

The effects of mass irregularity percentage, soil-structure interaction and soil type under the foundation on the seismic performance of steel bending frame buildings

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, Iran

ABSTRACT

This article examines the seismic performance of mid-range steel flexural frame buildings with different mass irregularity percentages designed in accordance with Iranian and foreign valid regulations. For this purpose, a 6-story building located on type C soil and for the Tehran region, which has a very high earthquake risk zone, has been considered for study. Assuming that the investigated buildings were built on type C soil and on type D soil, 22 records far from the fault were analysed in terms of soil-structure interaction and different mass irregularities in height at two levels of DBE and MCE earthquakes. These buildings are simulated in OpenSees finite element software where the nonlinear behaviour of geometry and materials is considered. The results showed that in structures with rigid and flexible foundations, under two levels of earthquake in two types of soil C and D with any type of mass irregularity, the values of relative displacements and acceleration have different patterns. So that the irregular mass changes (decrease and increase) have changed the amount of relative displacements in the lower floors of the structure compared to the regular state (decrease and increase, respectively). While in the upper floors, relative displacements have been created with irregular mass changes (decrease and increase), change (increase and decrease, respectively). In all classes of the irregular structure compared to the regular structure, increasing or decreasing the irregular mass will increase and decrease the absolute acceleration values, respectively. By changing the type of soil from state C to state D, the responses of buildings increase. In general, taking into account the type of local soil (type D instead of C) has increased the amount of relative displacements with less mass irregularities and acceleration by 50% and the amount of relative displacements with more mass by 65% on average.

ARTICLE INFO

Receive Date: 22 January 2024

Revise Date: 02 April 2024

Accept Date: 26 April 2024

Keywords:

Seismic performance

Soil-structure interaction

Steel bending frame systems

Mass irregularity

Nonlinear dynamic analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437080.3333>

*Corresponding author: Houshyar Eimani Kalehsar
Email address: hek@uma.ac.ir

آثار درصد نامنظمی جرمی، اندرکنش خاک-سازه و نوع خاک زیر فونداسیون بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی متوسط فولادی

مریم کیانی^۱، هوشیار ایمانی کله‌سر^{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

چکیده

این مقاله به بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های قاب خمشی متوسط فولادی میان مرتبه با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی که مطابق با آیین‌نامه‌های ایران و معتبر خارجی طراحی شده، می‌پردازد. بدین منظور یک ساختمان ۶ طبقه که بر روی خاک نوع C و برای منطقه تهران که دارای منطقه با پهنه‌بندی خطر زلزله خیلی زیاد واقع شده، جهت مطالعه در نظر گرفته شده‌اند. ساختمان‌های مورد بررسی بر روی خاک نوع C و روی خاک نوع D، تحت ۲۲ رکورد دور از گسل با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و نامنظمی‌های مختلف جرمی در ارتفاع در دو سطح زلزله DBE و MCE تحلیل شده‌اند. این ساختمان‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees شبیه‌سازی که در آن رفتار غیرخطی هندسه و مصالح در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داد که در سازه‌های با پایه صلب و انعطاف پذیر، تحت دو سطح زلزله در دو نوع خاک C و D دارای هر نوع نامنظمی جرمی، مقادیر جابجایی‌های نسبی و شتاب الگوی متفاوتی دارند. به طوری که تغییرات جرم نامنظمی (کاهش و افزایش)، مقدار جابجایی‌های نسبی در طبقات پایینی سازه را نسبت به حالت منظم تغییر (به ترتیب کاهش و افزایش) داده است. در حالی که در طبقات فوقانی مقدار جابجایی‌های نسبی با تغییرات جرم نامنظمی (کاهش و افزایش)، تغییر (به ترتیب افزایش و کاهش) ایجاد شده است. در تمامی طبقات سازه نامنظم نسبت به سازه منظم، با افزایش و یا کاهش جرم نامنظمی به ترتیب افزایش و کاهش مقادیر شتاب مطلق را به همراه دارد. با تغییر نوع خاک از حالت C به حالت D، پاسخ‌های ساختمان‌ها بیشتر می‌شود. به طور کلی نرم در نظر گرفتن نوع خاک محل (نوع D به جای C)، مقدار جابجایی‌های نسبی با نامنظمی‌های جرم کمتر و شتاب را ۵۰ درصد و مقدار جابجایی‌های نسبی با جرم بیشتر را ۶۵ درصد به صورت میانگین افزایش داده است.

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

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437080.3333	۱۴۰۳/۱۰/۳۰	۱۴۰۳/۰۲/۰۷	۱۴۰۳/۰۲/۰۷	۱۴۰۳/۰۱/۱۴	۱۴۰۲/۱۱/۰۲
هوشیار ایمانی کله‌سر hek@uma.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

قاب‌های مقاوم خمشی (MRF)^۱ از تیر و ستون‌هایی تشکیل شده‌اند که با اتصالات جوشی یا پیچی یا هر دو به هم متصل شده‌اند [۱]. مقاومت جانبی و پایداری قاب‌های خمشی بر صلبیت خمشی تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون متکی است [۲]. استفاده از قاب‌های فوق به منظور آزادی انتخاب دیوارهای جداکننده داخلی و فضای کافی به لحاظ معماری قابل توجه است [۱]. هم‌چنین اندرکنش خاک-سازه به عنوان یک پدیده مهم در رفتار سازه‌ها مطرح می‌شود. نقش انعطاف‌پذیری خاک و تأثیر فونداسیون در اثرات اندرکنش خاک-سازه به طور خاص مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده 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 مطالعه اثرات اندرکنش بر رفتار دینامیکی سازه‌ها، دو نتیجه مهم به وجود آمده است که شامل افزایش دوره تناوب سازه و تغییر در میرایی آن است. این اثرات تأثیرگذاری بسزایی بر طراحی سازه دارند و به تعیین روابط مرتبط با این تغییرات در آیین‌نامه‌ها پرداخته شده است. هم‌چنین، اندرکنش‌ها می‌توانند تغییرات قابل توجهی در توزیع نیروها در سازه‌های سخت ایجاد کنند. هم‌چنین بحث نامنظمی در سازه‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه‌ها داشته باشد [۳].

در سال ۱۹۹۹ میلادی العلی و کراوینکلر [۴]، اثرات نامنظمی ارتفاع در توزیع نیاز لرزه‌ای در ارتفاع سازه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نامنظمی ترکیبی سختی و مقاومت، نامنظمی مقاومت، نامنظمی سختی و در نهایت نامنظمی جرمی به ترتیب بیشترین آثار افزایش نیاز لرزه‌ای را در نتایج داشته‌اند. همین‌طور، وجود نامنظمی در ارتفاع بر تغییر مکان بام تأثیر زیادی ندارد. در تحقیق دیگر، فراگادکیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی [۵] 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.

در ادامه لیترانگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۰ میلادی به بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم قاب خمشی ویژه فولادی با نامنظمی‌های سختی، مقاومت و جرمی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که الزامات تجربی و تجویزی آیین‌نامه‌ها و محدودیت‌ها برای سازه‌های نامنظم در ارتفاع، می‌بایست متناسب با محل وقوع نامنظمی و تعداد طبقات نامنظم سازه، اعمال شود. هم‌چنین پیری زاده و شکیب [۷] در سال ۲۰۱۳ میلادی، بر اساس مهندسی زلزله عملکردی احتمالاتی، اثرات 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) تأثیر دارد که حتی ممکن است باعث ایجاد ناپایداری کلی در سیستم شود. این آثار ممکن است با توجه به موقعیت نامنظمی بر روی ظرفیت شدت لرزه‌ای و یا ظرفیت شکل‌پذیری سازه تأثیر داشته باشد.

با توجه به اهمیت اندرکنش خاک-سازه، در سال ۱۹۹۸ میلادی گزتاس و مایلوناکیز [۸]، لحاظ آثار اندرکنش خاک-پی-سازه را سبب ایجاد رفتار واقعی‌تری از سازه بیان نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که وجود خاک نرم در زیر سازه باعث کاهش سختی سیستم و در پی آن افزایش زمان تناوبی کل سازه شده است. در ادامه گزتاس و آپوستلو [۹] در سال ۲۰۰۴ میلادی 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 طولانی‌مدت و محتوای فرکانسی آن) از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها است. هم‌چنین در سال ۲۰۰۹ میلادی الغنائینی و النجار [۱۰]، به بررسی عملکرد ساختمان‌های قاب خمشی فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-

^۱ Moment Resisting Frames

سازه تحت بارهای دینامیکی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که آثار اندرکنش خاک-سازه موجب کاهش نیاز مقاومت و افزایش نیاز تغییرشکل سازه می‌شوند ولی لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه افزایش نیاز شکل‌پذیری و مقاومت را به همراه دارد. در پایان بیان کردند که آثار اندرکنش خاک-سازه با تغییر نیاز شکل‌پذیری و نیاز مقاومت سازه، در هر دو محدوده رفتار خطی و غیرخطی سازه‌ها تأثیر می‌گذارد. در ادامه تحقیقات محققان مختلف به مقایسه روش‌های عددی و روش‌های زیرسازه برای بررسی اندرکنش خاک-سازه پرداخته‌اند [۱۱]-[۱۳].

