هندسی) را در نظر می‌گیرد.

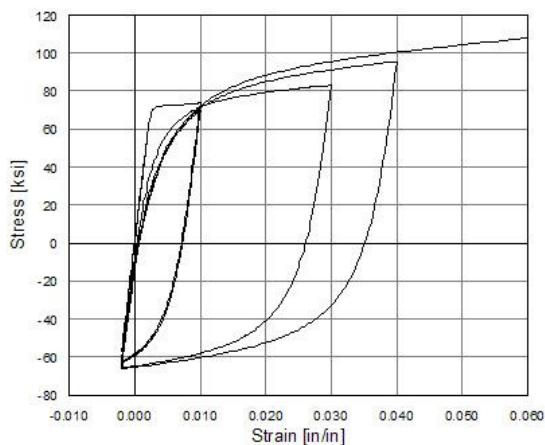
مطابق مرجع (Kazemi, 2023) جرم لرزه‌ای مدنظر در این سازه برابر با $1.05DL + 0.5LL$ در نظر گرفته شده است. قاب مورد نظر در این تحلیل قاب خمشی پیرامونی است. لازم به ذکر است که در این پروژه از مدل دوبعدی جهت شبیه‌سازی استفاده شده است که در این مدل‌ها، قاب پیرامونی خمشی سازه را مدل‌سازی کرده و از طریق ستون‌های انتهایی متکی آثار P- Δ قاب‌های ثقلی را لحاظ می‌کند (M. Dehcheshmeh et al., 2023). از المان غیرخطی با مقطع فایبر برای المان‌های مورد نظر تیر و ستون استفاده شده است. همچنین مصالح مورد استفاده برای تیر و ستون‌ها از نوع Steel02 بوده است. مدل رفتار این مصالح در شکل ۳ نشان داده شده است.



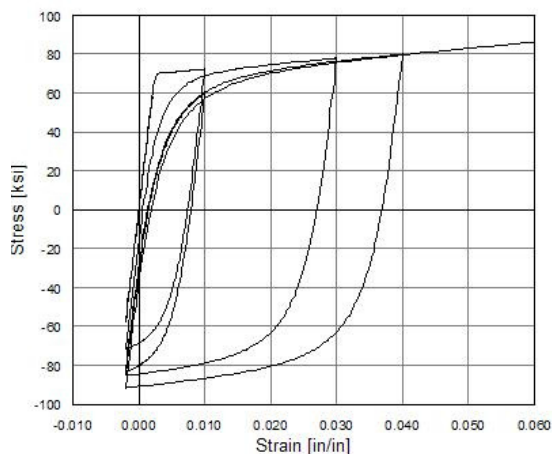
ب: مدل رفتار چرخه‌ای فولاد ۰۲ بدون سخت‌شوندگی
ایزوتروپیک



الف: مصالح فولاد ۰۲ (Mazzoni et al., 2006)



د: مدل رفتار چرخه‌ای فولاد ۰۲ با سخت‌شوندگی
ایزوتروپیک در کشش

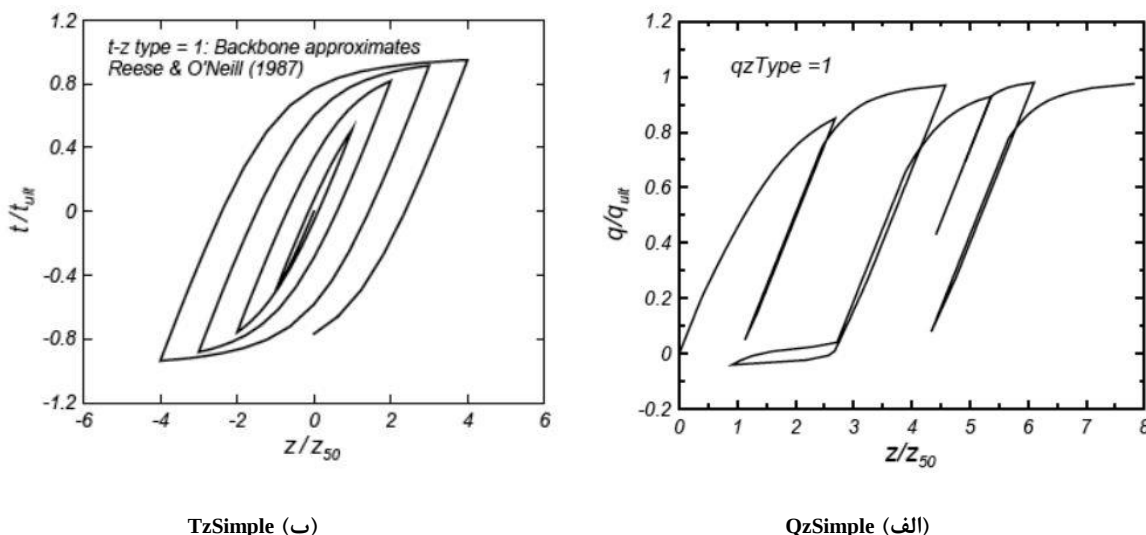


ج: مدل رفتار چرخه‌ای فولاد ۰۲ با سخت‌شوندگی
ایزوتروپیک در فشار

شکل ۳: مدل رفتاری مصالح Steel02 (Mazzoni et al., 2006)

