

# اثرات اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی نامنظم هندسی در پلان جداسازی شده پایه با جداگرهای لاستیکی هسته سربی

میثم محبوبی نیازمندی<sup>۱\*</sup>، محمد بخشنده<sup>۲</sup>

۱- دانش‌آموخته دکترای ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- مدرس، دانشکده مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی مهرآیین بندرانزلی، گیلان، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، شیمی، محیط زیست و مصالح، دانشگاه بولونیا، بولونیا، ایتالیا

\*بندرانزلی، گیلان، صندوق پستی ۴۴۱۴۶-۴۳۹۵۷، m.mahboubi@sutech.ac.ir

## چکیده

هدف اصلی مقاله حاضر بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه (SSI) بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی لغزشی نامنظم هندسی در پلان جداسازی‌شده با جداگرهای لاستیکی هسته سربی (LRB) است. به همین منظور با مدل‌سازی عددی سازه‌ها به روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، رفتار آن‌ها تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی شد. تأثیر نامنظمی و تعداد طبقات سازه، خصوصیات خاک و جداسازی و صلبیت پی بر پاسخ سازه‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی اثرات نامنظمی و تعداد طبقات، سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ مدل‌سازی شدند. برای بررسی اثرات SSI و نوع خاک، سازه‌های ۵ طبقه دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ واقع بر سه نوع خاک نرم، متوسط (با سختی متوسط) و سخت مدل‌سازی شدند. جهت تعیین اثرات جداسازی سازه و صلبیت پی، سازه‌های ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج پاسخ جابه‌جایی و شتاب سازه‌ها نشان داد که تعداد طبقات و نامنظمی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی‌شده دارد. افزایش تعداد طبقات و افزایش نامنظمی، هر یک باعث کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی طبقات می‌شوند. در نظر گرفتن SSI منجر به تأثیر معنادار نوع خاک بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های جداسازی‌شده می‌گردد. علاوه بر این، نتایج نشان داد که در سازه‌های با و بدون جداگر LRB واقع بر پی صلب، اثر جداسازی بر پاسخ دینامیکی سازه ناچیز است.

## واژگان کلیدی

اندرکنش خاک-سازه (SSI)، سازه‌های فولادی لغزشی نامنظم، تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی، جداگر لرزه‌ای LRB، روش اجزای محدود

## The Effects of Soil-Structure Interaction on the Seismic Behavior of Geometrically Irregular Steel Structures in Base-Isolated Plan with Lead Rubber Bearing Isolators

M. Mahboubi Niazmandi<sup>1,2\*</sup>, M. Bakhshandeh<sup>3</sup>

### Abstract

The present paper aimed to evaluate the effects of soil-structure interaction (SSI) on the seismic behavior of base-isolated geometrically irregular steel sliding structures equipped with lead rubber bearing (LRB) isolators. To this aim, the behavior of the irregular system under nonlinear time-history dynamic analysis was assessed using numerical modeling based on the finite element method in ABAQUS. The study considered various factors including irregularity, number of structure floors, soil properties, isolation, and foundation stiffness to analyze their impact on the response of the structures. 3-, 5-, and 7-story structures with 20% and 40% irregularity were modeled to investigate the effects of irregularity and the number of floors. Additionally, models of five-story structures were used to study the impacts of soil-structure interaction (SSI) on three different types of soil: soft, medium, and hard. The results of the study demonstrated that the number of floors and the structure's irregularity have a significant impact on the seismic response of the structure in terms of displacement and acceleration. As the number of floors and irregularity increase, the maximum displacement response of the structure's floors decreases. The study also highlighted the substantial influence of soil type on the seismic response of isolated structures when considering the effects of SSI. Furthermore, the findings indicated that the presence of isolators on rigid foundations had a negligible effect on the dynamic response of the structures, compared to structures without isolators.

### Keywords

Soil-structure interaction (SSI), Irregular steel sliding structures, Nonlinear time history analysis, Lead-rubber bearing (LRB) isolator, Finite element method (FEM).

## ۱- مقدمه

یکی از نکات مهم در طراحی سازه‌ها، مقاومت حداکثری آن‌ها در طول دوران بهره‌برداری در برابر بارهای جانبی شدید نظیر زلزله است. به‌طور کلی، برای مقابله با اثرات مخرب نیروی زلزله بر روی سازه‌ها دو روش اساسی پیشنهاد شده است. در روش اول که جزء تکنیک‌های قدیمی‌تر به‌شمار می‌رود، با استفاده از سیستم‌های مقاوم جانبی نظیر قاب‌های خمشی، قاب‌های مهاربندی‌شده، دیوارهای برشی و مواردی از این دست، ظرفیت لرزه‌ای سازه افزایش داده می‌شود [۱]. اکثر این روش‌ها بر این فرض استوارند که نیروی جانبی ناشی از زلزله از طریق پی به اسکلت سازه منتقل شده و سپس این نیرو در میان المان‌های خاصی که برای این منظور در سازه تعبیه شده است، توزیع و توسط آن‌ها تحمل می‌گردد [۲]. در طی دو دهه اخیر، مقررات طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله با فرض رفتار غیرالاستیک سازه‌ها در برابر وقایع بزرگ زلزله تنظیم شده است. با این فرض، دستیابی به رفتار شکل‌پذیرتر سازه‌ها با آسیب قابل‌توجه در برابر چنین زلزله‌هایی امکان‌پذیر گردیده است [۳]. در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های جدید مبتنی بر سیستم‌های کنترل فعال و غیرفعال برای مقاوم‌سازی و محافظت از سازه‌ها در برابر اثرات مخرب زلزله توسعه چشم‌گیری یافته است [۴]. بدون شک یکی از ایده‌های عالی برای این منظور، روش جداسازی سازه از پایه است که یک سیستم سازه‌ای انعطاف‌پذیر و مطلوب را از نظر بهسازی در برابر زلزله ایجاد می‌کند [۵]. این روش درواقع نصب سیستمی است که سازه و سایر متعلقات آن را از حرکات لرزه‌ای مخرب زمین جدا می‌سازد. این عمل با افزایش انعطاف‌پذیری سیستم به همراه فراهم نمودن میرایی مناسب حاصل می‌شود [۶]. علاوه بر این، سازه‌های جداسازی‌شده از پایه<sup>۱</sup> به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای انرژی زلزله را جذب می‌کنند [۷]. تاکنون سیستم‌های جداساز لرزه‌ای مختلفی جهت جداسازی حرکت زمین در پی سازه‌ها توسعه یافته‌اند که اساس بیش‌تر آن‌ها بر دو نوع لغزشی و لاستیکی استوار است [۸]. جداگر لاستیکی هسته سربی<sup>۲</sup> (LRB) یکی از مطلوب‌ترین سیستم‌های مستهلک‌کننده انرژی به‌شمار می‌رود که به‌منظور کنترل ارتعاشات سازه‌ای و کاهش پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر زمین‌لرزه‌های شدید توسعه زیادی یافته است [۹]. تأثیر اصلی استفاده از LRB، افزایش پریود (زمان تناوب) و میرایی سازه

می‌باشد که این پدیده معمولاً منجر به کاهش پاسخ سازه می‌گردد. کاربرد این سیستم در سازه‌ها موجب جلوگیری از ورود بخش عظیمی از نیروی زلزله به روسازه شده و کاهش هم‌زمان شتاب‌های پایه طبقات و همچنین دریافت (جابه‌جایی نسبی) بین طبقات را به همراه دارد [۱۰].

مستندات و شواهد فراوان موجود در گذشته گواه این مطلب بوده‌اند که محیط خاکی زیرین سازه‌ها و پدیده اندرکنش خاک-سازه<sup>۳</sup> (SSI) در هنگام وقوع زلزله، موجب افزایش نیروهای لرزه‌ای وارد بر بعضی سازه‌ها شده و در موارد بسیاری به‌عنوان یک عامل ثانویه، منجر به تخریب و فروریزش کل سازه گردیده است [۱۱]. اثرات SSI اختلافات پاسخ سازه در حالتی که این پاسخ با فرض برابری حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده است را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت اصلاح‌شده یا واقعی پی نشان می‌دهد. این اختلافات به مشخصه‌های حرکت میدان آزاد زمین به‌علاوه خصوصیات سازه و تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر (خاک مجاور و زیر پی) وابسته است [۱۲]. به‌عنوان یک نظریه کلی، SSI منجر به کاهش فرکانس غالب پاسخ سازه و تغییر در میزان انرژی مستهلک‌شده ناشی از زلزله می‌گردد [۱۳]. بنا بر نظر بسیاری از محققین، SSI می‌تواند در حرکات لرزه‌ای سازه مفید واقع شود و وقوع این پدیده به‌عنوان یک عامل میراکننده، نیروهای وارده به سازه را کاهش دهد و نقش مهمی را در پاسخ لرزه‌ای سازه ایفا نماید [۱۱ و ۱۴]. با این حال، به‌علت تصور محافظه‌کارانه بودن تأثیر انعطاف‌پذیری پی در فرآیند طراحی و تحلیل سازه‌ها، کم‌تر به این موضوع توجه جدی می‌شود [۱۵]. از همین رو اثرات SSI اغلب در برآورد پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها لحاظ نشده و در تحلیل‌های مختلف لرزه‌ای، خاک زیر پی صلب فرض می‌شود [۱۶]. در این حالت پاسخ سازه تنها متأثر از خصوصیات دینامیکی خود سازه بوده و انعطاف‌پذیری خاک، تأثیری در پاسخ سازه ندارد. با این حال در واقعیت، پاسخ سازه متأثر از خواص دینامیکی خاک، پی و سازه می‌باشد که با فرض صلب بودن خاک زیر پی در تناقض است [۱۷]. SSI در اثر عبور امواج زلزله از میان سیستم خاک-سازه رخ می‌دهد. بنابراین واضح است که در نظر گرفتن اثر SSI جهت پیش‌بینی پاسخ واقعی سازه ضروری است [۱۸].

لوکو<sup>۴</sup> [۱۷] با استفاده از روش خطی‌سازی معادل، به بررسی اثر SSI بر رفتار یک سازه الاستیک ساده جداسازی‌شده از پایه تحت اثر

<sup>۳</sup> Soil Structure Interaction

<sup>۴</sup> Luco

<sup>۱</sup> Base Isolated Structure

<sup>۲</sup> Lead Rubber Bearing

هستند. **شعاعی و محصولی** [۲۲] یک رویکرد مبتنی بر قابلیت اطمینان را برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی فولادی جداشده با LRB ارائه نمودند. این محققین با در نظر گرفتن دو پارامتر کلیدی طراحی شامل پرود طبیعی سازه و جابه‌جایی پایه هدف، از طریق تخمین منحنی‌های قابلیت اطمینان معادله رگرسیونی را برای پیش‌بینی متغیرهای طراحی بهینه سیستم جداسازی پایه (یعنی سختی اولیه و نیروی تسلیم) پیشنهاد کرده‌اند. **بی<sup>۱۱</sup> و همکاران** [۲۳] یک روش طراحی مبتنی بر جابه‌جایی مستقیم برای سازه‌های ساختمانی جداسازی شده از پایه با جداگرهای LRB ارائه نمودند. این محققین با استفاده از تحلیل‌های مودال و طیفی، پاسخ این مدل را تعیین نموده و دریافتند که یک رابطه فرم بسته ساده و به راحتی قابل برگشت از ویژگی‌های سازه‌ای به جابه‌جایی‌های لرزه‌ای برای این سیستم وجود دارد. روش پیشنهادی آن‌ها با مثال‌های عددی مبتنی بر تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی سازه‌های طراحی شده تأیید شد و نشان داد که این روش نتایج جابه‌جایی لرزه‌ای را به دست می‌دهد که به خوبی با آستانه‌های هدف از پیش تعیین شده مطابقت دارند. **رادکیا و همکاران** [۲۴] با استفاده از تحلیل افزایشی غیرخطی به ارزیابی اثر جداسازی لرزه‌ای بر رفتار سازه‌های نامتقارن فولادی با توجه به اثرات SSI پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که از نظر دریافت بین طبقات و شتاب طبقات، جداسازی لرزه‌ای تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه‌ها دارد. این اثر در سازه‌های یک طبقه قابل ملاحظه‌تر از سازه‌های با تعداد طبقات بیش‌تر است. همچنین مشخص شد نامنظمی‌های سازه‌ای تأثیر چندان زیادی بر پاسخ لرزه‌ای سازه همچون تغییر مکان و شتاب طبقات نداشته است. علاوه بر این، مشخص شد که با تبدیل خاک از نوع سخت به خاک‌های نرم و متوسط، سرعت جابه‌جایی و لغزش برای تمام سازه‌های مورد مطالعه کاهش می‌یابد. **کاظم‌نژاد و همکاران** [۲۵] دو روش مختلف را برای طراحی جداگر LRB شامل (۱) روش معمول طراحی بر اساس استانداردهای AASHTO و ASCE7 و (۲) طراحی بر اساس نقطه عملکرد شرح داده‌اند. این محققین با استفاده از تحلیل غیرخطی تاریخیچه زمانی به بررسی رفتار ساختمان‌های بتن مسلح دارای جداگر طراحی شده با دو روش مذکور پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که روش نقطه عملکرد از روش معمول دقیق‌تر است. **ژنگ<sup>۱۲</sup> و همکاران** [۲۶] با بررسی پاسخ