نوعی دیگر از رفتار گهواره‌ای سازه‌ها به موجب اثر اندرکنش خاک-سازه و ایجاد حرکت گهواره‌ای به سبب تسلیم شدن کف ستون‌ها است. هوائی و موبدی [۱۴] در سال ۲۰۱۵، به بررسی این رفتار بر روی پاسخ سازه‌ها با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی به همراه مهاربندهای فولادی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که عملکرد سازه با لحاظ حرکت گهواره‌ای و اندرکنش خاک-سازه، باعث کاهش پاسخ‌های سازه از جمله انرژی کرنشی، نیروی محوری و برش پایه می‌شود. رفتار سازه‌های با دیوار برشی فولادی و با لحاظ اندرکنش خاک-سازه در تحقیقی دیگر [۱۵] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن تحقیق نشان داد که نسبت برش به وزن مؤثر تجمعی طبقات در خاک‌های سخت‌تر، تحت هر دو نوع رکورد لرزه‌ای با تغییرات ناچیز همراه است. اما در خاک‌های نرم‌تر، تحت رکوردهای لرزه‌ای دور و نزدیک گسل، این نسبت کاهش یافته است. علاوه بر این جابجایی نسبی طبقات در سازه‌های با خاک سخت نسبت به سازه‌های با خاک نرم‌تر، افزایش کمتری دارد که این مسأله در خاک‌های نرم می‌تواند منجر به خسارت بیشتری در سازه شود. در ادامه، برای بررسی اثرات ضخامت بلوک‌های خاک زیر سازه، هوائی و ایزدپرست [۱۶] در سال ۲۰۲۱ به بررسی تأثیر مدل‌سازی ضخامت بلوک خاک به‌منظور لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه در پاسخ‌های دینامیکی ساختمان‌های بلندمرتبه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ضخامت بر نتایج آنالیز تأثیر بسزایی دارد و باعث کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه همچون حداکثر جابجایی جانبی طبقات، برش پایه سازه، بلندشدگی فونداسیون، تنش‌ها در سیستم، شتاب سطح زمین و شتاب حداکثر بام سازه می‌شود.

به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی متداول آیین‌نامه دارای شکل‌پذیری متوسط با لحاظ اندرکنش خاک-سازه، صابونی‌ا قدم و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۲۲ مطالعه‌ای انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که سازه‌های میان مرتبه طراحی شده با آیین‌نامه‌های داخل ایران، دارای خسارت پذیری کمی در مقابل بارهای زلزله می‌شوند. همچنین لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه باعث افزایش انعطاف‌پذیری سازه و کاهش آسیب‌پذیری در سازه‌ها در مقابل بارهای زلزله می‌شود. در ادامه بروجردیان و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۳ نشان دادند در صورتی که نوع خاک اعمال شده در طراحی متفاوت از خاک محل باشد، می‌تواند در هنگام زلزله، افزایش یا کاهش آسیب‌پذیری سازه را به همراه داشته باشد. در صورتی که خاک محل نرم‌تر از خاک موردنظر طراحی باشد، احتمال آسیب افزایش می‌یابد و اگر خاک محل سخت‌تر از خاک موردنظر طراحی باشد، احتمال آسیب سازه کاهش می‌یابد. همچنین ایمانی و کیانی [۳] در سال ۲۰۲۳ به بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی متوسط ۶ و ۹ طبقه پرداختند. آن‌ها نشان دادند که لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه در سازه ۶ طبقه تأثیر بسزایی در پاسخ‌های سازه ندارد و در صورتی که اثر اندرکنش خاک-سازه در ساختمان ۹ طبقه مشهود است. هم‌چنین با تغییر نوع خاک از حالت C به حالت D، پاسخ‌های سازه‌ها بیشتر می‌شود. هم‌چنین آثار نامنظمی جرمی می‌تواند مقادیر پاسخ‌های سازه را در دو ساختمان ۶ و ۹ طبقه به شدت افزایش دهد.

به منظور بررسی اثر میان‌قاب با مصالح بنایی بر روی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی تحت رکوردهای دور از گسل با لحاظ اندرکنش خاک-سازه، کاظمی و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۲۳ نشان دادند که با تغییر موقعیت دیوار میان‌قاب با مصالح بنایی در قاب‌های خمشی، می‌تواند حالت حدی ظرفیتی لرزه‌ای قاب خمشی مدنظر را با دو حالت لحاظ و عدم لحاظ اندرکنش خاک-سازه، افزایش دهد. هم‌چنین میان‌قاب با مصالح بنایی نقش اساسی در بهبود عملکرد لرزه‌ای دارد. در تحقیقی دیگر، کاظمی و ژانکوفسکی [۲۰]، به پیش‌بینی رفتار سازه‌های قاب خمشی فولادی با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و با استفاده از روش یادگیری ماشین تحت رکوردهای دور و نزدیک گسل با و بدون پالس پرداختند. در ادامه، آن‌ها به بررسی رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با رفتار اتصالات صلب و نیمه صلب با لحاظ

اندرکنش خاک-سازه پرداختند [۲۱]. آن‌ها نشان دادند که کاهش صلبیت اتصال مقادیر میانه منحنی IDA را کاهش می‌دهد. همچنین مقادیر شتاب طیف مود اول سازه با لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه کاهش یافته است.

به‌طور کلی، تاکنون مطالعات معدودی به بررسی تأثیرات اندرکنش بر عملکرد پرداخته است و نیاز به تحقیقات بیشتر در این زمینه احساس می‌شود. همچنین پدیده‌ای دیگر در پاسخ سازه‌های تحت بارهای جانبی می‌تواند موثر باشد، اثرات نامنظمی سازه‌ها است. یک نوع از نامنظمی‌های موردنظر مطابق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۲۲]، 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. با توجه به این اهمیت، اثرات نامنظمی به شکل‌های مختلف در سازه در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در مناطق مختلف کشور اغلب سازه‌های ساخته‌شده مسکونی از نوع میان مرتبه (با تعداد طبقات ۵ الی ۱۰ طبقه) هستند. همچنین با توجه به اینکه در صورت وجود نامنظمی جرمی در سازه‌ها امکان آسیب بیشتری تحت بارهای جانبی وجود دارد و همین‌طور سازه‌ها در واقعیت بر روی بستر خاک قرار می‌گیرند. در تحقیقات گذشته آثار اندرکنش خاک-سازه به همراه آثار نامنظمی در سازه‌ها به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین در بیشتر مناطق کشور با توجه به اینکه هزینه‌های انجام مطالعات ژئوتکنیک برای سازه‌های مسکونی نسبت به هزینه کل سازه زیاد است، از انجام مطالعات ژئوتکنیک صرف‌نظر می‌شود و یک نوع خاک (بیشتر تیپ ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ یا همان تیپ C آیین‌نامه ASCE7) با صلاحدید مهندس طراح در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق به بررسی ساختمان نامنظم جرمی ۶ طبقه با لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه پرداخته شده است. همچنین نوع خاک موردنظر اولیه در زیر فونداسیون از نوع ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است. سپس علاوه بر آثار خاک نوع ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ که به‌عنوان خاک مدنظر طراحی بود، خاک تیپ ۳ نیز به‌عنوان خاک واقعی مورد بررسی قرار داده شده است. آثار درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۶ طبقه در دو طبقه میانی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور طراحی و شبیه‌سازی سازه‌های موردنظر به ترتیب در نرم‌افزارهای ETABS و OpenSees، انجام می‌شود. تحلیل‌های تاریخچه زمانی، تحت ۲۲ رکورد دور از گسل انجام می‌شود. در پایان نتایج جابجایی نسبی طبقات و شتاب‌های سازه مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مدل‌های سازه‌ای مورد بررسی

در این مطالعه سیستم سازه‌ای قاب خمشی متوسط فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. سازه موردنظر برای شهر تهران که از نظر پهنه‌بندی زلزله، جز مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد ($A=0/35$) است [۲۲]، طراحی و کاربری سازه مسکونی و نوع خاک زمین از نوع ۲ و ۳ 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

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

فونداسیون هر یک از قاب‌های مورد مطالعه را با توجه به در اختیار داشتن مشخصات خاک‌ها و پارامترهای طراحی می‌توان طراحی نمود. با توجه به دوبعدی بودن قاب‌ها، فونداسیون تمامی قاب‌ها به شکل نواری و ابعاد متغیر به صورت پهنای ۱/۵ متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر، طول ۱۶/۵ متر و عمق قرارگیری فونداسیون ۱/۵ برای ساختمان ۶ طبقه طراحی شده است. [۱۷]. عمق یخبندان در نظر گرفته شده برای فونداسیون سازه ۵۰ سانتی‌متر است [۱۷]. همچنین، مشخصات خاک مورد مطالعه که از نوع C و D آیین‌نامه ASCE7 [۲۳] و یا همان خاک نوع ۲ و ۳ استاندارد ۱۲۸۰۰ [۲۲] است، در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات خاک نوع C و D

پارامتر مورد بررسی	(۲)	خاک نوع C	(۳)	خاک نوع D
(۴) سرعت موج برشی (V_s)	(۵) ۳۶۱ m/s	(۶) ۱۷۶ m/s		
(۷) زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	(۸) ۴۲ درجه	(۹) ۳۸ درجه		
(۱۰) ضریب چسبندگی (c)	(۱۱) ۰	(۱۲) ۵ kPa		
(۱۳) ضریب پواسون (ν)	(۱۴) ۰/۳۵	(۱۵) ۰/۳۵		
(۱۶) مدول برشی (G)	(۱۷) ۲۸۰ MPa	(۱۸) ۶۰ MPa		
(۱۹) وزن مخصوص (γ)	(۲۰) ۲۱ kN/m ³	(۲۱) ۱۹ kN/m ³		

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ETABS 2016 و مقاطع مرسوم فولادی استاندارد، ساختمان ۶ طبقه به روش LRFD (مطابق ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شده است. 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 [۲۴] صورت گرفته است (مطابق بارهای جدول ۴) و همچنین ملاحظات لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ [۲۲] (از روش تحلیل طیفی) مدنظر قرار گرفته است. مقاطع سازه‌های طراحی شده در جدول ۵ نشان داده شده است. قاب‌های میانی از نوع باربر ثقیل و قاب‌های پیرامونی از نوع باربر جانبی در نظر گرفته شده است. برای انجام تحلیل‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت مدل دوبعدی، قاب مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این که تعداد دهانه‌های باربر جانبی در دو جهت قاب یکی هستند، مقادیر DCR برای تمامی قاب‌های خمشی در هر دو جهت متعامد مشابه هم می‌باشد. در شکل ۲ مقادیر DCR، برای یکی از قاب‌های یک جهت ارائه شده است.