از مدل وینکلر برای مدل‌سازی فونداسیون در نرم‌افزار OpenSees، استفاده شده است. این مدل با استفاده از نوعی المان با طول صفر در محل پیش‌بینی‌شده رفتار غیرخطی خاک را تامین می‌کند. این المان طول صفر در محیط OpenSees با نام ZeroLength معرفی می‌شود. با کمک المان ZeroLength در این محیط می‌توان دونقطه با یک مختصات را در درجه‌ی آزادی دلخواه توسط یک منحنی نیرو تغییر مکان تک‌محوری به یکدیگر متصل کرد (Gajan et al., 2008). بنابراین می‌توان دو مصالح

TzSimple و QzSimple (منحنی رفتار این مصالح در شکل ۴ نشان داده شده است) را مطابق مرجع Sabouniaghdam et al., (2022) به درجات آزادی قائم و افقی این المان تخصیص داده و آن را به عنوان فنر وینکلر در نظر گرفت (Raychowdhury, 2008). برای اطلاعات بیشتر از روش‌های شبیه‌سازی سازه‌ها می‌توان به مقالات (Sabouniaghdam et al., 2022) و (Broujerdian et al., 2023) مراجعه کرد. مقاطع طراحی شده در مقالات (Sabouniaghdam et al., 2022) و (Broujerdian et al., 2023) اشاره شده است.



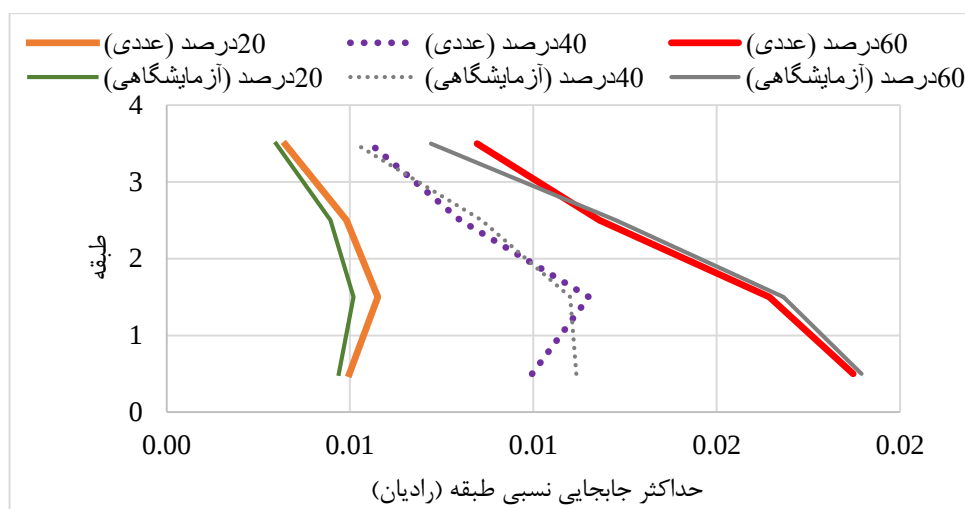
شکل ۴: مصالح مورد استفاده برای مدل‌سازی رفتار خاک (Mazzoni et al., 2006)

۲-۴- اعمال آثار نامنظمی جرمی در مدل‌ها

آثار نامنظمی جرمی در سازه با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ (IBC Standard, 2013) به سازه مورد نظر، اعمال شده است. مطابق این استاندارد، برای ایجاد نامنظمی جرمی در این تحقیق و همچنین برای اینکه محدوده‌ای از حالت‌های ممکن برای سازه در نظر گرفته شود، سه حالت برای کاهش جرم و چهار حالت برای افزایش جرم طبقه میانی سازه ۳ طبقه، مدنظر قرار گرفت. یکبار جرم طبقه میانی سازه ۳ طبقه نسبت به طبقات فوقانی و تحتانی خود، به میزان ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد کاهش داده شد و سپس به مقدار ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد جرم طبقه میانی افزایش داده شده است.

۲-۵- صحت سنجی مدل‌سازی عددی

سوویتا و همکاران یک سازه فولادی ۴ طبقه را بر اساس آئین‌نامه‌ها و مقررات لرزه‌ای کشور ژاپن در آن زمان طراحی کردند. آن‌ها برای پژوهش خود سازه مدنظر را با ابعاد حقیقی تحت شتاب‌نگاشت زلزله توسط میز لرزه‌ای مرکز دفاعی ژاپن قرار داده و در مرحله‌ی فروریزش رفتار سازه را مورد بررسی و تحلیل قرار دادند (Suita et al., 2008). تمام مشخصات مقاطع و مصالح این سازه مربوط به مرجع (Suita et al., 2008) است. از زلزله‌ی ثبت‌شده‌ی Kobe در ایستگاه Takatori برای اعمال بار لرزه‌ای استفاده شده است. در این مطالعه قاب دو دهانه‌ی این سازه مدل‌سازی و در مدل رایانه‌ای صحت سنجی تحقیق حاضر، اثر دال بر تیرها و ستون‌ها صرف‌نظر گردیده است. این قاب در نرم‌افزار OpenSees مدل‌سازی و تحت زلزله‌ی راستای شرقی-غربی (EW) زلزله‌ی Kobe در ایستگاه Takatori قرار گرفت. مطابق مرجع مورد نظر، زلزله‌ها در ۳ سطح ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ شتاب، به سازه اعمال و بیشترین جابجایی نسبی میان طبقه‌ای سازه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نیز مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابق شکل ۵ دارد.

