

## Investigating the effect of soil-structure interaction on the seismic performance of buildings having medium flexural frame with mass irregularity

Houshyar Eimani Kalehsar<sup>1\*</sup>, Maryam Kiani<sup>2</sup>

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

2- Master's student, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

### ABSTRACT

The present paper investigates the seismic performance of mid-range steel bending frame structures that are designed according to Iranian code and valid foreign regulations. For this purpose, 6- and 9-story structures on C-type soil have been designed for Tehran region, which has a very high earthquake risk zone. Assuming that the investigated systems were implemented on soil type C or wrongly on soil type D, the time history analyses under 22 records far from the fault in terms of soil-structure interaction and mass irregularity in height at two earthquake levels DBE and MCE is considered. These structures have been simulated in OpenSees finite element software. In the desired structural models, the nonlinear behaviour of geometry and materials is considered. The results showed that considering the effects of soil-structure interaction in the 6-story structure did not have a significant effect on the responses of the structure, while these effects are evident in the 9-story structure, and by changing the type of soil from state C to state D, more responses were created in the structure. The effects of mass irregularity can greatly increase the values of structural responses in two 6- and 9-story structures. In general, considering the type of local soil (type D instead of C), the values of relative displacements, acceleration and shear of the floors have increased by 1.5 times and sometimes with the increase in the number of floors of the structure and the creation of flexibility effects in the foundation, it increases up to 2 times.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 07 July 2023

Revise Date: 22 August 2023

Accept Date: 03 September 2023

### 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.2023.404764.3162>

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

## بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌های دارای قاب خمشی

### متوسط با نامنظمی جرمی

هوشیار ایمانی کله‌سر<sup>۱\*</sup>، مریم کیانی<sup>۲</sup>

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

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، 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 که مطابق با آیین‌نامه‌های ایران و معتبر خارجی طراحی شده، می‌پردازد. بدین منظور، دو ساختمان ۶ و ۹ 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. با فرض اینکه ساختمان‌های موردبررسی بر روی خاک نوع C و یا به صورت اشتباه روی خاک نوع D اجرا شده باشند، تحت ۲۲ رکوردهای دور از گسل با لحاظ اندرکنش خاک-سازه و نامنظمی جرمی در ارتفاع در دو سطح زلزله DBE و MCE تحلیل شده‌اند. این ساختمان‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees شبیه‌سازی و در مدل‌های سازه‌ای موردنظر، رفتار غیرخطی هندسه و مصالح در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه در سازه ۶ طبقه تأثیر بسزایی در پاسخ‌های سازه نداشته است در صورتی که اثر اندرکنش خاک-سازه در مورد ساختمان ۹ طبقه مشهود است. با تغییر نوع خاک از حالت C به حالت D، پاسخ‌های ساختمان‌ها بیشتر می‌شود. آثار نامنظمی جرمی توانست مقادیر پاسخ‌های سازه را در دو ساختمان ۶ و ۹ طبقه به شدت افزایش دهد. به‌طور کلی نرم در نظر گرفتن نوع خاک محل (نوع D به جای C)، مقادیر جابجایی‌های نسبی، شتاب و برش طبقات حدود ۱/۵ برابر شده است.

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

شأنه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.404764.3162">https://doi.org/10.22065/jsce.2023.404764.3162</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2023.404764.3162">10.22065/jsce.2023.404764.3162</a>	۱۴۰۳/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۶/۱۲	۱۴۰۲/۰۵/۳۱	۱۴۰۲/۰۴/۱۶
هوشیار ایمانی کله‌سر hek@uma.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## 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 [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 جهت آزادی انتخاب دیوارهای داخلی و فضای کافی به لحاظ معماری قابل توجه است [۱]. اندرکنش خاک-سازه را می‌توان به‌عنوان پدیده‌ای اثرگذار بر روی پاسخ سازه، به دلیل انعطاف‌پذیری خاک و همچنین پاسخ فونداسیون به دلیل نگهدارندگی ناشی از حضور سازه دانست. بررسی‌های صورت گرفته در زمینه‌ی اندرکنش خاک-سازه نشان می‌دهد که بسیاری از مطالعات تلاش خود را بر یافتن آثار موضعی اندرکنش بر فونداسیون سطحی و عمیق متمرکز نموده‌اند و کمتر به جزئیات و چگونگی ظاهر شدن این آثار در اعضای رو سازه پرداخته‌اند. 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. با توجه به مطالب گفته‌شده 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. 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 [۳]، 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.

العی و کراوینکلر در سال ۱۹۹۹ میلادی [۴]، آثار نامنظمی ارتفاع در توزیع نیاز لرزه‌ای در ارتفاع سازه را مورد تحقیق قرار دادند. آن‌ها سازه‌های موردنظر که ده طبقه بودند را با حالات مختلف توزیع جرم، مقاومت و سختی به صورت 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. در تحقیق دیگر، فراگادکیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی [۵]، روشی را برای تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی دارای نامنظمی از نوع جرم، سختی و مقاومت با استفاده از روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA)<sup>۱</sup> پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی می‌تواند محدوده کامل 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 موردنظر) و مهم‌تر از همه میزان شدت زلزله بستگی دارد. در محدوده رفتاری الاستیک و ابتدای غیر الاستیک، بیشتر نتایج پژوهش‌های قبل تأیید شده ولی با افزایش سطح آسیب ایجادشده 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، 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. همچنین پیری زاده و شکیب در سال ۲۰۱۳ میلادی [۷]، 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

<sup>۱</sup> Incremental Dynamic Analysis (IDA)

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.

با توجه به اهمیت اندرکنش خاک-سازه، گزناس و مایلوناکیز [۸] 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. در ادامه گزناس و آپوستلو [۹] 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 ایجادشده 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.

الفنائینی و النجار [۱۰] 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. 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. هوئی و موبدی [۱۴] در سال ۲۰۱۵، به بررسی این رفتار بر روی پاسخ سازه‌های با سیستم دوگانه قاب خمشی فولادی به همراه مهاربندهای فولادی پرداختند. سازه‌های موردبررسی در دو حالت با وجود و عدم حرکت گهواره‌ای تحت آنالیز دینامیکی موردبررسی قرار گرفتند. 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] موردبررسی 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.

برای بررسی اثرات ضخامت بلوک‌های خاک زیر سازه، هوئی 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 با استفاده از روش اجزای محدود توسط نرم‌افزار آباکوس مدل سه‌بعدی سازه موردنظر با رفتار غیرخطی اندرکنش خاک-سازه را بررسی کردند. در این تحقیق، خاک زیرسازه را با ۴ ضخامت مختلف موردبررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش ضخامت بر نتایج آنالیز تأثیر بسزایی دارد و باعث کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه همچون حداکثر جابجایی جانبی طبقات، تنش‌ها در سیستم، بلندشدگی فونداسیون، شتاب سطح زمین، شتاب حداکثر بام سازه و برش پایه سازه می‌شود.

صابونی اقدم و همکاران [۱۷] 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 در ادامه بروجردیان و همکاران [۱۸] 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.

کاظمی و همکاران [۱۹] 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. در تحقیق دیگر، کاظمی و ژانکوفسکی [۲۰]، 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. 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. نیز لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه مقادیر شتاب طیف مود اول سازه را کاهش داده است.