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 ۶ طبقه طراحی شده مدنظر این تحقیق

طبقات	اعضا	
	۴-۵	۱-۳
IPB280	IPB320	IPB400
IPB160	IPB180	IPB240
IPE360	IPE450	IPE500
IPE330	IPE330	IPE330
IPE220	IPE220	IPE220

۲-۲- شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای

توسط مراجع مختلف رکوردهای لرزه‌ای اعمالی به سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است که یکی از مراجع معتبر و مورد استفاده در پژوهش‌ها و تحقیق‌ها آیین‌نامه FEMA P695 [۲۵] می‌باشد. آیین‌نامه FEMA P695 [۲۵] رکوردهای زلزله را به دودسته دور از گسل^۲ و نزدیک به گسل^۳ تقسیم کرده است. در این مجموعه رکوردهای زلزله‌ای که در فاصله بیشتر از ۱۰ کیلومتر از محل گسل، ثبت شده‌اند را به‌عنوان رکورد دور از گسل و رکوردهایی که در فاصله‌ی نزدیک‌تر از ۱۰ کیلومتر ثبت شده باشند را رکوردهای نزدیک به گسل شناخته است. در این دست‌ورعمل 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. مشخصات رکوردهای لرزه‌ای مدنظر در جدول ۶ آورده شده است.

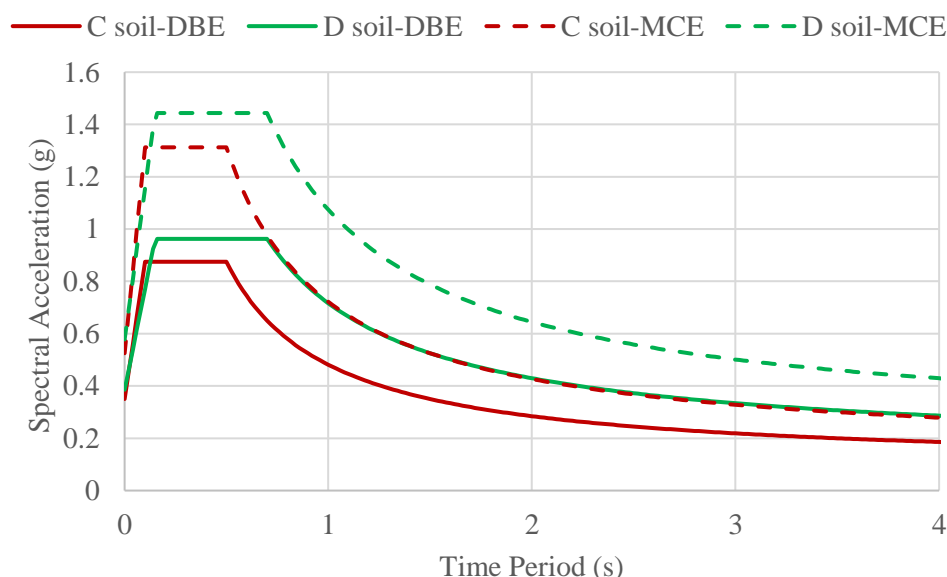
² Far Field

³ Near Field

جدول ۶: رکوردهای دور از گسل مورد بررسی این تحقیق [۲۵]

ID	زلزله	سال	ایستگاه	M_w	R_{JB} (km)	PGA_{max} (g)	PGV_{max} (cm/s)	نوع خاک
1	Northridge	1994	Beverly Hills – Mulhol	6.7	9.4	0.52	63	D
2	Northridge	1994	Canyon Country-WLC	6.7	11.4	0.48	45	D
3	Duzce, Turkey	1999	Bolu	7.1	12	0.82	62	D
4	Hector Mine	1999	Hector	7.1	10.4	0.34	42	C
5	Imperial Valley	1979	Delta	6.5	22	0.35	33	D
6	Imperial Valley	1979	El Centro Array #11	6.5	12.5	0.38	42	D
7	Kobe, Japan	1995	Nishi-Akashi	6.9	7.1	0.51	37	C
8	Kobe, Japan	1995	Shin-Osaka	6.9	19.1	0.24	38	D
9	Kocaeli, Turkey	1999	Duzce	7.5	13.6	0.36	59	D
10	Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.5	10.6	0.22	40	C
11	Landers	1992	Yermo Fire Station	7.3	23.6	0.24	52	D
12	Landers	1992	Coolwater	7.3	19.7	0.42	42	D
13	Loma Prieta	1989	Capitola	6.9	8.7	0.53	35	D
14	Loma Prieta	1989	Gilroy Array #3	6.9	12.2	0.56	45	D
15	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.4	12.6	0.51	54	C
16	Superstition Hills	1987	El Centro Imp. Co.	6.5	18.2	0.36	46	D
17	Superstition Hills	1987	Poe Road (temp)	6.5	11.2	0.45	36	D
18	Cape Mendocino	1992	Rio Dell Overpass	7.0	7.9	0.55	44	D
19	Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY101	7.6	10	0.44	115	D
20	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU045	7.6	26	0.51	39	C
21	San Fernando	1971	LA - Hollywood Stor	6.6	22.8	0.21	19	D
22	Friuli, Italy	1976	Tolmezzo	6.5	15	0.35	31	C

برای مقیاس سازی شتاب‌نگاشت‌های انتخاب‌شده، مولفه با شتاب بیشتر انتخاب می‌شود. سپس طیف‌های رکوردهای لرزه‌ای شتاب‌نگاشت‌های مورد نظر را g مقیاس می‌شود. طیف‌های رکوردها را در محدوده زمان تناوبی $0.1T$ 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 تعیین‌شده، باید ضریب مقیاس طوری تعیین شود که طیف سازه‌ها بالاتر از طیف آیین‌نامه قرار گیرد. ضریب مقیاس تعیین‌شده باید در شتاب‌نگاشت‌های مقیاس‌شده ضرب شود و در تحلیل‌ها مورد استفاده قرار گیرد [۲۵]. به‌عنوان نمونه، طیف پاسخ طراحی در سطح زلزله MCE و DBE در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: طیف پاسخ طراحی در دو سطح زلزله DBE و MCE

۳- روش مدل سازی در نرم افزار OpenSees

مدل سازی سیستم خاک-فونداسیون توسط روش وینکلر انجام گرفته است. مدل فونداسیون غیرخطی وینکلر (BNWF) می تواند رفتار سیستم خاک و فونداسیون را تعیین کند. هم چنین هر دو حالت رفتار غیرخطی و غیر الاستیک خاک (غیرخطی ماده ای) و بلندشدگی (غیرخطی هندسی) را در نظر می گیرد.

مطابق مرجع [۲۱] جرم لرزه ای مدنظر در این سازه برابر با $1.05DL + 0.5LL$ در نظر گرفته شده است. قاب موردنظر در این تحلیل قاب خمشی پیرامونی است. لازم به ذکر است که در این پروژه از مدل دوبعدی جهت شبیه سازی استفاده شده است که در این مدل ها، قاب پیرامونی خمشی سازه را مدل سازی کرده و از طریق ستون های انتهایی متکی آثار P-Δ قاب های ثقلی را لحاظ می کند [۲۷]. از المان غیرخطی با مقطع فایبر برای المان های موردنظر تیر و ستون استفاده شده است. هم چنین مصالح مورد استفاده برای تیر و ستون ها از نوع Steel02 بوده است.

از مدل وینکلر برای مدل سازی فونداسیون در نرم افزار OpenSees، استفاده شده است. این مدل با استفاده از نوعی المان با طول صفر در محل پیش بینی شده ی رفتار غیرخطی خاک را تامین می کند. این المان طول صفر در محیط OpenSees با نام Zerolength معرفی می شود. با کمک المان ZeroLength در این محیط می توان دونقطه با یک مختصات را در درجه ی آزادی دلخواه توسط یک منحنی نیرو تغییر مکان تک محوری به یکدیگر متصل کرد [۲۸]. بنابراین می توان دو مصالح QzSimple و TzSimple مطابق [۱۷] را به درجات آزادی قائم و افقی این المان تخصیص داده و آن را به عنوان فنر وینکلر در نظر گرفت [۲۹]. هم چنین میرایی در روش وینکلر با توجه به [۲۹] در نظر گرفته شده است. در این روش میرایی تشعشی توسط مصالح خاک و یک میراگر در ناحیه ی دور برای هر فنر با طول صفر در نظر گرفته می شو که نیروی ویسکوز نیز متناسب با سرعت در ناحیه دور، در هر فنر ایجاد می شود. در این مطالعه میرایی تشعشی برابر با ۵ درصد در نظر گرفته شده است.

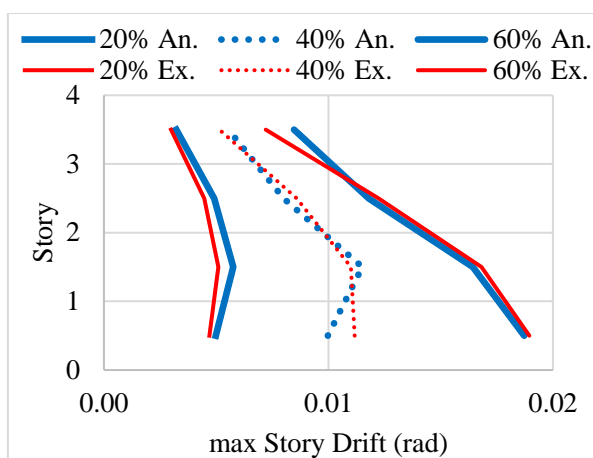
۴-۲ اعمال آثار نامنظمی جرمی در مدل ها

آثار نامنظمی جرمی در سازه با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ [۲۲] به سازه موردنظر، اعمال شده است. مطابق این استاندارد، برای ایجاد نامنظمی جرمی در این تحقیق و هم چنین برای اینکه محدوده ای از حالت های ممکن برای سازه در نظر گرفته شود، سه حالت برای کاهش جرم و چهار حالت برای افزایش جرم دو طبقه میانی سازه ۶ طبقه، مدنظر قرار گرفت. یکبار جرم دو طبقه میانی سازه ۶ 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 دو طبقه میانی افزایش داده شده است.