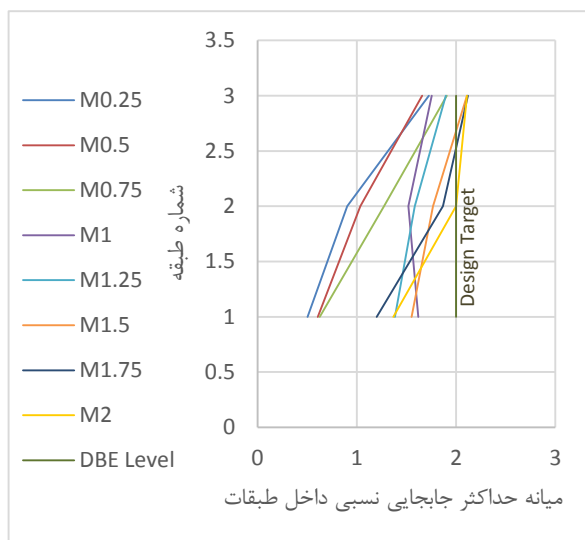


شکل ۵: مقایسه نتایج صحت سنجی مدل عددی در نرم افزار OpenSees با نتایج مدل آزمایشگاهی (Raychowdhury, 2008)

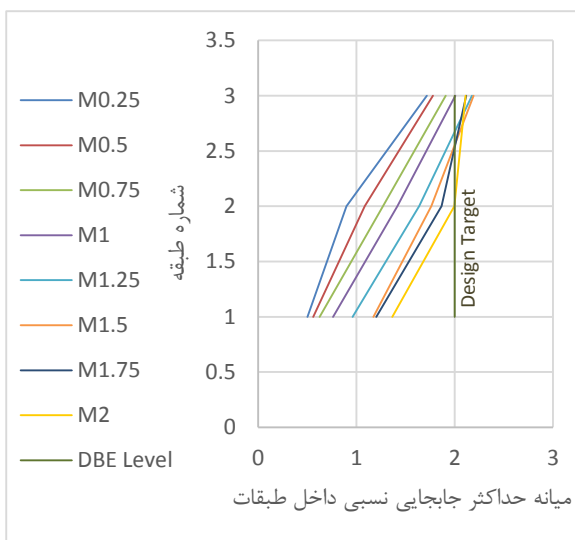
۳- نتایج

۳-۱- خروجی های جابجایی نسبی طبقات

شکل ۶، مقادیر حداکثر جابجایی نسبی طبقات را برای سازه‌ی مورد نظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE (زلزله سطح خطر ۱ یا همان زلزله طرح) با لحاظ اثر درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در طبقه میانی برای سازه ۳ طبقه در دو حالت با پایه صلب و انعطاف پذیر و بر روی خاک نوع ۲ نشان می‌دهد. در این شکل، عبارت جابجایی نسبی Design Target همان مقدار اولیه جابجایی مجاز مورد نظر طراحی سازه قرار گرفته بر روی خاک نوع ۲ است. نمودارهای M0.25، M0.5 و M0.75 معرف سازه نامنظم جرمی با پایه صلب و انعطاف پذیر با کاهش جرم طبقه میانی سازه مورد نظر به ترتیب به مقدار ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد است. همچنین M1.25، M1.5 و M2 معرف سازه نامنظم جرمی با پایه صلب و انعطاف پذیر با افزایش جرم طبقه میانی سازه مورد نظر به ترتیب به مقدار ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد هستند. در شکل مورد نظر و سازه ۳ طبقه، پاسخ‌های جابجایی نسبی سازه‌های با پایه انعطاف پذیر در مقایسه با سازه‌های با پایه صلب الگوی متفاوتی دارند. در سازه‌های با پایه صلب در نامنظمی‌هایی که جرم کمتری دارند، در تمامی طبقات مقدار جابجایی‌های نسبی نسبت به حالت منظم، کمتر است. همچنین در سازه‌های با پایه صلب در نامنظمی‌هایی که جرم بیشتری دارند در تمامی طبقات مقدار جابجایی‌های نسبی در مقایسه با حالت منظم با افزایش روبه‌رو شده است. در سازه‌های با پایه انعطاف پذیر در نامنظمی‌هایی با جرم کمتر در طبقات پایینی مقدار جابجایی‌های نسبی نسبت به حالت منظم، کمتر است، در حالی که در طبقات بالاتر در بیشتر مواقع حتی اگر جرم کمتر شود مقدار جابجایی‌های نسبی در مقایسه با حالت منظم افزایش یافته است. همچنین در سازه‌های با پایه انعطاف پذیر در نامنظمی‌هایی با جرم بیشتر در طبقات پایینی مقدار جابجایی‌های نسبی نسبت به حالت منظم، کاهش یافته در حالی که در طبقات بالاتر مقدار جابجایی‌های نسبی در مقایسه با حالت منظم افزایش یافته است. یکی از یافته‌های اصلی این تحقیق این بوده است که مقادیر پاسخ‌های سازه از جمله جابجایی نسبی طبقات با لحاظ اندرکنش خاک-سازه در صورت موجود بودن نامنظمی‌ها، به شدت افزایش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند اهمیت اثر نامنظمی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه یعنی مدل سازی واقعی سازه‌ها را بیشتر نشان دهد.



