

## ارزیابی اثر انواع جداگرهای لرزه ای بر رفتار سازه لغزشی نامتقارن فولادی

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

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی خوزستان، اهواز، ایران

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

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

### چکیده

جداسازی ساختمان‌ها از ارتعاشات زمین روش جدیدی است که در چند دهه اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته و تنها راه عملی کاهش هم‌زمان تغییرمکان بین طبقه‌ای و شتاب‌های طبقات می‌باشد. در این روش با افزایش زمان تناوب و میرایی سازه در تراز جداسازی شده، انرژی ناشی از نیروی زلزله به سازه کاهش می‌یابد. از طرفی زلزله‌های اخیر از جمله زلزله مخرب بم دارای مولفه‌های افقی و عمودی بوده است که بسته به زمان شروع مولفه‌های قائم یا افقی و یا ترکیب آن‌ها، تخریب بیشتر سازه‌ها را در پی داشته است. این موضوع اهمیت بررسی مولفه قائم زلزله را علاوه بر مولفه افقی نمایان می‌سازد. با توجه به موارد عنوان شده، هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار سازه‌های لغزشی نامتقارن با جداگرهای مختلف تحت اثر مولفه‌ی افقی و ترکیب مولفه‌های افقی و قائم زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. جهت دستیابی به هدف اصلی تحقیق، ریز اهدافی مانند بررسی تاثیر مشخصات جداسازها و تاثیر ترکیب مولفه‌های افقی و قائم زلزله بر پاسخ لرزه ای سازه مورد مطالعه مورد توجه قرار گرفتند. برای این منظور، سازه‌های یک، پنج و ده طبقه نامنظم (میزان نامنظمی ۴۰٪) با جداگرهای لرزه‌ای *R-FBI*، *LRB* و *P-F* واقع بر روی خاک تپ IV در نظر گرفته شده است جهت حصول نتایج تحقیق از روش عددی اجزا محدود با مدل‌سازی مصالح در ناحیه غیرخطی و انجام آنالیز دینامیکی صریح بهره گرفته شده است. نتایج تحقیق نشان دادند که با افزایش تعداد طبقات عملکرد جداگر لرزه‌ای *R-FBI* بهتر از سایر جداگرهای *LRB* و *P-F* است. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که اثر هم‌زمان مولفه‌های افقی و قائم بر سازه ۱ و ۱۰ طبقه چشم‌گیر است.

کلمات کلیدی: سازه لغزشی، جداگر، آنالیز لرزه ای، قاب خمشی فولادی، روش اجزای محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2018.114089.1428	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://10.22065/jsce.2018.114089.1428	۱۳۹۸/۱۰/۰۱	۱۳۹۷/۰۳/۲۳	۱۳۹۷/۰۳/۲۳	۱۳۹۶/۰۲/۰۱	۱۳۹۶/۱۰/۱۸
			فرهاد عباس گندمکار		* نویسنده مسئول:	
			farhad@jsu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

# Evaluation of the effect of different seismic isolators on the behavior of asymmetric steel sliding structures

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

1- Structural Engineering, dept. of Civil Engineering, Institute for high education ACECR, Ahvaz, Iran

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

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

## ABSTRACT

Isolation of buildings from earth vibrations is a new method that has been considered in the last few decades and is the only way to reduce simultaneously the inter-story displacement and acceleration of stories. In this method, increasing the period of rotation and damping of the structure at the separated level, the energy from the earthquake force to the structure decreases. Furthermore, recent earthquakes, including the Bam earthquake, have horizontal and vertical components, which resulted in the destruction of more structures, depending on the time of the start of the vertical or horizontal components or their combination. This issue highlights the importance of examining the vertical component of the earthquake in addition to the horizontal component. According to the mentioned cases, the main objective of this research is to investigate the behavior of asymmetric sliding structures with different separators under the horizontal component and the combination of horizontal and vertical components of the earthquake, taking into account the effects of soil and structure interaction. For this purpose, structures of 1, 5, and 10 stories irregular building (irregular amount of 40%) with seismic separators R-FBI, LRB and P-F on soil type IV are considered. In order to obtain the results of the research, the numerical method of finite element method has been used with modelling of materials in nonlinear area and performing explicit dynamic analysis. The results of the study showed that with increasing number of stories, the seismic separation function of R-FBI is better than other LRB and P-F separators. Also, the results of this study show that the simultaneous effect of horizontal and vertical components on structures 1 and 10 is remarkable.

## ARTICLE INFO

Receive Date: 08 January 2018

Revise Date: 21 April 2018

Accept Date: 13 June 2018

### Keywords:

sliding structure

isolator

seismic analysis

Steel moment frame

Finite element method

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.114089.1428

\*Corresponding author: Farhad Abbas Gandomkar

Email address: farhad@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 همچنین قاب‌های خمشی استوار است. روش‌های سنتی اغلب منجر به افزایش شتاب طبقات در ساختمان‌های با سختی بالا و تغییر مکان‌های نسبی بین طبقه‌های بزرگ در ساختمان‌های انعطاف پذیر می‌شوند. 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 زمین‌لرزه است. این عمل با محدود ساختن 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 پایه گیردار 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 به ویژه لوازم داخلی سازه جلوگیری می‌نماید [۱].

هنگام وقوع زلزله، نیروهای اینرسی در سازه‌ها ایجاد می‌شود. رفتار سازه‌های نامتقارن و نیروهای 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 مشخصه‌ی ساختمان‌های نامتقارن بستگی دارد [۲]. در طبیعت اکثر سازه‌ها، نامتقارن می‌باشند و به همین دلیل مطالعه بر 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 قرار می‌گیرد. 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 می‌باشد و در نتیجه پاسخ سازه با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک متفاوت خواهد بود. این اختلاف در پاسخ‌ها نمایانگر اثر اندرکنش خاک و سازه می‌باشد [۲]. داودی و همکارانش (۱۳۹۲) پاسخ دینامیکی سازه پایه گیردار و سازه جداسازی شده را تحت زلزله‌های نزدیک و دور از گسل بررسی کردند. آن‌ها در این تحقیق یک ساختمان فولادی ۴ طبقه با سیستم قاب خمشی در دو حالت گیردار و جداسازی شده با جداساز لاستیکی را در نرم افزار SAP2000 مدل سازی کردند؛ سپس تحت سه زلزله نزدیک گسل و سه زلزله دور از گسل تحلیل تاریخچه زمانی انجام دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که جداسازی لرزه‌ای سازه، در حالت اعمال شتاب نگاشت‌های حوزه نزدیک، باعث کاهش بیشینه شتاب مطلق کف طبقات به اندازه ۵۵/۵ درصد و در حالت اعمال شتاب نگاشت‌های حوزه دور از گسل، باعث کاهش بیشینه شتاب مطلق کف در برخی از طبقات به اندازه ۴۱/۹ درصد شد. هم چنین مقادیر برش پایه و جابجایی نسبی طبقات در سازه جداسازی شده در زلزله‌های نزدیک گسل نسبت به زلزله‌های دور از گسل کاهش بیش تری مشاهده شد [۶]. شربتدار و همکاران (۲۰۱۱) پاسخ لرزه‌ای سازه جداسازی شده با جداگرهای FPS و LRB تحت زلزله‌های نزدیک گسل را با استفاده از یک مدل تحلیلی سه بعدی غیر خطی 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 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 جابه‌جایی در یک منطقه محدود در فاصله‌ای حدود ۴ کیلومتر از محل پارگی گسل می‌تواند تا ۶۶٪ با هم اختلاف داشته باشند. هم چنین در این منطقه حداکثر شتاب بالاترین طبقه می‌تواند تا ۳۵٪ با هم اختلاف داشته باشند [۷]. فابیو مازا<sup>۱</sup> و آلفونسو ولکانو<sup>۲</sup> (۲۰۱۲) تاثیر زمین لرزه‌های نزدیک گسل را بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های جداسازی شده بررسی کردند. هدف اصلی آن‌ها

<sup>1</sup> Fabio Mazza<sup>2</sup> Alfonso Vulcano

در این تحقیق بررسی کارآمدی سازه‌های جداسازی شده با جداساز لاستیکی با میرایی بالا تحت تاثیر دو مولفه افقی و قائم زلزله حوزه نزدیک بود. از این رو، یک سازه بتنی ۵ طبقه با جداساز لاستیکی با میرایی بالا (H-D-R-B) تحت رکوردهای زلزله‌های السنترو<sup>۳</sup>، چی چی<sup>۴</sup> و دزک<sup>۵</sup> مورد تحلیل دینامیکی غیرخطی قرار گرفت. نتایج بررسی‌های عددی نشان داد که برای سازه‌های بتنی طراحی شده بر اساس مولفه افقی زلزله، شکل‌پذیری مورد نیاز تیرها و ستون‌ها مخصوصاً برای افزایش مقادیر نسبت سختی جداساز به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از زمانی است که مولفه قائم زلزله نیز به همراه مولفه افقی زلزله در طراحی در نظر گرفته شود. این تاثیر بر شکل‌پذیری مورد نیاز به وضوح در تیرها و ستون‌های طبقات بالایی مشاهده شد. نتایج تحقیق آن‌ها اهمیت ترکیب دو مولفه افقی و قائم زلزله‌های نزدیک گسل بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های بتنی را نشان داد [۸].