۵-۲ صحت سنجی مدل سازی عددی

سوویتا و همکاران یک سازه ی فولادی ۴ طبقه با ابعاد واقعی را در میز لرزه ی مرکز دفاعی ژاپن تحت شتاب نگاشت زلزله قراردادند و رفتار آن را در مرحله ی فروریزش مطالعه کردند [۳۰]. پلان مورد مطالعه به ابعاد ۱۰ متر در جهت (Y) و ۶ متر در جهت (X) است و هر طبقه ۳/۵ متر ارتفاع دارد و ارتفاع کلی سازه برابر با ۱۴ متر است. ستون ها از قوطی های مربعی فولاد سردنورد شده و تیرها از مقاطع I شکل گرم نورد شده ساخته شده اند [۳۰]. این سازه بر اساس آئین نامه ها و مقررات لرزه ای کشور ژاپن در آن زمان طراحی شده بود. تمام مشخصات مربوط به مقاطع و مصالح این سازه از مرجع [۳۰] و برای اعمال بار لرزه ای از زلزله ی ثبت شده ی Kobe در ایستگاه Takatori استفاده شده است. در این مطالعه قاب دو دهانه ای این سازه مدل سازی و در مدل رایانه ای صحت سنجی تحقیق حاضر، اثر دال بر تیرها و ستون ها صرف نظر گردیده است. این قاب در نرم افزار OpenSees مدل سازی و تحت زلزله ی راستای شرقی- غربی (EW) زلزله ی Kobe در ایستگاه Takatori قرار گرفت. مطابق مرجع موردنظر، زلزله ها در ۳ سطح ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ شتاب، به سازه اعمال و بیشترین جابجایی

نسبی میان طبقه‌های سازه با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد. نتایج به دست آمده در این تحقیق نیز مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی مطابق شکل ۴ دارد.

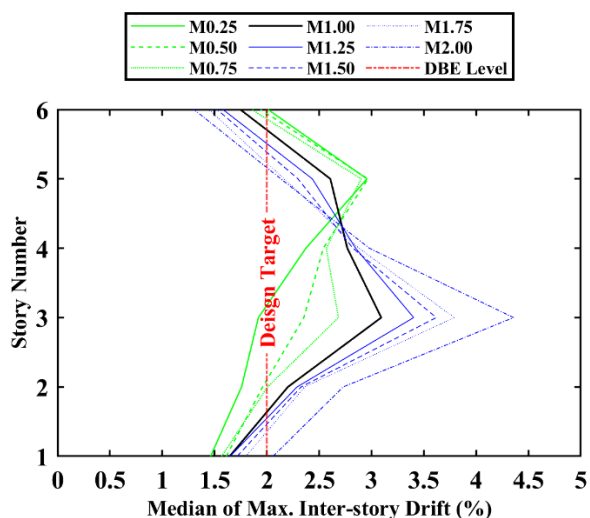


شکل ۴: مقایسه نتایج صحت سنجی مدل عددی در نرم افزار OpenSees با نتایج مدل آزمایشگاهی [۱۹]

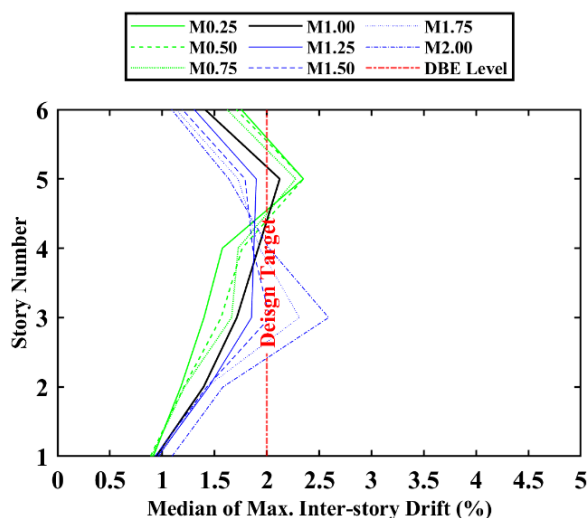
۳- نتایج و بحث

۳-۱- خروجی‌های جابجایی نسبی طبقات

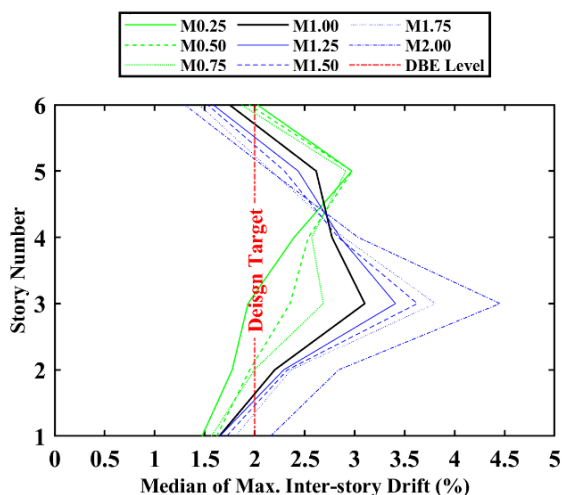
شکل ۵، مقادیر حداکثر جابجایی نسبی طبقات را برای سازه‌های موردنظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE (زلزله سطح خطر ۱ یا همان زلزله طرح) و سطح خطر لرزه‌ای MCE (زلزله سطح خطر ۲ یا بیشینه زلزله محتمل که برابر با ۱/۵ برابر زلزله سطح DBE در نظر گرفته می‌شود) با لحاظ اثرات نامنظمی‌های جرمی مختلف در دو طبقه میانی برای سازه ۶ طبقه برای دو حالت با پایه صلب و انعطاف پذیر و در دو حالت خاک نوع C و D نشان می‌دهد. در این شکل، عبارت جابجایی نسبی Design Target همان مقدار اولیه جابجایی مجاز موردنظر طراحی سازه قرار گرفته بر روی خاک نوع C است. به عنوان مثال نمودارهای M0.25، M0.5 و M0.75 معرف سازه‌های نامنظم جرمی با پایه صلب و انعطاف پذیر با کاهش جرم دو طبقه میانی سازه موردنظر به ترتیب به مقدار ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد است. همچنین M1.25، M1.5 و M2، M1.75 معرف سازه‌های نامنظم جرمی با پایه صلب و انعطاف پذیر با افزایش جرم دو طبقه میانی سازه موردنظر به ترتیب به مقدار ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد هستند. در شکل موردنظر و سازه ۶ طبقه، در سازه‌های با پایه صلب و انعطاف پذیر در هر دو نوع خاک C و D تحت سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE، نامنظمی‌هایی که جرم کمتری دارند مقدار جابجایی‌های نسبی در طبقات پایینی نسبت به سازه منظم، کمتر است. در حالی که در طبقات بالاتر (۴ و بالاتر) حتی اگر جرم کمتر شود مقدار جابجایی‌های نسبی در مقایسه با سازه منظم افزایش یافته است، که بیشینه تفاوت این اثرات در حالت M0.25 اتفاق افتاده است. همچنین در سازه‌های با پایه صلب و انعطاف پذیر در هر دو نوع خاک C و D تحت سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE، در نامنظمی‌های با جرم بیشتر در طبقات پایینی مقدار جابجایی‌های نسبی نسبت به سازه منظم، افزایش یافته است در حالی که در طبقات بالاتر مقدار جابجایی‌های نسبی نسبت به سازه منظم با کاهش روبه‌رو شده است. همچنین حداکثر مقدار تفاوت این آثار در حالت M2 است. با افزایش شدت زلزله و نرم‌تر در نظر گرفتن خاک (نوع D) این آثار تشدید یافته است. همچنین با افزایش شدت نامنظمی‌ها بیشینه پاسخ‌های جابجایی نسبی بیشتر شده است. لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه تغییرات محسوسی در پاسخ‌های جابجایی نسبی ندارد.



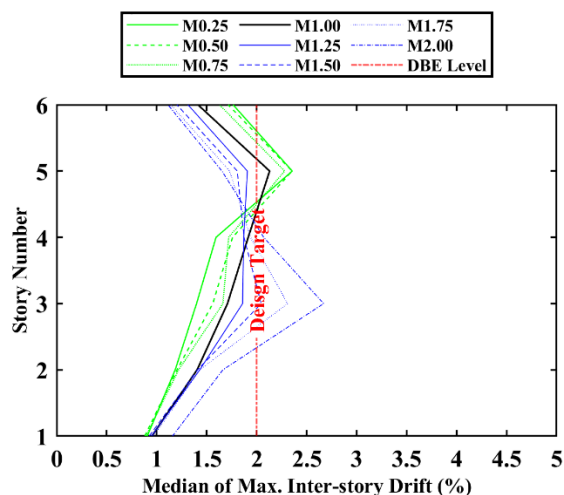
(ب) سازه با پایه ثابت و خاک نوع C تحت MCE



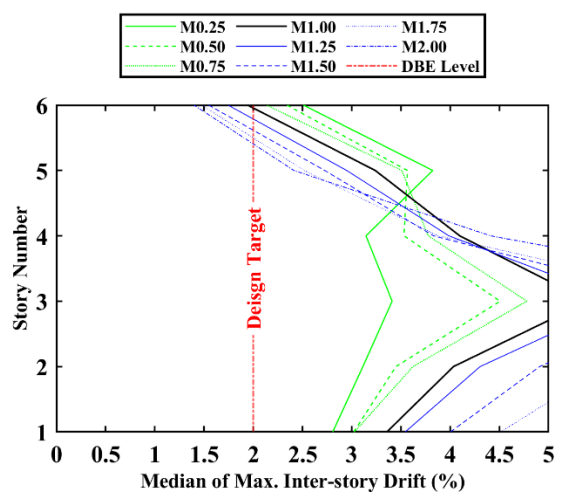
(الف) سازه با پایه ثابت و خاک نوع C تحت DBE