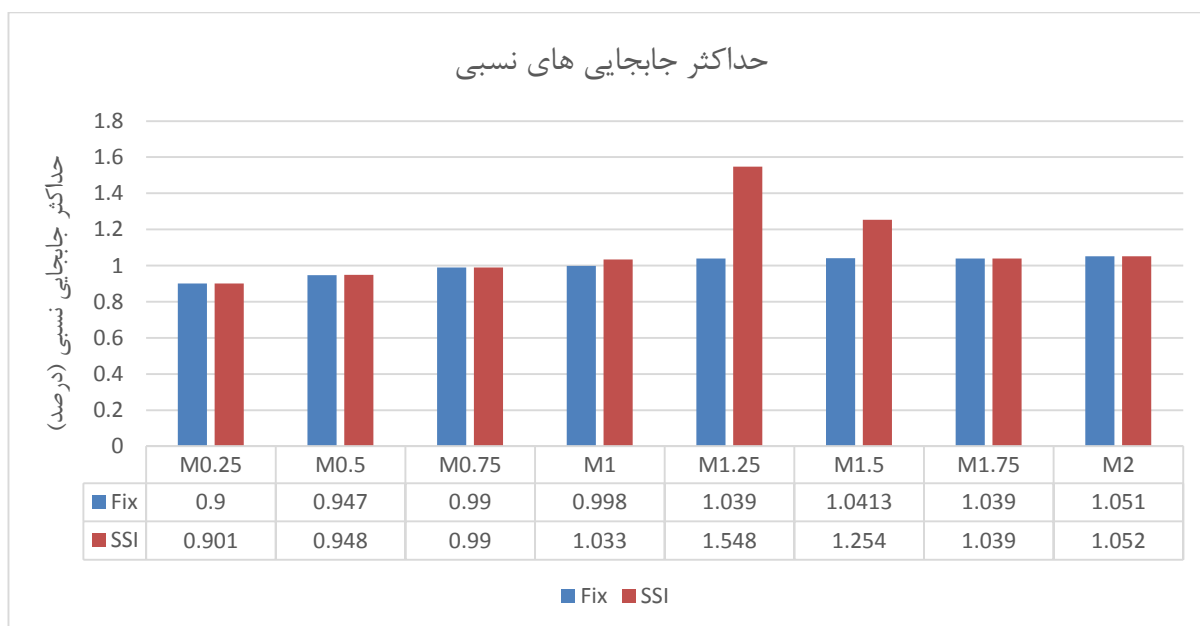
(ب) سازه با پایه انعطاف پذیر



(الف) سازه با پایه صلب

شکل ۶: حداکثر جابجایی نسبی با در نظر گرفتن اثرات درصد‌های مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۳ طبقه با پایه صلب و انعطاف پذیر در سطح خطر لرزه‌ای DBE

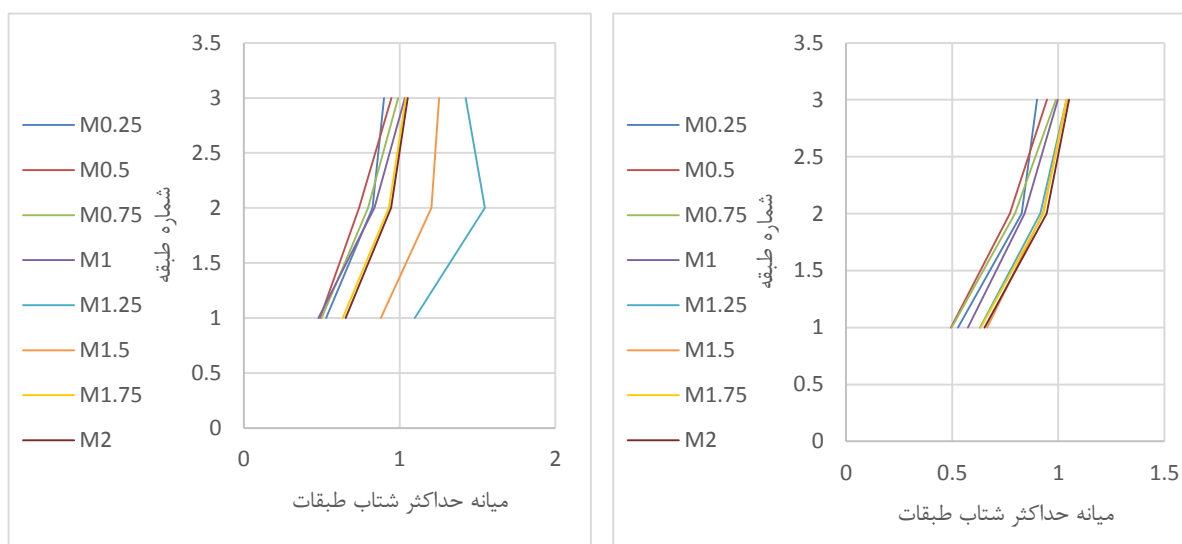
شکل ۷، نمودار میله‌ای بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی برای دو حالت پایه انعطاف پذیر و پایه صلب سازه‌های ۳ طبقه مورد نظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در درصد‌های مختلف نامنظمی جرمی مقادیر جابجایی نسبی در حالت پایه انعطاف پذیر بیشتر از حالت پایه صلب است. بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی‌های نسبی سازه نامنظم نسبت به سازه منظم در هر دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر وقتی که در سازه‌های نامنظم، جرم کمتر و بیشتر شده به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرده است. مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه پایه صلب در مقایسه با پایه انعطاف پذیر در حالت نامنظمی که جرم ۷۵ درصد کمتر و بیشتر شده بدون تغییر باقی‌مانده است، ولی در سازه‌های نامنظمی که جرم ۲۵ و ۵۰ درصد افزایش یافته تغییرات این مقادیر قابل مشاهده‌تر است.