تحریک هارمونیک پرداخت. آن‌ها دریافتند در خاک با انعطاف‌پذیری بیش‌تر، پاسخ لرزه‌ای سازه بیش‌تر از پاسخ متناظر حاصل از نادیده گرفتن اثرات SSI است. **هیان<sup>۱</sup> و همکاران** [۱۹] با استفاده از آزمایش‌های میز لرزان، به بررسی اثر SSI بر پاسخ لرزه‌ای یک سازه جداسازی شده از پایه پرداختند. نتایج آزمایش‌های آن‌ها نشان داد نسبت میرایی سازه با در نظر گرفتن اثر SSI، بزرگ‌تر از سازه‌های جداسازی شده بر روی پی‌های صلب است. همچنین این محققین دریافتند پاسخ دوران یک پی را می‌توان با جداسازی تقویت کرد. **کریشنامورسی<sup>۲</sup> و آنیتا<sup>۳</sup>** [۱۶] با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود و توسعه یک مدل عددی، به بررسی اثر SSI بر عملکرد لرزه‌ای سازه جداسازی شده با سیستم آونگ اصطکاکی<sup>۴</sup> (FPS) پرداختند. آن‌ها دریافتند که SSI بر پاسخ سازه جداسازی شده با FPS تأثیرگذار بوده و در بسیاری از موارد باعث افزایش پاسخ سازه می‌گردد. **کنسلارا<sup>۵</sup> و دی‌آنجلیس<sup>۶</sup>** [۹] با استفاده از تحلیل غیرخطی دینامیکی، تأثیر دو سیستم جداسازی پایه یعنی جداگر لاستیکی با میرایی بالا<sup>۷</sup> (HDRB) و جداگر لاستیکی هسته سربی در کنار یک لغزنده اصطکاکی<sup>۸</sup> (FS) را بر رفتار لرزه‌ای یک ساختمان بتن مسلح چندطبقه با نامنظمی شدید در پلان بررسی نمودند. **آدامینا<sup>۹</sup> و همکاران** [۲۰] به بررسی رفتار طبقه نرم در ساختمان‌های بتن آرمه دارای سیستم‌های جداساز لرزه‌ای LRB تحت اثر حرکات زمین لرزه نزدیک و دور از گسل پرداخته‌اند. در این مطالعه، چهار مدل سازه‌های مختلف تحت اثر تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی بررسی شده و پاسخ سازه برحسب شتاب نسبی و شتاب مطلق طبقات، جابه‌جایی، نیروهای برشی پایه، حلقه‌های هیستریزس پسماند و توزیع مفاصل پلاستیک در اعضای سازه مقایسه شد. نتایج نشان داد که عملکرد پاسخ یک سازه بتن آرمه جداسازی شده از پایه، تحت اثر زلزله حوزه نزدیک در مقایسه با زلزله حوزه دور، شدیدتر است. **حسن<sup>۱۰</sup> و پال<sup>۱۱</sup>** [۲۱] با استفاده از تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی و روش طیف پاسخ به بررسی تأثیر شرایط خاک زیر پی بر سازه‌های جداسازی شده پرداخته‌اند. آن‌ها دریافتند که برش پایه با افزایش انعطاف‌پذیری خاک و سختی روسازه، افزایش می‌یابد. همچنین نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که شتاب و جابه‌جایی طیفی در شرایط خاک نرم بیش‌تر بوده و بر این اساس می‌توان گفت که خاک‌های سخت و متوسط برای عایق ساختن پی سازه مناسب

<sup>7</sup> High Damping Rubber Bearing

<sup>8</sup> Friction Slider

<sup>9</sup> Athamnia et al

<sup>10</sup> Pal

<sup>11</sup> Ye et al

<sup>12</sup> Zheng et al

<sup>1</sup> Haiyang et al

<sup>2</sup> Krishnamoorthy

<sup>3</sup> Anita

<sup>4</sup> Friction Pendulum System

<sup>5</sup> Cancellara

<sup>6</sup> De Angelis



هیسرتیک جداگرهای LRB لغزشی تحت بارگذاری‌های سیکلیک، یک مدل عددی پیشرفته را برای بررسی رفتار هیسرتیک این سیستم در سازه‌ها توسعه داده‌اند.

به‌طورکلی رفتار سازه‌های نامنظم و نیروهای جانبی ایجادشده در آن‌ها تحت اثر زلزله در مقایسه با سازه‌های متقارن متفاوت است [۲۷ و ۲۸]. چراکه وجود هرگونه عدم تقارن در هندسه، سختی و یا توزیع جرم در پلان ساختمان می‌تواند علاوه بر پاسخ‌های جانبی سازه در اثر تحریک زلزله، باعث ایجاد پاسخ‌های پیچشی متناظر گردد [۲۹]. از نقطه‌نظر طراحی، دانستن بزرگی اثرات این پیچش جهت تخمین مقاومت و سختی المان‌های سازه‌ای مقاوم در برابر بارهای جانبی زلزله در سازه‌های نامنظم، ضروری است [۳۰]. این موضوع به‌ویژه در شرایطی که یک سازه نامتقارن بر روی خاک نرم قرار گرفته باشد، منجر به تشدید اثر SSI شده و می‌تواند رفتار متفاوتی را برای سازه به همراه داشته باشد [۲۹ و ۳۱]. در چنین مواردی برای جذب انرژی ورودی ناشی از زلزله بر روی سازه‌های نامتقارن می‌توان با افزودن جداگرهای LRB، کارایی ساختمان را افزایش داد [۳۲].

بیش‌تر سازه‌های موجود به دلایل مختلفی همچون ضوابط طراحی و شرایط بهره‌برداری با درصدی از عدم تقارن (نامنظمی) همراه هستند. تاکنون مطالعات گسترده‌ای برای بررسی عملکرد سازه‌های نامتقارن و جداسازی آن‌ها از پایه جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای آن‌ها انجام شده است. با این حال اغلب به دلیل تصور محافظه‌کارانه بودن طراحی، اثر SSI نادیده گرفته شده و تاکنون مطالعات محدودی درخصوص تأثیر هم‌زمان SSI و جداسازی لرزه‌ای بر رفتار سازه‌ها صورت گرفته است. از همین رو در پژوهش حاضر تلاش شده است تا تأثیر جداسازی لرزه‌ای سازه از پایه با استفاده از جداگرهای LRB بر رفتار واقعی سازه‌های فولادی نامتقارن در معرض بارگذاری لرزه‌ای و با درنظرگرفتن اثر SSI با استفاده از روش اجزای محدود مورد ارزیابی قرار بگیرد. برای دستیابی به این هدف با مدل‌سازی عددی اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، به ارزیابی رفتار سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه با درصد‌های مختلف نامنظمی تحت اثر تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که نوع نامنظمی درنظرگرفته‌شده برای سازه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر، از نوع نامنظمی هندسی در پلان سازه است که به‌صورت وجود فرورفتگی در پلان ساختمان‌های مدل‌سازی‌شده ایجاد شده است. ساختار مقاله حاضر مشتمل بر پنج بخش اصلی است. در بخش اول، همان‌گونه که از نظر گذشت، به معرفی ادبیات فنی

تحقیق پرداخته شد و هدف اصلی پژوهش حاضر تشریح گردید. در بخش دوم، چگونگی مدل‌سازی سازه‌های مورد مطالعه با استفاده از تحلیل اجزای محدود تشریح می‌شود. در این بخش خصوصیات مصالح، نحوه‌ی طراحی جداگر لاستیکی هسته سربی، خصوصیات بارگذاری و شرایط مرزی، اندرکنش و مش‌بندی المان‌های سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتهای این بخش نیز صحت نتایج مدل عددی اعتبارسنجی می‌شود. در بخش سوم در راستای بحث و بررسی یافته‌ها، رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه تحت اثر عوامل مختلفی همچون نامنظمی و تعداد طبقات، اندرکنش خاک-سازه و نوع خاک، جداسازی سازه و صلبیت پی بررسی می‌شود. در این بخش با تحلیل نتایج کانتورهای جابه‌جایی، تنش و کرنش و همچنین پاسخ سازه برحسب نمودارهای جابه‌جایی-زمان و شتاب-زمان ارزیابی می‌گردد. در بخش چهارم به مقایسه نتایج پرداخته می‌شود. در این بخش بیشینه پاسخ سازه‌ها با نامنظمی‌های مختلف با تغییر پارامترهایی همچون تعداد طبقات، نوع خاک و وجود جداگر مقایسه می‌گردد. در نهایت در بخش انتهایی مقاله، نتایج به‌دست‌آمده به‌صورت خلاصه ارائه می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل‌سازی اجزای محدود مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه پژوهش حاضر از مدل‌سازی اجزای محدود (FEM) در نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل رفتار سازه‌های فولادی نامنظم با درنظرگرفتن اثر SSI استفاده می‌کند. مدل‌های سازه‌ای ابتدا با نرم‌افزار ETABS و بر اساس استاندارد AISC-341-16 [۳۳] طراحی شدند. برای اعتبارسنجی مدل عددی از مدل آزمایشگاهی هیان و همکاران [۱۹] و مدل عددی رادکیا و همکاران [۲۴] استفاده شد. پس از اعتبارسنجی مدل، از نرم‌افزار ABAQUS برای تحلیل سازه‌های فولادی نامنظم استفاده شد. بر این اساس، تأثیر نامنظمی و تعداد طبقات، خصوصیات خاک و جداسازی و صلبیت پی بر پاسخ سازه‌های مشخص تعیین شد. برای بررسی اثرات نامنظمی و تعداد طبقات، سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ و به‌صورت نامنظمی هندسی سازه در پلان مدل‌سازی شدند. برای بررسی اثرات SSI و نوع خاک، یک سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ در سه حالت مختلف دارای پی نواری مستقر بر سه نوع خاک نرم، خاک متوسط (با سختی متوسط) و خاک سخت مدل‌سازی شد. جهت تعیین اثرات جداسازی سازه و صلبیت پی، یک سازه ۵ طبقه دارای