اغلب سازه‌های ساخته شده مسکونی در مناطق مختلف کشور از نوع میان مرتبه (با تعداد طبقات ۵ الی ۱۰ طبقه) 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 به صورت 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 تپ ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ یا همان تپ C آیین‌نامه ASCE7) با صلاحیت مهندس طراح در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق به بررسی دو ساختمان نامنظم جرمی ۶ و ۹ طبقه با لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه پرداخته شده است. همچنین نوع خاک مورد نظر اولیه در زیر فونداسیون از نوع ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ در نظر گرفته شده است. سپس علاوه بر آثار خاک نوع ۲ آیین‌نامه ۲۸۰۰ که به عنوان خاک مدنظر طراحی بود، خاک تپ ۳ نیز به عنوان خاک واقعی مورد بررسی قرار داده شده است. نامنظمی جرمی در سازه ۶ طبقه در دو طبقه میانی و در سازه ۹ طبقه در سه طبقه میانی سازه‌های مذکور مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور طراحی و شبیه‌سازی سازه‌های مورد نظر 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، شتاب‌های سازه و برش طبقات مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مدل‌های ساختمان‌های مورد بررسی

سیستم ساختمانی مورد بررسی در این مطالعه قاب خمشی فولادی متوسط است. در ضمن این سازه‌ها برای شهر تهران، که از نظر پهنه‌بندی زلزله، جز مناطق با لرزه‌خیزی خیلی زیاد ( $A=0/35$ ) است [۳]، طراحی و کاربری ساختمان 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 نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد

$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	E (MPa)	$\nu$	$f_y$ (MPa) ستون	$f_y$ (MPa) تیر	$f_u$ (MPa)	$\epsilon_y$	$\epsilon_u$
۷۸۵۰	$۲ \times ۱۰^۵$	۰/۳	۲۴۰	۲۴۰	۳۷۰	۰	۰/۲۵

جدول ۲: مشخصات مکانیکی بتن

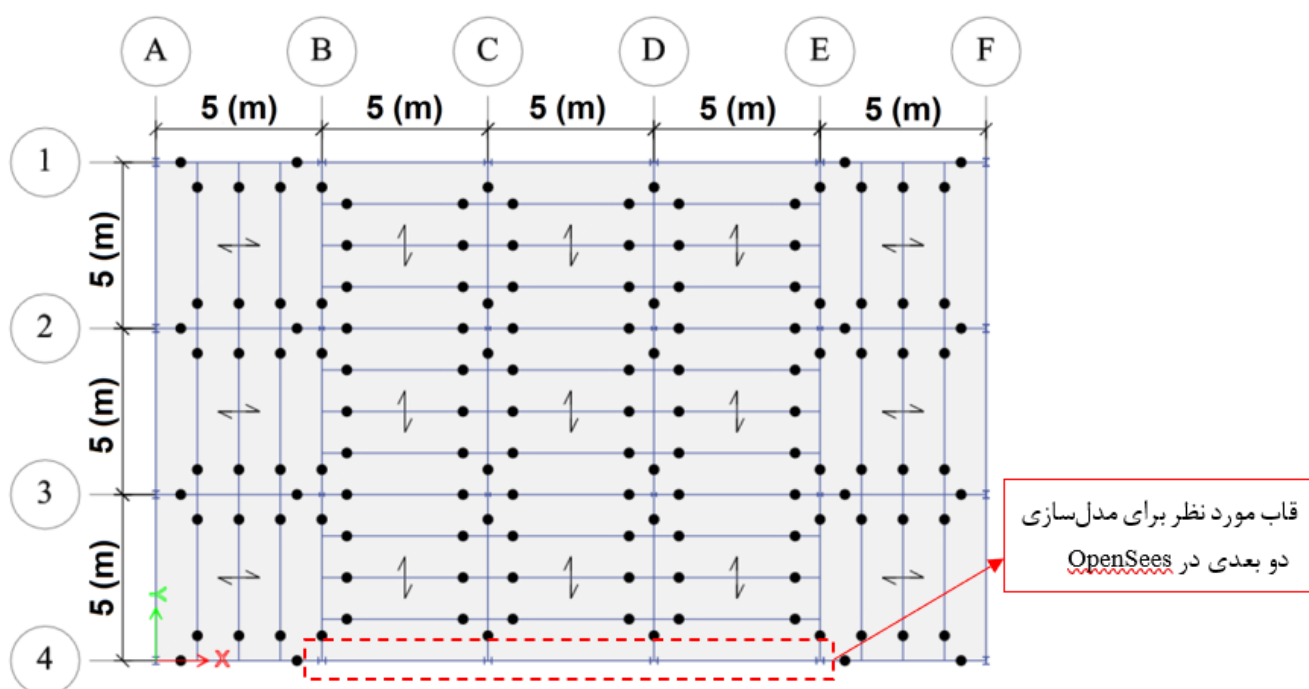
$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	E (MPa)	$\nu$
۲۴۰۰	$۲ \times ۱۰^۴$	۰/۱۵

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 ۱/۵ و ۲ متر و ارتفاع ۱۰۰ و ۱۳۰ سانتی‌متر، طول ۱۶/۵ و ۱۷ متر و عمق قرارگیری فونداسیون ۱/۵ و ۱/۸ به ترتیب برای ساختمان‌های ۶ و ۹ طبقه طراحی شده است. [۱۷]. عمق یخبندان در نظر گرفته شده برای فونداسیون‌های دو سازه ۵۰ سانتی‌متر است [۱۷]. هم‌چنین، مشخصات خاک مورد مطالعه که از نوع C و D آیین‌نامه ASCE7 [۲۲] و یا همان خاک نوع ۲ و ۳ استاندارد ۱۲۸۰۰ [۳] است، در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: مشخصات خاک نوع C و D

پارامتر مورد بررسی	(۱)	خاک نوع C (۲)	خاک نوع D (۳)
سرعت موج برشی ( $V_s$ )	(۴)	۳۶۱ m/s (۵)	۱۷۶ m/s (۶)
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )	(۷)	۴۲ درجه (۸)	۳۸ درجه (۹)
ضریب چسبندگی (c)	(۱۰)	۰ (۱۱)	۵ kPa (۱۲)
ضریب پواسون ( $\nu$ )	(۱۳)	۰/۳۵ (۱۴)	۰/۳۵ (۱۵)
مدول برشی (G)	(۱۶)	۲۸۰ MPa (۱۷)	۶۰ MPa (۱۸)
وزن مخصوص ( $\gamma$ )	(۱۹)	۲۱ kN/m <sup>3</sup> (۲۰)	۱۹ kN/m <sup>3</sup> (۲۱)

در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار ETABS 2016 و مقاطع مرسوم فولادی استاندارد، ساختمان‌های ۶ و ۹ طبقه به روش LRFD (مطابق ویرایش چهارم مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) طراحی شدند. 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 [۲۳] صورت گرفته است (مطابق بارهای جدول ۴) و همچنین ملاحظات لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ [۳] (از روش تحلیل طیفی) مدنظر قرار گرفته است. مقاطع سازه‌های طراحی شده در جدول ۵ و ۶ نشان داده شده است. قاب‌های پیرامونی از نوع باربر جانبی و قاب‌های میانی از نوع باربر ثقلی در نظر گرفته شده است. برای انجام تحلیل‌ها در نرم‌افزار OpenSees به صورت مدل دوبریدی، قاب مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است.



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 <sup>2</sup>	kgf/m <sup>2</sup>	kgf/m <sup>2</sup>	kgf/m <sup>2</sup>
بام	۲۵۰	۰	۱۵۰	۱۰۵
سایر طبقات	۲۳۰	۱۰۰	۲۰۰	۰

جدول ۵: مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۶ طبقه طراحی شده مدنظر این تحقیق

طبقات			اعضا
۵-۴	۴-۳	۲-۱	
IPB280	IPB320	IPB400	ستون قاب‌های خمشی
IPB160	IPB180	IPB240	ستون قاب‌های ثقلی
IPE360	IPE450	IPE500	تیرهای قاب‌های خمشی
IPE330	IPE330	IPE330	تیرهای قاب‌های ثقلی
IPE220	IPE220	IPE220	تیرهای فرعی

جدول ۶: مشخصات اعضای سازه‌ای ساختمان ۹ طبقه طراحی شده مدنظر این تحقیق

طبقات			اعضا
۶-۷	۶-۴	۳-۱	
IPB320	IPB400	IPB550	ستون قاب‌های خمشی
IPB180	IPB240	IPB320	ستون قاب‌های ثقلی
IPE400	IPE500	IPE550	تیرهای قاب‌های خمشی
IPE330	IPE330	IPE330	تیرهای قاب‌های ثقلی
IPE220	IPE220	IPE220	تیرهای فرعی

## ۲-۲- شتاب‌نگاشت‌های لرزه‌ای

رکوردهای لرزه‌ای اعمالی به سازه‌ها توسط مراجع مختلف مورد توجه قرار گرفته است که یکی از مراجع معتبر و مورد استفاده در تحقیق‌ها و پژوهش‌ها آیین‌نامه FEMA P695 [۲۴] می‌باشد. آیین‌نامه FEMA P695 [۲۴] رکوردها زلزله را به دودسته دور از گسل 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 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. مشخصات رکوردهای لرزه‌ای مورد نظر در جدول ۷ ارائه شده است.