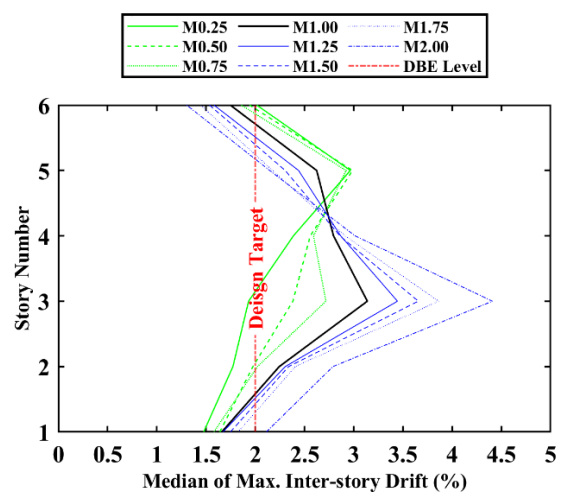
(ت) سازه با پایه انعطاف پذیر و نوع خاک C تحت MCE



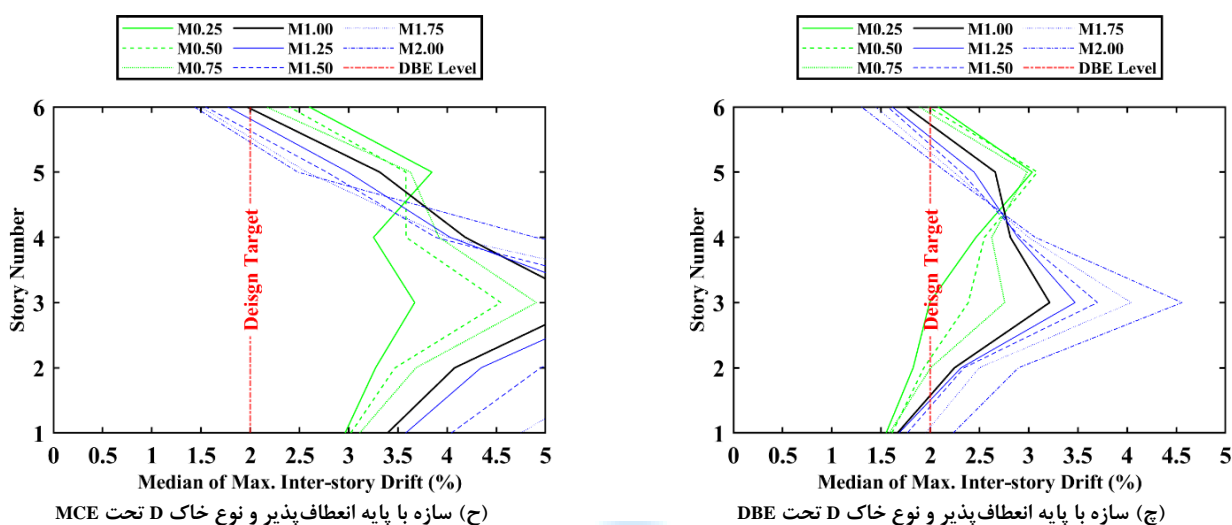
(پ) سازه با پایه انعطاف پذیر و نوع خاک C تحت DBE



(ج) سازه با پایه ثابت و خاک نوع D تحت MCE



(ث) سازه با پایه ثابت و خاک نوع D تحت DBE



شکل ۵: حداکثر جابجایی نسبی با در نظر گرفتن اثرات مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۶ طبقه با پایه صلب و انعطاف پذیر در دو حالت خاک نوع C و D در سطح خطر لرزه‌ای

جدول ۷، بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه‌های ۶ طبقه موردنظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در سطح زلزله DBE، مقادیر جابجایی نسبی سازه‌های نامنظم مختلف در نوع خاک C برای دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، بیشتر از سازه منظم است. همین‌طور در این نوع خاک، با افزایش شدت زلزله یعنی سطح زلزله MCE، مقادیر جابجایی نسبی در سازه‌های نامنظم وقتی جرم کاهش داده شده کمتر از سازه منظم و وقتی جرم افزایش داده شده، بیشتر شده است. ولی در سازه‌های ۶ طبقه واقع شده بر روی خاک نوع D، با ایجاد نامنظمی‌های مختلف در هر دو سطح زلزله مقادیر جابجایی‌های نسبی در هر دو حالت خاک پایه صلب و انعطاف پذیر در سازه‌های نامنظم وقتی جرم کاهش داده شده کمتر از سازه منظم و وقتی جرم افزایش داده شده، بیشتر شده است.

جدول ۷: بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه‌های موردبررسی دارای آثار منظمی و نامنظمی‌های مختلف تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح

MCE و DBE

MCE		DBE		نوع خاک محل	نوع سازه از نظر نامنظمی
پایه انعطاف پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف پذیر	پایه صلب		
۲/۹۷	۲/۹۶	۲/۳۶	۲/۳۵	خاک C	M0.25
۳/۸۵	۳/۸۲	۳/۰۴	۲/۹۷	خاک D	
۲/۹۷	۲/۹۷	۲/۳۵	۲/۳۵	خاک C	M0.5
۴/۵۴	۴/۵۱	۳/۰۹	۲/۹۹	خاک D	
۲/۹۱	۲/۹	۲/۲۸	۲/۲۸	خاک C	M0.75
۴/۹۱	۴/۷۸	۲/۹۹	۲/۹۲	خاک D	
۳/۱	۳/۰۹	۲/۱۳	۲/۱۲	خاک C	M1
۵/۴۷	۵/۴	۳/۲۱	۳/۱۴	خاک D	
۳/۴۱	۳/۴	۱/۹۱	۱/۹	خاک C	M1.25
۵/۸۲	۵/۷۵	۳/۴۷	۳/۴۵	خاک D	
۳/۶۳	۳/۶۲	۲/۰۴	۲/۰۳	خاک C	M1.5
۶/۴۴	۶/۴	۳/۷	۳/۶۶	خاک D	
۳/۸۱	۳/۷۹	۲/۳۱	۲/۳۱	خاک C	M1.75
۶/۹۸	۶/۸۱	۴/۰۴	۳/۸۶	خاک D	
۴/۴۵	۴/۳۶	۲/۶۷	۲/۵۹	خاک C	M2
۸/۶۸	۸/۰۳	۴/۵۶	۴/۴۱	خاک D	

در جدول ۸، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه‌های نامنظم نسبت به سازه منظم با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در دو نوع خاک مورد بررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. علامت منفی نشان‌دهنده کاهش مقادیر پاسخ-های سازه نامنظم نسبت به سازه منظم است. آثار نامنظمی‌های جرمی مختلف بر روی سازه با پایه انعطاف‌پذیر نسبت به سازه با پایه صلب مقادیر جابجایی‌های نسبی را در هر دو سطح زلزله افزایش داده است. آثار نامنظمی‌های جرمی مختلف بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C بسیار در افزایش مقادیر جابجایی‌های نسبی در هر دو سطح زلزله تأثیرگذار است. ولی در حالتی که تحت زلزله DBE جرم طبقات کمتر شده خاک نوع D نسبت به خاک C سبب کاهش مقادیر جابجایی‌های نسبی شده است. این آثار با افزایش شدت زلزله و نامنظمی محسوس‌تر است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر جابجایی نسبی پایه انعطاف‌پذیر نامنظم نسبت به منظم در نوع خاک‌های C و D در حالت M2 به ترتیب برابر با ۲۵/۴ و ۴۲/۱ درصد است.

جدول ۸: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های نامنظم نسبت به سازه‌ی منظم

MCE	DBE	نوع خاک محل	اندرکنش خاک-سازه	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
-۴/۲	۱۰/۸	خاک C	صلب	M0.25
-۲۹/۳	-۵/۴	خاک D		
-۴/۲	۱۰/۸	خاک C	انعطاف‌پذیر	
-۲۹/۶	-۵/۳	خاک D		
-۳/۹	۱۰/۸	خاک C	صلب	M0.5
-۱۶/۵	-۴/۸	خاک D		
-۴/۲	۱۰/۳	خاک C	انعطاف‌پذیر	
-۱۷	-۳/۷	خاک D		
-۶/۱	۷/۵	خاک C	صلب	M0.75
-۱۱/۵	-۷	خاک D		
-۶/۱	۷/۰۴	خاک C	انعطاف‌پذیر	
-۱۰/۲	-۶/۹	خاک D		
۱۰/۰۳	-۱۰/۴	خاک C	صلب	M1.25
۶/۵	۹/۹	خاک D		
۱۰	-۱۰/۳	خاک C	انعطاف‌پذیر	
۶/۴	۸/۱	خاک D		
۱۷/۲	-۴/۲	خاک C	صلب	M1.5
۱۸/۵	۱۶/۶	خاک D		
۱۷/۱	-۴/۲	خاک C	انعطاف‌پذیر	
۱۷/۷	۱۵/۳	خاک D		
۲۲/۷	۹	خاک C	صلب	M1.75
۲۶/۱	۲۲/۹	خاک D		
۲۲/۹	۸/۵	خاک C	انعطاف‌پذیر	
۲۷/۶	۲۵/۹	خاک D		
۴۱/۱	۲۲/۲	خاک C	صلب	M2
۴۸/۷	۴۰/۴	خاک D		
۴۳/۵	۲۵/۴	خاک C	انعطاف‌پذیر	
۵۸/۷	۴۲/۱	خاک D		

در جدول ۹، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه پایه انعطاف‌پذیر و صلب با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در دو نوع خاک مورد بررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار انعطاف‌پذیری بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C بسیار در افزایش مقادیر جابجایی نسبی تأثیرگذار است. این آثار با ایجاد نامنظمی‌های جرمی بیشتر افزایش یافته است. با افزایش شدت زلزله درصد اختلاف جابجایی نسبی به‌جز در حالتی که جرم دو طبقات میانی دو برابر شده، با کاهش روبه‌رو شده‌اند. به‌عنوان مثال در

حالت نامنظمی M2 تحت سطح زلزله MCE و سازه قرار گرفته بر روی خاک‌های C و D، مقادیر اختلاف سازه پایه انعطاف پذیر و صلب به ترتیب برابر با ۲/۱ و ۸/۱ درصد به دست آمده است.