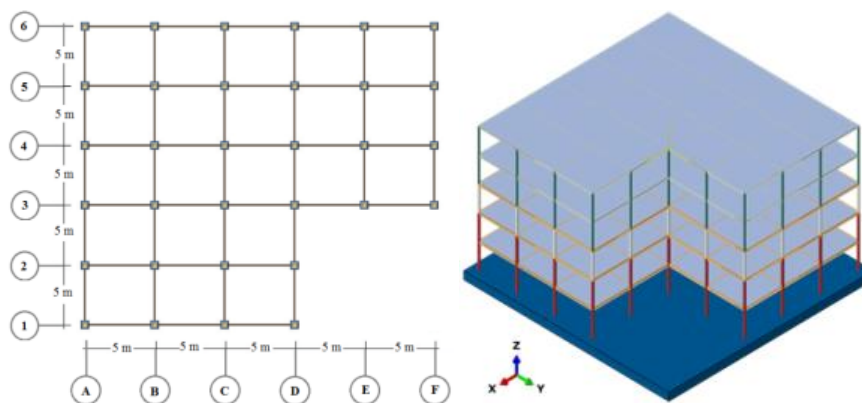
نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ مورد مطالعه قرار گرفت. برای بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها تحت اثر عوامل مذکور، کانتورهای جابه‌جایی کل سیستم، کانتورهای تنش، کانتورهای کرنش دال‌های کف و اسکلت سازه‌ها در انتهای بارگذاری دینامیکی ناشی از زلزله ارزیابی شد. همچنین پاسخ‌های جابه‌جایی و شتاب سازه‌ها مقایسه گردید. در مجموع ۲۰ مدل ساخته شد که جهت سهولت در تحلیل نتایج، این مدل‌ها مطابق با جدول (۱) نام‌گذاری شده‌اند. مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه در تحقیق حاضر به صورت سازه‌های سه‌بعدی و دارای پنج دهانه در جهت X و پنج دهانه در جهت Y طراحی شده‌اند. طول هر دهانه ۵ متر و ارتفاع هر طبقه ۳/۲ متر در نظر گرفته شده است. شکل (۱) پلان‌های دوبعدی و

سه‌بعدی یک نمونه از مدل‌های سازه‌ای شبیه‌سازی شده دارای نامنظمی ۲۰٪ را نشان می‌دهد. فرض بر این است که این سازه‌ها در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی متوسط واقع شده‌اند. مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه بر اساس الزامات مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران [۳۴] تحت بارگذاری ثقلی قرار گرفته و بر روی پی‌های صلب نصب گردیده‌اند. این مدل‌های سازه‌ای ابتدا با نرم‌افزار ETABS [۳۵] و بر اساس استاندارد AISC-341-16 [۳۳] طراحی می‌شوند. در نتیجه فرآیند طراحی، پروفیل‌های مقطع IPE و BOX به ترتیب برای تیرها و ستون‌ها انتخاب شدند که جدول (۲) مشخصات این مقاطع برای سازه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جزئیات مدل‌های سازه‌ای شبیه‌سازی شده

| توضیحات                                                          | درصد نامنظمی (%) | مدل‌ها | تعداد طبقات | بررسی اثر                   |
|------------------------------------------------------------------|------------------|--------|-------------|-----------------------------|
| سازه ۳ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪                           | ۲۰               | M1     | ۳           | اثرات تعداد طبقات و نامنظمی |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪                           | ۲۰               | M2     | ۵           |                             |
| سازه ۷ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪                           | ۲۰               | M3     | ۷           |                             |
| سازه ۳ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪                           | ۴۰               | M4     | ۳           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪                           | ۴۰               | M5     | ۵           |                             |
| سازه ۷ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪                           | ۴۰               | M6     | ۷           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی خاک نرم               | ۲۰               | M7     | ۵           | اثرات تپ خاک و نامنظمی      |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی خاک متوسط             | ۲۰               | M8     | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی خاک سخت               | ۲۰               | M9     | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی خاک نرم               | ۴۰               | M10    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی خاک متوسط             | ۴۰               | M11    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی خاک سخت               | ۴۰               | M12    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه بدون LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی خاک متوسط                | ۲۰               | M13    | ۵           | اثرات جداساز و پی نواری صلب |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی خاک متوسط (مشابه M8)  | ۲۰               | M14    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه بدون LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی پی صلب                   | ۲۰               | M15    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۲۰٪ روی پی صلب                | ۲۰               | M16    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه بدون LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی خاک متوسط                | ۴۰               | M17    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی خاک متوسط (مشابه M11) | ۴۰               | M18    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه بدون LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی پی صلب                   | ۴۰               | M19    | ۵           |                             |
| سازه ۵ طبقه مجهز به LRB با نامنظمی ۴۰٪ روی پی صلب                | ۴۰               | M20    | ۵           |                             |





شکل ۱- پلان‌های دوبعدی و سه‌بعدی یک نمونه از مدل‌های سازه‌ای شبیه‌سازی شده دارای نامنظمی ۲۰٪

جدول ۲- مشخصات مقاطع تیرها و ستونها برای طبقات مختلف سازه‌های مدل‌سازی شده

| ستونها            |                   |                   |                   | تیرها       |             |               | مدل‌های سازه‌ای                     |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|-------------------------------------|
| طبقات ۴ و ۵       |                   | طبقه ۳            | طبقات ۱ و ۲       | طبقات ۶ و ۷ | طبقات ۴ و ۵ | طبقات ۱ الی ۳ |                                     |
| –                 | –                 | BOX<br>200×200×20 | BOX<br>220×220×20 | –           | –           | IPE 330       | ۳ طبقه (مدل‌های M1 و M4)            |
| –                 | BOX<br>160×160×20 | BOX<br>200×200×20 | BOX<br>220×220×20 | –           | IPE 270     | IPE 330       | ۵ طبقه (مدل‌های M2, M5 و M7 تا M20) |
| BOX<br>140×140×20 | BOX<br>160×160×20 | BOX<br>200×200×20 | BOX<br>220×220×20 | IPE 240     | IPE 270     | IPE 330       | ۷ طبقه (مدل‌های M3 و M6)            |

با عمق ۲۰ متر و دارای مرزهای به اندازه کافی دور از پی تنظیم گردیده است. لازم به ذکر است که در مدل‌های M15، M16، M19 و M20 به دلیل صلب در نظر گرفتن پی، ابعاد خاک قابل صرف نظر است.

جدول ۳ مشخصات هندسی خاک و پی را برای مدل‌های سازه‌ای نشان می‌دهد. فونداسیون برای همه مدل‌ها بر روی ابعاد ۲۰ متر  $\times$  ۲۰ متر (20 m  $\times$  20 m) با عمق ۱ متر تنظیم شده است. برای به حداقل رساندن اثرات مرزها، همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، سطح خاک زیر پی روی ابعاد ۱۳۵  $\times$  ۱۳۵ متر مربع

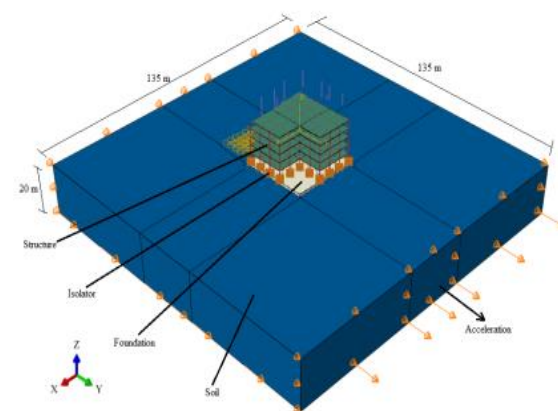
جدول ۳- مشخصات هندسی، پی و خاک برای مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه

| مدل‌های سازه‌ای                                                    |         |         |         |         |         |
|--------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| خاک                                                                |         |         | پی      |         |         |
| طول (m)                                                            | عرض (m) | عمق (m) | طول (m) | عرض (m) | عمق (m) |
| ۱۳۵                                                                | ۱۳۵     | ۲۰      | ۲۰      | ۲۰      | ۱       |
| ۳ طبقه (مدل‌های M1 و M4)                                           |         |         |         |         |         |
| ۱۳۵                                                                | ۱۳۵     | ۲۰      | ۲۰      | ۲۰      | ۱       |
| ۵ طبقه (مدل‌های M2, M5, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13, M16 و M19) |         |         |         |         |         |
| -                                                                  | -       | -       | -       | ۲۰      | ۱       |
| ۵ طبقه با پی صلب (مدل‌های M14, M15, M17 و M18)                     |         |         |         |         |         |
| ۱۳۵                                                                | ۱۳۵     | ۲۰      | ۲۰      | ۲۰      | ۱       |
| ۷ طبقه (مدل‌های M3 و M6)                                           |         |         |         |         |         |

غیرخطی بیش‌تری قرار داشته و تغییرات در خصوصیات رفتار دینامیکی و محدودهٔ امواج و فرکانس‌های ارتعاشی در این ساختمان‌ها بیش‌تر است؛ این تغییرات در نهایت منجر به تشدید اثرات SSI می‌شوند [۱۹]. پدیدهٔ SSI به دلیل ساختار مکانیکی، خواص دینامیکی و پارامتر سختی نسبی سازه نسبت به خاک ایجاد می‌گردد. برای بررسی تأثیر خصوصیات خاک و اثرات SSI بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های مورد مطالعه، سه نوع خاک مختلف (شامل نوع II، III و IV) مطابق با استاندارد لرزه‌ای ایران ۲۸۰۰- و ویرایش چهارم [۳۹] در نظر گرفته شد. برای تعریف خصوصیات خاک‌ها از مدل رفتاری پلاستیک استفاده شد. جدول ۵ مشخصات مکانیکی خاک متناظر با ساختمان‌های مختلف را نشان می‌دهد.

## ۲-۳- طراحی جداگر لاستیکی هسته سربی

به‌طور معمول هدف از جداسازی یک سازه از پایه، افزایش سختی و مستهلک‌نمودن انرژی آن است. یکی از متداول‌ترین دستگاه‌های جداسازی پایه برای سازه‌ها، جداگرهای لاستیکی هسته سربی (LRB) هستند. LRB متشکل از لایه‌های لاستیکی و صفحات فولادی است که عملکرد جداسازی و توزیع انرژی را ترکیب می‌کند. لایه‌های لاستیکی باعث انعطاف‌پذیری افقی سیستم شده و صفحات فولادی نیز سختی قائم آن را فراهم می‌کنند. LRB با نمایش رفتار دوطرفه با نرم‌شدگی<sup>۳</sup> تحت بارهای نسبتاً شدید لرزه‌ای، از عملکرد مطلوبی جهت کنترل توام لرزه‌های خفیف و شدید برخوردار است [۴۰ و ۴۱]. اصل عملکرد سیستم LRB مشابه سیستم بلبرینگ لاستیکی چندلایه<sup>۴</sup> است. با این تفاوت که یک هسته سربی استوانه‌ای در وسط سیستم LRB قرار داده شده تا استحکام سیستم را افزایش دهد [۴۲ و ۴۳]. رفتار پلاستیکی هسته سربی، رفتار هیسترتیک قابل‌توجهی را برای LRB فراهم می‌کند [۴۴ و ۴۵]. در تحقیق حاضر جهت جداسازی سازه‌های مورد مطالعه، با پیروی از برخی توصیه‌های موجود در آیین‌نامه UBC-97 [۴۵] اقدام به طراحی LRB‌ها گردید. پارامترهای مختلفی برای طراحی LRB نیاز است. این پارامترها عبارتند از: نسبت  $Q_d/W$  (مقاومت مشخصه یا نیروی طراحی تحت بارگذاری چرخه‌ای و  $W$  وزن کل سیستم جداسازی‌شده)،  $F_y$  نیروی تسلیم در یک بارگذاری یکنواخت،  $D$  قطر جداگر،  $d$  قطر هسته سربی،  $n$  تعداد لایه‌های لاستیکی و  $t$  ضخامت لایه است. برای مدل‌سازی LRB از مدل پیشنهادی Win که حلقه هیسترتیک



شکل ۲- نمای سه بعدی یک نمونه از مدل‌های سازه‌ای شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ABAQUS (سازه ۵ طبقه با نام‌نظمی ۰.۴۰٪)

## ۲-۲- خصوصیات مصالح

مصالح مدل‌سازی‌شده شامل فولاد، بتن و خاک بوده و خصوصیات غیرخطی آن‌ها با توجه به توانایی نرم‌افزار ABAQUS در تحلیل غیرخطی [۳۶] مطابق جدول (۴) اعمال گردید. این خصوصیات مکانیکی برای المان‌های مختلف شامل تیرها، ستون‌ها، دال سازه و پی بر اساس استانداردهای ارائه‌شده توسط مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران در مبحث پنجم مقررات ملی ساختمان ایران [۳۷] اتخاذ شده است.

