

## نشریه مهندسی سازه و ساخت (علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

### پاسخ لرزه‌ای سازه لغزشی نامتقارن فولادی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه

سحر رادکیا<sup>۱</sup>، فرهاد عباس گندمکار<sup>۲\*</sup>، روح اله راه نورد<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

۳- کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول، دزفول، ایران

#### چکیده

یکی از روش‌های مقابله با نیروی زلزله و تاثیرات نامطلوب آن بر سازه‌ها، استفاده از جداسازهای لرزه‌ای می‌باشد. تحقیق و بررسی بر سازه لرزه‌ای از دهه‌های گذشته توسط پژوهشگران آغاز شده، ولی تاکنون مطالعه‌ای بر موضوع تحقیق حاضر صورت نپذیرفته است لذا در این مطالعه رفتار لرزه‌ای سازه لغزشی نامتقارن فولادی با سیستم قاب خمشی تحت تاثیر مولفه‌ی افقی زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه مورد بررسی قرار گرفته است. جهت دستیابی به هدف اصلی تحقیق، سازه‌های یک، پنج و ده طبقه نامنظم (میزان نامنظمی ۴۰٪) با جداگر لرزه‌ای R-FBI واقع بر روی خاک‌های تیپ II، III و IV در نظر گرفته شده است. همچنین برای بررسی اثر نامنظمی، سازه‌های با نامنظمی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد با مدل منظم آن مقایسه شد. جهت حصول نتایج تحقیق، از روش عددی اجزا محدود با مدل‌سازی مصالح در ناحیه غیرخطی و تحلیل دینامیکی صریح بهره گرفته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با تغییر نوع زمین (مطابق آیین نامه ۲۸۰۰)، تغییر مکان و شتاب طبقات سازه به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. این تغییر جهت تبدیل زمین نوع II به III برای تغییر مکان طبقه فوقانی سازه ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۸۷/۲٪، ۳۶٪، ۴/۱٪ و جهت تبدیل زمین نوع II به IV به ترتیب ۱۹/۱٪، ۱/۳٪ و ۳۰/۷٪ می‌باشد. همچنین شتاب طبقه فوقانی سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با تبدیل زمین از نوع II به III به ترتیب ۲/۱۸٪، ۳/۲٪، ۴۳/۲٪ و از نوع II به IV به ترتیب ۵۱/۹٪، ۴۰/۵٪ و ۵۷/۴٪ می‌باشد.

کلمات کلیدی: سازه نامتقارن، سازه لغزشی، اندرکنش خاک و سازه، آنالیز لرزه ای، قاب خمشی فولادی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.105638.1384	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.105638.1384	۱۳۹۸/۰۹/۰۱	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۲/۲۰	۱۳۹۷/۰۱/۱۴	۱۳۹۶/۰۸/۲۴
			فرهاد عباس گندمکار		*نویسنده مسئول:
			gandomkar@jsu.ac.ir		پست الکترونیکی:

# Seismic Response of Asymmetric Sliding Steel Structure with Considering Soil-Structure Interaction Effects

Sahar Radkia<sup>1</sup>, Farhad Abbas Gandomkar<sup>2\*</sup>, Rohola Rahnavard<sup>3</sup>

1- M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Institute for High Education ACECR, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology-Dezful, Dezful, Iran

3- M.Sc. of Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology-Dezful, Dezful, Iran

## ABSTRACT

One of the methods of resisting to earthquake forces and its undesirable effects on structures is the use of seismic isolators. Investigations on the seismic structure have been initiated by researchers since decades, but so far no study has been done on the subject of this research. Therefore, in this study, the seismic behavior of an asymmetric slip structure with a moment frame system is affected by the horizontal component of the earthquake with Considering the effects of soil and structure interaction have been investigated. In order to achieve the main objective of the research, one, five, and ten stories irregular structures (40% irregularity) are considered with seismic isolator R-FBI located on type II, III and IV soils. Also, for irregular effect analysis, irregular structures of 20, 40 and 60 percent were compared to the regular model. In order to obtain the results of the research, the finite element method has been used with modeling of nonlinear materials and performing dynamic explicit analysis. The results of the study showed that, by changing the type of soil (in accordance with the 2800 Standards), the displacement and acceleration of the structural changes considerably. This change for the conversion of II to III soil was 87.2%, 36%, 4.1%, and in order to convert the soil II to IV, 19.1%, 3.1% and 30.7%, respectively, to change location of the upper storey of the structure is 1, 5 and 10 stories. Also, the acceleration of the upper storey of structures of 1, 5 and 10 stories for converting II to III are 2.18%, 3.2%, and 43.2% respectively, and in order to convert II to IV are 51.5%, 40.5% and 57.4% respectively.

## ARTICLE INFO

Received: 15/11/2017

Revised: 03/04/2018

Accepted: 10/05/2018

## Keywords:

Antisymmetric structure,  
Sliding structure,  
Soil - structure interaction,  
Seismic analysis,  
Steel moment frame.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.105638.1384

\*Corresponding author: Farhad Abbas Gandomkar  
Email address: gandomkar@jsu.ac.ir

## ۱- مقدمه

عموما طراحی لرزه‌ای سازه‌ها بر مفهوم افزایش ظرفیت سازه‌ها در برابر زلزله با استفاده از دیوارهای برشی، قاب‌های بادبندی شده و قاب‌های خمشی استوار است. روش‌های سنتی اغلب منجر به افزایش شتاب طبقات در ساختمان‌های با سختی بالا و تغییر مکان‌های نسبی بین طبقه‌ای بزرگ در ساختمان‌های انعطاف‌پذیر می‌شود. به همین دلیل المان‌های غیرسازه‌ای و محتویات ساختمان ممکن است در زلزله‌های بزرگ محتمل خسارات قابل ملاحظه‌ای شوند، این در صورتی است که خود ساختمان ممکن است آسیب جدی نبیند. به منظور کاهش شتاب‌های طبقات مفهوم جداسازی پایه بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفت. جداساز لرزه‌ای روشی برای کاهش یا حذف پتانسیل خسارت‌های ناشی از زمین لرزه است. این عمل با محدود کردن اثر تخریبی زلزله و نه با افزایش مقاومت سازه در مقابل آن انجام می‌پذیرد. در سیستم‌های جداساز لرزه‌ای هیچ یک از مسائل مربوط به سیستم معمولی با پایه‌گیردار اتفاق نمی‌افتد. در این حالت سازه فوقانی تقریباً به صورت یک جسم صلب بر روی جداسازهای نرم تغییر مکان می‌دهد. در واقع قسمت عمده حرکات لرزه‌ای زمین در تراز جداساز جذب و در نتیجه حرکت لرزه‌ای منتقل شده به سازه فوقانی کاهش یافته و از شکست اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای جلوگیری می‌کند [۱]. هنگام وقوع زلزله، نیروی اینرسی در سازه‌ها ایجاد می‌شود. رفتار سازه‌های نامتقارن و نیروی اینرسی ایجاد شده در آن‌ها در معرض تحریک زلزله در مقایسه با سازه‌های متقارن متفاوت خواهد بود. وقتی که ساختمان‌های نامتقارن در معرض تحریکات زلزله قرار می‌گیرند علاوه بر تحمل حرکات جانبی، حرکت پیچشی را نیز متحمل خواهند شد و در نتیجه نیروها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در المان‌های مقاوم در چنین ساختمان‌هایی متفاوت خواهد بود. این اختلاف به میزان خروج از مرکزیت و دیگر پارامترهای ساختمان‌های نامتقارن بستگی دارد [۲]. در طبیعت اکثر سازه‌ها نامتقارن هستند و به همین دلیل مطالعه سازه‌های مذکور و تعیین رفتار واقعی آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. از سوی دیگر مشخصات دینامیکی خاک، پاسخ‌های افقی سازه فوقانی را در معرض تحریک زلزله تحت تاثیر قرار می‌دهد. مطالعات گذشته نشان داده است که وقتی سازه‌ای بر روی خاک نرم قرار دارد و در معرض تحریک زلزله قرار می‌گیرد، پاسخ سازه فوقانی تحت تاثیر حرکت‌های پایه سازه، خاک زیر آن و سختی‌های آن‌ها است. در هنگام وقوع زلزله، به دلیل تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک زیر پایه سازه، حرکت پایه ساختمان نسبت به حرکت زمین در میدان آزاد در فاصله‌ای دورتر از سازه متفاوت است و در نتیجه پاسخ سازه با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک متفاوت خواهد بود. این اختلاف در پاسخ‌ها بیانگر اثر اندرکنش خاک و سازه می‌باشد [۲]. به گفته بسیاری از محققین ارزیابی پاسخ سازه بدون در نظر گرفتن مسئله اندرکنش خاک و سازه یک ارزیابی صحیح از آن نمی‌باشد. نوروز نژاد و همکارانش (۱۳۹۳) در تحقیقی به ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های جداسازی شده نامتقارن در انواع خاک‌ها تحت اثر شتابنگاشت‌های زلزله پرداختند. آن‌ها در این تحقیق یک مدل سه بعدی ۴ طبقه با جداگر LRB را با استفاده از نرم افزار آباکوس<sup>۱</sup> مدل‌سازی کردند. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی غیرخطی نشان داد که حداکثر تغییر مکان طبقه آخر در خاک نوع (III) و زمانیکه خروج از مرکزیت جرمی سازه ۲۰٪ است، رخ داده است. زمانیکه خاک مورد نظر، نوع (I) بوده و خروج از مرکزیت جرمی سازه ۱۰٪ است، حداقل تغییر مکان طبقه آخر در سازه اتفاق می‌افتد و سازه بهترین رفتار لرزه‌ای را از خود نشان می‌دهد. همچنین با مقایسه مقادیر جابجایی‌های نسبی طبقات مشخص شد، این مقادیر در خاک‌های با قوام کمتر مقادیر بالاتری را به خود اختصاص می‌دهند [۳]. اسپیراکوس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) در بررسی اندرکنش خاک و ساختمان جداسازی شده نتایجی را در مورد مود موثر و بررسی اثر ساختمان‌های چاق و لاغر ارائه کردند. آن‌ها با مدل نمودن یک سیستم سه درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزاد دورانی بر روی خاک‌های سخت سنگی و نرم چند لایه، مود اول ارتعاش سازه را همواره به عنوان موثرترین مود استنباط نمودند. همچنین مطالعه اسپیراکوس و همکارانش نشان می‌دهد که اثرات اندرکنش خاک و سازه برای سازه‌های چاق و با نسبت جرم کوچکتر ساختمانی و سازه‌های کوتاه مهم‌تر از اندرکنش خاک و پی سازه‌های مرتفع و باریک است؛ اما این اثر گذاری بر میرایی ویسکوز معادل در سازه‌های لاغر ناچیز است [۴]. شربتدار و همکاران (۲۰۱۱) پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده با جداگر های LRB و FPS تحت زلزله‌های نزدیک گسل را با استفاده از یک مدل تحلیلی سه بعدی غیرخطی بررسی کردند. در این مطالعه یک سازه ۱۵ طبقه با دو نوع جداگر مذکور تحت ۵ رکورد زلزله نزدیک گسل مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در مجاورت گسل پدید آورنده زلزله، زلزله‌ها در یک سایت خاص به میزان قابل توجهی تحت تاثیر مکانیسم