توکلی و همکارانش (۲۰۱۳) در تحقیقی به مقایسه‌ی پاسخ دینامیکی قاب‌های با پایه‌گیردار و قاب‌های جداسازی شده تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک گسل پرداختند. در این مطالعه سه سازه بتن مسلح ۴، ۸ و ۱۲ طبقه با قاب خمشی فولادی هر کدام یک بار به صورت با سیستم جداسازی لرزه‌ای (LRB) و بار دیگر با پایه‌گیردار تحت سه زلزله حوزه نزدیک و سه زلزله حوزه دور بررسی شدند. نتایج بدست آمده از تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی شش طیف مذکور، نشان دهنده این است که، شتاب کف طبقات در سازه جداسازی شده نسبت به سازه پایه‌گیردار، در زلزله‌های حوزه نزدیک، کاهش بیشتری نسبت به زلزله‌های حوزه دور دارد [۹].

لوکو<sup>۶</sup> (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای پایه غیرخطی برای یک مدل ساده شده ی الاستیک پرداخت. نتایج این مطالعه عددی نشان داد که پاسخ لرزه‌ای 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 صرف‌نظر شود [۱۰]. اعتدالی و سهرابی (۲۰۱۶) در تحقیقی به پیشنهاد روشی جهت کاهش پیچش در سازه‌های 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 مرکزیت‌های بزرگ ناچیز است [۱۱]. کریشنامورتی<sup>۷</sup> و آنیتا<sup>۸</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 می‌دهد؛ به نحوی که باعث افزایش پاسخ سازه می‌شود [۱۲].

لندی<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۶) مدل‌های مختلف جداگرهای اصطکاکی پاندولی را تحت زلزله‌های افقی و قائم مورد مقایسه قرار دادند. رفتار اینچنین سیستم‌هایی به شدت تحت تاثیر پارامترهایی همچون ضریب اصطکاک، نیروی محوری و شتاب‌های افقی و قائم بالا می‌باشد. جهت بررسی این پارامترها، چندین آنالیز دینامیکی غیرخطی بر روی مدل جداسازی شده انجام شد. نتایج نشان داد که در غیاب واژگونی، مولفه قائم زلزله و تغییرات نیروی محوری تاثیر بیشتری نسبت به حداکثر نیروی افقی در مقدار جابجایی حداکثر سازه دارند. در چندین رکورد، مولفه قائم، کششی را در جداگرها قبل از رسیدن به جابجایی حداکثر مشخص شده توسط سازنده تعیین کردند که این نتایج نشان دهنده-ی اهمیت توسعه‌ی یک روش طراحی برای سیستم‌های FPS است که در آن اثر مولفه قائم زلزله لحاظ شود [۱۳].

فالبورسکی<sup>۱۰</sup> و جانکوسکی<sup>۱۱</sup> (۲۰۱۶) در تحقیقی به بررسی رفتار سازه‌های نامتقارن با جداسازهای ساخته شده از تکیه‌گاه پلیمری پرداختند. در این تحقیق یک مدل ۴ طبقه‌ی نامتقارن فولادی در حالت پایه ثابت و جداسازی شده با استفاده از نرم افزار اجزا محدود MSC Marc مدل‌سازی و تحت تحریکات زلزله قرار گرفت. از مولفه‌های افقی و قائم زلزله‌های السنترو و نورث‌ریج جهت شتابنگاشت‌های اعمالی استفاده شد. نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی از اثربخشی تکیه‌گاه پلیمری در سرکوب ارتعاشات سازه نامتقارن تحت تحریکات زلزله حکایت داشت. همچنین نتایج نشان داد که تکیه‌گاه‌های پلیمری قادرند در کاهش آسیب‌های سازه‌ای در طول زلزله موثر عمل کنند [۱۴].

<sup>3</sup> Elcentro

<sup>4</sup> Chi-Chi

<sup>5</sup> Duzce

<sup>6</sup> Luco

<sup>7</sup> Krishnamoorthy

<sup>8</sup> Anita

<sup>9</sup> Landi

<sup>10</sup> Falborski

<sup>11</sup> Jankowski

در این تحقیق ۱۵ مدل شامل سیستم سازه فولادی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با استفاده از روش اجزا محدود و با بکارگیری نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه تاکنون مطالعه‌ای بر روی تحلیل لرزه‌ای سازه‌های لغزشی با در نظر گرفتن اثرات همزمان مواردی چون الف) تحلیل سه بعدی، ب) سیستم سازه‌های فولادی با قاب خمشی، ج) سازه‌ی نامتقارن، د) اثرات اندرکنش خاک و سازه و ه) تاثیر همزمان زلزله‌ی افقی و قائم انجام نشده است، لذا هدف اصلی این تحقیق بررسی رفتار سازه‌های لغزشی نامتقارن با جداگر-های مختلف تحت اثر مولفه‌ی افقی و ترکیب مولفه‌های افقی و قائم زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. شایان ذکر است که هدف از سازه‌ی نامتقارن در این مطالعه، سازه نامنظم در پلان با نامنظمی هندسی می‌باشد که مطابق بند ۱-۷-۱ الف آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله [۱۵] تعریف شده است.

## ۲- مدل‌های مورد بررسی

در این مطالعه سازه‌های سه بعدی قاب خمشی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با نامنظمی ۴۰٪ درصد به عنوان نمونه‌ای از سازه‌های کوتاه، متوسط و بلند مورد بررسی قرار می‌گیرد. این سازه‌ها در منطقه برای خطر نسبی زلزله متوسط با کاربری مسکونی طراحی شده است. ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر است. سازه‌های مورد بررسی دارای پنج دهانه در جهت X و پنج دهانه در جهت Y می‌باشد که در آن هر دهانه ۵ متر طول دارد. ستون‌ها از پروفیل BOX و تیرها از پروفیل IPE ساخته شده‌اند. این سازه‌ها بدون اعمال جداگر و بر اساس مبحث ششم آیین نامه مقررات ملی ساختمان ایران [۱۶] بارگذاری شده‌اند. طراحی اولیه سازه‌ها به صورت استاتیکی خطی با نرم افزار ETABS و بر اساس آیین نامه AISC-ASD01 [۱۷] انجام شده و مقاطع مناسب برای آن‌ها بدست آمده است. همچنین از نیروهای پای ستون‌ها در هر سازه جهت طراحی جداگرها استفاده شده است. جدول ۱ مقادیر مورد نظر برای بارهای وارده به سازه‌ها را نشان می‌دهد. جدول ۲ مشخصات مقاطع طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: بارهای اعمال شده بر مدل‌ها

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

جدول ۲: مشخصات مقاطع و زمان تناوب مدل‌های مورد بررسی

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

در این تحقیق ابعاد فونداسیون برای کلیه مدل‌ها 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 که در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۸]. همچنین خاک نوع IV برای کلیه مدل‌ها در نظر گرفته شده است. جهت دستیابی به هدف تحقیق تعداد ۱۵ مدل با مشخصات ارائه شده در جدول ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که مقادیر سختی ( $K$ ) و ضریب میرایی ( $C$ ) جداگرها با توجه به وزن سازه و مقادیر استهلاک و فرکانس فرض شده برای جداگر بر اساس روابط ۱ تا ۴ [۱۹] محاسبه می‌شوند.