برای مدل‌سازی تمام المان‌های فولادی از فولاد ST37 و مدل رفتاری<sup>۱</sup> الاستیک غیرخطی استفاده شد. برای مدل‌سازی اجزای فولادی با استفاده از تحلیل غیرخطی، ABAQUS به استفاده از تنش واقعی مربوط به کرنش پلاستیک از رابطهٔ مهندسی تنش-کرنش نیاز دارد. از آنجایی که می‌توان از هر تعداد نقطه برای تعریف نمودار تنش-کرنش استفاده کرد، لذا یک تقریب خوب از رفتار واقعی فولاد قابل‌دستیابی است. برای مدل‌سازی اجزای بتنی نیز از مدل رفتاری خسارت پلاستیک<sup>۲</sup> استفاده گردید. بر اساس این مدل، رفتار پلاستیک بتن به‌صورت گسیختگی با پلاستیسیتهٔ همسان‌گرد مدل‌سازی می‌شود. پس از تشکیل ترک‌های کششی، رابطهٔ تنش-کرنش در کشش به دلیل انتقال بار به میلگردهای فولادی کاهش می‌یابد. همچنین مقاومت کششی بتن پس از ترک خوردن، ناچیز در نظر گرفته می‌شود [۳۸].

خصوصیات مکانیکی خاک نقش مهمی را در رفتار SSI ایفا می‌نماید. با توجه به طبقه‌بندی ساختمان‌ها در استاندارد لرزه‌نگاری ایران (استاندارد ۲۸۰۰- و ویرایش چهارم) [۳۹]، ساختمان‌های نوع III و IV در مقایسه با ساختمان‌های نوع I و II، در معرض رفتار

<sup>۳</sup> Bi-linear Behavior With Softening

<sup>۴</sup> Laminated Rubber Bearing

<sup>۱</sup> Constitutive Model

<sup>۲</sup> Concrete Damage Plasticity

$$K_{eff} = K_p + \frac{Q_d}{D_d} \quad (\text{when } D_d \geq D_y) \quad (6)$$

زمانی که  $D_d < D_y$  باشد،  $K_{eff} = K_E$  خواهد بود.

تغییر مکان طراحی شده ( $D_d$ ) برای LRB طبق معادله (۷) محاسبه می‌گردد:

$$D_d = \left( \frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{1D} T_D}{\beta_d} \quad (7)$$

که در این معادله،  $S_{1D}$  ضریب طیفی بوده و برابر ۱ فرض می‌شود. مقدار  $T_D$  برای بیش‌تر سازه‌های جداسازی‌شده پایه در محدوده بین ۲/۰ تا ۳/۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود [۴۷].  $\beta_d$  نیز ضریب میرایی متناظر با پاسخ سطح خطر لرزه‌ای بوده و مقدار آن در ۲۵ درصد میرایی برابر با ۱/۶ در نظر گرفته می‌شود.

نیروهای  $F_u$  و  $F_y$  به ترتیب طبق معادلات (۸) و (۹) قابل محاسبه هستند:

$$F_u = Q_d + K_p D_d \quad (8)$$

$$F_y = Q_d + K_p D_y \quad (9)$$

مساحت چرخه هیسترتیک ( $W_d$ ) طبق معادله (۱۰) قابل محاسبه است:

$$W_d = 4Q_d (D_d - D_y) \quad (10)$$

این سطح بیانگر انرژی مستهلک‌شده در هر چرخه متناظر با جابه‌جایی طراحی‌شده به ازای مساحت کل حلقه پسماند است. در نهایت پارامترهای سختی و میرایی LRB تعیین می‌گردند. نسبت میرایی موثر ( $\zeta_{eff}$ ) برای سیستم جداسازی پایه لرزه‌ای که بیانگر همان مقدار اتلاف انرژی می‌راشده در هر چرخه سیکلیک برای جداگر است، طبق معادله (۱۱) قابل محاسبه است:

$$\zeta_{eff} = \frac{W_d}{2\pi K_{eff} D_d^2} \quad (11)$$

پریود اساسی LRB ( $T_b$ ) طبق معادله (۱۲) محاسبه می‌گردد:

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{M}{\sum k_{eff}}} \quad (12)$$

که در این معادله،  $M$  مجموع جرم سیستم جداسازی‌شده (شامل جرم سازه اصلی و جرم جداگر) است. ترم  $\sum k_{eff}$  نیز برابر با مجموع سختی‌های مؤثر سیستم جداسازی است.

نامیده شده و مطابق شکل (۳) به صورت یک منحنی دوخطی نیرو-تغییر شکل نشان داده می‌شود، استفاده می‌گردد. در این سیستم سختی الاستیک ( $K_E$ ) و سختی تسلیم ( $K_P$ ) به ترتیب طبق معادلات (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند:

$$K_E = F_y / D_y \quad (1)$$

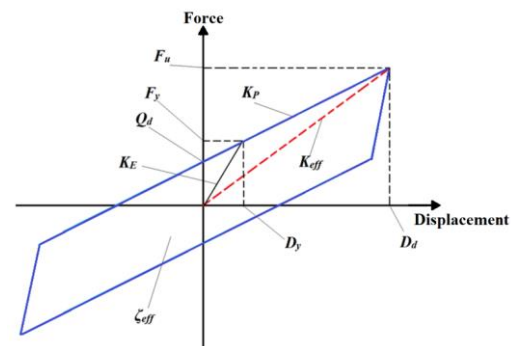
$$K_P = \frac{G \cdot A_r}{t_r} f_L \quad (2)$$

که  $D_y$  تغییر مکان تسلیم،  $G$  مدول برشی لاستیک،  $A_r$  سطح مقطع لایه‌های لاستیک،  $t_r$  ضخامت کل لاستیک متشکل از  $n$  لایه و  $f_L$  یک ضریب تجربی برابر با ۱/۵ است.

مقاومت مشخصه  $Q_d$  (نیروی متناظر با جابه‌جایی صفر) طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_d = A_{pb} \cdot \sigma_{ypb} \quad (3)$$

که در این معادله،  $A_{pb}$  و  $\sigma_{ypb}$  به ترتیب مساحت و قدرت تسلیم هسته سربی (بین ۷ تا ۸/۵ مگاپاسکال) هستند.



شکل ۳- شماتیک حلقه هیسترتیک (رفتار نیرو-تغییر شکل دوخطی جداگر LRB)

سختی موثر متوسط ( $K_{eff}$ ) جداگر LRB به صورت نسبت بین  $F_u$  (حداکثر نیروی برشی متناظر با جابه‌جایی طراحی‌شده ( $D_d$ )) برای LRB تعریف شده و با معادله ۴ محاسبه می‌شود [۴۶]:

$$K_{eff} = \frac{F_u}{D_d} \quad (4)$$

$K_{eff}$  طبق معادله (۵) نیز قابل محاسبه است [۴۵]:

$$K_{eff} = \frac{W_{DL} + 0.2W_{LL}}{g} \left( \frac{2\pi}{T_D} \right)^2 \quad (5)$$

که در آن  $W_{DL}$  و  $W_{LL}$  مجموع بارهای مرده و زنده،  $g$  شتاب ناشی از گرانش و  $T_D$  پریود هدف برای طراحی LRB هستند. علاوه بر این،  $K_{eff}$  به عنوان تابعی از  $Q_d$ ، طبق معادله (۶) نیز قابل محاسبه است:

جدول ۴- خصوصیات مکانیکی فولاد و بتن مورد استفاده در مدل سازی

| خصوصیات مکانیکی عضو سازه ای | جنس مصالح | مدل رفتاری     | چگالی، $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | مدول الاستیسیته، $E$ (GPa) | نسبت بواسون، $\nu$ (-) | تنش تسلیم، $F_y$ (MPa) | تنش نهایی، $F_u$ (MPa) | کرنش نهایی، $\epsilon_u$ (-) | مقاومت فشاری، $f_c$ (MPa) | مقاومت کششی، $f_t$ (MPa) |
|-----------------------------|-----------|----------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| تیرها                       | فولاد     | الاستیک غیرخطی | ۷۸۵۰                               | ۲۱۰                        | ۰/۳                    | ۲۴۵                    | ۴۱۲                    | ۰/۳                          | -                         | -                        |
| ستون ها                     | فولاد     | الاستیک غیرخطی | ۷۸۵۰                               | ۲۱۰                        | ۰/۳                    | ۲۴۵                    | ۴۱۲                    | ۰/۳                          | -                         | -                        |
| دال                         | بتن       | خسارت پلاستیک  | ۲۴۰۰                               | ۲۱                         | ۰/۱۸                   | -                      | -                      | ۰/۰۰۲                        | ۲۱                        | ۱/۱۲                     |
| پی                          | بتن       | خسارت پلاستیک  | ۲۴۰۰                               | ۲۱                         | ۰/۱۸                   | -                      | -                      | ۰/۰۰۲                        | ۲۱                        | ۱/۱۲                     |

جدول ۵- خصوصیات مکانیکی خاک متناظر با ساختگاه های مختلف

| نوع خاک         | سرعت موج برشی، $V_s$ (m/s) | مدول الاستیسیته، $E$ (GPa) | چگالی، $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | نسبت بواسون، $\nu$ (-) | زاویه اصطکاک داخلی، $\phi$ (Deg.) | چسبندگی، $C$ (kPa) |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| خاک سخت (II)    | ۳۷۵-۷۵۰                    | ۱۵۰                        | ۲۲۰۰                               | ۰/۴                    | ۴۱                                | ۲۷۵                |
| خاک متوسط (III) | ۱۷۵-۳۷۵                    | ۷۰                         | ۲۰۰۰                               | ۰/۴۵                   | ۳۷                                | ۱۲۰                |
| خاک نرم (IV)    | <۱۷۵                       | ۲۰                         | ۱۸۰۰                               | ۰/۲۵                   | ۳۲                                | ۶۰                 |

بالای سیستم جداسازی هستند.  $Q$  تعداد کل درجات آزادی روسازه و  $C_{eff}$  ضریب میرایی مؤثر است که بر حسب نسبت میرایی مؤثر  $\zeta_{eff}$  طبق معادله (۱۴) قابل محاسبه است:

$$C_{eff} = 2\zeta_{eff} \sqrt{M \cdot K_{eff}} \quad (14)$$

مقادیر پارامترهای LRB (سختی پیش از تسلیم ( $K_E$ ) و سختی پس از تسلیم ( $K_P$ ) پس از جستجوی بسیاری از اسناد فنی و مطالعات تحقیقاتی از تحقیقات مشابه گرفته شد. مقادیر پارامترهای مورد استفاده جهت طراحی جداگر LRB برای سازه های مختلف مورد مطالعه در تحقیق حاضر در جدول (۶) فهرست شده اند.