<sup>۱</sup> ABAQUS<sup>۲</sup> Spyarakos

پارگی، جهت لغزش نسبت به سایت و جابجایی دائمی زمین ناشی از حرکات تکتونیک قرار دارند. نتایج عددی حاکی از آن است که مقدار حداکثر جابه جایی در یک منطقه محدود در فاصله ای حدود ۴ کیلومتر از محل پارگی گسل میتواند تا ۶۶٪ با هم اختلاف داشته باشند. همچنین در این منطقه حداکثر شتاب بالاترین طبقه می تواند تا ۳۵٪ با هم اختلاف داشته باشند [۵].

سید محمود و همکاران (۲۰۱۲) در تحقیقی به بررسی پاسخ سازه های جداسازی شده تحت تحریکات زلزله با در نظر گرفتن انعطاف پذیری خاک پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که انعطاف پذیری خاک، بر روی پاسخ روسازه ی سفت تاثیر قابل توجه تری نسبت به روسازه نرم دارد [۶]. خوشنودی و معتمدی (۲۰۱۳) تاثیر مولفه قائم زلزله بر پاسخ ساختمان های فولادی نامتقارن جداسازی شده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که استفاده از سیستم جداسازی پایه سبب کاهش پاسخ های جانبی و نیروی سازه در مقایسه با سازه پایه گیردار می گردد. استفاده از سیستم جداسازی موجب کاهش پاسخ سازه در مقایسه با حالت پای گیردار می شود و در این پاسخ برخلاف پاسخ های جانبی، لحاظ مولفه قائم زلزله سبب تغییر پاسخ ها شد. همچنین نسبت حداکثر مولفه قائم زلزله به حداکثر مولفه افقی به عنوان یکی از پارامتر های تاثیر گذار شناخته شد. علاوه بر این، مولفه قائم زلزله در سازه جداسازی شده سبب ایجاد نیروی کششی در ستون تحتانی می گردد که چشم پوشی از آن می تواند باعث بلند شدگی محلی جداساز و خارج شدن آن از سیستم باربر سازه گردد [۷]. لوکو<sup>۳</sup> (۲۰۱۴) در مطالعه ای به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی عملکرد سیستم جداساز لرزه ای پایه غیرخطی برای یک مدل ساده شده ی الاستیک پرداخت. نتایج این مطالعه عددی نشان داد که پاسخ لرزه ای سازه واقع بر روی یک مدل جداساز پایه غیرخطی با اثر اندرکنش خاک و سازه ممکن است بزرگتر باشد نسبت به حالتی که از اثر اندرکنش صرف نظر شود [۸]. اعتدالی و سهرابی در (۲۰۱۵) در تحقیقی به پیشنهاد روشی جهت کاهش پیچش در سازه های جداسازی شده نامتقارن در طول زلزله پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که جداگرهای پایه قادر هستند چرخش طبقات را کاهش دهند اگرچه این کاهش در خروج از مرکزیت های بزرگ ناچیز است [۹]. کریشنامورتی<sup>۴</sup> و آنیتا<sup>۵</sup> (۲۰۱۶) به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی سازه جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه عددی نشان داد که اندرکنش خاک و سازه، پاسخ سازه جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی را تحت تاثیر قرار می دهد؛ به نحوی که باعث افزایش پاسخ سازه می شود [۱۰].

در این تحقیق ۹ مدل شامل سیستم سازه های فولادی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با استفاده از روش اجزا محدود و با بکارگیری نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار می گیرد. در این مطالعه روش مدل سازی با جزییات کامل شرح داده شده است. با توجه به موارد فوق الذکر و با توجه به اینکه تاکنون مطالعه ای بر روی تحلیل لرزه ای سازه های لغزشی با در نظر گرفتن اثرات همزمان مواردی چون الف) تحلیل سه بعدی، ب) سیستم سازه ای فولادی با قاب خمشی، ج) سازه ی نامتقارن و د) اثرات اندرکنش خاک و سازه، انجام نپذیرفته است، لذا هدف اصلی این پایان نامه بررسی رفتار لرزه ای سازه لغزشی نامتقارن فولادی با سیستم قاب خمشی تحت تاثیر مولفه افقی زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می باشد. شایان ذکر است که هدف از سازه ی نامتقارن در این مطالعه، سازه نامنظم در پلان با نامنظمی هندسی می باشد که مطابق بند ۱-۷-۱ الف آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله [۱۱] تعریف شده است.

## ۲- مدل های سازه ای

مدل های مورد بررسی در این مطالعه، به صورت سازه های سه بعدی قاب خمشی ۱ طبقه (۴۰٪ نامنظمی)، ۵ طبقه (منظم، ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ نامنظمی) و ۱۰ طبقه (۴۰٪ نامنظمی) به عنوان نمونه ای از سازه کوتاه، متوسط و بلند با ارتفاع طبقات برابر ۳/۲ متر می باشند. این سازه ها در منطقه با خطر نسبی زلزله متوسط با کاربری مسکونی می باشند. سازه های مورد بررسی دارای پنج دهانه در جهت X و پنج دهانه در جهت Y می باشند. ستون ها از پروفیل BOX و تیرها از پروفیل IPE ساخته شده اند. طول تمامی دهانه ها ۵ متر می باشد. این سازه ها بدون اعمال جداگر و بر اساس مبحث ششم آیین نامه مقررات ملی ساختمان ایران [۱۲] بارگذاری شده اند. جدول ۱ مقادیر مورد نظر برای بارهای وارده به سازه ها را نشان می دهد. طراحی اولیه سازه ها به صورت استاتیکی خطی با نرم افزار ETABS و بر اساس

<sup>3</sup> Luco

<sup>4</sup> Krishnamoorthy

<sup>5</sup> Anita

آیین نامه AISC-ASD01 [۱۳] انجام شده و مقاطع مناسب برای آن ها بدست آمده است (جدول ۲). هم چنین از نیروهای پای ستون ها در هر سازه جهت طراحی جداگرا استفاده شده است.