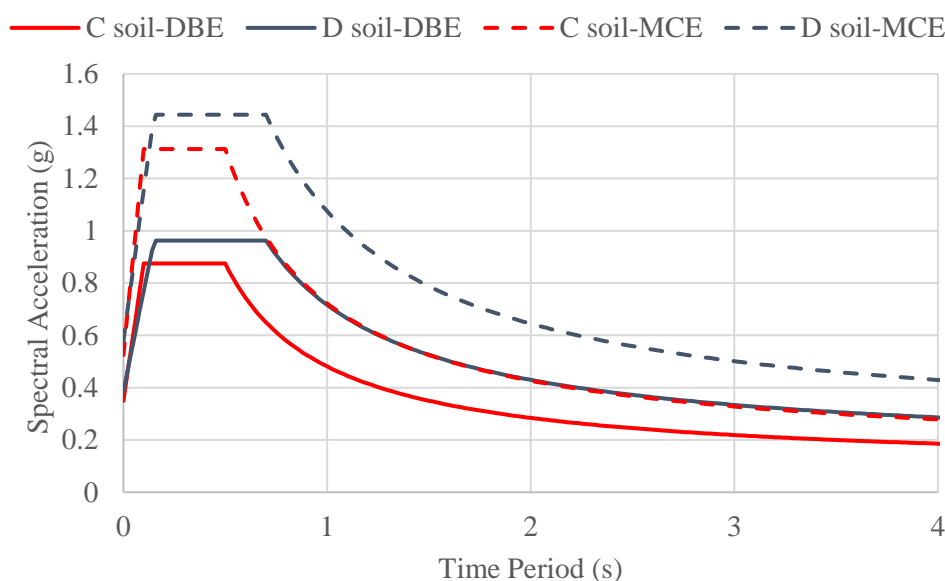
جدول ۷: رکوردهای دور از گسل مورد بررسی این تحقیق [۲۴]

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 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 [۲۴]. به‌عنوان نمونه، طیف پاسخ طراحی در سطح زلزله DBE و MCE در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>2</sup> Far Field

<sup>3</sup> Near Field



شکل ۲: طیف پاسخ طراحی در دو سطح زلزله DBE و MCE

### ۳-۲- روش مدل سازی در نرم افزار OpenSees

برای مدل سازی سیستم خاک-فونداسیون، از روش وینکلر استفاده شده است. مدل فونداسیون غیرخطی وینکلر (BNWF) قادر به تعیین رفتار سیستم خاک و فونداسیون با در نظر گرفتن هر دو حالت رفتار غیرخطی و غیر الاستیک خاک (غیرخطی ماده‌ای) و بلندشدگی (غیرخطی هندسی) هست.

جرم لرزه‌ای مدنظر در این سازه مطابق مرجع [۲۱] برابر با  $1/05DL + 0/5LL$  در نظر گرفته شده است. قاب موردنظر در این تحلیل قاب خمشی پیرامونی می‌باشد. لازم به ذکر است که در این پروژه جهت شبیه‌سازی از مدل دوبعدی استفاده شده است که در این مدل‌ها، قاب پیرامونی خمشی سازه را مدل‌سازی نموده و برای لحاظ آثار  $P-\Delta$  قاب‌های ثقلی، از ستون‌های انتهایی متکی استفاده شده است [۲۶]. المان‌های موردنظر تیر و ستون از المان غیرخطی با مقطع فایبر در نظر گرفته شده است. هم‌چنین مصالح مورد استفاده برای تیر و ستون‌ها از نوع Steel02 بوده است.

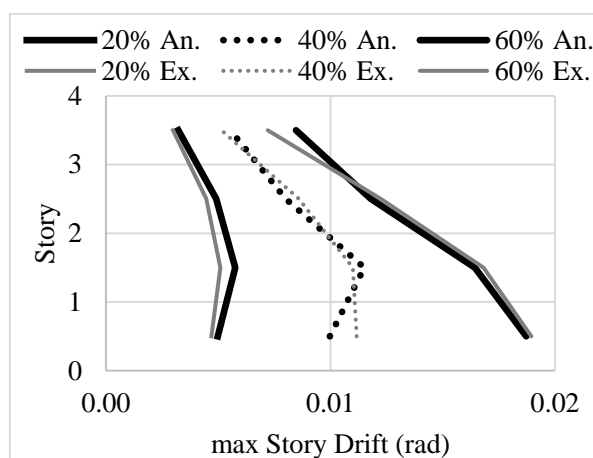
برای مدل سازی فونداسیون در نرم‌افزار OpenSees، از مدل وینکلر استفاده شده است. این مدل با استفاده از نوعی المان با طول صفر در محل پیش‌بینی شده‌ی رفتار غیرخطی خاک را تامین می‌کند. این المان طول صفر در محیط OpenSees با نام Zerolength معرفی می‌شود. با کمک المان ZeroLength در این محیط می‌توان دونقطه با یک مختصات را درجه‌ی آزادی دلخواه توسط یک منحنی نیرو تغییر مکان تک‌محوری به یکدیگر متصل کرد [۲۷]. بنابراین می‌توان دو مصالح QzSimple و TzSimple مطابق [۱۷] را به درجات آزادی قائم و افقی این المان تخصیص داده و آن را به‌عنوان فنر وینکلر در نظر گرفت [۲۸].

### ۴- اعمال آثار نامنظمی جرمی در مدل‌ها

آثار نامنظمی جرمی در سازه با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ [۳] به سازه موردنظر، اعمال شده است. مطابق این استاندارد، برای ایجاد نامنظمی جرمی در این تحقیق، جرم دو طبقه میانی سازه ۶ طبقه و جرم سه طبقه میانی سازه ۹ طبقه نسبت به طبقات فوقانی و تحتانی خود، مقدار ۵۰ درصد افزایش داده شده است.

## ۵-۲- صحت سنجی مدل سازی عددی

سوویتا و همکاران یک سازه فولادی ۴ طبقه با ابعاد واقعی را در میز لرزه‌ی مرکز دفاعی ژاپن تحت شتاب‌نگاشت زلزله قرار دادند و رفتار آن را در مرحله‌ی فروریزش مطالعه کردند [۲۹]. این سازه بر اساس آئین‌نامه‌ها و مقررات لرزه‌ای کشور ژاپن در آن زمان طراحی شده بود. تمام مشخصات مربوط به مقاطع و مصالح این سازه از مرجع [۲۹] و برای اعمال بار لرزه‌ای از زلزله‌ی ثبت‌شده‌ی Kobe در ایستگاه Takatori 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 موردنظر، 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 ۳ دارد.