شکل ۷: بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه مورد بررسی دارای آثار مختلف نامنظمی جرمی تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح زلزله DBE

۲-۳- خروجی‌های شتاب مطلق طبقات

شکل ۸، مقادیر حداکثر شتاب مطلق طبقات را برای سازه‌ی مورد نظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE (زلزله سطح خطر ۱ یا همان زلزله طرح) با لحاظ اثر درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در طبقه میانی برای سازه ۳ طبقه در دو حالت با پایه صلب و انعطاف‌پذیر و بر روی خاک نوع ۲ نشان می‌دهد. در شکل مورد نظر و سازه ۳ طبقه، پاسخ‌های شتاب مطلق سازه‌های با پایه انعطاف‌پذیر در مقایسه با سازه‌های با پایه صلب از الگوی متفاوتی‌تری برخوردار هستند. در سازه‌های با پایه صلب در نامنظمی‌هایی که جرم کمتری دارند، در تمامی طبقات مقدار شتاب مطلق نسبت به حالت منظم، کمتر است. همچنین در سازه‌های با پایه در نامنظمی‌هایی که جرم بیشتری دارند در تمامی طبقات مقدار شتاب مطلق در مقایسه با حالت منظم با افزایش روبه‌رو شده است. در سازه‌های با پایه انعطاف‌پذیر در نامنظمی‌های با جرم کمتر در طبقات پایینی مقدار شتاب مطلق نسبت به حالت منظم، بیشتر شده است. درحالی که در طبقات بالاتر مقدار شتاب مطلق در مقایسه با حالت منظم کاهش یافته است. همچنین در سازه‌های با پایه انعطاف‌پذیر در نامنظمی‌های با جرم بیشتر در تمامی طبقات مقدار شتاب مطلق در مقایسه با حالت منظم افزایش یافته است، که بیشینه مقدار این افزایش‌ها در طبقه میانی اتفاق افتاده است. یکی از یافته‌های اصلی این تحقیق این بوده است که مقادیر پاسخ‌های سازه از جمله شتاب طبقات با لحاظ اندرکنش خاک-سازه در صورت موجود بودن نامنظمی‌ها، به شدت افزایش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند اهمیت اثر نامنظمی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه یعنی مدل‌سازی واقعی سازه‌ها را بیشتر نشان دهد.