جدول ۱: بارهای اعمال شده بر مدل ها

مقدار بار اعمالی (kg/m <sup>2</sup> )	نوع بار اعمالی
۵۰۰	بار مرده کف طبقات
۴۵۰	بار مرده بام
۲۰۰	بار زنده کف طبقات
۱۵۰	بار زنده بام
۲۵۰	بار مرده دیوارهای جانبی

جدول ۲: مشخصات مقاطع و زمان تناوب مدل های مورد بررسی

مقاطع ستون ها	مقاطع تیرها	زمان تناوب (ثانیه)	مدل مورد مطالعه
BOX 160X160X10	IPE220	۰/۱۹	۱ طبقه با نامنظمی ۴۰ درصد
BOX 220X220X20 S1 and S2 BOX 220X220X20 S3 BOX 200X200X20 S4 and S5	IPE330 S1 to S3 IPE270 S4 and S5	۰/۶۴	۵ طبقه منظم
BOX 220X220X20 S1 and S2 BOX 220X220X20 S3 BOX 200X200X20 S4 and S5	IPE330 S1 to S3 IPE270 S4 and S5	۰/۶۴	۵ طبقه با نامنظمی ۲۰ درصد
BOX 220X220X20 S1 and S2 BOX 200X200X20 S3 BOX 160X160X20 S4 and S5	IPE330 S1 to S3 IPE270 S4 and S5	۰/۶۴	۵ طبقه با نامنظمی ۴۰ درصد
BOX 240X240X20 S1 and S2 BOX 200X200X20 S3 BOX 180X180X20 S4 and S5	IPE360 S1 IPE330 S2 and S3 IPE270 S4 and S5	۰/۶۴	۵ طبقه با نامنظمی ۶۰ درصد
BOX 320X320X20 S1 BOX 280X280X20 S2 and S3 BOX 260X260X20 S4 to S6 BOX 200X200X20 S7 and S8 BOX 180X180X20 S9 and S10	IPE360 S1 IPE400 S2 to S4 IPE360 S5 and S6 IPE330 S7 and S8 IPE270 S9 IPE240 S10	۱/۰۷	۱۰ طبقه با نامنظمی ۴۰ درصد

لازم به توضیح است که برای همه مدل های مورد مطالعه در این تحقیق، ابعاد فونداسیون ۲۷×۲۷ متر و عمق ۱ متر در نظر گرفته شده است. همچنین سطح خاک ۱۳۵×۱۳۵ متر و عمق آن ۲۰ متر با مرزهایی به اندازه کافی دور از فونداسیون جهت به حداقل رساندن اثرات مرزها در نظر گرفته شده است (شکل ۲) [۱۴].

جهت دستیابی به هدف تحقیق، تعداد ۱۲ مدل با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ مورد بررسی قرار می گیرند. لازم به ذکر است که مقادیر سختی ( $K$ ) و ضریب میرایی ( $C$ ) جداگرا با توجه به وزن سازه و مقادیر استهلاک و فرکانس فرض شده برای جداگر بر اساس روابط ۱ تا ۴ [۱۵] محاسبه می شوند. هم چنین تیپ خاک های مورد مطالعه مستخرج از آیین نامه ۲۸۰۰ [۱۱] است.

جدول ۳: مشخصات انواع مدل ها

نام مدل	تعداد طبقات	نامنظمی (%)	مشخصات ایزولاتور R-FBI			خاک (تیپ)
			C(N.s/m)	K (N/m)	$\mu$	
مدل ۱	۱	۴۰	۴۰۴۳/۵	۷۹۳۵۵	۰/۰۵	II ✓
مدل ۲	۵	۴۰	۲۳۶۲۶	۴۶۳۶۶۶	۰/۰۵	III ✓
مدل ۳	۱۰	۴۰	۴۸۶۵۳/۶	۹۵۴۸۲۸/۶	۰/۰۵	IV ✓
مدل ۴	۱	۴۰	۴۰۴۳/۵	۷۹۳۵۵	۰/۰۵	II ✓
مدل ۵	۵	۴۰	۲۳۶۲۶	۴۶۳۶۶۶	۰/۰۵	III ✓
مدل ۶	۱۰	۴۰	۴۸۶۵۳/۶	۹۵۴۸۲۸/۶	۰/۰۵	IV ✓
مدل ۷	۱	۴۰	۴۰۴۳/۵	۷۹۳۵۵	۰/۰۵	II ✓
مدل ۸	۵	۴۰	۲۳۶۲۶	۴۶۳۶۶۶	۰/۰۵	III ✓
مدل ۹	۱۰	۴۰	۴۸۶۵۳/۶	۹۵۴۸۲۸/۶	۰/۰۵	IV ✓
مدل ۱۰	۵	۰	۲۷۲۱۵	۵۳۴۱۰۲	۰/۰۵	IV ✓
مدل ۱۱	۵	۲۰	۲۶۲۰۹	۵۱۴۳۵۰	۰/۰۵	IV ✓
مدل ۱۲	۵	۶۰	۱۹۲۳۴	۳۷۷۴۶۸	۰/۰۵	IV ✓

که در آن:

$$K_0 = m_i \omega_0 \quad (1)$$

$$C_0 = 2\xi_0 \omega_0 m_i \quad (2)$$

و در این روابط:

$$m_i = m_0 + \sum_{j=1}^n m_j \quad (3)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad (4)$$

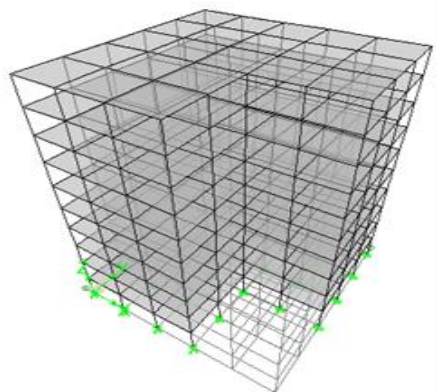
که در آن  $f_0$  فرکانس جداگر؛  $\omega_0$  فرکانس زاویه ای جداگر؛  $m_i$  جرم طبقه  $i$  ام؛  $m_0$  جرم جداگر؛  $\xi_0$  استهلاک جداگر؛  $C_0$  ضریب میرایی جداگر و  $K_0$  سختی جداگر است.

### ۳- روش تحقیق

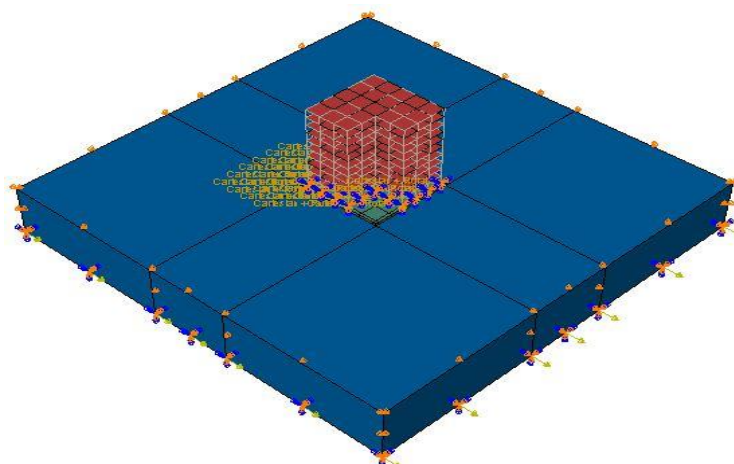
با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مدل‌های سازه‌های نوین، جهت تعیین رفتار آن‌ها از روش‌های عددی استفاده می‌شود. لذا در تحقیق حاضر از روش عددی اجزا محدود جهت مدل‌سازی سازه‌ی قاب خمشی فولادی، المان‌های جداگر و خاک زیر سازه استفاده شد. برای برآورد نیازهای تحلیل موجود، می‌بایست از نرم افزار اجزا محدودی بهره گرفته می‌شد که تمام نیازهای تحلیل را با توجه به هدف تحقیق برآورد نماید. لذا پس از بررسی‌های لازم، نرم افزار آباکوس جهت تامین نیازهای تحلیلی این مطالعه استفاده گردید. ابتدا با انتخاب المان‌های مناسب جهت مدل‌سازی سازه، قاب فولادی، جداگر و خاک، مدل اجزا محدود سازه مورد مطالعه تهیه گردید و سپس با انتخاب مش‌بندی مناسب و مقایسه نتایج حاصل از مدل مذکور با مطالعات پیشین نسبت به صحت سنجی مدل با تحلیل مودال اقدام گردید که به این وسیله اطمینان لازم از روش عددی استفاده شده حاصل می‌گردد. پس از تهیه مدل صحت سنجی شده، نسبت به تهیه مدل‌های مورد نیاز هدف اقدام می‌گردد. پس از تهیه مدل‌های فوق‌الذکر تاثیر مشخصات خاک و جداگر و همچنین اثر مولفه‌ی افقی زلزله بر پاسخ سازه-ها تعیین می‌گردد.