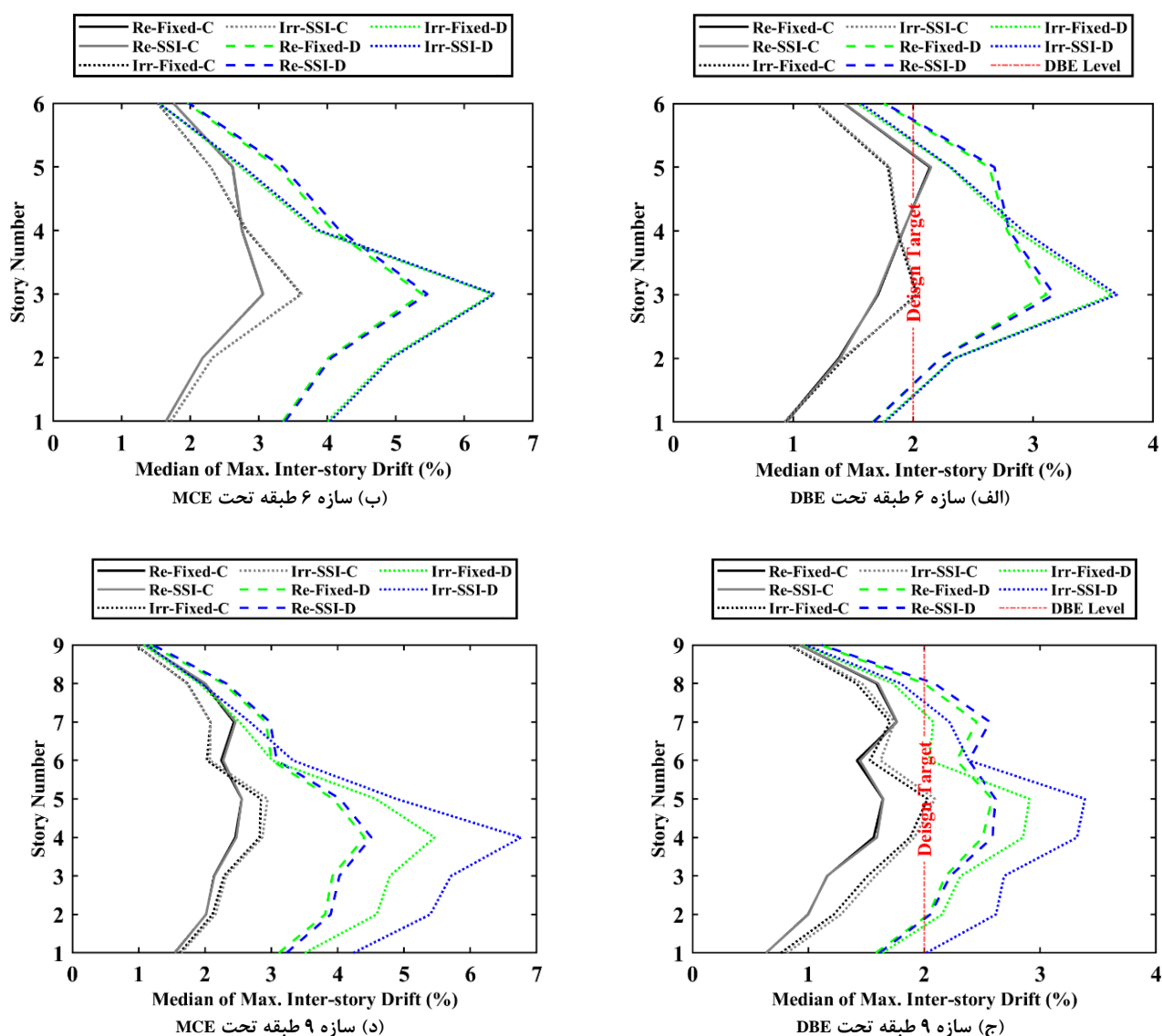


شکل ۳: مقایسه نتایج صحت سنجی مدل عددی در نرم‌افزار OpenSees با نتایج مدل آزمایشگاهی [۲۹]

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- خروجی‌های جابجایی نسبی طبقات

شکل ۴، 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 اثر نامنظمی جرمی در دو طبقه میانی برای سازه ۶ طبقه و سه طبقه میانی برای سازه ۹ طبقه برای دو حالت با پایه صلب و انعطاف‌پذیر 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. به‌عنوان مثال نمودارهای Re-Fixed-D و Re-Fixed-C معرف سازه منظم با پایه صلب و به ترتیب قرار گرفته بر روی خاک‌ها نوع C و D است. همچنین Irr-SSI-C و Irr-SSI-D معرف سازه نامنظم جرمی با پایه انعطاف‌پذیر و به ترتیب قرار گرفته بر روی خاک‌های نوع C و D است. در شکل موردنظر و سازه‌های ۶ طبقه، لحاظ اندرکنش خاک-سازه، تغییرات محسوسی در نتایج جابجایی‌های نسبی در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد نمی‌کند. ولی آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله ایجاد می‌کند. در شکل موردنظر و سازه‌های ۹ طبقه، لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه، وقتی که سازه دارای نامنظمی جرمی و نوع خاک D است تغییرات محسوسی در نتایج جابجایی‌های نسبی در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد می‌کند. همچنین آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله موردبررسی ایجاد کرده است.



شکل ۴: حداکثر جابجایی نسبی با در نظر گرفتن اثر نامنظمی جرمی در دو سازه پایه صلب و انعطاف پذیر در دو حالت خاک نوع C و D در سطح خطر لرزه‌ای

جدول ۸، بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه‌های ۶ و ۹ طبقه موردنظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در سطح زلزله DBE، مقادیر جابجایی نسبی سازه منظم ۶ طبقه در نوع خاک C برای دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر، بیشتر از حالت نامنظم است. همین‌طور در این نوع خاک، با افزایش شدت زلزله یعنی سطح زلزله MCE، مقادیر جابجایی نسبی در سازه نامنظم ۶ طبقه بیشتر از منظم است. ولی در سازه‌های ۶ طبقه قرارگرفته بر روی نوع خاک D، با ایجاد نامنظمی مقادیر جابجایی‌های نسبی در دو حالت خاک پایه صلب و انعطاف پذیر بیشتر از حالت سازه منظم است. مقادیر جابجایی نسبی سازه نامنظم ۹ طبقه در هر دو نوع خاک C و D برای دو حالت پایه صلب و انعطاف پذیر در هر دو سطح زلزله DBE و MCE، بیشتر از حالت منظم است.

جدول ۸: بیشینه مقادیر حداکثر جابجایی نسبی سازه‌های مورد بررسی دارای آثار منظمی و نامنظمی تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح DBE و

MCE				نوع خاک محل	نوع سازه از نظر منظمی	تعداد طبقات
MCE		DBE				
پایه انعطاف پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف پذیر	پایه صلب			
۳/۰۶۶	۳/۰۶۲	۲/۱۴۹	۲/۱۳۹	خاک C	منظم	۶ طبقه
۵/۴۶	۵/۳۸۶	۳/۱۷۵	۳/۱۰۸	خاک D		
۳/۶۲۷	۳/۶۱۹	۲/۰۴۵	۲/۰۲۸	خاک C	نامنظم	
۶/۴۳۸	۶/۴۰۴	۳/۶۹۹	۳/۶۵۶	خاک D		
۲/۵۵۶	۲/۵۵۴	۱/۷۶۶	۱/۷۶۲	خاک C	منظم	۹ طبقه
۴/۵۰۹	۴/۴۰۴	۲/۶۱۴	۲/۵۸۶	خاک D		
۲/۹۴۳	۲/۸۴۴	۲/۰۹۲	۲/۰۲۸	خاک C	نامنظم	
۶/۷۶۳	۵/۴۶۱	۳/۳۸۶	۲/۹۰۷	خاک D		

در جدول ۹، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه منظم نسبت به سازه نامنظم با دو نوع خاک مورد بررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار نامنظمی بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C بسیار در افزایش مقادیر جابجایی نسبی تأثیرگذار است. همین‌طور تأثیر نامنظمی در سازه‌های ۹ طبقه نسبت به سازه ۶ طبقه بیشتر مشاهده می‌شود. آثار نامنظمی در سازه تحت رکوردهای قوی‌تر بیشتر مشاهده شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات در سازه ۶ طبقه پایه صلب منظم نسبت به نامنظم در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۵/۲ و ۱۷/۶۳ درصد به دست آمده است. مقادیر اختلاف جابجایی نسبی سازه منظم نسبت به سازه نامنظم در سازه‌های ۹ طبقه با پایه انعطاف‌پذیر تحت سطح زلزله MCE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D، به ترتیب برابر با ۱۵/۱۴ و ۵۰ درصد است.

جدول ۹: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های منظم نسبت به سازه‌های نامنظم

MCE		DBE		نوع خاک محل	اندرکنش خاک-سازه	تعداد طبقات
درصد اختلاف		درصد اختلاف				
۱۸/۱۹	۵/۲	صلب	خاک C	خاک C	صلب	۶ طبقه
۱۸/۹	۱۷/۶۳					
۱۸/۳	۴/۸۴					
۱۷/۹۱	۱۶/۵					
۱۱/۳۵	۱۵/۱	صلب	خاک C	خاک C	صلب	۹ طبقه
۲۴	۱۲/۴۱					
۱۵/۱۴	۱۸/۴۶					
۵۰	۳۹/۵۳					

در جدول ۱۰، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر با 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. همین‌طور تأثیر انعطاف‌پذیری بر روی سازه قرارگرفته بر روی خاک نوع D نسبت به نوع C در سازه‌های ۹ طبقه نسبت به سازه ۶ طبقه بیشتر است و این آثار با ایجاد نامنظمی و افزایش شدت زلزله بیشتر می‌شوند. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات در سازه ۶ طبقه منظم پایه صلب نسبت به انعطاف‌پذیر در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۲/۲ درصد به دست آمده است. در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله MCE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D، مقادیر اختلاف سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر به ترتیب برابر با ۳/۵ و ۲۳/۸ درصد است.