جدول ۹: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های پایه انعطاف پذیر نسبت به پایه صلب

MCE	DBE	نوع خاک محل	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف		
۰/۳	۰/۴۳	خاک C	M0.25
۰/۸	۲/۴	خاک D	
۰	۰	خاک C	M0.5
۰/۷	۳/۳	خاک D	
۰/۳	۰	خاک C	M0.75
۲/۷	۲/۴	خاک D	
۰/۳	۰/۵	خاک C	M1
۱/۳	۲/۲	خاک D	
۰/۳	۰/۵	خاک C	M1.25
۱/۲	۰/۶	خاک D	
۰/۳	۰/۵	خاک C	M1.5
۰/۶	۱/۱	خاک D	
۰/۵	۰	خاک C	M1.75
۲/۵	۴/۷	خاک D	
۲/۱	۳/۱	خاک C	M2
۸/۱	۳/۴	خاک D	

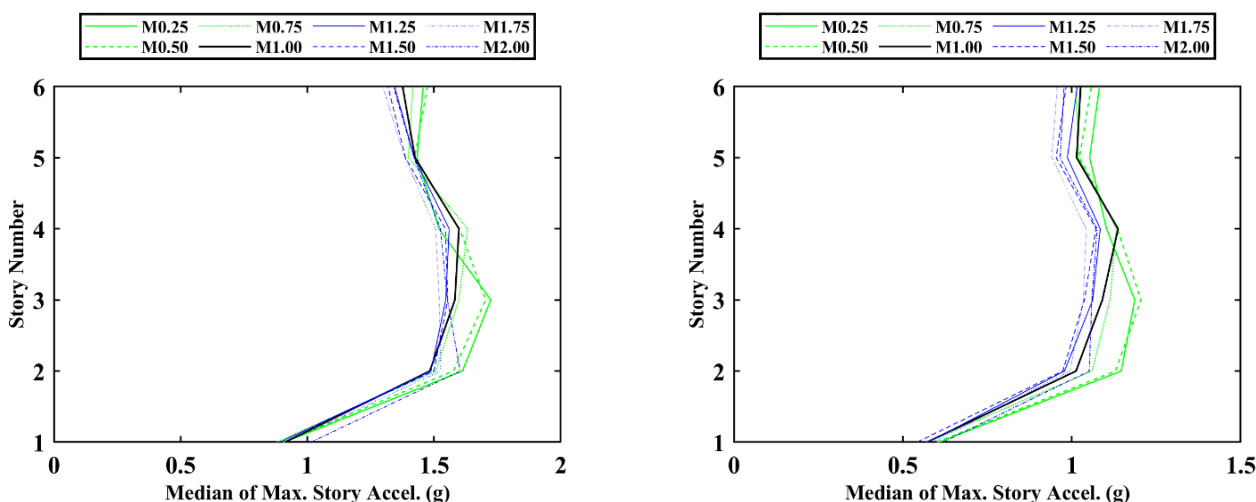
در جدول ۱۰، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه قرار گرفته بر روی دو نوع خاک C و D با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. تأثیر خاک نوع D بر روی سازه‌های با پایه انعطاف پذیر نسبت به حالت با پایه صلب در افزایش مقادیر جابجایی نسبی تأثیرگذار است. همین‌طور آثار خاک نوع D در سازه تحت رکوردهای قوی‌تر بیشتر مشاهده شده است. همچنین با افزایش شدت نامنظمی‌های جرمی این اثرات بیشتر شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات بر روی دو نوع خاک C و D در حالت نامنظمی M0.5 با پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب برابر با ۲۷/۲ و ۳۱/۱ درصد به دست آمده است.

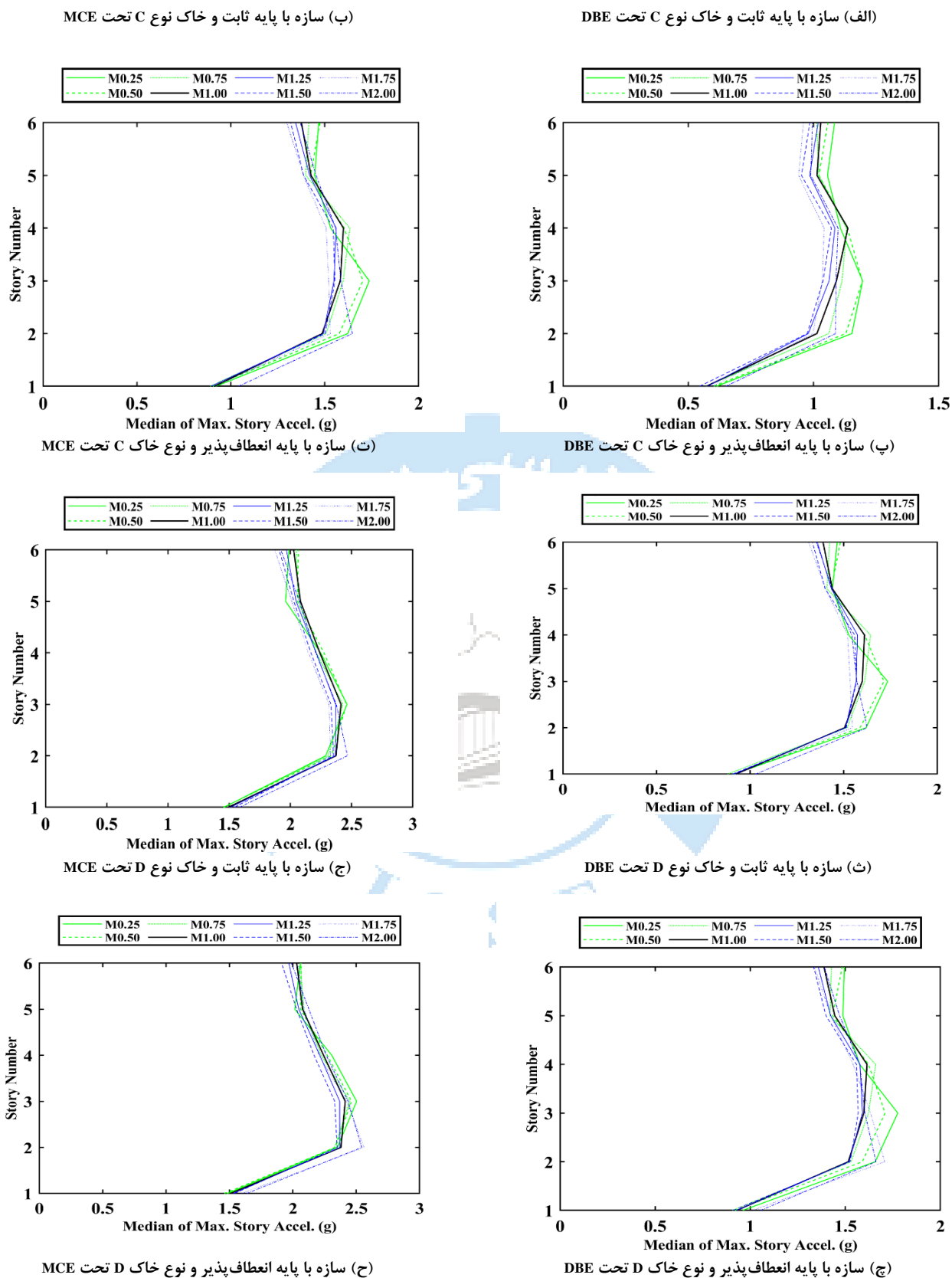
جدول ۱۰: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک‌های مختلف C و D

MCE	DBE	اندرکنش خاک-سازه	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف		
۲۹/۱	۲۶/۴	صلب	M0.25
۲۹/۶	۲۸/۸	انعطاف پذیر	
۵۱/۹	۲۷/۲	صلب	M0.5
۵۲/۹	۳۱/۱	انعطاف پذیر	
۶۴/۸	۲۸/۱	صلب	M0.75
۶۸/۷	۳۱/۱	انعطاف پذیر	
۷۴/۸	۴۸/۱	صلب	M1
۷۶/۵	۵۰/۷	انعطاف پذیر	
۶۹/۱	۸۱/۶	صلب	M1.25
۷۰/۷	۸۱/۷	انعطاف پذیر	
۷۶/۸	۸۰/۳	صلب	M1.5
۷۷/۴	۸۱/۴	انعطاف پذیر	
۷۹/۷	۶۷/۱	صلب	M1.75
۸۳/۲	۷۴/۹	انعطاف پذیر	
۸۴/۲	۷۰/۳	صلب	M2
۹۵/۱	۷۰/۸	انعطاف پذیر	

۲-۳- خروجی‌های شتاب مطلق طبقات

شکل ۶، مقادیر حداکثر شتاب مطلق طبقات را برای سازه‌های موردنظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE با لحاظ اثرات نامنظمی‌های جرمی مختلف در دو طبقه میانی برای سازه ۶ طبقه برای دو حالت با پایه صلب و انعطاف‌پذیر و در دو حالت خاک C و D نشان می‌دهد. در شکل موردنظر و سازه ۶ طبقه، در سازه‌های با پایه صلب و انعطاف‌پذیر در هر دو نوع خاک C و D و تحت سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE، نامنظمی‌هایی که جرم کمتری دارند مقدار شتاب مطلق در بیشتر مواقع در تمامی طبقات نسبت به سازه منظم، بیشتر است که بیشینه تفاوت این اثرات در حالت M0.25 اتفاق افتاده است. در سازه‌های با پایه صلب و انعطاف‌پذیر در هر دو نوع خاک C و D و تحت سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE در نامنظمی‌های با جرم بیشتر، مقدار شتاب مطلق در تمامی طبقات نسبت به سازه منظم، کاهش یافته است. با افزایش شدت زلزله و تغییر نوع خاک به D، این آثار دچار تشدید شده است. همچنین با افزایش شدت نامنظمی‌ها بیشینه پاسخ‌های شتاب در حالت کلی کاهش یافته است. لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه تغییرات محسوسی در پاسخ‌های شتاب ندارد.