برای تعیین خصوصیات LRB و محاسبه حداکثر تغییرشکل تقریبی سیستم جداسازی، معادله حرکت آن که از مقادیر مؤثر و معادل استفاده می کند، قابل استفاده است [۴۸]. اگر چه این فرض ممکن است به عنوان یک تقریب ناخالص در نظر گرفته شود، اما به نظر می رسد که در سیستم های جداسازی پایه رایج از نتایج قابل قبولی برخوردار است [۴۹]. این معادله حرکت را می توان به صورت معادله (۱۳) نشان داد:

$$M\ddot{x}_b(t) + C_{eff}\dot{x}_b(t) + K_{eff}x_b(t) + \sum_{q=1}^Q m_q a_q = -M\ddot{x}_g(t) \quad (13)$$

که در این معادله،  $x_b(t)$  جابه جایی نسبی سیستم جداسازی نسبت به زمین،  $\ddot{x}_g(t)$  شتاب افقی زمین،  $m_q$  و  $a_q$  به ترتیب جرم و شتاب نسبی از درجه آزادی چهارم نسبت به کف پایه درست

جدول ۶- خصوصیات جداگرهای LRB طراحی شده برای سازه‌های مورد مطالعه

| مدل‌های سازه‌ای | خصوصیات مکانیکی | سختی مؤثر، $K_{eff}$ (kN) | سختی الاستیک، $K_E$ (kN/m) | سختی پلاستیک، $K_P$ (kN/m) | مقاومت مشخصه، نیروی تسلیم، $Q_d$ (kN) | نیروی تسلیم، $F_y$ (MPa) | تغییر مکان طراحی شده، $D_d$ (m) | نیروی نهایی، $F_u$ (MPa) |
|-----------------|-----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------|
|                 |                 |                           |                            |                            |                                       |                          |                                 |                          |
| ۳ طبقه          | نامنظمی ۲۰٪     | ۲۸۴.۶۹                    | ۲۸۴.۶۷                     | ۲۸۳.۴۲                     | ۳۳۹۴                                  | ۶۱۴.۸۷                   | ۰.۲۶۸                           | ۷۶۲.۹۷                   |
|                 | نامنظمی ۴۰٪     | ۲۹۷.۵۵                    | ۲۹۷.۵۲                     | ۲۹۶.۲۸                     | ۳۳۹۴                                  | ۶۴۲.۶۵                   | ۰.۲۶۸                           | ۷۹۷.۴۳                   |
| ۵ طبقه          | نامنظمی ۲۰٪     | ۳۲۲.۸۱                    | ۳۲۲.۶۶                     | ۳۲۱.۵۶                     | ۴۴۳۳                                  | ۱۰۳۵.۷۴                  | ۰.۳۵۴                           | ۱۱۴۲.۷۵                  |
|                 | نامنظمی ۴۰٪     | ۳۱۱.۱۲                    | ۳۱۰.۹۷                     | ۳۰۹.۸۷                     | ۴۴۳۳                                  | ۹۹۸.۲۲                   | ۰.۳۵۴                           | ۱۱۰۱.۳۶                  |
| ۷ طبقه          | نامنظمی ۲۰٪     | ۳۸۹.۱۸                    | ۳۸۸.۹۵                     | ۳۸۷.۹۱                     | ۵۳۰۲                                  | ۱۵۴۸.۰۲                  | ۰.۴۱۶                           | ۱۶۱۸.۹۹                  |
|                 | نامنظمی ۴۰٪     | ۳۷۷.۵۸                    | ۳۷۷.۳۵                     | ۳۷۶.۳۱                     | ۵۳۰۲                                  | ۱۵۰۱.۸۶                  | ۰.۴۱۶                           | ۱۵۷۰.۷۳                  |

## ۲-۴- خصوصیات بارگذاری و شرایط مرزی

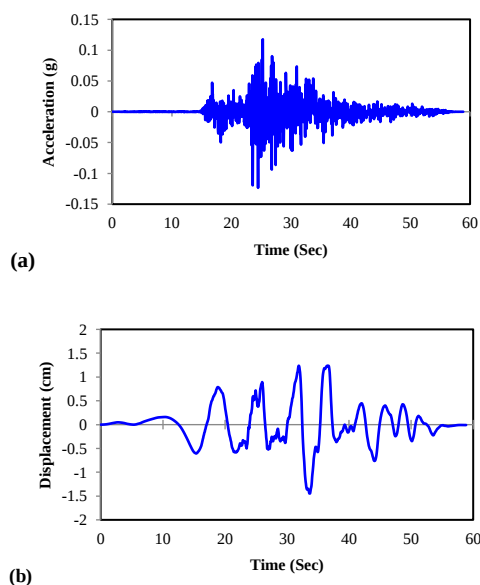
بارهای اعمال شده در ABAQUS بسته به نحوه اعمال آن‌ها به دو نوع کنترل نیرو و کنترل جابه‌جایی تقسیم می‌شوند [۳۶ و ۳۸]. در تحقیق حاضر، بارگذاری به دو صورت ثقلی (بارهای مرده و زنده) (از نوع کنترل نیرو) و بار جانبی زلزله (از نوع کنترل جابه‌جایی) بر روی سازه‌ها اعمال می‌گردد. مقادیر بارگذاری ثقلی (بارهای مرده و زنده) در تمامی طبقات به استثناء طبقه بام سازه‌ها یکسان است. جدول (۷) مقادیر بارهای ثقلی اعمال شده بر روی طبقات مختلف مدل‌های سازه‌ای را نشان می‌دهد. بار مرده هر طبقه از ساختمان‌ها به جز طبقه بام ۶/۴ کیلونیوتن بر مترمربع و بار زنده ۱/۹۶ کیلونیوتن بر مترمربع است. بار مرده طبقه بام ۵/۹ کیلونیوتن بر مترمربع و بار زنده طبقه بام ۱/۴۷ کیلونیوتن بر مترمربع است. از آنجایی که سازه در مرحله نخست با بارهای ثقلی درگیر می‌شود و حتی پیش از بهره‌برداری به‌طور مداوم وزن اسکلت خود را تحمل می‌کند، لذا ابتدا ترکیب بارهای ثقلی بر روی سازه اعمال می‌شود. به‌منظور بارگذاری بر روی سازه‌ها از دستورالعمل‌های نشریه ۳۶۰ [۵۰] و مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران (بارهای وارد بر ساختمان) [۵۱] و طراحی مدل‌ها از روش حالت حدی<sup>۱</sup> (LRFD) استفاده شد. مطابق با بند ۳-۲-۸ نشریه ۳۶۰ در خصوص ترکیب بارگذاری ثقلی، حد بالا و پایین اثرات بار ثقلی ( $Q_G$ ) و بر حسب بار مرده مؤثر ( $Q_D$ ) و بار زنده مؤثر ( $Q_L$ ) بر اساس معادلات (۱۵) و (۱۶) محاسبه شد.

$$Q_{G1} = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (15)$$

$$Q_{G2} = 0.9Q_D \quad (16)$$

<sup>۱</sup> Load and Resistant Factor Design

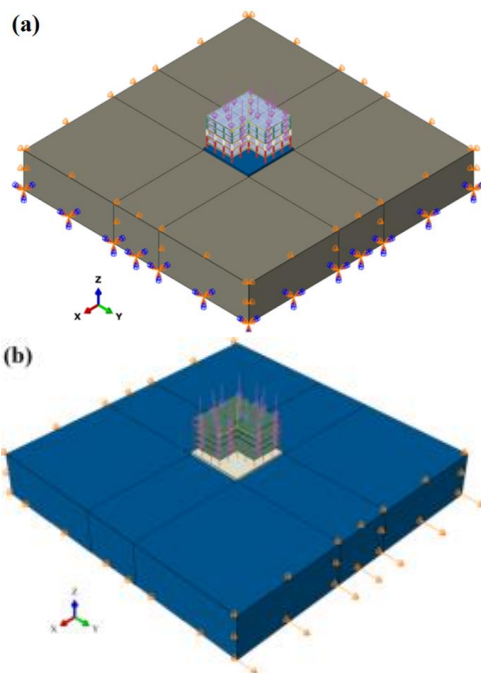
در گام بعدی برای انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی، بار جانبی ناشی از زلزله به‌صورت رکورد جابه‌جایی زلزله بم بر روی سازه اعمال گردیده و در طی این فرآیند، بارهای ثقلی ناشی از گام قبلی هنوز فعال باقی مانده است. میرایی ذاتی ۵ درصد برای تمام سازه‌ها در نظر گرفته شد. شکل‌های (۴-ا) و (۴-ب) به‌ترتیب مؤلفه‌های افقی و قائم نمودارهای شتاب-زمان و جابه‌جایی-زمان رکورد زلزله بم را نشان می‌دهد.



شکل ۴- رکورد زلزله بم، (a) نمودار شتاب-زمان و (b) نمودار جابه‌جایی-زمان

در این تحقیق از تحلیل صریح دینامیکی به روش مستقیم در ABAQUS استفاده شده است. این روش برای لحاظ کردن اثرات SSI و تحلیل‌های تاریخچه زمانی مناسب است [۵۲]. برای انجام

تحلیل‌ها، شرایط مرزی مورد استفاده برای خاک در شرایط بارگذاری استاتیکی و دینامیکی غیرخطی متفاوت است. در این مطالعه، برای تعیین شرایط مرزی، انتهای خاک یک بستر سنگی فرض شده است. بنابراین، حرکت در تمام جهات محدود شده و تنها در جهت بارگذاری آزاد می‌شود. بر این اساس، برای اعمال بارگذاری استاتیکی (ثقلی)، با در نظر گرفتن فاصله کافی از سازه و فونداسیون، مرزهای خاک به صورت تکیه‌گاه ساده و از نوع غلتکی در نظر گرفته شد. بنابراین، در مرحله اعمال بارهای ثقلی، حرکت در تمام جهات محدود شده و تنها در جهت بارگذاری آزاد می‌باشد. در بارگذاری دینامیکی با نظر به این که جابه‌جایی در جهت افقی اعمال می‌گردد، محدودیت جابه‌جایی سیستم در جهات افقی برداشته می‌شود. همچنین برای اعمال بارگذاری دینامیکی، فاصله مرزها به اندازه کافی دور از سازه در نظر گرفته شد تا اثر مرزها به حداقل برسد. شکل (۵) شرایط بارگذاری و بارگذاری دینامیکی بر روی یک سازه نمونه دارای نامنظمی ۲۰٪ نشان می‌دهد.



شکل ۵- شرایط بارگذاری و شرایط مرزی اعمال شده بر روی یک سازه نمونه، (a) بارگذاری استاتیکی، (b) بارگذاری دینامیکی غیرخطی

لازم به ذکر است که شرایط مرزی اعمال شده در حالتی که پی زیر سازه صلب در نظر گرفته می‌شود، اندکی با حالت پی

انعطاف‌پذیر واقع بر خاک نرم متفاوت است. در این حالت خاک زیرین پی، صلب در نظر گرفته شده و شرایط مرزی مستقیماً به پی اعمال می‌گردد. در مرحله بارهای گرانشی، کف پی دارای محدودیت جابه‌جایی و دوران در راستای قائم و افقی است که محدودیت جابه‌جایی در راستای افقی Y در مرحله تحلیل دینامیکی غیرخطی جهت اعمال جابه‌جایی شتابناک برداشته می‌شود. فاصله مرزبندی در نظر گرفته شده از سازه برای یک مدل اجزای محدود تأثیر قابل توجهی بر زمان محاسباتی تحلیل‌ها دارد [۵۲ و ۵۳]. از همین رو در تحقیق حاضر برای اعمال شرایط مرزی دینامیکی، فاصله بین مرزها به اندازه کافی دور از سازه در نظر گرفته شد تا اثر مرزی بر نتایج حداقل گردد. همچنین مرز خاک در عمق آن ثابت در نظر گرفته شد.