جدول ۱۰: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های پایه صلب نسبت به پایه انعطاف‌پذیر

MCE	DBE	نوع خاک محل	نامنظمی	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۰/۱۳	۰/۵	خاک C	منظم	۶ طبقه
۱/۴	۲/۲	خاک D		
۰/۲۲	۰/۸	خاک C	نامنظم	
۰/۵۳	۱/۲	خاک D		
۰/۰۸	۰/۲	خاک C	منظم	۹ طبقه
۲/۴	۱/۱	خاک D		
۳/۵	۳/۲	خاک C	نامنظم	
۲۳/۸	۱۶/۵	خاک D		

در جدول ۱۱، مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه قرار گرفته بر روی دو نوع خاک C و D 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 بسیار در افزایش مقادیر جابجایی نسبی تأثیرگذار است. همین‌طور آثار خاک نوع D در سازه تحت رکوردهای قوی‌تر بیشتر مشاهده شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات در سازه ۶ طبقه منظم بر روی دو نوع خاک C و D با پایه صلب و انعطاف‌پذیر به ترتیب برابر با ۴۵/۳ و ۴۷/۷ درصد به دست آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم 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 ۹۲ و ۱۲۹/۸ درصد است.

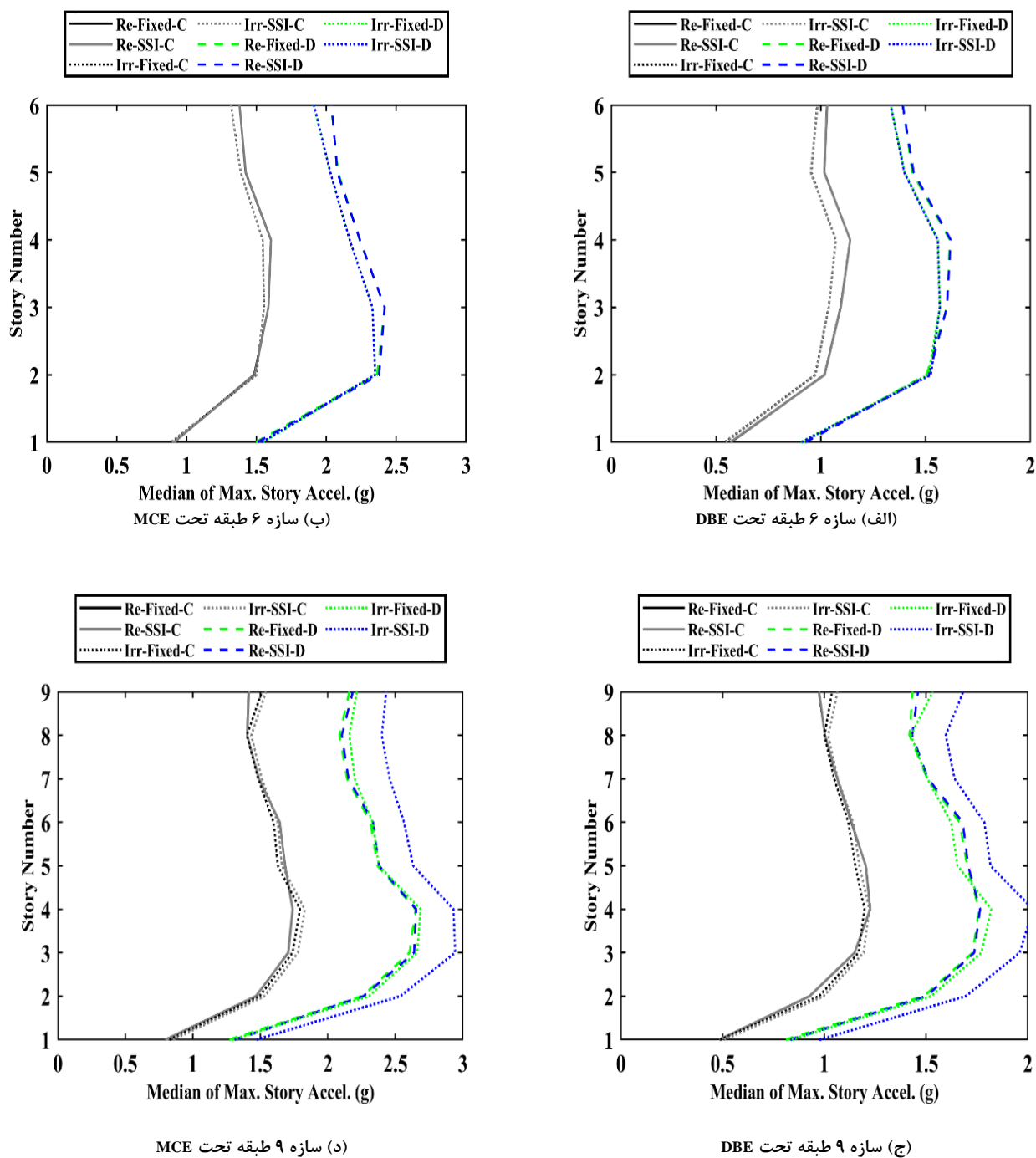
جدول ۱۱: درصد اختلاف جابجایی نسبی طبقات سازه‌های قرار گرفته بر روی خاک‌های مختلف C و D

MCE	DBE	اندرکنش خاک-سازه	نامنظمی	تعداد طبقات	
درصد اختلاف	درصد اختلاف				
۷۵/۹	۴۵/۳	صلب	منظم	۶ طبقه	
۷۸/۱	۴۷/۷	انعطاف‌پذیر			
۷۷	۸۰/۳	صلب	نامنظم		
۷۷/۵	۸۰/۹	انعطاف‌پذیر			
	۷۲/۴	۴۶/۸	صلب	منظم	۹ طبقه
	۷۶/۴	۴۸	انعطاف‌پذیر		
	۹۲	۴۳/۳	صلب	نامنظم	
	۱۲۹/۸	۶۱/۹	انعطاف‌پذیر		

## ۲-۳- خروجی‌های شتاب مطلق طبقات

شکل ۵، مقادیر حداکثر شتاب مطلق طبقات را برای سازه‌های موردنظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE با لحاظ اثر نامنظمی جرمی در دو طبقه میانی برای سازه ۶ طبقه و سه طبقه میانی برای سازه ۹ طبقه برای دو حالت با پایه صلب و انعطاف‌پذیر و در

دو حالت خاک نوع C و D نشان می‌دهد. در شکل موردنظر و سازه‌های ۶ طبقه، لحاظ اندرکنش خاک-سازه، تغییرات محسوسی در نتایج شتاب‌های مطلق سازه ۶ طبقه در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد نمی‌کند. ولی آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله ایجاد می‌کند. در شکل موردنظر و سازه‌های ۹ طبقه، لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه، وقتی که سازه دارای نامنظمی جرمی و نوع خاک D است تغییرات محسوسی در نتایج شتاب‌های مطلق سازه ۹ طبقه در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد می‌کند. هم‌چنین آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله موردبررسی ایجاد کرده است.



شکل ۵: حداکثر شتاب مطلق با در نظر گرفتن اثر نامنظمی جرمی در دو سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر در دو حالت خاک نوع C و D در سطح خطر لرزه‌ای

جدول ۱۲، بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه‌های ۶ و ۹ طبقه موردنظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در هر دو سطح زلزله DBE و MCE، مقادیر شتاب سازه منظم ۶ طبقه در هر دو نوع خاک C و D برای دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر، بیشتر از حالت نامنظم است. در سطح زلزله DBE، مقادیر شتاب سازه منظم ۹ طبقه در نوع خاک C برای دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر، بیشتر از حالت نامنظم است. همین‌طور در این نوع خاک، با افزایش شدت زلزله یعنی سطح زلزله MCE، مقادیر شتاب در سازه نامنظم ۹ طبقه بیشتر از منظم است. ولی در سازه‌های ۹ طبقه قرارگرفته بر روی نوع خاک D، با ایجاد نامنظمی مقادیر شتاب در دو حالت خاک پایه صلب و انعطاف‌پذیر بیشتر از حالت سازه منظم است.