جدول ۳: مشخصات انواع جداگر در مدل‌های مورد بررسی

مشخصات ایزولاتور R-FBI						تعداد طبقات	مولفه زلزله	نام مدل
R-FBI			LRB		P-F			
C(N.s/m)	K(N/m)	$\mu$	C(N.s/m)	K(N/m)	$\mu$			
-	-	-	-	-	۰/۱	۱	افقی	مدل ۱
-	-	-	-	-	۰/۱	۵	افقی	مدل ۲
-	-	-	-	-	۰/۱	۱۰	افقی	مدل ۳
-	-	-	۲۰۲۱۸	۳۱۷۴۲۰	-	۱	افقی	مدل ۴
-	-	-	۱۸۸۱۳۱	۱۸۵۶۵۴۶	-	۵	افقی	مدل ۵
-	-	-	۲۴۳۲۶۸	۳۸۲۳۱۹۰	-	۱۰	افقی	مدل ۶
۴۰۴۳/۵	۷۹۳۵۵	۰/۰۵	-	-	-	۱	افقی	مدل ۷
۲۳۶۲۶	۴۶۳۶۶۶	۰/۰۵	-	-	-	۵	افقی	مدل ۸
۴۸۶۵۳/۶	۹۵۴۸۲۸	۰/۰۵	-	-	-	۱۰	افقی	مدل ۹
-	-	-	-	-	-	۱	افقی	مدل ۱۰
-	-	-	-	-	-	۵	افقی	مدل ۱۱
-	-	-	-	-	-	۱۰	افقی	مدل ۱۲
۴۰۴۳/۵	۷۹۳۵۵	۰/۰۵	-	-	-	۱	افقی+قائم	مدل ۱۳
۲۳۶۲۶	۴۶۳۶۶۶	۰/۰۵	-	-	-	۵	افقی+قائم	مدل ۱۴
۴۸۶۵۳/۶	۹۵۴۸۲۸	۰/۰۵	-	-	-	۱۰	افقی+قائم	مدل ۱۵

که در آن:

$$K_i = m_t \omega_i \quad (۱)$$

$$C_i = 2\xi_i \omega_i m_t \quad (۲)$$

و در این روابط:

$$m_t = m_s + \sum_{i=1}^n m_i \quad (۳)$$

$$w_o = 2\pi f \quad (۴)$$

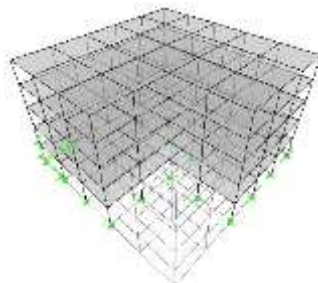
که در آن  $f$  فرکانس جداگر؛  $w_0$  فرکانس زاویه‌ای جداگر؛  $m_i$  جرم طبقه  $i$  ام؛  $m$  جرم جداگر؛  $\xi$  استهلاک جداگر؛  $C$  ضریب میرایی جداگر و  $K_0$  سختی جداگر است.

### ۳- روش تحقیق

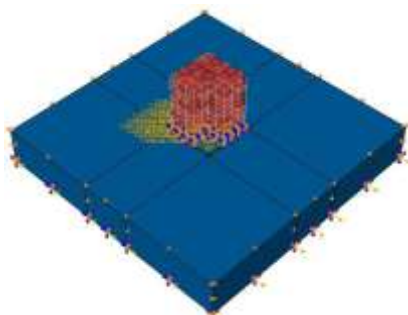
با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مدل‌های سازه‌های نوین، استفاده از روش‌های عددی جهت تعیین رفتار آن‌ها اجتناب ناپذیر است. از این رو در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی سازه‌ی قاب خمشی فولادی، المان‌های جداگر و خاک زیر سازه، از روش اجزای محدود استفاده شد. برای برآورد نیازهای تحلیل موجود، می‌بایست از نرم افزار اجزا محدودی بهره گرفته شود که تمام نیازهای تحلیل را با توجه به هدف تحقیق برآورد کند. لذا پس از بررسی‌های لازم، نرم افزار ABAQUS جهت تامین نیازهای تحلیلی این مطالعه استفاده گردید. با انتخاب المان‌های مناسب جهت مدل‌سازی قاب فولادی، جداگر و خاک، مدل اجزا محدود سازه مورد مطالعه تهیه گردید. سپس با انتخاب مش مناسب و مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی مذکور با نتایج آزمایشگاهی 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 فوق الذکر تاثیر انواع جداگر و همچنین اثر مولفه‌های افقی و قائم زلزله بم بر پاسخ سازه‌ها تعیین می‌گردد.

#### ۳-۱- 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 ۵ 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 آنالیز آن‌ها در نرم افزار آباکوس مطابق موارد عنوان شده در بخش ۳ (روش تحقیق) اقدام گردید. نمونه مدل ۱۰ طبقه 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



شکل ۲: نمونه‌ای از مدل‌های سه بعدی ۱۰ طبقه ترسیمی در نرم افزار آباکوس

#### 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 [۲۰] است.

خصوصیات فولاد، بتن و خاک شامل خاصیت‌های خطی و غیرخطی مصالح، رفتار غیرخطی هندسی و تحلیل غیرخطی می‌باشد. در مدل‌سازی تمام اجزاء فولادی از خاصیت غیرارتجاعی مصالح استفاده شده است. خاصیت غیرخطی 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 معرفی می‌شود. پس از آن وارد فاز سخت شدگی کرنشی تا حد رسیدن به تنش نهایی می‌شوند. چگالی اعضاء هنگام استفاده از تحلیل دینامیکی مدل بایستی تعریف شود. چگالی از طریق منوی Mass Density به ترتیب به مقدار ۷۸۵۰، ۲۴۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای فولاد، بتن و خاک تعریف می‌شود. حد مرحله الاستیک نمودار تنش-کرنش از طریق منوی Elastic تعریف می‌شود. که در آن مدول یانگ به ترتیب برای فولاد و بتن برابر است با  $۲/۱ * ۱۰^۵$  و  $۲/۱ * ۱۰^۴$  نیوتن بر میلی‌متر مربع و ضریب پواسون برابر است با  $۰/۳$  است. بخش پلاستیک نمودار تنش-کرنش فولاد از طریق منوی Plastic تعریف می‌شود. در این مطالعه از فولاد ST37 برای تعریف تیر و ستون استفاده گردیده است. خصوصیات مکانیکی این فولاد در جدول ۴ آمده است. مدل پلاستیک آسیب دیده<sup>۱۲</sup> بتن قادر به مدل‌سازی بتن در تمام اجزاء سازه‌ای همچون تیرها، خرپاها، پوسته‌ها و مورد مطالعه‌ی این تحقیق می‌باشد. رفتار غیر الاستیک بتن با استفاده از الاستیسیته خرابی ایزوتروپیک همراه با پلاستیسیته فشاری و کششی ایزوتروپیک ترسیم می‌شود. مقاومت فشاری اسمی بتن مورد استفاده ۲۱ مگاپاسکال فرض می‌شود. نمودار تسلیم فشاری از بتن معمولی گرفته می‌شود. تنش کششی ترک به طور محافظه کارانه برابر است با  $۵/۶\%$  مقدار حداکثر تنش فشاری فرض می‌شود [۲۰]. پس از ایجاد ترک کششی رابطه تنش-کرنش در کشش به علت انتقال بار به آرماتور کم می‌شود. از مقاومت کششی بتن پس از ایجاد ترک صرف نظر می‌شود. خصوصیات بتن استفاده شده در سقف سازه‌ای و پی آن در جدول ۵ آمده است.

در میزان تاثیر و نحوه‌ی رفتار اندرکنشی سیستم خاک-سازه، خاک‌ها و ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی که مبنای طبقه بندی ساختمان‌ها قرار گرفته است نقش بسیار مهمی ایفاء می‌کند. با توجه به طبقه بندی ساختمان‌ها در استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۵] ساختمان تیپ IV در مقایسه با ساختمان تیپ I و II مستعد رفتار غیرخطی، تغییر در مشخصه‌های رفتار دینامیکی، تغییر در دامنه‌ی امواج و فرکانس‌های ارتعاشی و نهایتاً تشدید اثرات پدیده اندرکنش خاک-سازه در حالت بیستری است. این حالت به واسطه ساختار مکانیکی و ویژگی‌های دینامیکی، همچنین پارامتر سختی نسبی سازه به خاک در ساختمان IV است [۲۱]. برای تعریف خصوصیات پلاستیک خاک از مدل موهر کلمب<sup>۱۳</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. بر این اساس جهت بررسی تاثیر مشخصات خاک بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه خاک تیپ IV آیین نامه ۲۸۰۰ [۱۵] در نظر گرفته شده که در جدول ۶ مشخصات آن‌ها ارائه شده است.