## ۴-مدل عددی

مدل‌های مورد بررسی در این مطالعه، به صورت سازه‌های سه بعدی قاب خمشی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با ۴۰٪ نامنظمی می‌باشند. شکل ۱ مدل ۱۰ طبقه فولادی را نشان می‌دهد که اعضاء قاب‌ها در ابتدا با فرض پایه ثابت و به صورت استاتیکی طراحی شدند. مدل نمایش داده شده نمونه‌ای از مدل‌های طراحی شده در نرم افزار Etabs می‌باشند. پس از طراحی مدل‌های مورد مطالعه تحقیق نسبت به تحلیل آنها در نرم افزار آباکوس مطابق موارد عنوان شده در بخش ۳ (روش تحقیق) اقدام گردید. نمونه مدل تهیه شده در نرم افزار آباکوس در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۱: نمونه‌ای از مدل‌های سه بعدی ترسیمی در نرم افزار Etabs (مدل ۱۰ طبقه با نامنظمی ۴۰٪)



شکل ۲: نمونه‌ای از مدل‌های سه بعدی ترسیمی در نرم افزار آباکوس (مدل ۱۰ طبقه با نامنظمی ۴۰٪)

## ۴-۱- خصوصیات مصالح

ویژگی مصالح فولاد و بتن مصرفی در مدل‌ها در جداول ۴ و ۵ تهیه شده است. این ویژگی‌ها بر اساس استاندارد ارائه شده توسط موسسه‌ی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران در مبحث پنجم مقررات ملی ساختمان [۱۶] است. خصوصیات مدل شامل خاصیت غیرخطی مصالح، رفتار غیرخطی هندسی و تحلیل غیرخطی می‌باشد. برای مدل‌سازی تمام اجزاء فولادی از رفتار غیرارتجاعی مصالح استفاده شده است. خاصیت غیر خطی مصالح در آباکوس مستلزم بهره‌گیری از تنش واقعی متناظر با کرنش حد پلاستیک از رابطه تنش-کرنش مهندسی است. رابطه تنش و کرنش در نرم افزار آباکوس یکسان فرض شده است. برای تعریف نمودار تنش کرنش هر تعداد نقطه می‌تواند استفاده شود. بنابراین می‌توان با تقریب خوبی به رفتار واقعی مصالح دست یافت. رفتار مصالح

تا حد تنش تسلیم به صورت الاستیک است. پس از آن وارد فاز سخت شدگی کرنشی تا حد رسیدن به تنش نهایی می شوند. چگالی اعضاء هنگام استفاده از تحلیل دینامیکی مدل بایستی تعریف شود. چگالی از طریق منوی Mass Density به ترتیب به مقدار ۷۸۵۰ و ۲۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب برای فولاد و بتن تعریف می شود. حد مرحله الاستیک نمودار تنش-کرنش از طریق منوی Elastic تعریف می شود. که در آن مدول یانگ به ترتیب برای فولاد و بتن برابر است با  $۲/۱ \times ۱۰^۵$  و  $۲/۱ \times ۱۰^۴$  نیوتن بر میلی متر مربع و ضریب پواسون برابر است با ۰/۳ است. بخش پلاستیک نمودار تن-کرنش فولاد از طریق منوی Plastic تعریف می شود. در این مطالعه از فولاد ST37 برای برای تعریف تیر و ستون استفاده گردیده است. خصوصیات مکانیکی این فولاد در جدول ۴ آمده است. مدل پلاستیک آسیب دیده<sup>۶</sup> بتن قادر به مدلسازی بتن در تمام اجزاء سازه‌ای همچون تیرها، خراباها، پوسته‌ها و مورد مطالعه ی این تحقیق می باشد. رفتار غیر الاستیک بتن با استفاده از الاستیسیته خرابی ایزوتروپیک همراه با پلاستیسیته فشاری و کششی ایزوتروپیک ترسیم می شود. مقاومت فشاری اسمی بتن مورد استفاده ۲۱ مگاپاسکال فرض می شود. نمودار تسلیم فشاری از بتن معمولی گرفته می شود. تنش کششی ترک به طور محافظه کارانه برابر است با ۵/۶٪ مقدار حد اکثر تنش فشاری فرض می شود [۱۶]. پس از ایجاد ترک کششی رابطه تنش-کرنش در کشش به علت انتقال بار به آرماتور کم می شود. از مقاومت کششی بتن پس از ایجاد ترک صرف نظر می شود. خصوصیات بتن استفاده شده در سقف سازه ای و پی آن در جدول ۵ آمده است.

در میزان تاثیر و نحوه ی رفتار اندرکنشی سیستم خاک-سازه، خاک ها و ویژگی های مکانیکی و دینامیکی که مبنای طبقه بندی ساختمان قرار گرفته است نقش بسیار مهمی ایفاء می کند. با توجه به طبقه بندی ساختمانها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۱] ساختمانهای تیپ III و IV به واسطه ساختار مکانیکی و ویژگی های دینامیکی، همچنین پارامتر سختی نسبی سازه به خاک بیش از دو ساختمان تیپ I و II مستعد رفتار غیرخطی، تغییر در مشخصه های رفتار دینامیکی، تغییر در دامنه ی امواج و فرکانس های ارتعاشی و نهایتا تشدید اثرات پدیده اندرکنش خاک-سازه هستند [۱۷]؛ بر این اساس جهت بررسی تاثیر مشخصات خاک بر رفتار لرزه ای سازه های مورد مطالعه خاک های تیپ II، III و IV آیین نامه ۲۸۰۰ [۱۱] در نظر گرفته شده که در جدول ۶ مشخصات آنها ارائه شده است. برای تعریف خصوصیات پلاستیک خاک از مدل موهر کلمب<sup>۷</sup> استفاده شده است. برای تعریف خصوصیات پلاستیک خاک به روش موهر کولمب لازم است که چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای خاک تعریف شود.

جدول ۴: خصوصیات مصالح فولادی

کرنش نهایی	تنش نهایی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	مدول یانگ (مگاپاسکال)
۰/۳	۴۱۲	۲۴۵	۲۱۰۰۰

جدول ۵: خصوصیات مصالح بتنی

تنش فشاری بتن (مگاپاسکال)	تنش کششی بتن (مگاپاسکال)	پارامتر ویسکوزیته	خروج از مرکزیت	زاویه ترک خوردگی	مدول یانگ (مگاپاسکال)	نام بتن
۱/۱۲	۲۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۳۱	۲۱۰۰۰	fc21

جدول ۶: مشخصات خاک های مورد مطالعه [۱۸]

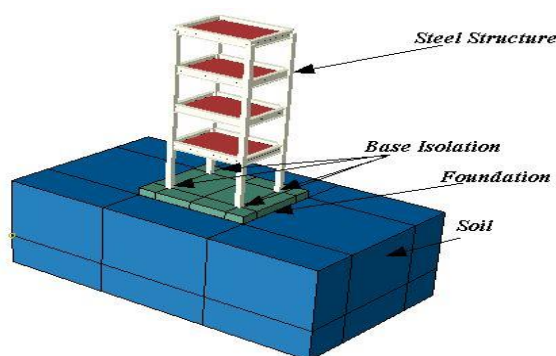
توصیف آیین نامه	چسبندگی (مگاپاسکال)	سرعت برشی ( $\frac{m}{s}$ )	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	مدول یانگ (مگاپاسکال)	چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	خاک
خاک خیلی متراکم (سنگ)	۲۷۰	۶۰۰	۳۰	۰/۳۵	۲۱۸۴	۲۲۰۰	II
خاک متراکم	۱۵۰	۳۰۰	۲۸	۰/۳۵	۵۳۴/۶	۲۲۰۰	III
خاک نرم	۱۵۰	۱۵۰	۱۸	۰/۴	۱۳۸/۶	۲۲۰۰	IV