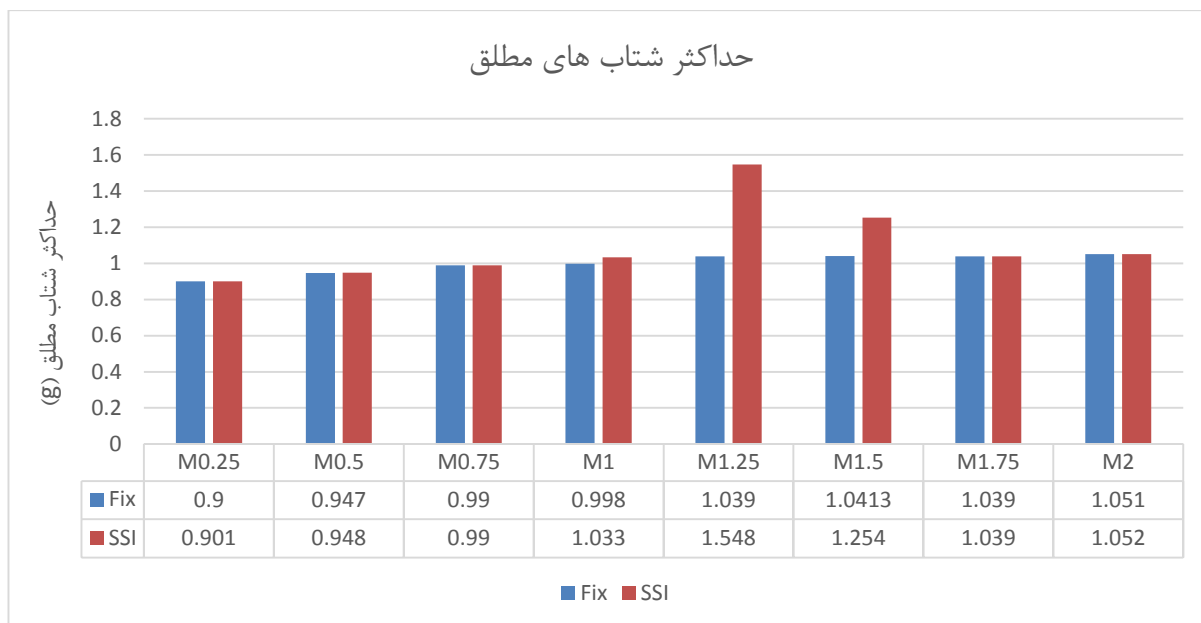


(ب) سازه با پایه انعطاف‌پذیر

(الف) سازه با پایه صلب

شکل ۸: حداکثر شتاب مطلق با در نظر گرفتن اثرات درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۳ طبقه با پایه صلب و انعطاف‌پذیر در سطح خطر لرزه‌ای DBE

شکل ۹، نمودار میله‌ای بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق برای دو حالت پایه انعطاف‌پذیر و پایه صلب سازه‌های ۳ طبقه مورد نظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در درصدهای مختلف نامنظمی جرمی مقادیر شتاب مطلق در حالت پایه انعطاف‌پذیر بیشتر از حالت پایه صلب است. بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه نامنظم نسبت به سازه منظم در هر دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر وقتی که در سازه‌های نامنظم، جرم کمتر و بیشتر شده به ترتیب کاهش و افزایش پیدا کرده است. مقادیر حداکثر شتاب سازه پایه صلب در مقایسه با پایه انعطاف‌پذیر در سازه‌های نامنظمی که جرم ۷۵ درصد کاهش و افزایش پیدا کرده بدون تغییر باقی مانده است، ولی در سازه‌هایی نامنظمی که جرم ۲۵ و ۵۰ درصد بیشتر شده تغییرات این مقادیر محسوس‌تر است.



شکل ۹: پیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه مورد بررسی دارای آثار مختلف نامنظمی جرمی تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح زلزله DBE

۳-۳- بحث در نتایج

جدول ۷، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی و شتاب طبقات سازه نامنظم و منظم را با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی برای دو حالت پایه ثابت و انعطاف پذیر تحت زلزله‌ی با سطح DBE نشان می‌دهد. علامت منفی نشان‌دهنده کاهش مقادیر پاسخ‌های سازه نامنظم نسبت به سازه منظم است. تأثیر نامنظمی با جرم‌های مختلف وقتی که سازه دارای پایه انعطاف پذیر است، بیشتر مشاهده می‌شود. درصد اختلاف جابجایی نسبی و شتاب مطلق در سازه‌هایی که دارای نامنظمی با جرم‌های کمتر هستند دچار کاهش شده‌است، ولی در سازه‌هایی که با جرم‌های بیشتر نامنظمی دارند، این مقادیر افزایش پیدا کرده است. در بدترین حالت نامنظمی در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب ۱۴/۵- و ۴۱/۲ درصد حداکثر اختلاف جابجایی نسبی سازه نامنظم نسبت به سازه منظم مشاهده می‌شود. همچنین در بدترین حالت نامنظمی در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب ۹/۸- و ۴۹/۹ درصد حداکثر اختلاف شتاب سازه نامنظم نسبت به سازه منظم دیده می‌شود.

جدول ۷: درصد اختلاف جابجایی نسبی و شتاب مطلق طبقات سازه‌ی نامنظم نسبت به سازه‌ی منظم

نوع سازه از نظر درصد نامنظمی	جابجایی نسبی		شتاب مطلق	
	پایه صلب	پایه انعطاف پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف پذیر
M0.25	-۱۴/۵	-۱/۷	-۹/۸	-۱۲/۸
M0.5	-۱۱/۴	-۵/۵	-۵/۱	-۸/۲
M0.75	-۴/۹	۸/۶	-۰/۸	-۴/۲
M1.25	۸/۴	۴۱/۲	۴/۱	۴۹/۹
M1.5	۹/۳	۲۰/۲	۴/۳	۲۱/۴
M1.75	۵/۵	۲۰/۸	۴/۱	۰/۶
M2	۵/۱	۲۰/۲	۵/۳	۱/۸

در جدول ۸، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی و شتاب هر طبقه‌ی پایه صلب و انعطاف‌پذیر را با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی تحت زلزله‌ی با سطح DBE نشان می‌دهد. آثار انعطاف‌پذیری با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی مقادیر حداکثر جابجایی نسبی و شتاب هر طبقه را افزایش داده است. در بدترین حالت ۱۱۲/۲ درصد حداکثر اختلاف جابجایی نسبی هر طبقه سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب مشاهده می‌شود. همچنین در بدترین حالت نامنظمی ۷۳/۷۳ درصد حداکثر اختلاف شتاب مطلق هر طبقه سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب دیده می‌شود.