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 مورد مطالعه [۱۸]

توصیف آیین نامه	چسبندگی (مگاپاسکال)	سرعت برشی (m/s)	زاویه اصطکاک داخلی	ضریب پواسون	مدول یانگ (مگاپاسکال)	چگالی ( $kg/m^3$ )	خاک
خاک نرم	۱۵۰	۱۵۰	۱۸	۰/۴	۱۳۸/۶	۲۲۰۰	IV

<sup>12</sup> Concrete Damage Plasticity<sup>13</sup> Mohr Columb



## ۲-۴- بارگذاری و شرایط مرزی

به غیر از اندرکنش‌ها که می‌توانند سبب اعمال بار و تنش به قطعات مدل گردند، این قطعات به طور مستقیم هم می‌توانند بارگذاری شوند. بارهایی که به طور مستقیم اعمال می‌شوند را می‌توان بر اساس نحوه اعمال به دو دسته نیرو کنترلی (Force Control) و جابه جایی کنترلی (Displacement Control) تقسیم نمود. در حالت اول مقدار نیرو مشخص است اما مقدار جابه جایی محل نیروی اعمالی به سازه مشخص نیست. حالت دوم دقیقاً عکس حالت اول است. هر دو نوع بارگذاری نامبرده، در قالب بار (Load) و شرایط مرزی (Boundary Condition) قابل اعمال به سازه می‌باشند [۲۸].

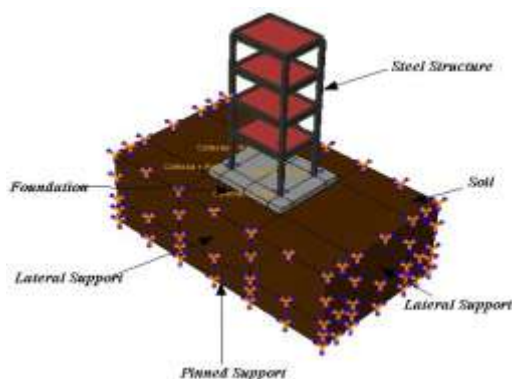
شرایط مرزی مورد استفاده برای خاک، در حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی با یکدیگر متفاوت هستند. در حالت استاتیکی فقط کافی است با گرفتن فاصله کافی از سازه و فونداسیون، مرزهای خارجی در مقابل تغییر مکان عمود بر همان صفحه مقید شود. در بارگذاری دینامیکی بستن مرزها سبب ایجاد اثر جعبه‌ای می‌شود. اما چنانچه مرزها به اندازه کافی از سازه دور شود اثر مرزها به حداقل می‌رسد ولی از سوی دیگر سبب افزایش زمان تحلیل می‌شود [۲۹، ۳۰]. بنابراین در این تحقیق برای اعمال شرایط مرزی دینامیکی سعی شده فاصله مرزها به اندازه کافی دور از سازه در نظر گرفته شود. شرایط مرزی انتهایی مدل نیز با فرض قرار گرفتن لایه خاک بر روی سنگ بستر در همه جهات به جز جهت اعمال زلزله بسته شده است. شکل ۳ نمونه مدل عددی ساخته در نرم افزار آباکوس براساس مرجع ۲۲ را نشان می‌دهد.

در این تحقیق شتاب ثقل با استفاده از تعریف شتابی یکنواخت (Gravity) در یک جهت خاص و هم‌چنین چگالی مشخص شده در قسمت تعریف مصالح، به کل مدل اعمال می‌شود. مولفه‌های افقی و قائم زلزله بم به عنوان تحریک اعمال شده بر مدل‌های مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. از آنجا که روش تحلیل از نوع دینامیکی می‌باشد، زمان آنالیز مفهوم فیزیکی و واقعی خود را دارد. زمان مورد نیاز برای انجام تحلیل بر روی یک مدل عددی با شرایط ثابت و مشخص، تابع گام‌های 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 مش‌بندی بوده و نیز بسته به روش تحلیل وجود اندرکنش‌ها، انواع غیرخطی شدن، تعریف استهلاک تعیین کننده این هزینه محاسباتی می‌باشند. پس باید گام حل<sup>۱۴</sup> تا آنجا که امکان دارد کوتاه شود، به عبارت دیگر باید طول رکورد کوتاه شود [۳۰]. برای کوتاه کردن طول رکورد از تعریفی به نام طول زمان قوی رکورد<sup>۱۵</sup> استفاده می‌شود. در این بازه زمانی حرکات قابل توجه و تاثیرگذار زمین اتفاق افتاده و در خارج از این بازه زمانی، با تقریب قابل قبولی می‌توان از وجود تحریک زلزله صرف‌نظر کرد. در نهایت با استفاده از نرم افزار سائزموسیگنال<sup>۱۶</sup> پس از اصلاح رکورد زلزله، جهت تعیین طول زمان قوی رکورد زلزله اقدام می‌شود. بر این اساس زمان قوی زلزله بم بین ۲۰ تا ۳۶ ثانیه می‌باشد. بنابراین زمان حرکت قوی زلزله حدود ۱۶ ثانیه می‌باشد. در شکل ۴ نداشت جابه جایی افقی و قائم زلزله بم ارائه شده است. همچنین اعمال نیروی زلزله بر اساس نداشت جابه جایی از طریق دستور Amplitude تعریف شده است. همچنین در این مطالعه برای تعریف شرایط مرزی، انتهای خاک به عنوان بستر سنگی فرض شده است. برای تعریف این تکیه گاه، از جابجایی در دو جهت که جابجایی در آن جهت‌ها اعمال نمی‌شود، جلوگیری شده است. همچنین جابجایی مرزهای کناری خاک در جهت عمود بر صفحه بسته شده است. برای معرفی تکیه گاه‌های کناری و سنگ بستر از منوی Boundary Condition استفاده شد.

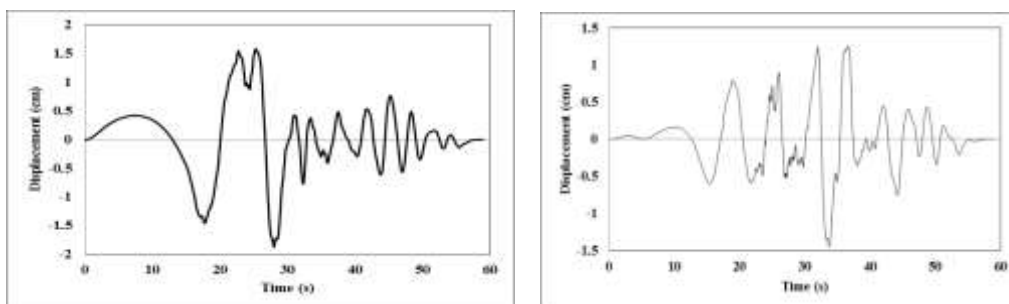
<sup>14</sup> Step time

<sup>15</sup> Strong Duration

<sup>16</sup> Seismosignal



شکل ۳: نمونه مدل عددی ساخته شده در نرم افزار ABAQUS براساس [۲۲]



ب

الف

شکل ۴: نگاهت جابه جایی زلزله بم (الف) افقی (ب) قائم

### ۳-۴- تماس و مش بندی

در این تحقیق مش بندی سازه به نحوی تعیین شد که نرم افزار بتواند جواب مناسب را محاسبه کند. در مدل‌های این تحقیق تمامی تیر و ستون‌های سازه با استفاده از المان خطی B31 مدل‌سازی شده‌اند. خصوصیات المان تیر<sup>۱۷</sup> با استفاده از مقاطع پیش تعریف شده در نرم افزار آباکوس تعریف شده‌اند که دارای ۶ درجه آزادی شامل ۳ درجه آزادی انتقالی و ۳ درجه آزادی دورانی است. فونداسیون و خاک زیرسازه با استفاده از المان C3D8R مدل‌سازی شده است. این المان دارای هشت گره و هر گره ۳ درجه آزادی انتقالی دارد. در مدل‌سازی 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 المان‌های تیر و پوسته با استفاده از قید گره زدن<sup>۱۸</sup> به نحوی که دارای عملکرد مرکب باشند، به یکدیگر متصل شده‌اند. جزئیات بیشتر تماس میان تیر و ستون فولادی و سقف بتنی در [۲۴، ۲۵ و ۲۶] آمده است. شکل ۵ مش‌بندی مدل عددی و انواع تماس‌ها را از نمای نزدیک نشان می‌دهد. برای تعریف جداگرها از رابط<sup>۱۹</sup>‌های موجود در کتابخانه آباکوس استفاده شده است. برای مدل‌سازی جداگر میان سازه و پی باید انتهای ستون‌ها سازه در تمام جهت‌ها 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، برای جداگر LRB ضریب سختی فنر، ضریب میرایی و برای جداگر P-F ضریب اصطکاک تعریف شده است. برای تعریف تماس میان پی و خاک زیرسازه از روش تماس سطح به سطح<sup>۲۰</sup> در کتابخانه ABAQUS استفاده شده است. برای تعریف خصوصیات تماس میان خاک و پی از خصوصیات