<sup>۶</sup> Concrete Damage Plasticity<sup>۷</sup> Mohr Columb

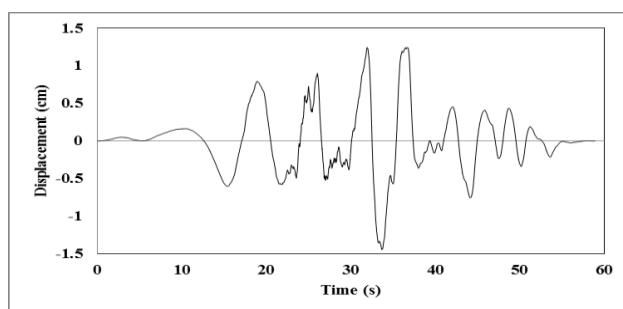


## ۴-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

در این مطالعه برای تعریف شرایط مرزی، انتهای خاک به عنوان بستر سنگی فرض شده که برای معرفی آن از گزینه Pinned استفاده شد. این تکیه گاه از جابجایی در سه جهت جلوگیری می کند. همچنین جابجایی مرزهای کناری خاک در جهت عمود بر صفحه بسته شده است. شکل ۳ نمونه مدل عددی ساخته در نرم افزار آباکوس براساس مرجع ۱۹ را نشان می دهد. بارگذاری نیز به عنوان یک شرط مرزی تعریف شده است که در آن بار به صورت نگاشت جابجایی-زمان به انتهای خاک وارد می شود. در این مطالعه تحریک اعمال شده بر مدل های مورد مطالعه، مولفه افقی زلزله بم می باشد. از آنجا که روش تحلیل از نوع دینامیکی می باشد، زمان آنالیز مفهوم فیزیکی و واقعی خود را دارد. زمان مورد نیاز برای انجام آنالیز بر روی یک مدل عددی با شرایط ثابت و مشخص، تابع گام های زمانی تحلیل آن است. زیرا در بسیاری موارد کنترل زیادی بر روی هزینه محاسباتی هر گام زمانی تحلیل نداریم و پارامترهایی از قبیل تعداد درجات آزادی که تابع مش بندی بوده و نیز بسته به روش تحلیل وجود اندرکنش ها، انواع غیرخطی شدن، تعریف استهلاک و ... تعیین کننده این هزینه محاسباتی می باشند. پس باید گام حل<sup>۸</sup> تا آنجا که امکان دارد کوتاه شود، به عبارت دیگر باید طول رکورد کوتاه شود [۲۰]. برای کوتاه کردن طول رکورد از تعریفی به نام طول زمان قوی رکورد<sup>۹</sup> استفاده می شود. در این بازه زمانی حرکات قابل توجه و تاثیرگذار زمین اتفاق افتاده و در خارج از این بازه زمانی، با تقریب قابل قبولی می توان از وجود تحریک زلزله صرف نظر کرد. در نهایت با استفاده از نرم افزار سائزموسیگنال<sup>۱۰</sup> پس از اصلاح رکورد زلزله، جهت تعیین طول زمان قوی رکورد زلزله اقدام می شود. بر این اساس زمان قوی زلزله بم بین ۲۰ تا ۳۶ ثانیه می باشد. بنابراین زمان حرکت قوی زلزله حدود ۱۶ ثانیه می باشد. در شکل ۴ نگاشت جابه جایی افقی زلزله بم ارائه شده است.



شکل ۳: نمونه مدل عددی ساخته شده در نرم افزار آباکوس براساس [۱۹]



شکل ۴: نگاشت جابه جایی افقی زلزله بم

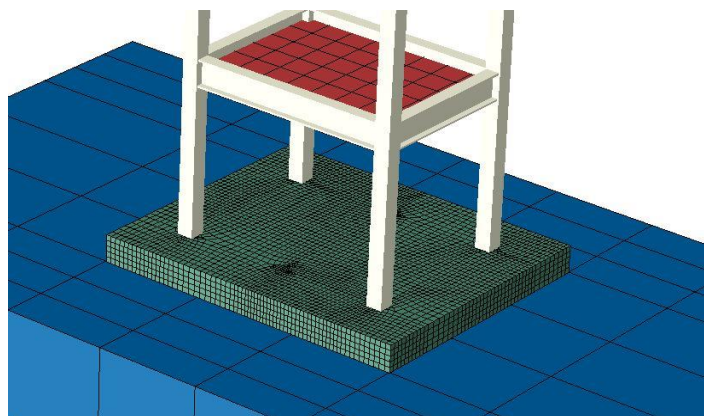
<sup>8</sup> Step time

<sup>9</sup> Strong Duration

<sup>10</sup> Seismosignal

## ۴-۳- تماس و مش بندی

در این تحقیق مش بندی سازه به نحوی تعیین شد که نرم افزار بتواند جواب مناسب را محاسبه کند. تمامی تیر و ستون ها با استفاده از المان خطی B31 مدل سازی شده اند. خصوصیات المان تیر<sup>۱۱</sup> با استفاده از مقاطع پیش تعریف شده در نرم افزار آباکوس تعریف شده اند. فونداسیون و خاک زیرسازه با استفاده از المان C3D8R مدل سازی شده است. این المان دارای هشت گره و هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی دارد. در مدل سازی سقف سازه از المان S4R استفاده شده است. المان S4R دارای چهار گره و شش درجه آزادی شامل سه درجه انتقالی و سه درجه دورانی در هر گره است. عملکرد به صورت خمشی و غشایی پیش تعریف شده در نرم افزار آباکوس است. سپس المان های تیر و پوسته با استفاده از قید گره زدن<sup>۱۲</sup> به نحوی که دارای عملکرد مرکب باشند، به یکدیگر متصل شده اند. جزییات بیشتر تماس میان تیر و ستون فولادی و سقف بتنی در [ ۲۱، ۲۲ و ۲۳ ] آمده است. شکل ۵ مش بندی مدل عددی را از نمای نزدیک نشان می دهد. برای تعریف جداگرها از رابط<sup>۱۳</sup> های موجود در کتابخانه آباکوس استفاده شده است. برای مدل سازی جداگر میان سازه و پی باید انتهای ستون ها سازه در تمام جهت ها به پی مقید و فقط در جهت اعمال بارگذاری آزاد شود. برای مقید شدن ستون به پی از رابط Rotational و برای تعریف جداگر از رابط Cartesian استفاده شده است. برای جداگر RFBI ضریب سختی فنر، ضریب میرایی و ضریب اصطکاک تعریف شده است.



شکل ۵: مش بندی مدل عددی در نمای نزدیک

## ۴-۴- صحت سنجی

در این تحقیق، ۴ مثال جهت کنترل صحت مدل ساخته شده در نرم افزار با کار آزمایشگاهی که توسط هی یانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۹] انجام شده در نظر گرفته شده است، در مدل آزمایشگاهی یک سازه قاب فولادی ۴ طبقه با جداساز لایه ای لاستیکی (LRB) تحت چندین آزمایش میز لرزان با شرایط مختلف قرار گرفت. مشخصات جداسازها در جدول ۷ ارائه شده است. مشخصات دینامیکی سازه جداسازی شده با اثر اندرکنش خاک-سازه با استفاده از یک تئوری ساده پیش بینی شده و در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۷: مشخصات فیزیکی و مکانیکی جداگر LRB [۱۹]

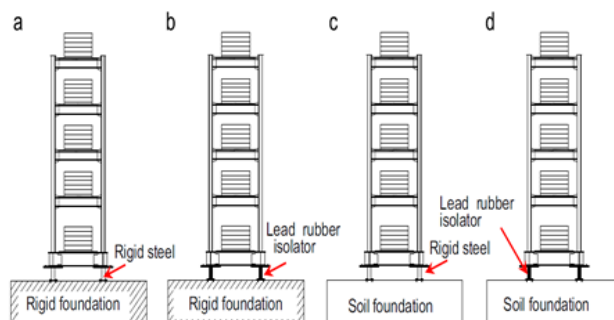
ضریب شکل	ضریب شکل اولیه	جرم لاستیک (کیلوگرم)	میرایی ویسکوز	سختی جانبی	قطر سرب مدادی (متر)	ضریب اصلاح برای سختی لاستیک	مدول بالک لاستیک (مگاپاسکال)	نیروی تسلیم (نیوتن)	مدول برشی لاستیک (مگاپاسکال)	ضریب شکل ثانویه
۳/۴۸	۱۹/۲	۲۵/۵	۱۰/۹۳	۰/۱۷	۰/۰۰۸	۰/۷	۱۹۶۰	۴۴۰	۰/۶	۳/۴۸

<sup>11</sup> BEAM<sup>12</sup> Tie constraint<sup>13</sup> Connector

جدول ۸: پارامترهای دینامیکی پیش بینی شده برای سیستم اندرکنش خاک-سازه ی جداسازی شده [۱۹]

ضریب پوواسون خاک	نسبت چگالی نسبی	نسبت لاغری سازه	نسبت جرم	پارامتر موج	نسبت ارتفاع	ضریب میرایی جداگر	فرکانس سازه جداسازی شده (هرتز)	ضریب میرایی سازه	فرکانس اصلی سازه (هرتز)
۰/۴۱	۱/۵۷	۲/۶۷	۰/۲	۴۸/۹	۰/۰۸	۱۰/۴۷	۴/۰۷	۲/۷۵	۶/۹۵

در آزمایش میز لرزان چهار تست جهت بررسی پاسخ لرزه ای سازه تحت چهار شرایط مختلف: سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون صلب (تست I)، سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون صلب (تست II)، سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون خاکی (تست III) و سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون خاکی (تست IV) طراحی شده که در شکل ۶ نشان داده شده است. در تحقیق حاضر جهت اعتبار سنجی ۴ مدل مشابه چهار تست مدل آزمایشگاهی در نرم افزار مدلسازی شده و خصوصیات مصالح مشابه کار آزمایشگاهی به آنها اعمال شده است. در مدل های عددی، اطراف خاک با استفاده از شرایط مرزی مقید شده تا جلوی حرکت خاک در جهت عمود بر صفحه سطوح گرفته شود. همچنین سطح زیرین خاک در تمام جهات مقید شده که نشانگر سنگ بستر می باشد. همان گونه که پیشتر تعریف شد مشخصات جداگرها نیز توسط المان رابط در محل اتصال سازه به فونداسیون تعریف شده است. برای مدلسازی خاک و فونداسیون از المان حجمی Solid، از المان سطحی Shell برای مدلسازی سقف، و از المان خطی Wire برای مدلسازی تیر و ستون استفاده شده است. برای مدل سازی تماس سازه و پی و هم چنین مدل سازی جداگر مشابه آنچه در بخش قبلی گفته شده عمل گردید (شکل ۳ و ۵).