شکل ۶: حداکثر شتاب مطلق با در نظر گرفتن اثرات مختلف نامنظمی جرمی در سازه ۶ طبقه با پایه صلب و انعطاف پذیر در دو حالت خاک نوع C و D در سطح خطر لرزه‌ای

جدول ۱۱، بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه‌های ۶ طبقه موردنظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در سطح زلزله DBE، مقادیر شتاب مطلق سازه‌های نامنظم مختلف در نوع خاک C برای دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر، کمتر از سازه منظم است. همین‌طور در این نوع خاک، با افزایش شدت زلزله یعنی سطح زلزله MCE، مقادیر شتاب مطلق سازه‌های نامنظم مختلف برای دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر، بیشتر از سازه منظم است. ولی در سازه‌های ۶ طبقه واقع شده بر روی خاک نوع D، با ایجاد نامنظمی‌های مختلف در هر دو سطح زلزله مقادیر شتاب مطلق در هر دو حالت خاک پایه صلب و انعطاف‌پذیر در سازه‌های نامنظم مختلف بیشتر از سازه منظم است.

جدول ۱۱: بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه‌های موردبررسی دارای آثار منظمی و نامنظمی‌های مختلف تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح

MCE و DBE

MCE		DBE		نوع خاک محل	نوع سازه از نظر نامنظمی
پایه انعطاف‌پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف‌پذیر	پایه صلب		
۱/۷۴	۱/۷۲	۱/۲	۱/۱۹	خاک C	M0.25
۲/۵	۲/۴۶	۱/۷۸	۱/۷۳	خاک D	
۱/۷	۱/۷	۱/۱۹	۱/۲	خاک C	M0.5
۲/۴۶	۲/۴۶	۱/۷۱	۱/۷۱	خاک D	
۱/۶۳	۱/۶۳	۱/۱۳	۱/۱۳	خاک C	M0.75
۲/۴۵	۲/۴۳	۱/۶۶	۱/۶۴	خاک D	
۱/۶	۱/۶	۱/۱۴	۱/۱۴	خاک C	M1
۲/۴۱	۲/۴۱	۱/۶۱	۱/۶۱	خاک D	
۱/۵۶	۱/۵۶	۱/۰۸	۱/۰۸	خاک C	M1.25
۲/۳۷	۲/۳۷	۱/۵۹	۱/۵۷	خاک D	
۱/۵۵	۱/۵۵	۱/۰۷	۱/۰۷	خاک C	M1.5
۲/۳۵	۲/۳۵	۱/۵۷	۱/۵۷	خاک D	
۱/۵۳	۱/۵۳	۱/۰۴	۱/۰۴	خاک C	M1.75
۲/۵۶	۲/۳۳	۱/۷۱	۱/۵۵	خاک D	
۱/۶۵	۱/۶	۱/۱	۱/۰۷	خاک C	M2
۲/۵۴	۲/۴۷	۱/۶۶	۱/۶۳	خاک D	

در جدول ۱۲، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه‌های نامنظم نسبت به سازه منظم با درصد‌های مختلف نامنظمی جرمی در دو نوع خاک موردبررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار نامنظمی‌های جرمی مختلف بر روی سازه با پایه انعطاف‌پذیر نسبت به سازه با پایه صلب مقادیر شتاب را در هر دو سطح زلزله افزایش داده است. آثار نامنظمی‌های جرمی مختلف بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C در بیشتر مواقع سبب کاهش مقادیر شتاب در هر دو سطح زلزله شده است. ولی در حالتی که تحت زلزله DBE جرم طبقات کمتر شده خاک نوع D نسبت به خاک C سبب افزایش مقادیر شتاب شده است. این آثار با افزایش شدت زلزله و نامنظمی، بیشتر مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در حالت نامنظمی M0.25 انعطاف‌پذیر تحت سطح زلزله MCE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D مقادیر اختلاف سازه نامنظم و منظم به ترتیب برابر با ۸/۷۵ و ۳/۷ درصد است.

جدول ۱۲: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های نامنظم نسبت به سازه‌ی منظم

MCE	DBE	نوع خاک محل	اندرکنش خاک-سازه	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۷/۵	۴/۴	خاک C	صلب	M0.25
۲/۱	۷/۵	خاک D		
۸/۷۵	۵/۳	خاک C	انعطاف پذیر	
۳/۷	۱۰/۶	خاک D		
۶/۳	۵/۳	خاک C	صلب	M0.5
۲/۱	۶/۲	خاک D		
۶/۳	۴/۴	خاک C	انعطاف پذیر	
۲/۱	۶/۲	خاک D		
۱/۹	-۰/۹	خاک C	صلب	M0.75
-۰/۸	۱/۹	خاک D		
۱/۹	-۰/۹	خاک C	انعطاف پذیر	
۱/۷	۳/۱	خاک D		
-۲/۵	-۵/۳	خاک C	صلب	M1.25
-۱/۷	-۲/۵	خاک D		
-۲/۵	-۵/۳	خاک C	انعطاف پذیر	
-۱/۷	-۱/۲	خاک D		
-۳/۱	-۶/۱	خاک C	صلب	M1.5
-۲/۵	-۲/۵	خاک D		
-۳/۱	-۶/۱	خاک C	انعطاف پذیر	
-۲/۵	-۲/۵	خاک D		
-۴/۴	-۸/۸	خاک C	صلب	M1.75
-۳/۳	۳/۷	خاک D		
-۴/۴	-۸/۸	خاک C	انعطاف پذیر	
۶/۲	۶/۲	خاک D		
۰	-۶/۱	خاک C	صلب	M2
۲/۵	۰/۶	خاک D		
۳/۱	-۳/۵	خاک C	انعطاف پذیر	
۵/۴	۳/۱	خاک D		

در جدول ۱۳، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه پایه انعطاف پذیر و صلب با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در دو نوع خاک مورد بررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار انعطاف پذیری بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C در سازه‌های با نامنظمی‌های مختلف آنچنان در افزایش مقادیر شتاب تأثیرگذار نیست. در حالتی که جرم دو طبقه میانی ۲۵ درصد کاهش و ۱۰۰ درصد افزایش داده شده، اثرات انعطاف پذیری بیشتر مشاهده می‌شود. هم‌چنین در حالتی که طبقات میانی دارای افزایش جرم ۷۵ درصد و نوع خاک D است، انعطاف پذیری بیشینه تأثیر خود را بر سازه داشته است. وقتی که دو طبقه میانی دارای کاهش جرم ۵۰ درصد و نوع خاک C است، تحت سطح زلزله DBE مقدار شتاب با کاهش روبه‌رو شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر شتاب طبقات در حالت نامنظمی M0.75 پایه انعطاف پذیر نسبت به صلب در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۰ و ۱/۲ درصد به‌دست آمده است.

جدول ۱۳: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های پایه انعطاف‌پذیر نسبت به پایه صلب

MCE	DBE	نوع خاک محل	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف		
۱/۲	۰/۸	خاک C	M0.25
۱/۶	۲/۹	خاک D	
۰	-۰/۸	خاک C	M0.5
۰	۰	خاک D	
۰	۰	خاک C	M0.75
۰/۸	۱/۲	خاک D	
۰	۰	خاک C	M1
۰	۰	خاک D	
۰	۰	خاک C	M1.25
۰	۱/۳	خاک D	
۰	۰	خاک C	M1.5
۰	۰	خاک D	
۰	۰	خاک C	M1.75
۹/۹	۱۰/۳	خاک D	
۳/۱	۲/۸	خاک C	M2
۲/۸	۲/۵	خاک D	

در جدول ۱۴، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه قرار گرفته بر روی دو نوع خاک C و D با درصدهای مختلف نامنظمی جرمی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. تأثیر خاک نوع D بر روی سازه‌های با پایه انعطاف‌پذیر نسبت به حالت با پایه صلب در افزایش مقادیر شتاب تأثیرگذار است. همین‌طور آثار خاک نوع D در سازه تحت رکوردهای قوی‌تر به‌جز در حالتی که جرم دو طبقه میانی کاهش ۲۵ درصدی داشته است، بیشتر مشاهده شده است. هم‌چنین با افزایش شدت نامنظمی‌های جرمی این اثرات بیشتر شده است. به‌عنوان مثال در حالت نامنظمی M1.75 تحت سطح زلزله MCE و سازه قرار گرفته بر روی پایه‌های صلب و انعطاف‌پذیر مقادیر اختلاف سازه بر روی دو نوع خاک C و D به ترتیب برابر با ۵۲/۳ و ۶۷/۳ درصد به‌دست آمده است.