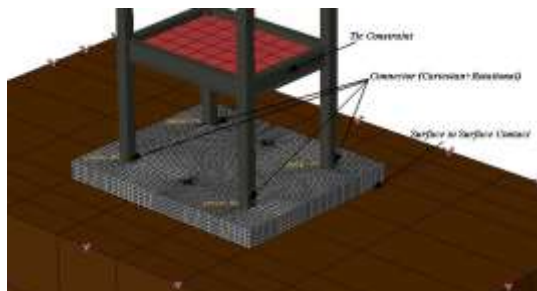
<sup>17</sup> BEAM

<sup>18</sup> Tie constraint

<sup>19</sup> Connector

<sup>20</sup> Surface to Surface

تماس عمودی و مماسی استفاده شده است. برای تماس عمودی از گزینه تماس سخت<sup>۲۱</sup> و برای تماس مماسی از فرمولاسیون Penalty با ضریب اصطکاک ۰/۳ استفاده شد.



شکل ۵: تماس و مش بندی مدل عددی در نمای نزدیک

#### ۴-۴- صحت سنجی

از آنجایی که در این تحقیق سازه‌های با مقیاس واقعی مدل می‌شود و مدل‌های آزمایشگاهی با این ویژگی محدود هستند لذا راستی آزمایی آن با نمونه آزمایشگاهی مشابه ناممکن است. برای صحت سنجی نتایج، نمونه آزمایشگاهی که توسط هی یانگ و همکاران [۲۲] انجام شده در نظر گرفته شد. این آزمایش، سال ۲۰۱۴ در موسسه مهندسی ژئوتکنیک در دانشگاه ناچینگ<sup>۲۲</sup> چین انجام 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. در این نمونه آزمایشگاهی، طول دهانه ۰/۸ متر، ارتفاع طبقه اول ۰/۶ و دیگر طبقات ۰/۵ متر می‌باشد. در مدل آزمایشگاهی [۲۲]، مقطع I شکل با مشخصات هندسی I100x5x50x7 برای کلیه تیرها، و مقطع BOX60x60x3 برای کلیه ستون‌ها استفاده شده است. هم‌چنین پی بتنی در این مدل شامل یک دال با ابعاد ۱/۲x۱ متر و ضخامت ۰/۱ متر می‌باشد. این پی بتنی با استفاده از ۴ شمع بتنی با ابعاد ۰/۲x۰/۲ و ارتفاع ۰/۸ متری بر روی توده خاک قرار دارد. مشخصات جداساز LRB استفاده شده در این مدل 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 [۲۲]

ضریب شکل ثانویه	ضریب شکل اولیه	جرم (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)
۳/۴۸	۱۹/۲	۲۵/۵	۱۰/۹۳	۰/۱۷	۰/۰۰۸	۰/۷	۱۹۶۰	۴۴۰	۰/۶

جدول ۸: پارامترهای دینامیکی پیش بینی شده برای سیستم اندرکنش خاک-سازه‌ی جداسازی شده [۲۲]

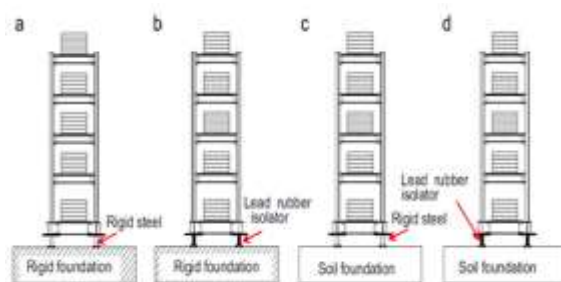
ضریب پوواسون خاک	نسبت چگالی نسبی	نسبت لاغری سازه	نسبت جرم	پارامتر موج (I/s)	نسبت ارتفاع (h <sub>b</sub> /h)	ضریب میرایی جداگر	فرکانس سازه جداسازی شده (هرتز)	ضریب میرایی سازه	فرکانس اصلی سازه (هرتز)
۰/۴۱	۱/۵۷	۲/۶۷	۰/۲	۴۸/۹	۰/۰۸	۱۰/۴۷	۴/۰۷	۲/۷۵	۶/۹۵

در آزمایش میز لرزان چهار تست جهت بررسی پاسخ لرزه‌ای سازه انجام شده است. این تست‌ها عبارتند از سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون صلب (آزمایش I)، سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون صلب (آزمایش II)، سازه جداسازی نشده بر روی فونداسیون خاکی (آزمایش III) و سازه جداسازی شده بر روی فونداسیون خاکی (آزمایش IV). جزئیات مدل‌های این چهار آزمایش 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 اختصاص داده شده است. در مدل‌های عددی، اطراف خاک با استفاده از شرایط مرزی مقید شده تا

<sup>21</sup> Hard Contact

<sup>22</sup> Nanjing

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. همانگونه که پیش تر تعریف شد مشخصات جداگرا نیز توسط المان رابط در محل اتصال سازه به فونداسیون تعریف شده است. برای مدل سازی 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 همچنین مدل سازی جداگرا مشابه آنچه در بخش قبلی گفته شده عمل گردید (شکل ۳ و ۵).



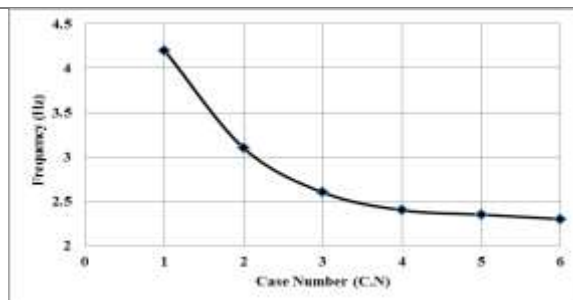
شکل ۶: آزمایش های میز لرزان برای چهار شرایط مختلف. (a) آزمایش I، (b) آزمایش II، (c) آزمایش III و (d) آزمایش IV [۲۲]

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 تحلیل فرکانسی بدست آمدند. برای مقایسه نتایج آنالیز حساسیت مش از فرکانس ارتعاشی مود اول استفاده شد. جدول ۹ اندازه مش در بخش های مختلف سازه را در حالت های گوناگون نشان می دهد. همچنین شکل ۷ نتایج متناسب با مش های انتخابی در جدول ۹ را نشان می دهد.

نظر به شکل ۷ و با توجه به اینکه اختلاف پاسخ ارائه شده جهت C.N.6 و C.N.5 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 در نظر گرفته شد. 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 گرفت.

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

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



شکل ۷: آنالیز حساسیت مش

جدول ۱۰ مقایسه نتایج مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی را نشان می دهد. با توجه به جدول ۱۰ مشاهده می شود که اختلاف مدل عددی و نمونه آزمایشگاهی برای سازه با جداگر بر روی پی صلب (آزمایش I) ۰/۷٪ است. همچنین خطای مدل عددی در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی به ترتیب برای آزمایش II، III و IV برابر ۸/۷۷٪، ۳/۶۶٪ و ۱/۷۴٪ است. با توجه به مش بندی انتخاب شده در جدول ۱۰ فرکانس های بدست آمده از تحلیل فرکانسی مدل های عددی با فرکانس های بدست آمده از مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. همانطور که در جدول ملاحظه می شود، نتایج ارائه شده و درصد خطای محاسبه شده نشان گر تطابق و نزدیکی نتایج مدل های عددی مطالعه حاضر و مدل های آزمایشگاهی بوده و دلالت بر صحت مدلسازی انجام شده دارد.