جدول ۸: درصد اختلاف جابجایی نسبی و شتاب مطلق طبقات سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب هر طبقه

نوع سازه از نظر درصد نامنظمی	حداکثر اختلاف جابجایی نسبی هر طبقه	حداکثر اختلاف شتاب مطلق هر طبقه
M0.25	۰/۶	۰/۱۹
M0.5	۸/۴	۴/۲
M0.75	۰/۱۶	۰/۲
M1	۱۱۲/۲	۱۱/۷
M1.25	۴۴/۴	۷۳/۷۳
M1.5	۳۲/۳	۳۲/۵
M1.75	۰/۲۷	۰
M2	۰/۱	۰/۱۵

در جدول ۹، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی و شتاب طبقات سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر را با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی تحت زلزله‌ی با سطح DBE نشان می‌دهد. علامت منفی نشان‌دهنده کاهش مقادیر پاسخ‌های سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به سازه پایه صلب است. در سازه مورد نظر وقتی که جرم ۷۵ درصد کمتر و بیشتر شده است، انعطاف‌پذیری تأثیری در حداکثر اختلاف پاسخ‌های سازه ندارد. در بدترین حالت نامنظمی ۱۲/۷- درصد حداکثر اختلاف جابجایی نسبی سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب مشاهده می‌شود. همچنین در بدترین حالت نامنظمی ۴۹ درصد حداکثر اختلاف شتاب مطلق سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب دیده می‌شود.

جدول ۹: درصد اختلاف جابجایی نسبی و شتاب مطلق طبقات سازه پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب

نوع سازه از نظر درصد نامنظمی	حداکثر اختلاف جابجایی نسبی	حداکثر اختلاف شتاب مطلق
M0.25	۰/۶	۰/۱۱
M0.5	-۶/۷	۰/۱
M0.75	۰	۰
M1	-۱۲/۵	۳/۵
M1.25	-۱۲/۷	۴۹
M1.5	-۳/۷	۲۰/۴
M1.75	۰/۲	۰
M2	۰/۰۹	۰/۰۹

۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی اثر درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۳ طبقه قاب خمشی فولادی متوسط طراحی شده بر روی خاک نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰ (نوع C آیین نامه ASCE7) پرداخته است. دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر برای سازه در نظر گرفته شد. تحلیل های ساختمان مورد نظر در نرم افزار OpenSees تحت ۲۲ رکورد زمین لرزه دور از گسل مطابق FEMA P695 [۲۴] مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق حاضر عبارتند از:

(۱) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، در مقادیر جابجایی نسبی در تمامی طبقات تغییرات قابل توجهی ایجاد کرده است به طوری که در حالت با پایه صلب و انعطاف پذیر در صورت کاهش جرم طبقه، به صورت میانگین جابجایی نسبی طبقات به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین به ترتیب ۳۰ و ۱۰ درصد افزایش یافته است.

(۲) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، در مقادیر شتاب مطلق در تمامی طبقات تغییرات قابل توجهی ایجاد کرده است به طوری که در حالت با پایه صلب و انعطاف پذیر در صورت کاهش جرم طبقه، به صورت میانگین شتاب مطلق طبقات به ترتیب ۱۰ و ۳ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین به ترتیب ۱۰ و ۴۰ درصد افزایش یافته است.

(۳) لحاظ اندرکنش خاک-سازه در سازه مورد نظر با شدت مختلف نامنظمی های جرمی، در مقادیر جابجایی نسبی تغییرات محسوسی ایجاد کرده است به طوری که در صورت کاهش جرم طبقه، به صورت میانگین جابجایی نسبی طبقات ۰/۲ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین ۵ درصد افزایش یافته است.

(۴) لحاظ اندرکنش خاک-سازه در سازه مورد نظر با شدت مختلف نامنظمی های جرمی، در مقادیر شتاب مطلق تغییراتی ایجاد کرده است به طوری که در صورت کاهش جرم طبقه، به صورت میانگین شتاب مطلق طبقات ۰/۵ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین ۲۲ درصد افزایش یافته است.

این پژوهش برای قضاوت مهندسی در حوزه درصد نامنظمی جرمی در سیستم قاب خمشی کوتاه مرتبه تحت زلزله با لحاظ اندرکنش خاک-سازه بسیار سودمند است. با مطالعه این تحقیق می توان شناخت لرزه ای بیشتری نسبت به رفتار واقعی سازه ها دارای درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در ارتفاع تحت رکوردهای دور از گسل به دست آورد. محدودیت هایی نیز در این تحقیق وجود داشت که در تحقیقات آتی باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد و به آن ها پرداخته شود. نیاز به انجام مطالعات آزمایشگاهی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و آثار نامنظمی می تواند در شناخت رفتار واقعی سازه ها کمک کند. روش های مقیاس سازی جدیدی نیز وجود داشته (همانند مقیاس سازی با استفاده از طیف شرطی) که می تواند نتایج سازه ها را دقیق تر مورد مقایسه قرار دهد، توصیه می شود که این روش ها با روش های آیین نامه ای مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد. همچنین بررسی همزمان مکانیزم ها و مفاصل تشکیل شده برای تحقیقات آتی پیشنهاد می شود.