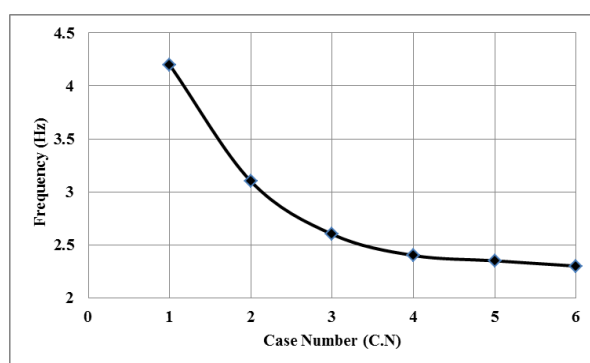
شکل ۶: تست های میز لرزان طراحی شده برای چهار شرایط مختلف. (a) تست I، (b) تست II، (c) تست III و (d) تست IV [۱۹]

جهت مشخص کردن اندازه مش در هر یک از بخش های سیستم مورد مطالعه، آنالیز حساسیت مش انجام گردید. جهت این امر اندازه ی مش در بخش های مختلف سیستم مورد مطالعه تغییر داده شد و برای تغییرات مذکور نتایج آنالیز فرکانسی بدست آمدند. برای مقایسه نتایج آنالیز حساسیت مش از فرکانس ارتعاشی مد اول استفاده گردید. در این خصوص جدول ۹ نشان دهنده اندازه مش در بخش های مذکور می باشد. همچنین شکل ۷ نتایج متناسب با مش های انتخابی در جدول فوق الذکر را نشان می دهد.

با توجه به شکل ۷ و با توجه به اینکه اختلاف پاسخ ارائه شده جهت C.N.5 و C.N.6 بسیار ناچیز می باشد؛ لذا براساس اصول آنالیز حساسیت مش، ملاک تعیین مش بندی سیستم مورد مطالعه با توجه به پاسخ ارائه شده در C.N.5 می باشد. بنابراین جهت صحت سنجی سیستم مورد مطالعه اندازه مش حداقل جهت خاک، فونداسیون، سازه و سقف به ترتیب ۴۰۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر می باشند. آنالیز حساسیت انجام شده برای مدل اجزا محدود مربوط به تست شماره IV می باشد که در آن تمام اجزا مورد مطالعه در این تحقیق (خاک، ایزولاتور، فونداسیون و سازه) وجود دارند. لذا مش فوق الذکر برای مدل سازی اجزا محدود در تست شماره I، II و III نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۹: حداقل اندازه مش در نظر گرفته شده در حالت های مختلف

شماره مورد (C.N)	حداقل اندازه مش (میلی متر)			
	سقف	سازه	فونداسیون	خاک
۱	۱۸۰	۱۳۰	۶۰	۱۰۰۰
۲	۱۶۰	۱۱۰	۵۰	۸۰۰
۳	۱۴۰	۹۰	۴۰	۶۰۰
۴	۱۲۰	۷۰	۳۰	۵۰۰
۵	۱۰۰	۵۰	۲۰	۴۰۰
۶	۸۰	۳۰	۱۰	۳۰۰



شکل ۷: آنالیز حساسیت مش

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ مشخص می‌شود که جهت ۴ حالت بررسی شده‌ی مذکور با توجه به حداکثر خطای روش عددی استفاده شده در تحقیق حاضر (۰.۸/۷۷٪)، مدل‌های عددی صحت سنجی شده پاسخ نزدیک به واقعیت سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون صلب (تست I)، سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون صلب (تست II)، سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون خاکی (تست III) و سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون خاکی (تست IV) را ارائه می‌دهد. با توجه به مش بندی انتخاب شده در جدول ۱۰ فرکانس های بدست آمده از تحلیل فرکانسی مدل‌های عددی با فرکانس‌های بدست آمده از مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در جدول ملاحظه می‌شود، نتایج ارائه شده و درصد خطای محاسبه شده نشان‌گر تطابق و نزدیکی نتایج مدل‌های عددی مطالعه حاضر و مدل های آزمایشگاهی بوده و دلالت بر صحت مدل‌سازی انجام شده دارد.

جدول ۱۰: جدول مقایسه و صحت سنجی مدل آزمایشگاهی و مدل عددی

شماره تست	فرکانس (Hz)		خطا (%)
	مدل عددی	مدل آزمایشگاهی	
تست شماره I	۷	۶/۹۵	۰/۷
تست شماره II	۲/۳۹	۲/۶۲	۸/۷۷
تست شماره III	۴/۲	۴/۳۶	۳/۶۶
تست شماره IV	۲/۳۳	۲/۲۹	۱/۷۴

## ۵- نتایج تحلیل

همانگونه که پیش تر گفته شد در این تحقیق ۹ مدل شامل سیستم سازه فولادی ی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با استفاده از روش اجزا محدود و با بکارگیری نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مطالعه روش مدل سازی با جزئیات کامل شرح داده شده است. از کاستی‌های تحقیقات قبلی را می‌توان به عدم بررسی اثر جداگرهای لرزه ای بر سازه های نامنظم در پلان اشاره کرد که در این تحقیق برای اولین بار بررسی می‌شود.

## ۵-۱- اثر جنس خاک بر رفتار لرزه ای خاک

در این بخش نتایج تحلیل‌ها در سازه‌های نامتقارن لغزشی در انواع خاک‌ها تحت شتاب‌نگاشت زلزله بم بیان شده است. برای انجام مقایسه میان نتایج این تحلیل‌ها، از حداکثر تغییر مکان مطلق طبقات، حداکثر شتاب مطلق طبقات، حداکثر مطلق تغییر مکان لغزشی و حداکثر مطلق سرعت لغزشی در حین زلزله استفاده شده که در برای خاک‌های نوع II، III و IV به ترتیب در جداول ۱۱، ۱۲ و ۱۳ آمده است.

جدول ۱۱: پاسخ‌های حداکثر مطلق برای خاک نوع II در سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه

نام مدل	نوع زمین	تعداد طبقات	S (mm)	S̄ (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم		طبقه دهم	
					U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )
مدل ۱	II	۱	۲/۸	۳۰	۱۳/۳	۳/۶۶	-	-	-	-
مدل ۲	II	۵	۱/۴	۴۵	۱۷/۵	۷۶/۶	۲۴	۱۰/۴	-	-
مدل ۳	II	۱۰	۰/۳۴	۰/۲	۱۷/۵	۱۱۸/۵	۲۳	۱۳/۷۸	۳۰/۳	۵/۸۵

جدول ۱۲: پاسخ‌های حداکثر مطلق برای خاک نوع III در سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه

نام مدل	نوع زمین	تعداد طبقات	S (mm)	S̄ (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم		طبقه دهم	
					U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )
مدل ۴	III	۱	۱/۶۹	۱۵	۲۴/۹	۳/۵۸	-	-	-	-
مدل ۵	III	۵	۲/۵	۹۲	۱۸	۱۸/۸	۲۵	۵/۹	-	-
مدل ۶	III	۱۰	۰/۰۰۰۲۶۹	۰/۰۰۶۳۹	۱۶/۷	۵۴/۳۲	۲۳/۹	۷/۳۹	۳۰/۷	۳/۴۸

جدول ۱۳: پاسخ‌های حداکثر مطلق برای خاک نوع IV در سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه

نام مدل	نوع زمین	تعداد طبقات	S (mm)	S̄ (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم		طبقه دهم	
					U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	Ū (mm/s <sup>2</sup> )
مدل ۷	IV	۱	۱	۱۲	۸/۵	۳/۷۸	-	-	-	-
مدل ۸	IV	۵	۳/۳	۶۴	۱۹	۲۰/۸	۲۸/۶	۵	-	-
مدل ۹	IV	۱۰	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۴۴	۱۶/۸	۸/۱۵	۲۶/۹	۱/۳۹	۳۹/۶	۲/۴۹