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

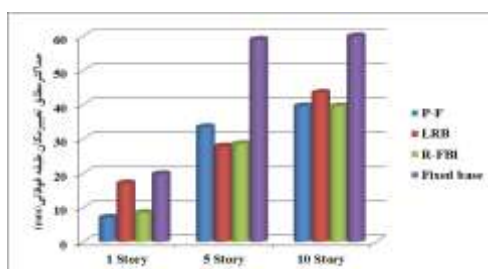
همانگونه که پیش تر گفته شد در این تحقیق ۱۵ مدل شامل سیستم سازه فولادی ۱، ۵ و ۱۰ طبقه با استفاده از روش اجزا محدود و با بکارگیری نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار می گیرد. در این مطالعه روش مدل سازی با جزئیات کامل شرح داده شده است. از کاستی های تحقیقات قبلی می توان به عدم بررسی اثر جداگرهای لرزه ای بر سازه های نامنظم در پلان اشاره کرد که در این تحقیق برای اولین بار بررسی می شود. همچنین در این مقاله انواع جداگرها هم زمان با در نظر گرفتن اثر خاک بررسی شده که خود نوآوری این مطالعه به حساب می آید.

### ۵-۱- تاثیر مشخصات جداسازها

در این بخش نتایج تحلیل ها در سازه های نامتقارن لغزشی با انواع جداگرها تحت شتابنگاشت زلزله بم بیان شده است. برای انجام مقایسه میان نتایج این تحلیل ها، مدل های جداسازی شده با مدل های پایه ثابت مقایسه می شوند. جزئیات حداکثر مطلق پاسخ ها برای حالت جداسازی شده و پایه ثابت در سازه ۱، ۵ و ۱۰ طبقه در جدول ۱۱ آمده است. نتایج مربوط به تغییرمکان لغزشی در سازه یک طبقه نشان می دهند که جداگر P-F کمترین پاسخ لغزشی را ایجاد می کند. پس از آن جداگر R-FBI کمترین پاسخ را دارد. نتایج بیانگر این واقعیت هستند که المان اصطکاکی نقش مهمی در کاهش تغییرمکان لغزشی سازه یک طبقه ایفا می کند. روند مذکور به وضوح در سازه پنج و ده طبقه نیز دیده می شود که نشان از اهمیت المان اصطکاکی در کنترل تغییرمکان لغزشی سازه است. از طرفی در سازه یک طبقه سرعت لغزشی نیز در جداگر P-F بسیار کمتر از سایر جداگرهاست. عملکرد جداگر P-F نسبت به LRB و آن نیز نسبت به R-FBI کمتر بوده است، لذا تاثیر المان اصطکاکی را به طور یقین نمی توان در این خصوص قطعی دانست ولی در یک جداگر با تنها المان اصطکاکی، بهترین پاسخ جهت سرعت لغزشی حاصل گردیده است. پاسخ جهت سازه پنج طبقه نشان از تفاوت رفتار جداگرها نسبت به سازه یک طبقه دارد. در این سازه بهترین جداگر LRB و بعد از آن R-FBI بود و جداگر P-F رفتار بسیار بدتری نسبت به جداگرهای دیگر از خود نشان داد. در سازه ده طبقه بهترین سیستم جهت کاهش سرعت لغزشی R-FBI و سپس P-F بود و جداگر LRB دارای رفتار نامناسبی در این خصوص نمایانگر شد. به صورت کلی می توان گفت که جهت تغییرمکان لغزشی بهترین جداگر P-F و جهت سرعت لغزشی در سازه کوتاه، P-F و در سازه متوسط LRB و در سازه نسبتا بلند R-FBI بهترین سیستم جداگر می باشد.

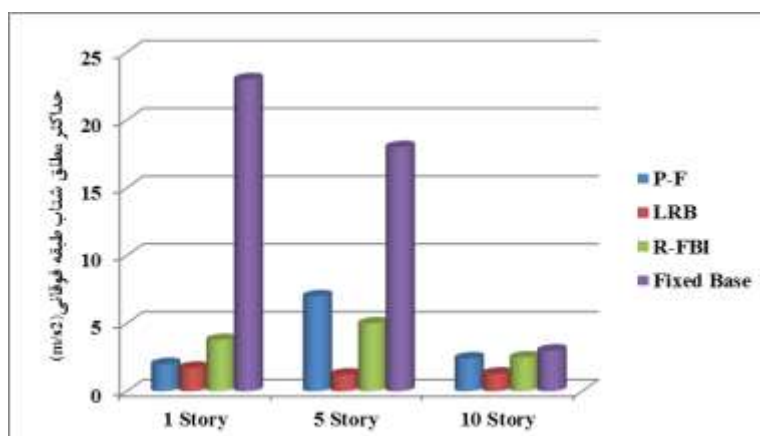
با توجه به شکل ۸ کمترین پاسخ دینامیکی تغییرمکان بدست آمده جهت سازه یک طبقه در صورتی بدست آمد که جداگر P-F استفاده گردد. این نتیجه جهت سازه پنج طبقه در طبقه اول در صورتی حاصل گردید که جداگر R-FBI استفاده شود. همچنین جهت سازه ده طبقه در طبقه اول وقتی حداقل پاسخ تغییرمکان حاصل می گردد که از جداگر R-FBI یا P-F استفاده گردد. حداقل های مذکور جهت

سازه ۱، ۵ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۷/۱، ۱۹ و ۱۶/۸ میلیمتر حاصل شد. این درحالیست که جهت سازه‌ای که جداسازی نشده است اعداد مذکور به ترتیب ۱۹/۸، ۴۱ و ۲۵ میلیمتر می‌باشد. این نتایج نشان از کاهش پاسخ دینامیکی تغییرمکانی به ترتیب به میزان ۶/۴، ۵۳/۶ و ۳۲/۸ درصد جهت سازه‌های یک، پنج و ده طبقه دارد. این موارد نشان از تاثیر المان اصطکاکی جهت کاهش پاسخ تغییرمکان طبقه دارد. هرچند که نتیجه فوق در طبقه پنجم سازه ۵ طبقه حاصل نشده و بهترین سیستم در این خصوص LRB تعیین شده است. همچنین در طبقه پنجم سازه ۱۰ طبقه بهترین سیستم R-FBI می‌باشد. در مقایسه حداقل پاسخ تغییرمکان پنجم در سازه ۵ طبقه جداسازی شده با سازه جداسازی نشده ۵ طبقه، تاثیر جداگر در کاهش پاسخ تغییرمکان سازه ۵۲/۷ درصد نشان داده شد. همچنین جهت سازه ۱۰ طبقه در طبقه پنجم بهترین سیستم R-FBI و درصد کاهش پاسخ نسبت به سازه جداسازی نشده ۳۱/۹ درصد بدست آمد. از طرفی جهت سازه ۱۰ طبقه و در طبقه دهم بهترین سیستم جداگر R-FBI تعیین گردید که درصد کاهش پاسخ آن نسبت به سازه جداسازی نشده ۳۴/۳ درصد تعیین گردید.



شکل ۸: حداکثر مطلق تغییرمکان طبقه فوقانی برای جداگرهای مختلف

مطالب فوق الذکر جهت شتاب طبقات در شکل ۹ حاکی از آن است که بهترین سیستم جهت سازه یک طبقه جداگر LRB و جهت سازه ۵ طبقه در طبقه اول و پنجم نیز جداگر LRB بهترین سیستم جهت کاهش شتاب طبقات است. این درحالیست که بهترین سیستم کاهش شتاب جهت سازه ۱۰ طبقه در طبقه اول، پنجم و دهم به ترتیب P-F، LRB و LRB بدست آمد. نتایج نشان می‌دهند که در اکثر موارد سیستم LRB بهترین سیستم کاهش شتاب طبقه می‌باشد. با مقایسه شتاب حداقل در سازه‌های جداسازی شده با سازه‌های پایه ثابت درصد کاهش شتاب توسط سیستم‌های جداسازی جهت سازه یک طبقه ۹۲/۴ درصد بدست آمد. این در حالیست که در طبقه اول و پنجم سازه ۵ طبقه به میزان به ترتیب ۹۱/۲ و ۹۳/۱ درصد کاهش در شتاب طبقه با جداسازی لرزه‌ای حاصل گردید. همچنین جهت سازه ده طبقه و در طبقات اول، پنجم و دهم جهت کاهش پاسخ شتاب درصدهای ۱۰/۵، ۴۹ و ۵۶/۶ درصد بدست آمد. نتایج نشان از تاثیر بسیار زیاد جداسازی لرزه‌ای بر پاسخ‌های دینامیکی سازه‌های مورد مطالعه دارد که در این خصوص تاثیر بیشتر توسط سازه‌های کوتاه است تا نسبتا بلند.