جدول ۱۲: بیشینه مقادیر حداکثر شتاب مطلق سازه‌های موردبررسی دارای آثار منظمی و نامنظمی تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح DBE و

MCE

MCE		DBE		نوع خاک محل	نوع سازه از نظر منظمی	تعداد طبقات
پایه انعطاف‌پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف‌پذیر	پایه صلب			
۱/۶۰۵	۱/۶۰۴	۱/۱۴	۱/۱۴	خاک C	منظم	۶ طبقه
۲/۴۱۸	۲/۴۱۸	۱/۶۲	۱/۶۱۶	خاک D		
۱/۵۵۴	۱/۵۵۴	۱/۰۷۲	۱/۰۷۲	خاک C	نامنظم	
۲/۳۴۹	۲/۳۵۳	۱/۵۶۸	۱/۵۶۸	خاک D		
۱/۷۳۹	۱/۷۳۹	۱/۲۲۵	۱/۲۲۶	خاک C	منظم	۹ طبقه
۲/۶۵	۲/۶۵	۱/۷۶۵	۱/۷۶	خاک D		
۱/۸۲۹	۱/۷۹۴	۱/۲۲۱	۱/۱۹۸	خاک C	نامنظم	
۲/۹۴۳	۲/۶۸۸	۲/۰۲۵	۱/۸۲	خاک D		

در جدول ۱۳، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه منظم و نامنظم با دو نوع خاک موردبررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار نامنظمی بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C در سازه ۹ طبقه انعطاف‌پذیر بسیار در افزایش مقادیر شتاب تأثیرگذار است. همین‌طور تأثیر نامنظمی وقتی که سازه دارای پایه انعطاف‌پذیر و خاک نوع D است، در سازه‌های ۹ طبقه نسبت به سازه‌های ۶ طبقه بیشتر مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر شتاب طبقات در سازه ۶ طبقه پایه صلب منظم نسبت به نامنظم در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۶ و ۳ درصد به‌دست‌آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه انعطاف‌پذیر تحت سطح زلزله DBE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D مقادیر اختلاف سازه منظم و نامنظم به ترتیب برابر با ۰/۳۳ و ۱۴/۷۳ درصد است.

جدول ۱۳: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های منظم نسبت به سازه‌های نامنظم

MCE	DBE	نوع خاک محل	اندرکنش خاک-سازه	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۳	۶	خاک C	صلب	۶ طبقه
۳	۳	خاک D		
۳	۶	خاک C	انعطاف‌پذیر	
۳	۳	خاک D		
	۲/۳	خاک C	صلب	۹ طبقه
	۳/۴	خاک D		
	۰/۳۳	خاک C	انعطاف‌پذیر	
	۱۴/۷۳	خاک D		

در جدول ۱۴، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه پایه صلب و انعطاف پذیر با 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 سازه ۹ طبقه نامنظم بسیار در افزایش مقادیر شتاب تأثیرگذار است. همین‌طور تأثیر انعطاف پذیری در سازه‌های ۹ طبقه نسبت به سازه‌های ۶ طبقه بیشتر دیده می‌شود. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر شتاب طبقات در سازه ۶ طبقه منظم پایه صلب نسبت به انعطاف پذیر در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۰ و ۰/۲۵ درصد به‌دست آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله DBE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D مقادیر اختلاف سازه پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب برابر با ۱/۹۲ و ۱۱/۲۶ درصد است.

جدول ۱۴: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های پایه صلب نسبت به پایه انعطاف پذیر

MCE	DBE	نوع خاک محل	نامنظمی	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۰/۰۶۲	۰	خاک C	منظم	۶ طبقه
۰	۰/۲۵	خاک D		
۰	۰	خاک C	نامنظم	
۰/۱۷	۰	خاک D		
۰	۰/۰۸۲	خاک C	منظم	۹ طبقه
۰	۰/۲۸	خاک D		
۱/۹۵	۱/۹۲	خاک C	نامنظم	
۹/۵	۱۱/۲۶	خاک D		

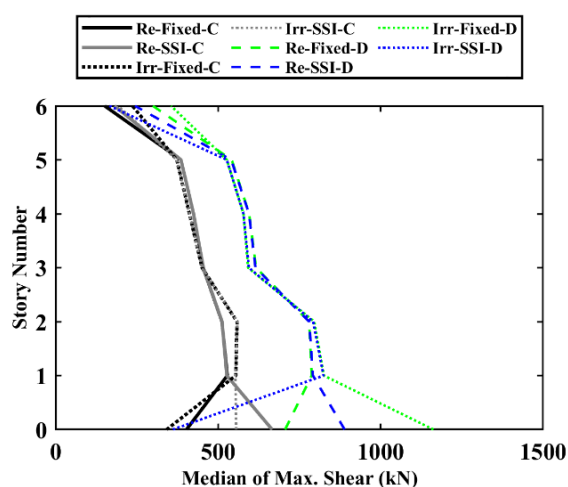
در جدول ۱۵، مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه قرارگرفته بر روی دو نوع خاک C و D تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. تأثیر خاک نوع D بر روی سازه‌های نامنظم ۹ طبقه با پایه انعطاف پذیر نسبت به حالت با پایه صلب در افزایش مقادیر شتاب تأثیرگذار است. همین‌طور آثار خاک نوع D در سازه به‌جز در سازه‌های نامنظم ۹ طبقه تحت رکوردهای قوی‌تر بیشتر مشاهده شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر شتاب طبقات در سازه ۶ طبقه منظم بر روی دو نوع خاک C و D با پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب برابر با ۴۱/۸ و ۴۲/۱ درصد به‌دست آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله DBE و سازه قرارگرفته بر روی پایه‌های صلب و انعطاف پذیر مقادیر اختلاف سازه بر روی دو نوع خاک C و D به ترتیب برابر با ۵۱/۹۲ و ۶۵/۸۵ درصد است.

جدول ۱۵: درصد اختلاف شتاب مطلق طبقات سازه‌های قرارگرفته بر روی خاک‌های مختلف C و D

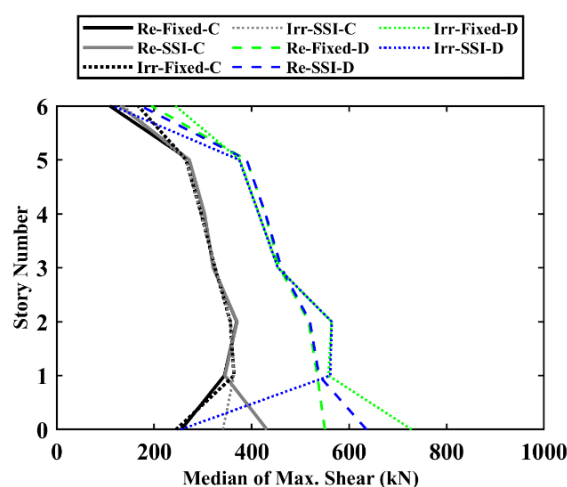
MCE	DBE	اندرکنش خاک-سازه	نامنظمی	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۵۰/۷۵	۴۱/۸	صلب	منظم	۶ طبقه
۵۰/۶۵	۴۲/۱	انعطاف پذیر		
۵۱/۴	۴۶/۳	صلب	نامنظم	
۵۱/۲	۴۶/۳	انعطاف پذیر		
۵۲/۴	۴۳/۶	صلب	منظم	۹ طبقه
۵۲/۴	۴۴/۱	انعطاف پذیر		
۴۹/۸	۵۱/۹۲	صلب	نامنظم	
۶۰/۹	۶۵/۸۵	انعطاف پذیر		