نتایج تحقیق نشان می‌دهند که با تغییر نوع زمین زیر پی سازه مورد مطالعه از نوع II به III و IV، تغییر مکان لغزشی در سازه ۱ طبقه به ترتیب ۳۹/۶ و ۶۴/۲ درصد کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که تغییر نوع زمین باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در تغییر مکان لغزشی می‌شود که از این نتایج جهت طراحی بهینه جداگرها می‌توان استفاده نمود. از طرفی در سازه ۵ طبقه با تبدیل نوع خاک از II به III و IV، تغییر مکان لغزشی به میزان ۷۸/۵ و ۱۳۵/۷ درصد افزایش می‌یابد. همچنین جهت تغییر مکان مذکور و با تبدیل زمین از نوع II به نوع III و IV در سازه ۱۰ طبقه، به ترتیب ۹۹/۹۲ و ۹۹/۹۱ درصد کاهش مشاهده گردید. این نتایج نشان می‌دهند که در سازه‌های ۱ طبقه (کوتاه) و ۱۰ طبقه (نسبتاً بلند) تغییر مکان لغزشی با تبدیل زمین نوع II به III و IV روند کاهشی داشت، در صورتی که در سازه ۵ طبقه (متوسط)، با تبدیل زمین II به III و IV تغییر مکان لغزشی روند افزایشی داشت. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با تغییر نوع زمین

زیر پی روند تغییر در تغییرمکان لغزشی نیز متغیر است و بدون انجام آنالیزهای لازم، پیش بینی نتایج امکان پذیر نیست. این امر اهمیت تهیه مدل‌های پایه این ریز هدف را اثبات می‌نماید. همچنین در مطالعه انجام شده بر سرعت لغزشی جداگرها مشخص گردید که با تغییر نوع زمین در زیر پی سازه ۱ طبقه از II به III و IV سرعت مذکور به ترتیب به میزان ۵۰ درصد و ۶۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در سازه ۵ طبقه جهت سرعت لغزشی در تبدیل مذکور به ترتیب به ۱۰۴/۴ درصد و ۴۲/۲ درصد کاهش مشاهده گردید. سرعت لغزشی در سازه ۱۰ طبقه با تبدیل نوع زمین از II به III و IV به ترتیب با کاهش ۶۸ و ۷۸ درصدی مواجه است.

نتایج تحقیق نشان می‌دهند که با تبدیل زمین نوع II به III و IV سرعت لغزشی در تمام سازه‌های مورد مطالعه روند کاهش داشت. از این نتایج به همراه نتایج مربوط به تغییرمکان لغزشی چنین بر می‌آید که نوع زمین تاثیر به سزایی دارد بر هر دو پارامتر مذکور که مستقیماً بر طراحی جداگرها اثر دارند؛ به گونه‌ای که المان‌های اصطکاکی، استهلاکی و فنریت جداگرها قابل کنترل و تعیین بر اساس نتایج آن‌ها می‌باشند.

با تبدیل زمین نوع II به III تغییرمکان طبقه سازه یک طبقه به میزان ۸۷/۲ درصد افزایش می‌یابد. این در صورتی است که با تبدیل نوع زمین از II به IV تغییر مکان مذکور به میزان ۳۶ درصد کاهش نشان می‌دهد. در خصوص شتاب طبقه، نتایج نشان دادند که با تغییر نوع زمین از II به III و IV به ترتیب شتاب طبقه ۲/۱ درصد کاهش و ۳/۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. روند تغییرمکان و شتاب با تغییر نوع زمین متغیر است. از طرفی تغییرمکان با نوع زمین به میزان خیلی زیادی تغییر می‌کند. در صورتی که شتاب طبقه به میزان بسیار ناچیز تغییر دارد.

جهت ساختمان ۵ طبقه نتایج نشان دادند که در طبقه اول با تبدیل نوع زمین از II به III و IV تغییرمکان طبقه اول به میزان ۲/۸ درصد و ۸/۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. جهت طبقه پنجم، سازه مذکور، تغییرمکان طبقه پنجم به میزان ۴/۱ درصد و ۱۹/۱ درصد افزایش در صورتی نشان داده شده است که زمین از نوع II به III و IV تبدیل گردد. این در حالیست که شتاب طبقه اول ۷۵/۴ و ۷۲/۸ درصد کاهش و شتاب طبقه پنجم نیز به میزان ۴۳/۲ و ۵۱/۹ درصد کاهش در صورت تبدیل زمین نوع II به III و IV را نشان داد. همچنین در سازه ۱۰ طبقه با تبدیل زمین نوع II به III و IV، جهت تغییرمکان طبقه اول به ترتیب ۴/۵ و ۴ درصد کاهش، جهت تغییرمکان طبقه پنجم ۳/۹ و ۱۶/۹ درصد افزایش و جهت تغییرمکان طبقه دهم ۱/۳ و ۳۰/۶ درصد افزایش نشان داده می‌شود. این اعداد جهت شتاب طبقه اول به ترتیب ۵۴/۱ و ۹۳/۱ درصد کاهش، جهت شتاب طبقه پنجم ۴۶/۳ و ۸۹/۹ درصد کاهش و جهت شتاب طبقه دهم نیز ۴۰/۵ و ۵۷/۴ درصد کاهش مشاهده می‌گردد.

نتایج نشان داده شده در خصوص میزان تغییرمکان و شتاب‌های طبقات سازه یک، پنج و ده طبقه به عنوان سازه‌های کوتاه، متوسط و نسبتاً بلند نشان از تغییر قابل ملاحظه در آنها با توجه به تغییر نوع زمین دارند. این نتایج کمک شایانی به طراحی می‌نمایند به طوری که با تعیین صحیح خاک زیر پی و یا اصلاح خاک زیر پی مطابق مشخصات خاک هدف (خاکی است که سازه روی آن کمترین پاسخ را ارائه می‌دهد) کمترین پاسخ جهت سازه حاصل گردد. این در حالی است که پارامترهای اقتصادی سازه به لحاظ نوع پروفیل‌های ستون-ها و تیرها نیز در نتایج مذکور نقش بسزایی دارند که با تغییر آنها و نزدیک کردن به پروفیل‌های اقتصادی می‌توان با اخذ خاک هدف بهترین پاسخ را که هم کمترین باشد و هم سازه اقتصادی باشد، بدست آورد.

## ۵-۲- تاثیر نامنظمی بر رفتار لرزه ای سازه

جهت بررسی تاثیرات نامنظمی سازه بر رفتار لرزه ای آن در این بخش اثرات نامنظمی بر رفتار سازه ۵ طبقه بررسی شد. برای انجام مقایسه میان نتایج این تحلیل‌ها مانند بخش قبل از حداکثر تغییرمکان مطلق طبقات و حداکثر شتاب مطلق طبقات در حین زلزله استفاده شده که در جدول ۱۴ آمده است.

نتایج جدول ۱۴ نشان می‌دهد که تغییرمکان لغزشی جهت مدل منظم و نامنظم در نامنظمی‌های مختلف دارای رفتار متغیر است به گونه‌ای که در مدل منظم میزان تغییرمکان لغزشی کم و در حدود مدل نامنظم ۶۰٪ است. این درحالیست که بیشترین تغییرمکان لغزشی مربوط به مدل با نامنظمی ۲۰٪ می‌باشد و با افزایش نامنظمی مقدار آن کاهش می‌یابد. مجموعاً بین مدل‌های منظم و نامنظم کمترین تغییرمکان لغزشی متعلق به سازه نامنظم ۶۰٪ است. از طرفی کمترین سرعت لغزشی حاصل شده جهت سازه منظم حاصل گردید

و این در حالیست که بیشترین آن مربوط به سازه نامنظم ۲۰٪ است، ولی روند کاهشی آن با افزایش نامنظمی سازه همانند تغییرمکان لغزشی نیست.