شکل ۹: حداکثر مطلق شتاب طبقه فوقانی برای جداگرهای مختلف

جدول ۱۱: پاسخ‌های حداکثر مطلق برای حالت جداسازی شده و پایه ثابت در سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه

نوع جداساز	تعداد طبقات	S (mm)	$\bar{S}$ (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم		طبقه دهم	
				U (mm)	$\bar{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	$\bar{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	$\bar{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )
R-FBI	۱	۱	۱۲/۲	۸/۵	۳/۷۸	-	-	-	-
	۵	۳/۳	۶۴	۱۹	۲۰/۸	۲۸/۶	۵	-	-
	۱۰	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۴۵	۱۶/۸	۸/۱۵	۲۶/۹	۱/۳۹	۳۹/۶	۲/۴۹
LRB	۱	۱/۳۴	۱۱/۲	۱۷/۱	۱/۷۳	-	-	-	-
	۵	۷/۳	۶۳	۲۱/۵	۱/۴	۲۷/۹	۱/۲۳	-	-
	۱۰	۴/۸۳	۳۹	۲۰/۹	۴/۵۱	۳۳/۷	۰/۵۱	۴۳/۵	۱/۳
P-F	۱	۰/۳۲	۰/۱۶	۷/۱	۲/۰۹	-	-	-	-
	۵	۱/۸	۷۹	۲۰/۶	۲۵/۸	۳۳/۵	۷/۰۴	-	-
	۱۰	۰/۰۰۰۴۶	۰/۰۴۹	۱۶/۸	۴/۲۸	۲۶/۹۸	۱/۴۲	۳۹/۶۵	۲/۴۲
Fixed Base	۱	-	-	۱۹/۸	۲۳	-	-	-	-
	۵	-	-	۴۱	۱۶	۵۹	۱۸	-	-
	۱۰	-	-	۲۵	۵/۹	۴۱	۱	۶۰	۳

## ۲-۵- تاثیر ترکیب مولفه‌های قائم و افقی زلزله

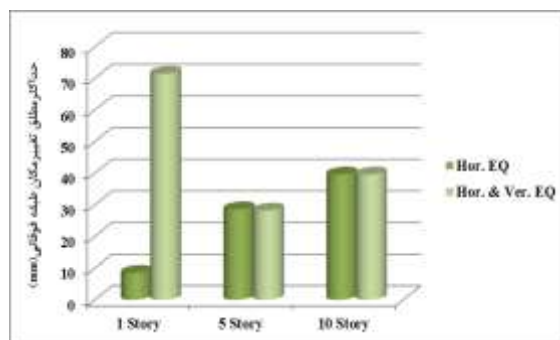
یکی از پارامترهایی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد اثر همزمان مولفه‌های افقی و قائم زلزله بر رفتار سازه فولادی با تعداد طبقات مختلف است. در این بخش نتایج تحلیل‌ها در سازه‌های نامتقارن لغزشی تحت زلزله افقی و ترکیب زلزله افقی و قائم بم بیان شده است.

با توجه به شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نتایج تحقیق در خصوص پاسخ تغییرمکان لغزشی سازه یک طبقه نشان داد که با فرض اعمال دو مولفه افقی و قائم زلزله بر سازه بجای یک مولفه افقی، این تغییرمکان هشت برابر می‌گردد. این در حالیست که تاثیر دو مولفه بودن زلزله بجای یک مولفه بودن آن در سازه ۵ طبقه هیچ گونه تاثیر مشخصی نشان نمی‌دهد. علاوه بر این، همانند سازه یک طبقه، در سازه ۱۰ طبقه نیز با اعمال دو مولفه زلزله بر آن بجای یک مولفه زلزله، تغییرمکان لغزشی به میزان ۲/۲ برابر افزایش دارد.

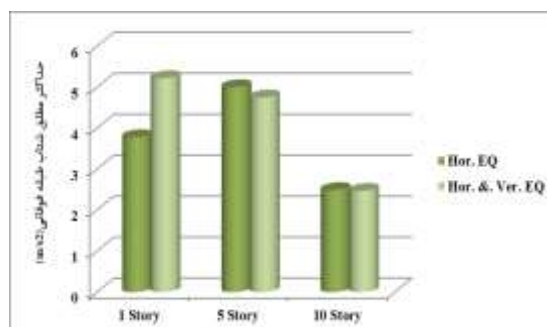
با فرض اعمال دو مولفه زلزله بجای یک مولفه بر سازه یک طبقه، سرعت لغزشی حدوداً ۷/۹۵ برابر می‌گردد. این در حالیست که این سرعت جهت سازه ۵ طبقه اندکی کاهش می‌یابد. همچنین جهت سازه ۱۰ طبقه، تقریباً تغییری در سرعت لغزشی بوجود نمی‌آید.

در خصوص پاسخ دینامیکی سازه یک طبقه، شایان ذکر است که تغییرمکان و شتاب آن در صورت اعمال زلزله با دو مولفه افقی و عمودی بر سازه به جای زلزله با یک مولفه افقی، افزایش می‌یابد. این افزایش جهت تغییرمکان به ۸/۴ برابر می‌رسد. در صورتی که افزایش در شتاب فقط ۳۸ درصد نشان می‌دهد. این مطالب تاثیر زیاد مولفه عمودی زلزله را بر نتایج تحقیق نشان می‌دهد. همچنین جهت سازه ۵ طبقه و جهت تغییرمکان طبقه اول و پنجم در صورتی که دو مولفه افقی و عمودی بر سازه بجای یک مولفه افقی اعمال گردد، تغییر زیادی ندارند. این در حالی است که پاسخ شتاب یک نتیجه‌ی متفاوت را نشان می‌دهد. شتاب طبقه اول در صورت اعمال دو مولفه افقی و قائم نسبت به مولفه افقی تنها به شدت کاهش می‌یابد. و جهت طبقه پنجم نیز شتاب مذکور کاهش می‌یابد ولی میزان کاهش همانند طبقه اول چشمگیر نمی‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که مولفه عمودی تاثیر کمتری بر تغییر نتایج نسبت به سازه یک طبقه دارد. بررسی‌ها جهت سازه ده طبقه نشان می‌دهند که تغییرمکان سازه در طبقه اول، پنجم و دهم در صورت فرض اعمال دو مولفه افقی و عمودی بر سازه نسبت به یک

مولفه افقی، هیچ گونه تغییری نمی کنند. این موضوع نشان از ناچیز بودن اثرات مولفه عمودی زلزله بر سازه سنگین ۱۰ طبقه است. این در حالی است که نتایج نشان می دهند که با فرض اعمال دو مولفه افقی و قائم بجای اعمال یک مولفه افقی بر سازه ۱۰ طبقه، شتاب طبقات اول، پنجم و دهم کاهش می یابند. این کاهش ها به ترتیب ۳۴/۸، ۱۰/۷ و ۱/۶ درصد می باشند. پس نتایج گویای آن هستند که شتاب به سمت کاهش تغییر می کند ولی تغییر مکان تغییری ندارد. در مجموع می توان نتیجه گرفت که حذف مولفه قائم در برآورد لرزه ای سازه نسبتاً بلند در جهت اطمینان طراحی گام بر می دارد. در جدول ۱۲ می توان مقادیر پاسخ های حداکثر مطلق برای زلزله افقی و ترکیب زلزله افقی و قائم مشاهده کرد.