## ۲-۵- اندرکنش و مش‌بندی المان‌های سازه‌ای

در این تحقیق برای شبیه‌سازی المان محدود بسیاری از المان‌های سازه‌ای از دستورات موجود در کتابخانه ABAQUS [۵۲] استفاده شده است. کلیه مقاطع طراحی شده برای المان‌های تیر و ستون سازه‌ها با استفاده از مدل خطی B31 و مقاطع از پیش تعریف شده در ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. خاک و پی و همچنین دال‌های بتنی سقف سازه‌ها به ترتیب با استفاده از المان‌های C3D8R و S4R مبتنی بر انتگرال‌گیری کاهش یافته مدل‌سازی و مش‌بندی شده‌اند. المان C3D8R شامل هشت گره با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است. المان S4R نیز دارای چهار گره و شش درجه آزادی (سه درجه انتقالی و سه درجه چرخش) در هر گره بوده و دارای عملکرد خمشی و غشایی است. جزئیات اتصال و تماس بین المان‌های تیر و ستون‌های فولادی و دیواره و دال‌های بتنی سقف سازه‌ها از طریق مدل‌سازی المان محدود در ABAQUS [۵۲] موجود است. برای مقید کردن ستون‌ها به پی از "رابط چرخشی" [۳۸] استفاده شد. تماس بین پی و خاک زیرسازه با استفاده از روش اندرکنش سطح به سطح<sup>۲</sup> [۴۰] تعیین شد. برای تعریف جداگرها از "رابط کارترین" [۳۸] استفاده شد. همچنین برای تعیین شرایط مرزی جداگر LRB بین پی و سازه، انتهای ستون‌ها در تمامی جهات به جز در جهت اعمال بارگذاری مقید گردید. شکل (۶) نماهای دوبعدی و سه‌بعدی مش‌بندی اعمال شده بر روی اجزای مختلف مدل‌های شبیه‌سازی شده در ABAQUS را نشان می‌دهد.

<sup>3</sup> Cartesian Connector

<sup>1</sup> Rotational Connector

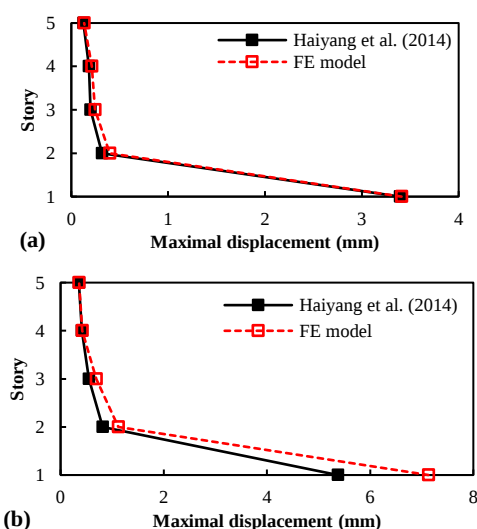
<sup>2</sup> Surface to Surface

## ۶-۲- اعتبارسنجی مدل عددی

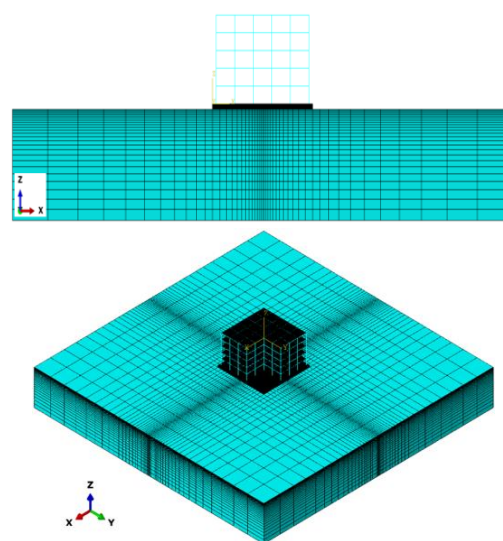
در مطالعه حاضر برای اعتبارسنجی مدل سازی المان محدود در نرم افزار ABAQUS، از دو نمونه مدل سازی آزمایشگاهی [۱۹] و مدل سازی عددی [۲۶] استفاده شد. بدین منظور یک مدل المان محدود برای تعیین رفتار قاب فولادی ۵ طبقه جداسازی شده از پایه مطابق با مطالعه آزمایشگاهی هیان و همکاران [۱۹] ساخته شد و پاسخ حداکثر جابه جایی طبقات آن در مقابل تحریک زلزله معادل الاسترو ( $PGA=0.3g$ ) در دو حالت سازه روی پی خاک و سازه روی پی صلب مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، یک ساختمان ۵ طبقه جداسازی شده با نامنظمی ۴۰٪ مطابق با مطالعه عددی رادکیا و همکاران [۲۶] مدل سازی شد و پاسخ رفتار آن تحت اثر تحریک زلزله بم مورد سنجش قرار گرفت.

جزئیات مدل های مورد مطالعه و تکنیک های مدل سازی به ترتیب در [۱۹] و [۲۶] موجود است. شکل (a-۷) و (b-۷) به ترتیب نمودار پاسخ حداکثر جابه جایی طبقات سازه مدل سازی شده در مقایسه با مدل آزمایشگاهی [۱۹] را در دو حالت سازه روی پی خاک و سازه روی پی صلب نشان می دهد.

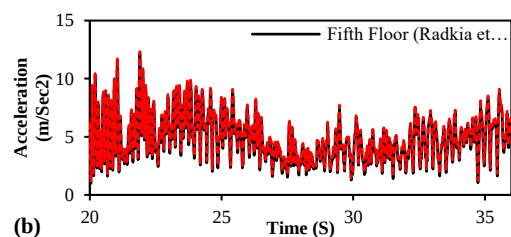
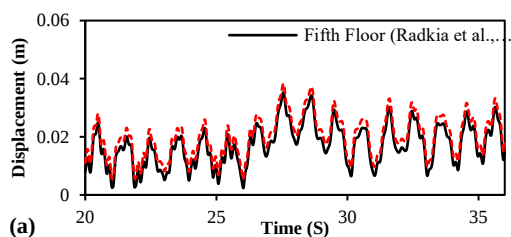
علاوه بر این، شکل (a-۸) و (b-۸) به ترتیب نمودارهای پاسخ جابه جایی-زمان و شتاب-زمان برای طبقه آخر (سقف) سازه تحت اثر بخش قوی رکورد زلزله بم حدود ۱۶ ثانیه (بین ۲۰ تا ۳۶ ثانیه)، حاصل از شبیه سازی المان محدود انجام شده در تحقیق حاضر را در مقایسه با مدل عددی [۲۶] نشان می دهد. به منظور درک دقت مدل سازی عددی، در جدول (۸) نتایج حاصل از حداکثر پاسخ جابه جایی و شتاب طبقه آخر سازه های مدل سازی شده در تحقیق حاضر در مقایسه با مدل های مرجع ارائه شده است. همان طور که در جدول (۸) مشاهده می گردد، خطای پاسخ حداکثر جابه جایی طبقه آخر سازه مدل سازی شده در مقایسه با مدل آزمایشگاهی [۱۹] در دو حالت به ترتیب برابر با ۶/۶۲ و ۱/۳۶ درصد است. این مقدار خطا برای حداکثر پاسخ جابه جایی و شتاب طبقه آخر سازه مدل سازی شده در مقایسه با مدل عددی [۲۶] به ترتیب برابر ۸/۵ و ۱/۶۵ درصد تعیین شده است. این نتایج نشان دهنده دقت بالای مدل شبیه سازی شده در مقایسه با هر دو مدل مرجع بوده و دلالت بر صحت مدل سازی انجام شده در تحقیق حاضر دارد.



شکل ۷- پاسخ حداکثر جابه جایی طبقات در مقایسه با مدل آزمایشگاهی [۱۹] در حالت های (a) سازه روی پی خاک و (b) سازه روی پی صلب



شکل ۶- نماهای دوبعدی و سه بعدی اجزای مختلف مدل های شبیه سازی شده در ABAQUS



شکل ۸- (a) پاسخ جابه‌جایی-زمان و (b) نمودار پاسخ شتاب-زمان برای طبقه آخر سازه مدل‌سازی شده در مقایسه با مدل عددی [۲۶]

جدول ۸- مقایسه نتایج بیشینه پاسخ جابه‌جایی طبقه آخر سازه مدل‌سازی شده در مقایسه با مدل‌های مرجع

| مدل        | پاسخ سازه                | حالت مدل‌سازی        | مدل‌های مرجع | مدل‌سازی المان محدود | اختلاف (%) |
|------------|--------------------------|----------------------|--------------|----------------------|------------|
| آزمایشگاهی | حداکثر جابه‌جایی (mm/s)  | سازه روی پی خاک      | ۰.۱۲۴        | ۰.۱۳۳                | ۶.۶۲       |
|            | حداکثر جابه‌جایی (mm/s²) | سازه روی پی صلب      | ۰.۳۵۴        | ۰.۳۵۹                | ۱.۳۶       |
| عددی       | حداکثر جابه‌جایی (mm/s)  | سازه روی خاک نوع III | ۰.۰۳۵۲۲      | ۰.۰۳۸۲۷              | ۸.۵۰       |
|            | حداکثر شتاب (mm/s²)      | سازه روی خاک نوع III | ۱۲.۱۳۱       | ۱۲.۳۳۰               | ۱.۶۵       |

### ۳-۱- اثرات تعداد طبقات و نامنظمی

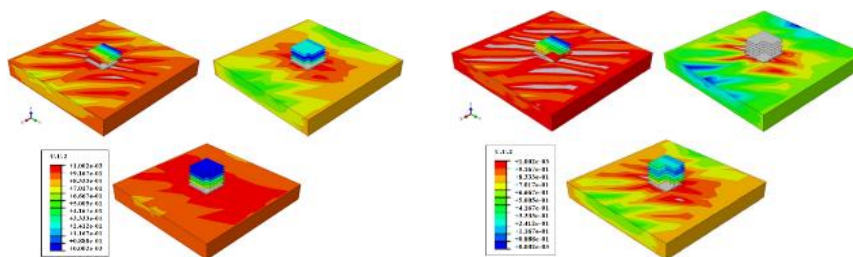
در این بخش اثر تعداد طبقات و نامنظمی هندسی بر رفتار سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه جداسازی شده از پایه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل (a-۱۰) و (b-۱۰) به ترتیب کانتورهای تنش ایجاد شده در سازه‌های مورد مطالعه با نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ را نشان می‌دهد. مطابق شکل (a-۱۰) نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد طبقات، تنش ایجاد شده در سازه افزایش یافته و همچنین تنش با کاهش شماره طبقه به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین همان‌طور که در شکل (b-۱۰) مشاهده می‌گردد، تنش‌های ایجاد شده در سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه با افزایش تعداد طبقات به طور قابل ملاحظه‌ای در طبقات پایین افزایش یافته است. از سوی دیگر تنش ایجاد شده در طبقات آخر سازه ۷ طبقه بیش‌تر از سازه‌های ۳ و ۵ طبقه است.

شکل (a-۱۱) و (b-۱۱) به ترتیب کانتورهای کرنش ایجاد شده در دال‌های کف سازه‌های مورد مطالعه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (a-۱۱) مشاهده می‌شود، کرنش ایجاد شده در دال‌های کف سازه‌های مورد مطالعه با نامنظمی ۲۰٪ در منطقه میانی هر دال بیش‌تر می‌باشد. در عین حال کرنش بیشینه دال‌های کف در سازه‌های ۵ و ۷ طبقه نزدیک به مقدار حد مجاز کرنش است؛ این در حالی است که کرنش بیشینه در سازه ۳ طبقه، با مقدار حد کرنش مجاز فاصله قابل توجهی دارد. مطابق شکل (b-۱۱)، کرنش ایجاد شده در

دال‌های کف سازه‌ها با نامنظمی ۴۰٪ برای طبقه اول سازه ۳ طبقه بیش‌تر است. این در حالی است که کرنش دال‌ها در سازه‌های ۵ و ۷ طبقه در طبقات بالاتر بیش‌تر می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر حاکی از کرنش قابل توجه در محل اتصال دال‌ها به تیرها است. همچنین این کرنش‌ها در قسمت‌های خارجی سازه نسبت به قسمت‌های داخلی سازه بیش‌تر است.