جدول ۱۴: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک‌های مختلف C و D

MCE	DBE	اندرکنش خاک-سازه	نوع سازه از نظر نامنظمی
درصد اختلاف	درصد اختلاف		
۴۳	۴۵/۴	صلب	M0.25
۴۳/۷	۴۸/۳	انعطاف‌پذیر	
۴۴/۷	۴۲/۵	صلب	M0.5
۴۴/۷	۴۳/۷	انعطاف‌پذیر	
۴۹/۱	۴۵/۱	صلب	M0.75
۵۰/۳	۴۶/۹	انعطاف‌پذیر	
۵۰/۶	۴۱/۲	صلب	M1
۵۰/۶	۴۱/۲	انعطاف‌پذیر	
۵۱/۹	۴۵/۴	صلب	M1.25
۵۱/۹	۴۷/۲	انعطاف‌پذیر	
۵۱/۶	۴۶/۷	صلب	M1.5
۵۱/۶	۴۶/۷	انعطاف‌پذیر	
۵۲/۳	۴۹	صلب	M1.75
۶۷/۳	۶۴/۴	انعطاف‌پذیر	
۵۴/۴	۵۱/۴	صلب	M2
۵۳/۹	۵۰/۹	انعطاف‌پذیر	

۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه در سازه ۶ طبقه قاب خمشی متوسط فولادی طراحی شده بر روی خاک نوع C آیین نامه ASCE7 (نوع ۲ استاندارد ۲۸۰۰) پرداخته است. با توجه به کمبود مطالعات ژئوتکنیک، بعضا خاک نوع C در اکثر نقاط ایران با فرض اشتباه برای محل احداث سازه در نظر گرفته می شود. در این تحقیق یک حالت بحرانی تر برای نوع خاک (نوع D آیین نامه ASCE7 یا همان نوع ۳ استاندارد ۲۸۰۰)، هم چنین برای اینکه محدوده ای از حالات ممکن برای سازه را پوشش دهد درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در ارتفاع در نظر گرفته شده و رفتار لرزه ای آن ها مورد مقایسه قرار گرفته اند. تحلیل سازه های مورد نظر در نرم افزار OpenSees تحت ۲۲ رکورد زمین لرزه دور از گسل مطابق FEMA P695 [۲۵] مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق حاضر عبارتند از:

۲۲) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر تحت سطح خطر لرزه ای DBE و نوع خاک C در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، در مقادیر جابجایی نسبی در تمامی طبقات تغییراتی 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 ۲ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین به ترتیب ۱ و ۲ درصد افزایش یافته است.

۲۳) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر تحت سطح خطر لرزه ای DBE و نوع خاک D در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، در مقادیر جابجایی نسبی در تمامی طبقات تغییراتی 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 ۵ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین به ترتیب ۳ و ۴ درصد افزایش یافته است. هم چنین شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر تحت سطح خطر لرزه ای MCE و نوع خاک C نتایج مشابهی را به دست داده است.

۲۴) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر تحت سطح خطر لرزه ای MCE و نوع خاک D 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 ۵ درصد کاهش پیدا کرده است و با افزایش جرم به صورت میانگین ۱۰ درصد افزایش یافته است.

۲۵) شدت مختلف نامنظمی ها در سازه مورد نظر تحت سطح خطر لرزه ای MCE و نوع خاک C و D در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، در مقادیر شتاب مطلق در تمامی طبقات تغییرات قابل مشاهده ای ایجاد کرده است. هم چنین لحاظ اندرکنش خاک-سازه، تغییرات محسوسی در نتایج جابجایی های نسبی و شتاب مطلق ساختمان ۶ طبقه بالحاظ درصدهای مختلف نامنظمی جرمی در هر دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد نمی کند.

۲۶) در صورتی که فرض طراحی سازه ها مطابق خاک نوع C انجام پذیرد ولی خاک محل از نوع D باشد، تحت دو سطح خطر لرزه ای و در هر دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، با کاهش و افزایش جرم نامنظمی، مقادیر جابجایی نسبی به صورت میانگین ۵۰ و ۶۵ درصد افزایش یافته است. هم چنین در دو حالت افزایش و کاهش جرم نامنظمی، شتابها به صورت میانگین ۵۰ درصد افزایش یافته است.

این تحقیق برای قضاوت مهندسی در حوزه درصد نامنظمی جرمی در سیستم های قاب خمشی میان مرتبه تحت زلزله با لحاظ اندرکنش خاک-سازه بسیار سودمند است. با مطالعه این پژوهش می توان شناخت لرزه ای بیشتری نسبت به رفتار واقعی سازه ها دارای درصد نامنظمی های مختلف تحت رکوردهای دور از گسل به دست آورد. هم چنین در این تحقیق نشان داده شده است که اثرات اشتباه در نظر گرفتن نوع خاک می تواند آثار نامطلوبی در رفتار سازه ها ایجاد کند که این موضوع مهندسی را به دریافت مطالعات ژئوتکنیک از کارفرما برای طراحی سازه، توصیه می شود. محدودیت هایی در این تحقیق نیز 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 اثرات 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

سازه‌های را دقیق‌تر مورد مقایسه قرار دهد، توصیه می‌شود که این روش‌ها در مقایسه با روش‌های آیین‌نامه‌ای مورد مقایسه و بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] Naeim, F. (1989). *The seismic design handbook*. Springer Science & Business Media.
- [2] Scawthorn, C. and Chen, W.-F. (2002). *Earthquake engineering handbook*. CRC press..
- [3] Eimani kalehsar, H. and 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
- [4] Al-Ali, A. A. K. (1999). *Effects of vertical irregularities on seismic behavior of building structures*. Stanford University.
- [5] Michalis, F. Dimitrios, V. and Manolis, P. (2006). Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a nine-storey steel frame. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 35, no. 12, pp. 1489–1509.
- [6] Le-Trung, K. Lee, K. Lee, J. and Lee, D. H. (2012). Evaluation of seismic behaviour of steel special moment frame buildings with vertical irregularities. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, vol. 21, no. 3, pp. 215–232.
- [7] Pirizadeh, M. and Shakib, H. (2013). Probabilistic seismic performance evaluation of non-geometric vertically irregular steel buildings. *J. Constr. Steel Res.*, vol. 82, pp. 88–98.
- [8] 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*.
- [9] Gazetas, G. and Apostolou, M. (2004). Nonlinear soil–structure interaction: foundation uplifting and soil yielding. In *Proceedings Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction*, pp. 29–30.
- [10] El Ganainy, H. and El Naggar, M. H. (2009). Seismic performance of three-dimensional frame structures with underground stories. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 29, no. 9, pp. 1249–1261.
- [11] Sameti, A. R. and Ghannad, M. A. (2016). Equivalent linear model for existing soil-structure systems. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 16, no. 02, p. 1450099.
- [12] Chen, L. (2016). Dynamic interaction between rigid surface foundations on multi-layered half space. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 16, no. 05, p. 1550004.
- [13] Sbartaï, B. (2016). Dynamic interaction of two adjacent foundations embedded in a viscoelastic soil. *Int. J. Struct. Stab. Dyn.*, vol. 16, no. 03, p. 1450110.
- [14] Havaei, G. and Mobedi, E. (2015). Effect of Interaction and Rocking Motion on The Earthquake Response of Buildings. *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–49, doi: 10.22065/jsce.2015.38598.
- [15] Gholhaki, M. (Sep. 2019). Study of Thin Steel Plate Shear Wall System by Considering Soil - Structure Interaction under Near and Far Field Earthquakes. *Sharif J. Civ. Eng.*, doi: 10.24200/j30.2018.2183.2127.
- [16] Havaei, G. and Izadparast, S. M. (2021). Effect of soil block thickness modeling on soil-structure interaction in dynamic responses of 15-storey high-rise buildings. *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 8, no. 10, pp. 301–316.
- [17] Sabouniaghdam, M. Mohammadi Dehcheshmeh, E. Safari, P. and Broujerdian, V. (2022). Probabilistic collapse assessment of steel frame structures considering the effects of soil-structure interaction and height. *Sci. Iran*.
- [18] Broujerdian, V. Mohammadi Dehcheshmeh, E. and Safari, P. (2023). Seismic performance assessment of intermediate moment-resisting steel frames designed based on misidentified site soil classes. *Sci. Iran*.
- [19] Kazemi, F. Asgarkhani, N. and Jankowski, R. (2023). Probabilistic assessment of SMRFs with infill masonry walls incorporating nonlinear soil-structure interaction. *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 21, no. 1, pp. 503–534.

- [20] Kazemi, F. and Jankowski, R. (2023). Machine learning-based prediction of seismic limit-state capacity of steel moment-resisting frames considering soil-structure interaction. *Comput. Struct.*, vol. 274, p. 106886.
- [21] Kazemi, F. and Jankowski, R. (2023). Enhancing seismic performance of rigid and semi-rigid connections equipped with SMA bolts incorporating nonlinear soil-structure interaction. *Eng. Struct.*, vol. 274, p. 114896.
- [22] IBC Standard, (2013). *Iranian Building Codes And Standards, Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition*.
- [23] ASCE7-10 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, (2010). *Asce7-10*.
- [24] INBC Part 6th, (2013). *Iranian National Building Code, Part 6th , Design Loads for Buildings*.
- [25] FEMA, (2009). *FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.
- [26] Mehdizadeh, K. and Karamodin, A. (2017). Probabilistic assessment of steel moment frames incremental collapse (ordinary, intermediate and special) under earthquake. *J. Struct. Constr. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 129–147.
- [27] M. Dehcheshmeh, E. Rashed, P. Broujerdian, V. Shakouri, A. and Aslani, F. (2023). Predicting Seismic Collapse Safety of Post-Fire Steel Moment Frames. *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 1091.
- [28] Gajan, S. Hutchinson, T. C. Kutter, B. L. Raychowdhury, P. Ugalde, J. A. and Stewart, J. P. (2008). *Numerical models for analysis and performance-based design of shallow foundations subjected to seismic loading*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [29] Raychowdhury, P. (2008). Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures. UC San Diego.
- [30] Suita, K. Yamada, S. Tada, M. Kasai, K. Matsuoka, Y. and 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*, vol. 1217.