شکل ۱۰: حداکثر مطلق تغییر مکان طبقه فوقانی برای اثرات مولفه قائم و افقی زلزله



شکل ۱۱: حداکثر مطلق شتاب طبقه فوقانی برای اثرات مولفه قائم و افقی زلزله

جدول ۱۲: پاسخ های حداکثر مطلق برای زلزله افقی و ترکیب زلزله افقی و قائم در سازه های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه

نوع زلزله	تعداد طبقات	S (mm)	$\dot{S}$ (mm/s)	طبقه اول		طبقه پنجم		طبقه دهم	
				U (mm)	$\ddot{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	$\ddot{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )	U (mm)	$\ddot{U}$ (mm/s <sup>2</sup> )
یک مولفه ای (زلزله افقی)	۱	۱	۱۲/۲	۸/۵	۳/۷۸	-	-	-	-
	۵	۳/۳	۶۴	۱۹	۲۰/۸	۲۸/۶	۵	-	-
	۱۰	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۴۵	۱۶/۸	۸/۱۵	۲۶/۹	۱/۳۹	۳۹/۶	۲/۴۹
دو مولفه ای (زلزله افقی و قائم)	۱	۸	۹۷/۲۸	۷۱/۴۶	۵/۲۲	-	-	-	-
	۵	۳/۱	۵۳/۷۴	۱۸/۵	۶/۸	۲۸/۲	۴/۷۵	-	-
	۱۰	۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۴۳	۱۶/۸	۵/۳۱	۲۶/۹	۱/۲۴	۳۹/۶	۲/۴۷



## ۴- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار سازه‌های لغزشی نامتقارن با جداگرهای مختلف تحت اثر مولفه‌ی افقی و ترکیب مولفه‌های افقی و قائم زلزله بم مورد مطالعه قرار گرفته است. اثرات اندرکنش خاک و سازه برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد. حداکثر جابه‌جایی مطلق، حداکثر شتاب مطلق، حداکثر جابه‌جایی لغزشی مطلق و حداکثر سرعت لغزشی مطلق، در تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مدل‌های مورد مطالعه، برای مدل‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق برای تاثیر مشخصات جداسازها عبارتست از:

- نتایج مربوط به تغییرمکان لغزشی جهت سازه ۱، ۵ و ۱۰ طبقه نشان می‌دهد که به ترتیب جداگر P-F و R-FBI کمترین پاسخ لغزشی را ایجاد می‌کنند. این روند نشان از اهمیت المان اصطکاکی در کنترل تغییرمکان لغزشی سازه است.
- با توجه به نتایج مربوط به سرعت لغزشی نشان داده شد که عملکرد جداگر P-F نسبت به R-FBI و LRB در سازه ۱ طبقه، LRB نسبت به R-FBI و P-F در سازه ۵ طبقه، و R-FBI نسبت به P-F و LRB در سازه ۱۰ طبقه بهتر بوده است. لذا با توجه به پاسخ دینامیکی (تغییرمکان و شتاب) حاصله جهت سازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ طبقه چنین برمی‌آید که ایزولاتورهای استفاده شده برای هر یک از سازه‌های مذکور در هر طبقه خاص دارای مزیت می‌باشند و از این نظر ارائه سیستم بهینه جهت یک سازه خاص غیرممکن است.

نتایج این تحقیق برای تاثیر ترکیب مولفه‌های زلزله عبارتست از:

- در صورت اعمال دو مولفه افقی و قائم زلزله بر روی سازه به جای یک مولفه افقی، تغییرمکان لغزشی افزایش می‌یابد، این افزایش در سازه ۱ و ۱۰ طبقه چشمگیر و در سازه ۵ طبقه ناچیز است. هم‌چنین سرعت لغزشی، با اعمال دو مولفه افقی و قائم زلزله به جای یک مولفه افقی در سازه ۱ تغییر زیاد و در سازه ۵ و ۱۰ طبقه بسیار ناچیز است.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سازه‌ی ۱ طبقه تغییرمکان و شتاب افزایش چشمگیری می‌یابد، در صورتی که دو مولفه افقی و قائم زلزله به جای یک مولفه افقی اعمال گردد. تاثیر اعمال دو مولفه افقی و قائم زلزله به جای یک مولفه بر سازه ۵ طبقه بسیار کمتر از سازه ۱ طبقه است به گونه‌ای که تاثیر آنچنانی در پاسخ دو حالت متفاوت دیده نمی‌شود. در خصوص سازه ۱۰ طبقه هیچ‌گونه تغییری در اعمال دو حالت فوق الذکر بر تغییرمکان طبقات بدست نیامد. این موضوع نشان از تاثیر تعداد طبقات، وزن سازه، سختی سازه و ارتباط آنها در تعیین فرکانس ارتعاشی و مودهای ارتعاشی سازه دارد. از طرفی مقایسه دو حالت مذکور نشان از کاهش شتاب طبقات در صورت اعمال زلزله افقی و قائم به جای زلزله افقی تنها می‌باشد.

## 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] Shayanfar, M. Astiri, H. (2011). Effect of Rubber-Lead isolators in Steel Structures with moment Frames. *6<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Semnan university, Iran
- [4] Fatahi, A. Makhdomi, A. (2012). Investigation of the effect of viscous extension dampers on linear models and hysteresis of seismic isolators under the influence of near-field earthquakes. *7<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Razi university, Kermanshah, Iran
- [5] Alizade, A. Tavakoli, H. Vtani, A. (2012). The effect of friction isolators on nonlinear response of steel moment frames under near-field disturbances. *3<sup>th</sup> National conference of Structures and Earthquake*, ACECR Kerman, Iran
- [6] Davoodi, M. Dahestani, M. Zahedi, F. Shahbabaie, S. (2013). Comparison of Dynamic Response of Structural Base Structures and Separated Structures under Near and Near Faults. *8<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Babol, Iran

- [7] Sharbatdar, M.K. Hoseini Vaez, S.R. Ghodrati Amiri, G. and Naderpour, N. (2011). Seismic Response of Base-Isolated Structures with LRB and FPS under near Fault Ground Motions. *Procedia Engineering*, Vol 14, Pages 3245-3251.
- [8] Mazza, F. and Vulcano, A. (2012). Effect of near-fault ground motions on the nonlinear dynamic response of base-isolated r.c. framed buildings. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol 41, Issue 2, Pages 211-232.
- [9] Tavakoli, H. Naghavi, F. and Goltabar, A. (2013). Dynamic responses of the base-fixed and isolated building frames under far- and near-fault earthquake. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol 39, Issue 4, Pages 2573-2585
- [10] Enrique Luco, j. (2014). Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation. *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 66, Pages 167-177.
- [11] Etedali, S. and Mohammad Reza S. (2016). A proposed approach to mitigate the torsional amplifications of asymmetric base-isolated buildings during earthquakes. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol 20, Issue 2, Pages 768-776
- [12] Krishnamoorthy, A. and Anita, S. (2016). Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model. *Journal of Structures*. Vol 5, pages 44-57
- [13] Landi, L. Gianluca G. and Diotallevi, P. (2016). Comparison of different models for friction pendulum isolators in structures subjected to horizontal and vertical ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol 81, Pages 75-83.
- [14] Falborski, T. and Jankowski, R. (2016). Behavior of asymmetric structure with base isolation made of polymeric bearings. *Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures*, Vol 40, Pages 333-341
- [15] Institute of Standards and Industrial Research of Iran. (4th revision). *Seismic Standard of Iran*. Tehran, Iran
- [16] Iranian National Building Code. (2013). *Part 6-Building Loading*. Tehran, Iran
- [17] American Institute of Steel Construction. (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago. IL, USA
- [18] Torabi, H. and Rayhani, M. (2014). Three dimensional finite element modeling of seismic soil-structure interaction in soft soil. *Journal of Computers and Geotechnics*, Vol 60, Pages 9-19.
- [19] 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
- [20] Iranian National Building Code. (2013). *Part 5-Building materials and products*. Tehran, Iran
- [21] 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*. Iran university of science and technology, Tehran, Iran
- [22] Haiyang, Z. 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*. Vol 67, Pages 208-218
- [23] Rahnavard, R. and Hassanipour, A. (2016). *Steel Structures Analysis Using ABAQUS*. ISBN:978-600-6789-44-6, ACECR, Kerman, Iran
- [24] 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
- [25] Rahnavard, R. Hassanipour, A. Suleiman, M. Mokhtari, A. (2017), *Evaluation on eccentrically braced frame with single and double shear panels*, Journal of Building Engineering Vol 10, Pages 13-25.
- [26] Rahnavard, R. Hassanipour, A. Mounesi, A. (2016). Numerical study on important parameters of composite steel-concrete shear walls, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 121, Pages 441-456.
- [27] Sadeghvarziri, M. Foutch, D. (1991). Dynamic behavior of Rc highway bridges under combined effect of vertical and horizontal motions. *Journal of Earthquake engineering and structural dynamic*, Vol 20, Issue 6, Pages 535-549
- [28] *ABAQUS Documentation*, (2012). version 6.12.
- [29] Sia, H. Motaghi, A. (2011). Static and Dynamic 3D Analysis of vertical Group with Considering the Effects of Kinematic Interactions between Soil and Candle. *6<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Semnan university, Iran
- [30] Mozafari, N. Yaghlani, A. (2014). Comparison of the effect of LRB and Universal base isolators on the seismic response of steel structures with special moment frame. *9<sup>th</sup> National Civil Engineering Congress*, Faculty of Civil Engineering, Esfahan university of technology, Iran