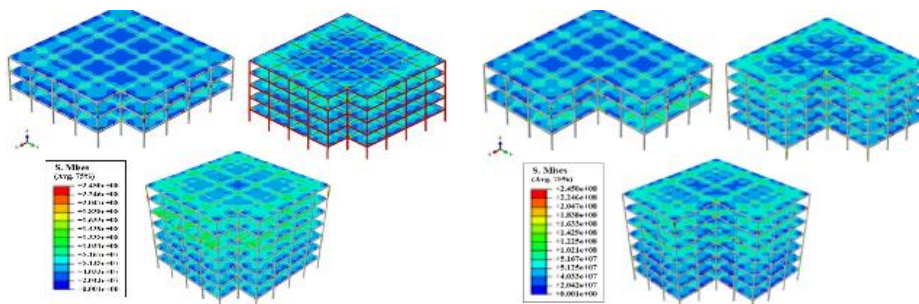
شکل‌های (a-۱۲) و (b-۱۲) به ترتیب کانتورهای کرنش ایجاد شده در اسکلت سازه‌های مورد مطالعه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج شکل (a-۱۲) مشاهده می‌گردد که برای سازه‌های دارای نامنظمی ۲۰٪، کرنش ایجاد شده در المان‌های تیر موازی با جهت حرکت زمین، در ناحیه اتصالی به ستون‌ها از مقادیر بالایی برخوردار است. کرنش ایجاد شده در المان‌های تیر عمود بر حرکت زمین، در قسمت میانی بیش‌تر بوده و در تیرهای کناری (دهانه‌های اول و آخر در ناحیه میانی) کرنش پلاستیک نیز رخ داده است. نکته قابل توجه دیگر، افزایش کرنش پلاستیک ایجاد شده با افزایش تعداد طبقات می‌باشد. همچنین مطابق شکل (b-۱۲) برای سازه‌های دارای نامنظمی ۴۰٪، کرنش ایجاد شده در المان‌های تیر اسکلت سازه‌های ۳ و ۵ طبقه که در موازات حرکت زمین هستند در ناحیه اتصالی بیش‌تر است. کرنش ایجاد شده در سازه ۷ طبقه در المان‌های تیر به موازات حرکت زمین در طبقات بالا در ناحیه میانی بیشینه است. این کرنش در المان‌های تیر عمود بر حرکت زمین در طبقات پایین‌تر سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه و در ناحیه میانی بیشینه می‌باشد.



(a)

(b)

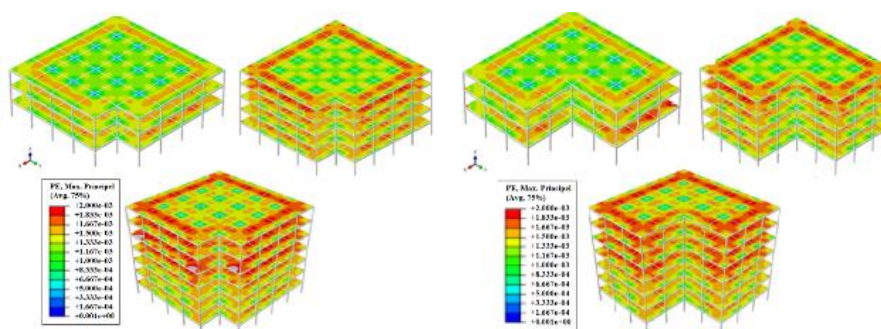
شکل ۹- کانتورهای جابه‌جایی کل سیستم در جهت Y برای سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه به‌ازای نامنظمی هندسی: (a) ۲۰٪، (b) ۴۰٪.



(a)

(b)

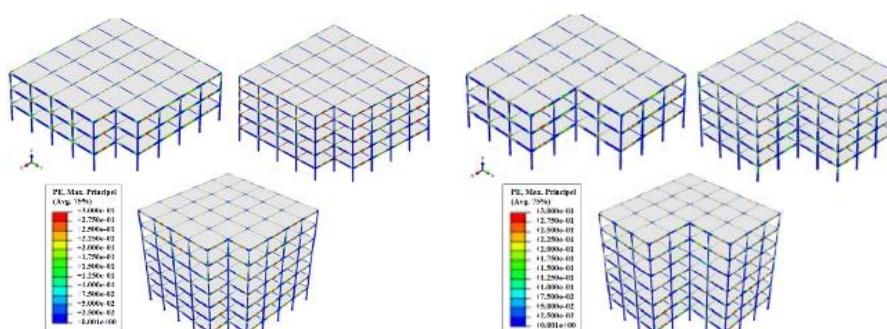
شکل ۱۰- کانتورهای تنش برای سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه به‌ازای نامنظمی هندسی: (a) ۲۰٪، (b) ۴۰٪.



(a)

(b)

شکل ۱۱- کانتورهای کرنش در دال‌های کف برای سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه به‌ازای نامنظمی هندسی: (a) ۲۰٪، (b) ۴۰٪.



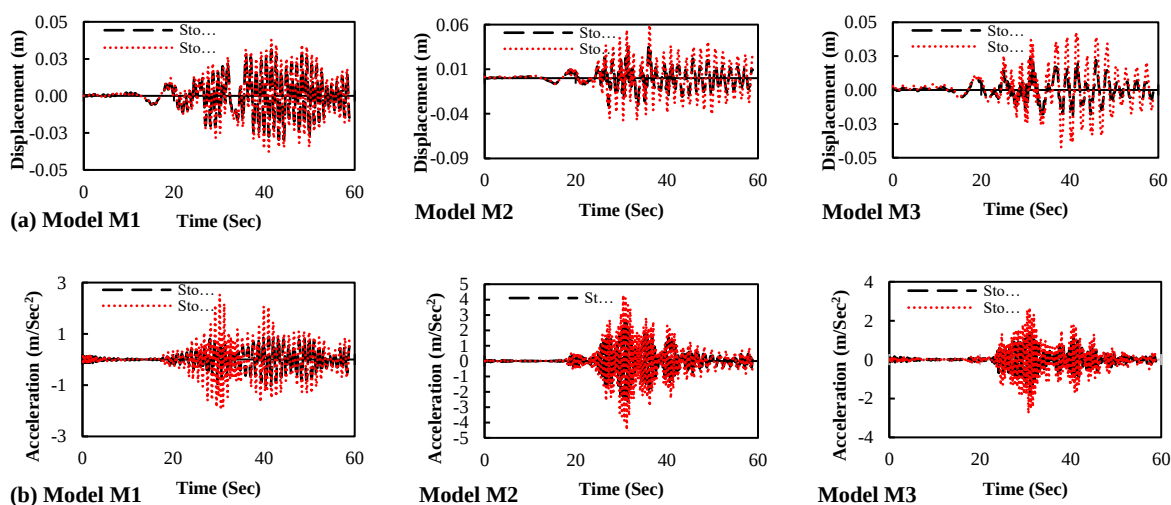
(a)

(b)

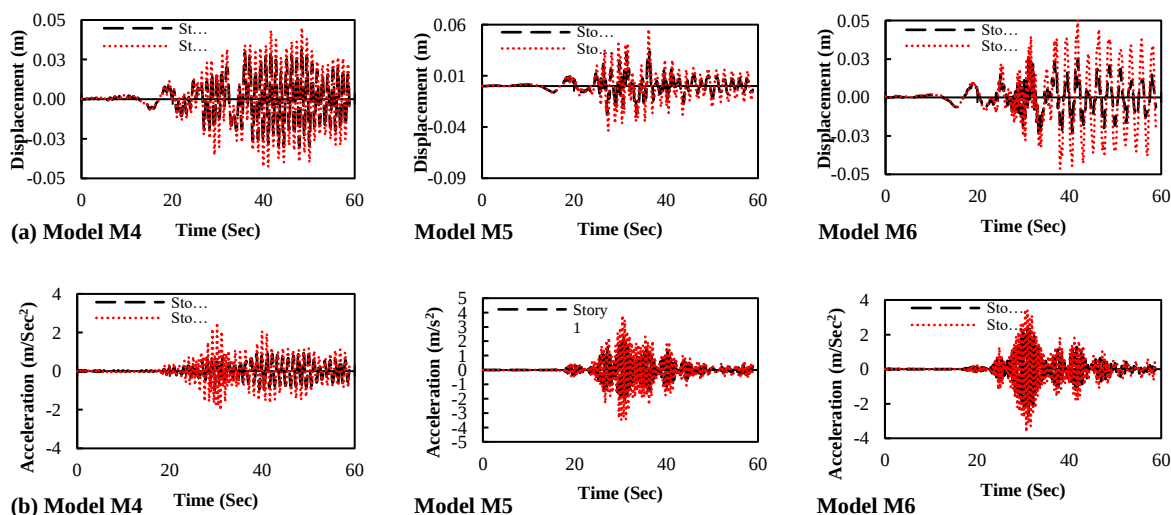
شکل ۱۲- کانتورهای کرنش در اسکلت برای سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه به‌ازای نامنظمی هندسی: (a) ۲۰٪، (b) ۴۰٪.

(b-14) به ترتیب نمودارهای پاسخ جابه‌جایی-زمان و شتاب-زمان سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه با نامنظمی ۴۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌گونه در این شکل مشاهده می‌شود همانند سازه‌های دارای نامنظمی ۲۰٪، در سازه با نامنظمی ۴۰٪ نیز مدل ۳ طبقه نسبت به مدل‌های ۵ و ۷ طبقه دارای دوره‌های پاسخ کوتاه‌تر و تعداد دوره پاسخ بیش‌تری می‌باشد. پاسخ شتاب در سازه‌های با نامنظمی ۴۰٪ در انتهای زمان اعمال رکورد میرانشده و همچنین در سازه ۷ طبقه دارای شدت بیش‌تر است. نمودار پاسخ جابه‌جایی و شتاب بیانگر عدم میراشدن سازه در انتهای زمان اعمال رکورد زلزله می‌باشد.

شکل‌های (a-13) و (b-13) به ترتیب نمودارهای پاسخ جابه‌جایی-زمان و شتاب-زمان سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه با نامنظمی ۲۰٪ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد دوره‌های پاسخ در سازه ۳ طبقه نسبت به سازه‌های ۵ و ۷ طبقه کوتاه‌تر و طبیعتاً تعداد آن بیش‌تر است. همچنین محدوده جابه‌جایی طبقات در زمان مشخص در سازه ۷ طبقه به‌طور قابل‌توجهی نسبت به محدوده جابه‌جایی طبقات در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه بیش‌تر است. پاسخ شتاب سازه‌های ۵ و ۷ طبقه نسبت به سازه ۳ طبقه به رکورد زلزله قابل‌توجه بوده و باعث ایجاد دامنه‌های بلندی در پاسخ شتاب می‌گردد. شکل (a-14) و



شکل ۱۳- پاسخ طبقات اول و آخر سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪، (a) نمودار جابه‌جایی-زمان، (b) نمودار شتاب-زمان

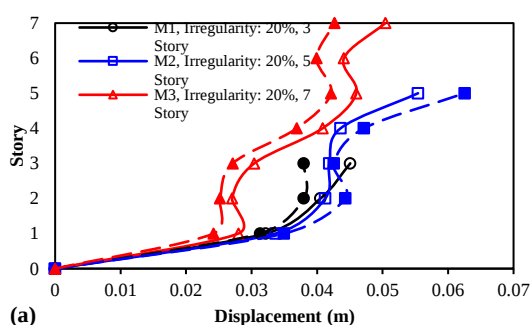


شکل ۱۴- پاسخ طبقات اول و آخر سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی ۴۰٪، (a) نمودار جابه‌جایی-زمان، (b) نمودار شتاب-زمان

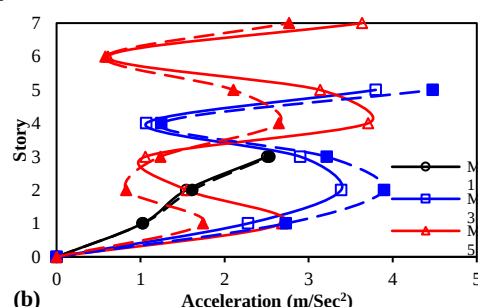
سازه‌های دارای نامنظمی ۲۰٪ عبارتند از: بیشینه پاسخ جابه‌جایی برای سه طبقه اول سازه ۳ طبقه و ۵ طبقه تقریباً برابر است، این در حالی است که بیشینه جابه‌جایی در سه طبقه اول سازه ۷ طبقه کم‌تر از

شکل ۱۵ نمودارهای بیشینه پاسخ سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ را به صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. بر اساس نمودار پاسخ جابه‌جایی-زمان (شکل ۱۵-a)، نتایج به‌دست‌آمده برای

بیش‌تر است. نکته حائز اهمیت دیگر حاکی از مقدار برابر بیشینه پاسخ شتاب در طبقه آخر سازه‌های ۵ و ۷ طبقه به‌طور تقریبی است. نتایج برای سازه‌های دارای نامنظمی ۴۰٪ نشان می‌دهد که: پاسخ شتاب سازه ۵ طبقه به استثناء طبقه ۴، نسبت به طبقات متناظر در سازه ۷ طبقه بیش‌تر است. از طرفی بیشینه پاسخ شتاب در ۳ طبقه اول سازه ۵ طبقه نسبت به سازه ۳ طبقه بیش‌تر است. بیشینه پاسخ شتاب در طبقه آخر سازه ۳ و ۷ طبقه تقریباً برابر بوده و بیشینه پاسخ شتاب طبقه آخر در سازه ۵ طبقه نسبت به سازه‌های ۳ و ۷ طبقه بیش‌تر است.