نتایج جدول ۱۴ نشان می‌دهد که با افزایش میزان تغییرمکان طبقه اول کاهش یافت. هرچند این کاهش ناچیز و به اندازه ۱/۲ میلی‌متر است. مدل‌های منظم و نامنظم ۵ طبقه در شتاب طبقه اول رفتار متغییری از خود نشان می‌دهند به گونه‌ای که با افزایش نامنظمی از ۲۰ به ۴۰ درصد شتاب افزایشی ولی با افزایش نامنظمی از ۴۰ به ۶۰ درصد شتاب به شدت کاهش می‌یابد. هم‌چنین تغییرمکان طبقه پنجم در سازه منظم کمترین مقدار را دارد، این در صورتی است که با ایجاد و افزایش نامنظمی میزان تغییرمکان نیز افزایش می‌یابد. پاسخ شتاب طبقه پنجم به نامنظمی کاملاً متغییر بوده ولی پاسخ سازه منظم به شتاب حداقل حاصل گردید. این در حالیست که همانند طبقه اول سازه، شتاب در صورت افزایش نامنظمی از ۲۰ به ۴۰ و ۴۰ به ۶۰ به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

جدول ۱۴: پاسخ‌های حداکثر مطلق برای خاک نوع IV در سازه‌های ۵ طبقه با نامنظمی مختلف

نام مدل	نوع زمین	نامنظمی (%)	S (mm)	S (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم	
					U	U	U	U
					(mm)	(mm/s <sup>2</sup> )	(mm)	(mm/s <sup>2</sup> )
مدل ۸	IV	۴۰	۳/۳	۶۴	۱۹	۲۰/۸	۲۸/۶	۵
مدل ۱۰	IV	۰	۲/۴۲	۰/۰۳۴	۱۸/۹	۱۴/۹	۲۴/۵	۳/۹۲
مدل ۱۱	IV	۲۰	۵/۲۸	۴۸/۵	۱۹	۱۷/۸۸	۲۶	۴/۵
مدل ۱۲	IV	۶۰	۲/۱۲۳	۰/۰۸۵	۱۷/۸	۸/۶۶	۳۸	۴/۸۱

#### ۴- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه لغزشی نامتقارن فلزی با سیستم قاب خمشی تحت تاثیر مولفه افقی زلزله مورد مطالعه قرار گرفته است. حداکثر جابه‌جایی مطلق، حداکثر شتاب مطلق، حداکثر جابه‌جایی لغزشی مطلق و حداکثر سرعت لغزشی مطلق، در تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی مدل‌های مورد مطالعه، برای مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده‌اند که تغییر نوع زمین تاثیر زیادی در تغییر جابه‌جایی لغزشی دارد. با تبدیل نوع زمین از II به III و IV در سازه‌های ۱ و ۱۰ طبقه، تغییرمکان لغزشی روند کاهشی دارد این در صورتی است که با تبدیل مذکور در سازه ۵ طبقه رفتار متفاوتی حاصل گردید. هم‌چنین با تغییر نوع زمین از II به III و IV سرعت لغزشی جداگانه نیز کاهش می‌یابد. این کاهش جهت سازه‌های ۱ و ۱۰ طبقه می‌باشد. این در صورتی است که با تبدیل فوق‌الذکر سرعت لغزشی در سازه ۵ طبقه افزایش نشان می‌دهد. با تبدیل نوع زمین از II به III تغییرمکان و شتاب طبقه در سازه یک طبقه افزایش می‌یابد. این در حالیست که با تغییر نوع زمین از II به IV تغییرمکان طبقه کاهش ولی شتاب طبقه افزایش می‌یابد. هم‌چنین جهت سازه ۵ طبقه تغییرمکان و شتاب طبقه اول با تبدیل نوع زمین از II به III و IV افزایش نشان می‌دهد. از طرفی جهت طبقه آخر سازه ۵ طبقه با تبدیل نوع زمین از II به III و IV برای تغییرمکان و شتاب آن به ترتیب افزایش و کاهش چشمگیر مشاهده گردید. علاوه بر این در سازه ۱۰ طبقه جهت طبقه اول با تغییر نوع زمین از II به III و IV تغییرمکان کاهش نشان می‌دهد. در حالی که برای طبقه پنجم و دهم تبدیل زمین افزایش را در نتایج نشان می‌دهد. از سوی دیگر شتاب طبقات اول، پنجم و دهم با تبدیل نوع زمین از II به III و IV کاهش نشان می‌دهد. هم‌چنین با توجه به نتایج تحقیق روند مشخصی جهت ارتباط میزان نامنظمی سازه و تغییرمکان لغزشی وجود ندارد. هم‌چنین مشخص می‌گردد که برای تعیین تغییرمکان لغزشی در نامنظمی‌های مختلف حتماً می‌بایست

آنالیزهای لازم صورت پذیرد. این موضوع در رابطه با سرعت لغزشی سازه نیز صادق است. هم‌چنین مشاهده شد که نامنظمی سازه بر روند افزایشی یا کاهش‌ی تغییر مکان طبقات و شتاب آن‌ها تاثیر ویژه‌ای ندارد.

## مراجع

- [1] Naeim, F. and Kelly, J.M. (1999). *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc., Edition. University of California at Berkeley, USA
- [2] Fooladgar, A. and Shakib, H. (2002). *The impact of multi-component earthquakes on asymmetric buildings based on sliding supports and flexible foundation*. PhD dissertation on Structural Engineering, Tarbiat Modares University of Tehran, Iran
- [3] Noruoz Nejad, GH. and Ahmadi, P. (2014). Evaluation of Seismic Behavior of Asymmetric Separated Structures in Different Soils Under the Impact of Earthquake Accelerations. *8<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Babol, Iran
- [4] Spyrakos, C.C., Maniatakis, Ch.A. and Koutromanos, I.A. (2009). Soil-structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum. *Engineering Structures*, Volume 31, Issue 3, Pages 729-737
- [5] Sharbatdar, M.K., Hoseini Vaez S.R, Ghodrati Amiri G. and H Naderpour. (2011). Seismic Response of Base-Isolated Structures with LRB and FPS under near Fault Ground Motions. *Procedia Engineering*, Volume 14, Pages 3245-3251.
- [6] Sayed, M. Austrell, P. and Jankowski, R. (2012). Simulation of the response of base-isolated buildings under earthquake excitations considering soil flexibility. *Earthquake Engineering and Engineering vibration*, Volume 3, PP 359-374.
- [7] Khoshnudian, F. and Motamedi, D. (2013). Seismic response of asymmetric steel isolated structures considering vertical component of earthquakes. *Journal of Civil Engineering*, Volume 17, Issue 6, Pages 1333-1347
- [8] Enrique Luco, J. (2014). Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 66, Pages 167-177.
- [9] Etedali, S. and Sohrabi. M. R. (2015). A proposed approach to mitigate the torsional amplifications of asymmetric base-isolated buildings during earthquakes. *Journal of civil engineering*, Volume 20, Issue 2, Pages 768-776
- [10] Krishnamoorthy, A. and Anita, S. (2016). Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model. *Journal of Structures*, Volume 5, Pages 44-57.
- [11] Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (4th revision). *Seismic Standard of Iran*. Tehran, Iran
- [12] Iranian National Building Code. (2013). *Part 6-Building Loading*. Tehran, Iran
- [13] American Institute of Steel Construction. (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago. IL, USA
- [14] Torabi, H. and Rayhani, M. (2014). Three dimensional finite element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil. *Journal of Computers and Geotechnics*, Volume 60, Pages 9-19.
- [15] Abbas Gandomkar, F. and Saadatpour, M. (2003). Seismic response of shear structures based on R-FBI, LRB and P-F separators considering the effects of soil and structure interaction, *6<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Esfahan University of Technology, Esfahan, Iran
- [16] Iranian National Building Code. (2013). *Part 5-Building materials and products*. Tehran, Iran
- [17] Hosseyni, M. and Ghavami, E. (2011). Interaction of soil and concrete structures with special moment frames and shear walls in the sites of type III and IV. *4<sup>th</sup> Iran national conference of Concrete*.
- [18] Hosseinzadeh, N.A. and Nateghi, F. (2004). Shake table study on soil-foundation-structure interaction effects. *International Institute of Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No: 1918.
- [19] Zhuang, H., Xu, Y., Chao, Z. and Dandan, J. (2014). Shaking table for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect. *Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. Volume 67, Pages 208-218
- [20] Rahnavard, R. and Hassanipour, A. (2016). *Steel Structures Analysis Using ABAQUS*. ISBN:978-600-6789-44-6, ACECR, Kerman, Iran
- [21] Rahnavard, R. and Siahpolo, N. (2017). Function comparison between moment frame and moment frame with centrally braces in high-rise steel structure under the effect of progressive collapse. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 4(4): 42-57. doi: 10.22065/jsce.2017.77865.1084
- [22] Rahnavard, R., Hassanipour, A., Suleiman, M. and Mokhtari, A. (2017). Evaluation on eccentrically braced frame with single and double shear panels, *Journal of Building Engineering* 10 13-25.
- [23] Rahnavard, R., Hassanipour, A. and Mounesi, A. (2016), Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls, *Journal of Constructional Steel Research* 121 441-456.
- [24] Rahnavard, R. Fathi Zade Fard, F., Hosseini, A., Suleiman, M. (2018). Nonlinear analysis on progressive collapse of tall steel composite buildings. *Case Studies in Construction Materials* 8 359-379