## ۳-۳- خروجی‌های برش طبقات

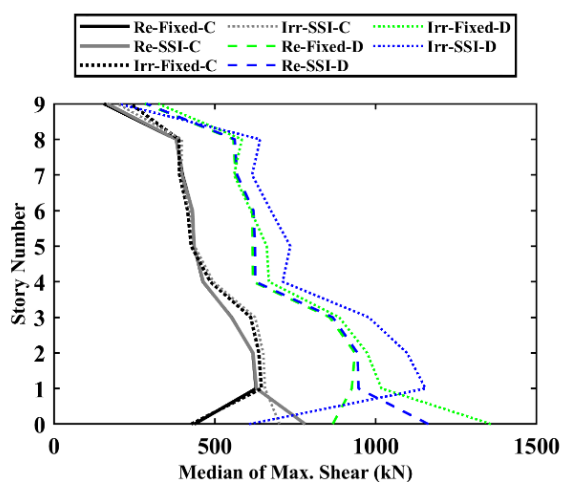
شکل ۶، مقادیر حداکثر برش طبقات را برای سازه موردنظر در سطح خطر لرزه‌ای DBE و MCE با لحاظ اثر نامنظمی جرمی در دو طبقه میانی برای سازه ۶ طبقه و سه طبقه میانی برای سازه ۹ طبقه برای دو حالت با پایه صلب و انعطاف‌پذیر و در دو حالت خاک نوع C و D نشان می‌دهد. در شکل موردنظر و سازه‌های ۶ طبقه، لحاظ اندرکنش خاک-سازه، تغییرات محسوسی در نتایج برش سازه ۶ طبقه در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد نمی‌کند. ولی آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله ایجاد می‌کند. در شکل موردنظر و سازه‌های ۹ طبقه، لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه، وقتی که سازه دارای نامنظمی جرمی و نوع خاک D است، تغییرات محسوسی در نتایج برش سازه ۹ طبقه در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد می‌کند. هم‌چنین آثار نامنظمی تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله موردبررسی ایجاد کرده است.



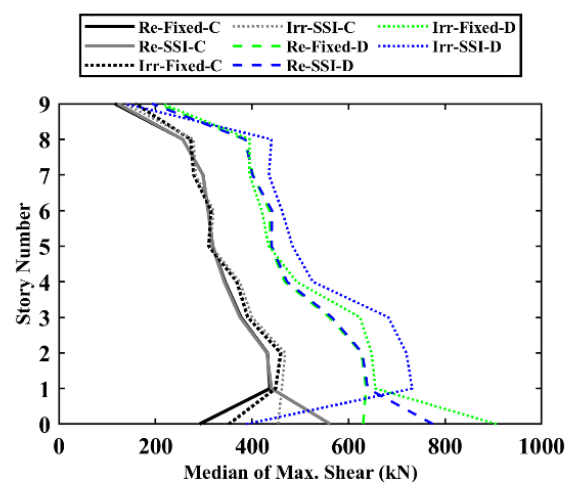
MCE تحت سازه ۶ طبقه تحت (ب)



DBE تحت سازه ۶ طبقه تحت (الف)



MCE تحت سازه ۹ طبقه تحت (د)



DBE تحت سازه ۹ طبقه تحت (ج)

شکل ۶: حداکثر برش با در نظر گرفتن اثر نامنظمی جرمی در دو سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر در دو حالت خاک نوع C و D در سطح خطر لرزه‌ای

جدول ۱۶، بیشینه مقادیر حداکثر برش سازه‌های ۶ و ۹ طبقه موردنظر این تحقیق را نشان می‌دهد. در سطح زلزله DBE، مقادیر برش سازه منظم ۶ طبقه در نوع خاک C برای دو حالت پایه صلب و انعطاف‌پذیر، بیشتر از حالت نامنظم است. همین‌طور در این نوع خاک، با افزایش شدت زلزله یعنی سطح زلزله MCE، مقادیر برش در سازه نامنظم با پایه صلب ۶ طبقه بیشتر از منظم ولی در سازه نامنظم با پایه انعطاف‌پذیر ۶ طبقه کمتر از منظم است. ولی در سازه‌های ۶ طبقه قرارگرفته بر روی نوع خاک D، با ایجاد نامنظمی مقادیر برش در حالت خاک پایه صلب بیشتر از حالت سازه منظم ولی در حالت انعطاف‌پذیر کمتر از حالت سازه منظم است. در سازه‌های ۹ طبقه قرارگرفته بر روی هر دو نوع خاک C و D تحت هر دو سطح زلزله DBE و MCE، در سازه پایه صلب نامنظم مقادیر برش نسبت به سازه منظم قرارگرفته بر روی خاک پایه صلب بیشتر از حالت پایه انعطاف‌پذیر است ولی حالت پایه انعطاف‌پذیر مقادیر برش سازه نامنظم کمتر از سازه منظم است.

جدول ۱۶: بیشینه مقادیر حداکثر برش سازه‌های موردبررسی دارای آثار منظمی و نامنظمی تحت رکوردهای زلزله دور از گسل با سطح DBE و MCE

تعداد طبقات	نوع سازه از نظر منظمی	نوع خاک محل	DBE		MCE	
			پایه صلب	پایه انعطاف‌پذیر	پایه صلب	پایه انعطاف‌پذیر
۶ طبقه	منظم	خاک C	۳۶۹/۴۹۵	۴۳۱/۳۰۵	۵۲۸/۳۵۳	۶۶۶/۱
		خاک D	۵۵۰/۲۸۲	۶۳۵/۵۷۴	۷۸۷/۹۵۴	۸۸۹/۲۱۹
	نامنظم	خاک C	۳۶۳/۸۱۲	۳۶۳/۶۶	۵۵۸/۲۳۹	۵۵۹/۴۳۴
		خاک D	۷۲۸/۴۰۷	۵۶۴/۳۲	۱۱۶۲/۶۶۳	۸۲۴/۳۵۷
۹ طبقه	منظم	خاک C	۴۳۷/۲۱۳	۵۶۲/۲۴۱	۶۲۸/۱۴۹	۷۸۰/۷۶۱
		خاک D	۶۳۶/۳۲۴	۷۷۴/۹۳۹	۹۳۵/۱۰۸	۱۱۶۳/۷۷۳
	نامنظم	خاک C	۴۵۹/۶۰۳	۴۶۸/۷۸	۶۴۴/۷۹۹	۷۰۱/۱۴۳
		خاک D	۹۰۶/۵۲۳	۷۳۱/۹۵۵	۱۳۵۸/۰۵۱	۱۱۵۴/۶۱۴

در جدول ۱۷، مقادیر اختلاف حداکثر برش طبقات سازه منظم و نامنظم با دو نوع خاک موردبررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار نامنظمی بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C در حالت صلب بسیار در افزایش مقادیر برش تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر برش طبقات در سازه ۶ طبقه پایه صلب منظم نسبت به نامنظم در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۳۲/۴ درصد به‌دست‌آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه انعطاف‌پذیر قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D تحت سطح زلزله DBE، مقادیر اختلاف سازه منظم و نامنظم به ترتیب برابر با ۱۶/۶ و ۵/۵ درصد است.

جدول ۱۷: درصد اختلاف برش طبقات سازه‌های منظم نسبت به سازه‌های نامنظم

تعداد طبقات	اندرکنش خاک-سازه	نوع خاک محل	درصد اختلاف	
			DBE	MCE
۶ طبقه	صلب	خاک C	۱/۵	۵/۷
		خاک D	۳۲/۴	۴۷/۶
	انعطاف‌پذیر	خاک C	۱۵/۷	۱۶
		خاک D	۱۱/۲	۷/۳
۹ طبقه	صلب	خاک C	۵/۱	۳
		خاک D	۴۲/۵	۴۵/۲
	انعطاف‌پذیر	خاک C	۱۶/۶	۱۰/۲
		خاک D	۵/۵	۱

در جدول ۱۸، مقادیر اختلاف حداکثر برش طبقات سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر با دو نوع خاک موردبررسی تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. آثار انعطاف‌پذیری بر روی خاک نوع D نسبت به خاک C در حالت نامنظم بسیار در افزایش مقادیر

برش تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر برش طبقات در سازه ۶ طبقه نامنظم پایه صلب نسبت به انعطاف‌پذیر در نوع خاک‌های C و D به ترتیب برابر با ۰/۰۴۲ و ۲۲/۵ درصد به‌دست‌آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله DBE و سازه قرارگرفته بر روی خاک‌های C و D مقادیر اختلاف سازه پایه صلب و انعطاف‌پذیر به ترتیب برابر با ۲ و ۱۹/۳ درصد است.