مراجع

- Akbari, P., Saberi, V., Saberi, H., Eslami, F., Sadeghi, A. (2020). Study the Seismic Behavior of Steel Structures with Concentric Braces with Soil-Structure Interaction. *Civil and project journal*, 2(9), 11-21. Persian.
- Al-Ali, A. A. K. (1999). *Effects of vertical irregularities on seismic behavior of building structures*. Stanford University.
- ASCE7-10 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, (2010). *Asce7-10*.
- Broujerdian, V., Mohammadi Dehcheshmeh, E., & Safari, P. (2023). Seismic performance assessment of intermediate moment-resisting steel frames designed based on misidentified site soil classes. *Sci. Iran*.
- Chen, L. (2016). Dynamic interaction between rigid surface foundations on multi-layered half space. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 16(05), 1550004.
- Eimani kalehsar, H., & Kiani, M. (2023). Investigating the effect of soil-structure interaction on the seismic performance of buildings having medium flexural frame with mass irregularity. *J. Struct. Constr. Eng.*, doi: 10.22065/jsce.2023.404764.3162. Persian
- El Ganainy, H., & El Naggar, M. H. (2009). Seismic performance of three-dimensional frame structures with underground stories. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 29(9), 1249–1261.
- FEMA, (2009). *FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.
- Gajan, S., Hutchinson, T. C., Kutter, B. L., Raychowdhury, P., Ugalde, J. A., & Stewart, J. P. (2008). *Numerical models for analysis and performance-based design of shallow foundations subjected to seismic loading*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Gazetas, G. (1998). Seismic soil-structure interaction: New evidence and emerging issues State of the Art Paper. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Geo-Institute ASCE Conference*.
- Gazetas, G., & Apostolou, M. (2004). Nonlinear soil–structure interaction: foundation uplifting and soil yielding. In *Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, 29–30.
- IBC Standard, (2013). *Iranian Building Codes And Standards, Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition*.
- INBC Part 6th, (2013). *Iranian National Building Code, Part 6th , Design Loads for Buildings*.
- Kazemi, F., & Jankowski, R. (2023). Enhancing seismic performance of rigid and semi-rigid connections equipped with SMA bolts incorporating nonlinear soil-structure interaction. *Eng. Struct.*, 274, 114896.
- Kazemi, F., & Jankowski, R. (2023). Machine learning-based prediction of seismic limit-state capacity of steel moment-resisting frames considering soil-structure interaction. *Comput. Struct.*, 274, 106886.
- Kazemi, F., Asgarkhani, N., & Jankowski, R. (2023). Probabilistic assessment of SMRFs with infill masonry walls incorporating nonlinear soil-structure interaction. *Bull. Earthq. Eng.*, 21(1), 503–534.
- Le- Trung, K., Lee, K., Lee, J., & Lee, D. H. (2012). Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 21, (3), 215–232.
- M. Dehcheshmeh, E., Rashed, P., Broujerdian, V., Shakouri, A., & Aslani, F. (2023). Predicting Seismic Collapse Safety of Post-Fire Steel Moment Frames. *Buildings*, 13(4), 1091.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). OpenSees command language manual. *Pacific earthquake engineering research (PEER) center*, 264(1), 137-158.
- Michalis, F., Dimitrios, V., & Manolis, P. (2006). Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine- storey steel frame. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 35(12), 1489–1509.
- Naeim, F. (1989). *The seismic design handbook*. Springer Science & Business Media.
- Pirizadeh, M., & Shakib, H. (2013). Probabilistic seismic performance evaluation of non-geometric vertically irregular steel buildings. *J. Constr. Steel Res.*, 82, 88–98.

Pouraminian, M., Pourbakhshian, S., Yousefzadeh, H., & Farsangi, E. N. (2021). Reliability-based linear analysis of low-rise RC frames under earthquake excitation. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 6(1), 32.

Rahgozar, N., Pouraminian, M., & Rahgozar, N. (2021). Reliability-based seismic assessment of controlled rocking steel cores. *Journal of Building Engineering*, 44, 102623.

Raychowdhury, P. (2008). Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures. UC San Diego.

Sabouniaghdam, M., Mohammadi Dehcheshmeh, E., Safari, P., & Broujerdian, V. (2022). Probabilistic collapse assessment of steel frame structures considering the effects of soil-structure interaction and height. *Sci. Iran*.

Sameti, A. R., & Ghannad, M. A. (2016). Equivalent linear model for existing soil-structure systems. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 16(02), 1450099.

Sbartai, B. (2016). Dynamic interaction of two adjacent foundations embedded in a viscoelastic soil. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, 16(03), 1450110.

Scawthorn, C., & Chen, W.-F. (2002). *Earthquake engineering handbook*. CRC press.

Suita, K., Yamada, S., Tada, M., Kasai, K., Matsuoka, Y., & Shimada, Y. (2008). Collapse experiment on 4-story steel moment frame: Part 2 detail of collapse behavior. In *Proceedings of the 14th world conference on earthquake engineering, Beijing, China*, 1217.