جدول ۱۸: درصد اختلاف برش طبقات سازه‌های پایه صلب نسبت به پایه انعطاف‌پذیر

MCE	DBE	نوع خاک محل	نامنظمی	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۲۶/۱	۱۶/۷	خاک C	منظم	۶ طبقه
۱۲/۹	۱۵/۵	خاک D		
۰/۲	۰/۰۴۲	خاک C	نامنظم	
۲۹/۱	۲۲/۵	خاک D		
۲۴/۳	۲۸/۶	خاک C	منظم	۹ طبقه
۲۴/۵	۲۱/۸	خاک D		
۸/۷	۲	خاک C	نامنظم	
۱۵	۱۹/۳	خاک D		

در جدول ۱۹، مقادیر اختلاف حداکثر برش طبقات سازه قرارگرفته بر روی دو نوع خاک C و D تحت زلزله‌های با سطح DBE و MCE را نشان می‌دهد. تأثیر خاک نوع D بر روی سازه‌های با پایه صلب نسبت به حالت با پایه انعطاف‌پذیر بسیار در افزایش مقادیر برش تأثیرگذار است. همین‌طور آثار خاک نوع D در سازه تحت رکوردهای قوی‌تر بیشتر مشاهده شده است. به‌عنوان مثال در سطح خطر لرزه‌ای DBE، مقدار اختلاف حداکثر برش طبقات در سازه ۶ طبقه نامنظم بر روی دو نوع خاک C و D با پایه صلب و انعطاف‌پذیر به ترتیب برابر با ۱۰۰/۲ و ۵۵/۲ درصد به‌دست‌آمده است. همین‌طور در مقایسه سازه‌های ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله MCE و سازه قرارگرفته بر روی پایه‌های صلب و انعطاف‌پذیر مقادیر اختلاف سازه بر روی دو نوع خاک C و D به ترتیب برابر با ۱۱۰/۶ و ۴۶/۷ درصد است.

معمولاً در سازه‌های بلندتر، اثرات موده‌های بالاتر در ایجاد تلاش‌ها و نیز پاسخ‌ها در سازه نسبت به سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر تأثیرگذار هستند. این اثرات می‌توانند برش پایه بیشتری را در پایه ایجاد کنند. همین‌طور با افزایش انعطاف‌پذیری در پایه سازه اثرات اندرکنش خاک-سازه در سازه بلندتر بیشتر می‌شود. بنابراین در سازه ۶ طبقه نسبت به سازه ۹ طبقه، تغییر در پاسخ‌های سازه و تلاش‌های تولیدشده (همانند جابجایی‌های نسبی، شتاب مطلق طبقات و برش پایه) کمتری مشاهده می‌شود.

جدول ۱۹: درصد اختلاف برش طبقات سازه‌های قرارگرفته بر روی خاک‌های مختلف C و D

MCE	DBE	اندرکنش خاک-سازه	نامنظمی	تعداد طبقات
درصد اختلاف	درصد اختلاف			
۴۹/۱	۴۸/۹	صلب	منظم	۶ طبقه
۳۳/۵	۴۷/۴	انعطاف‌پذیر		
۱۰۸/۳	۱۰۰/۲	صلب	نامنظم	
۴۷/۴	۵۵/۲	انعطاف‌پذیر		
۴۸/۹	۴۵/۵	صلب	منظم	۹ طبقه
۴۹/۱	۳۷/۸	انعطاف‌پذیر		
۱۱۰/۶	۹۷/۲	صلب	نامنظم	
۶۴/۷	۵۶/۱	انعطاف‌پذیر		

## ۴- نتیجه گیری

این مطالعه به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه در دو ساختمان ۶ و ۹ طبقه قاب خمشی فولادی متوسط 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) با حالت نامنظمی جرمی در ارتفاع مورد مقایسه قرار گرفته اند. تحلیل های ساختمان های 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:

(۲۳) لحاظ اندرکنش خاک-سازه، تغییرات محسوسی در نتایج جابجایی های نسبی، شتاب و برش طبقات ساختمان ۶ طبقه در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد نمی کند. ولی لحاظ آثار اندرکنش خاک-سازه در سازه ۹ طبقه، تغییرات محسوسی در نتایج جابجایی های نسبی، شتاب و برش طبقات در هر دو سطح زلزله ایجاد می کند. در ساختمان های ۶ و ۹ طبقه نامنظم تحت سطح زلزله MCE، و سازه های قرار گرفته بر روی خاک نوع D مقادیر اختلاف حداکثر جابجایی نسبی طبقات سازه پایه صلب و انعطاف پذیر به ترتیب برابر با ۰/۵۳ و ۲۳/۸ درصد است.

(۲۴) لحاظ آثار نامنظمی در نتایج جابجایی های نسبی، شتاب و برش طبقات سازه های ۶ و ۹ طبقه تغییرات محسوسی در دو سطح زلزله DBE و MCE ایجاد می کند. در سازه های ۶ و ۹ طبقه انعطاف پذیر تحت سطح زلزله MCE و ساختمان های قرار گرفته بر روی خاک نوع D مقادیر اختلاف حداکثر شتاب طبقات سازه منظم و نامنظم به ترتیب برابر با ۳ و ۱۱ درصد است.

(۲۵) در صورتی که فرض طراحی سازه ها مطابق خاک نوع C انجام پذیرد ولی خاک محل از نوع D باشد، مقادیر جابجایی های نسبی حدود ۱/۵ برابر می شوند. هم چنین مقادیر برش و شتاب طبقات می تواند تا ۱/۵ برابر افزایش یافته و با اعمال نامنظمی برش طبقات حدود ۲ برابر می شود. در سطح خطر لرزه ای DBE، مقدار حداکثر برش طبقات در ساختمان ۹ طبقه منظم با پایه صلب و سازه قرار گرفته بر روی خاک های C و D به ترتیب برابر با ۴۳۷/۲۱۳kN و ۶۳۶/۳۲۴kN به دست آمده و حدودا ۱/۵ برابر شده است. همین طور در مقایسه ساختمان های ۶ طبقه نامنظم با پایه صلب تحت سطح زلزله DBE و ساختمان قرار گرفته بر روی خاک های C و D مقادیر حداکثر برش طبقات به ترتیب برابر با ۳۶۳/۸۱۲kN و ۷۲۸/۴۰۷kN بوده و حدودا ۲ برابر شده است.

این تحقیق برای قضاوت مهندسی در حوزه انتخاب نوع خاک و لحاظ اثرات اندرکنش خاک-سازه و نامنظمی جرمی در سیستم های قاب خمشی تحت زلزله بسیار سودمند است. با مطالعه این پژوهش می توان شناخت بیشتری نسبت به رفتار واقعی سازه ها دست پیدا کرد. هم چنین 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 کند. 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. با توجه به اینکه استفاده از شتابنگاشت مصنوعی، موضوعی جدید و کاربردی در بررسی رفتار لرزه ای سازه ها است، بررسی سازه های مورد نظر دارای نامنظمی جرمی و دارای پایه ثابت و پایه انعطاف پذیر تحت این نوع شتابنگاشت ها که منطبق بر طیف طراحی (همانند استاندارد ۲۸۰۰) باشند، توصیه می شود. هم چنین لحاظ اثرات زلزله های حوزه نزدیک در بررسی رفتار این نوع سازه ها با ویژگی های بررسی شده می تواند رفتار مشخص تری از سازه نشان دهد.

## 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] IBC Standard, (2013). *Iranian Building Codes And Standards, Iranian Code Of Practice For Seismic Resistant Design Of Buildings, Standard No.2800, 4th Edition*.

- [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] Sbartai, 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] ASCE7-10 Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, (2010). *Asce7-10*.
- [23] INBC Part 6th, (2013). *Iranian National Building Code, Part 6th, Design Loads for Buildings*.
- [24] FEMA, (2009). *FEMA P695: Quantification of building seismic performance factors*. US Department of Homeland Security, FEMA.
- [25] 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.

- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Raychowdhury, P. (2008). Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures. UC San Diego.
- [29] 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.