بیشینه جابه‌جایی در سازه‌های ۳ و ۵ طبقه است. نکته قابل توجه دیگر این است که بیشینه جابه‌جایی طبقه آخر برای سازه ۷ طبقه از سازه ۵ طبقه کم‌تر بوده و پاسخ جابه‌جایی در سازه ۵ طبقه از همه بیش‌تر است. این نتایج برای سازه‌های دارای نامنظمی ۴۰٪ عبارتند از: بیشینه پاسخ جابه‌جایی در سازه ۵ طبقه نسبت به سازه‌های ۳ و ۷ طبقه بیش‌تر می‌باشد. بیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه ۳ طبقه نسبت به ۳ طبقه اول سازه ۷ طبقه نیز بیش‌تر است. همچنین بر اساس نمودار پاسخ شتاب-زمان (شکل ۱۵-b)، نتایج حاصله برای سازه‌های دارای نامنظمی ۲۰٪ نشان می‌دهد که: بیشینه پاسخ شتاب در سه طبقه اول سازه ۵ طبقه نسبت به سازه ۳ طبقه و ۳ طبقه اول سازه ۷ طبقه متناظراً

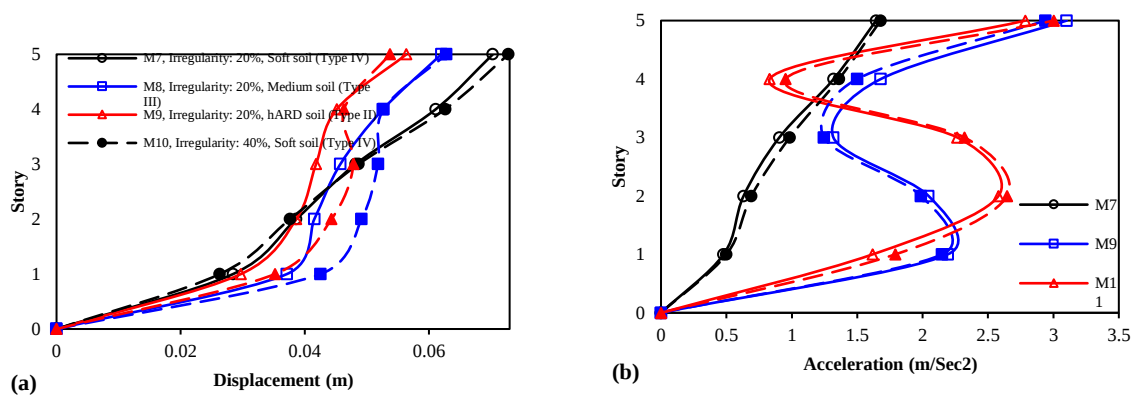


شکل ۱۵- نمودارهای مقایسه‌ای بیشینه پاسخ سازه‌های ۳، ۵ و ۷ طبقه دارای نامنظمی هندسی ۲۰٪ و ۴۰٪: (a) جابه‌جایی-زمان، (b) شتاب-زمان

کم‌تر از مدل‌های واقع بر خاک‌های نوع II و نوع III است. بیشینه جابه‌جایی در طبقه ۳ به‌طور تقریبی در هر سه نوع خاک برابر است. همچنین اختلاف قابل توجهی برای بیشینه جابه‌جایی در طبقات ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. بر اساس پاسخ شتاب-زمان (شکل ۱۶-b)، نتایج حاصله برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ نشان می‌دهد که: بیشینه شتاب در سازه واقع بر خاک نوع IV نسبت به سازه واقع بر خاک‌های نوع II و نوع III کم‌تر است. نکته قابل توجه برابری تقریبی بیشینه پاسخ شتاب در طبقه آخر برای سازه‌های واقع بر خاک‌های نوع II و نوع III است. نتایج برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۴۰٪ نشان می‌دهد که: بیشینه شتاب در مدل واقع بر خاک نوع IV نسبت به مدل‌های واقع بر خاک‌های نوع II و III به استثناء طبقه چهارم کم‌تر است. بیشینه شتاب طبقه آخر در سازه واقع بر خاک‌های نوع III و نوع II تقریباً برابر بوده و دو برابر بیشینه شتاب طبقه آخر سازه واقع بر خاک نوع IV است.

## ۳-۲- اثرات اندرکنش خاک-سازه و نوع خاک

در این بخش اثر نوع خاک بر رفتار سازه ۵ طبقه جداسازی شده دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ بررسی شده است. شکل (۱۶) بیشینه پاسخ سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی‌های ۲۰٪ و ۴۰٪ را به‌صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. بر اساس پاسخ جابه‌جایی-زمان (شکل ۱۶-a)، نتایج به‌دست آمده برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ عبارتند از: بیشینه جابه‌جایی سازه واقع بر خاک نوع IV برای سه طبقه اول کم‌تر از بیشینه جابه‌جایی سازه واقع بر خاک‌های نوع II و III است. این در حالی است که برای طبقات بالاتر، بیشینه جابه‌جایی سازه واقع بر خاک نوع IV نسبت به سازه واقع شده بر خاک‌های نوع II و نوع III بیش‌تر است. کم‌ترین بیشینه جابه‌جایی برای طبقات ۴ و ۵ برای سازه واقع بر خاک نوع II به‌دست آمده است. این نتایج برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۴۰٪ عبارتند از: بیشینه جابه‌جایی برای طبقات ۱ و ۲ در مدل واقع بر خاک نوع IV

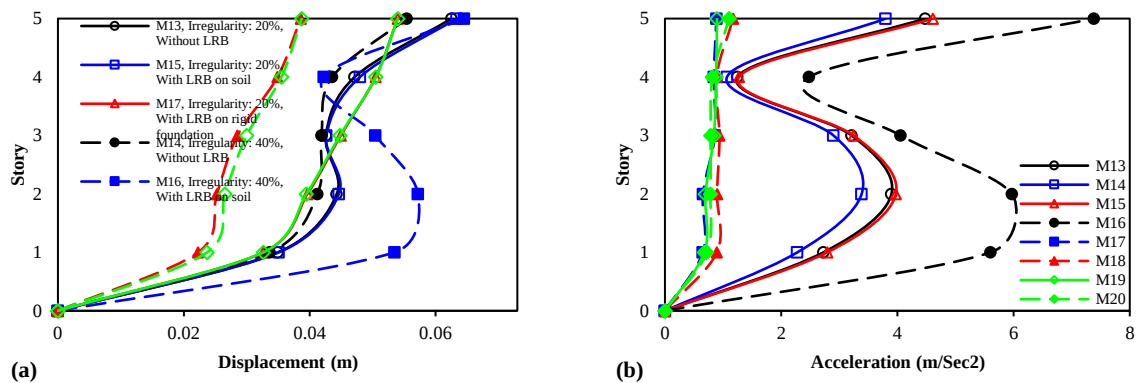


شکل ۱۶- نمودارهای مقایسه‌ای پیشینه پاسخ سازه‌های ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ قرارگرفته بر روی خاک‌های نرم، متوسط و سخت، (a) جابه‌جایی-زمان، (b) شتاب-زمان

پیشینه پاسخ شتاب سازه بدون جداگر بر روی پی صلب نسبت به سازه با جداگر بر روی پی صلب نزدیک به هم است. همچنین بر اساس نمودار پاسخ شتاب-زمان (شکل ۱۷-ب)، نتایج حاصله برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ نشان می‌دهد که: پیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه بدون جداگر و با جداگر بر روی خاک به استثنای طبقات ۳ و ۴، از پیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه با و بدون جداگر بر روی پی صلب بیش‌تر است. نکته قابل توجه دیگر، برابری تقریبی پیشینه پاسخ جابه‌جایی طبقات سازه با و بدون جداگر بر روی خاک می‌باشد. چنین نتیجه‌ای در سازه با و بدون جداگر واقع شده بر روی پی صلب نیز قابل رؤیت است. این امر بیانگر اثر جزئی جداگر بر پاسخ جابه‌جایی سازه است. نتایج برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۴۰٪ نشان می‌دهد که: پیشینه پاسخ شتاب با جداگر بر روی خاک نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌تر است. با این وجود ذکر این نکته ضروری است که پیشینه پاسخ شتاب در سازه با جداگر بر روی خاک به استثنای طبقه آخر به‌طور تقریبی دارای مقدار برابری با سازه‌ی بدون جداگر بر روی خاک است. همچنین پیشینه پاسخ شتاب در سازه واقع شده بر روی پی صلب نیز نسبت به سازه‌ی با جداگر بر روی پی صلب به‌طور نامحسوسی بیش‌تر است. در نهایت پیشینه پاسخ شتاب و به‌طور خاص طبقه بام، در سازه‌های واقع شده بر روی خاک به‌طور قابل توجهی نسبت به سازه‌های واقع شده بر روی پی صلب بیش‌تر است.

### ۳-۳- اثرات جداسازی سازه و صلبیت پی

در این بخش اثرات جداسازی سازه و صلبیت پی بر رفتار سازه ۵ طبقه جداسازی شده از پایه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ مورد بررسی قرار گرفته است. جهت نیل به این هدف، چهار مدل سازه‌ای شامل سازه‌های بدون جداگر بر روی خاک (M13)، دارای جداگر بر روی خاک (M14)، دارای جداگر بر روی پی صلب (M15) و بدون جداگر بر روی پی صلب (M16) مدل‌سازی گردیدند. شکل ۱۷ نمودارهای پیشینه پاسخ سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ و مدل‌سازی شده واقع در چهار حالت مختلف را به‌صورت مقایسه‌ای نشان می‌دهد. بر اساس نمودار پاسخ جابه‌جایی-زمان (شکل ۱۷-ا)، نتایج به‌دست آمده برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ عبارتند از: پیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه با جداگر بر روی خاک از سازه‌های بدون جداگر بر روی خاک، با جداگر بر روی پی صلب و بدون جداگر بر روی پی صلب بیش‌تر است. نکته قابل توجه دیگر این که پیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه با جداگر بر روی پی صلب و خاک تقریباً برابر است؛ این درحالی است که پیشینه پاسخ جابه‌جایی مدل با جداگر بر روی پی صلب نسبت به مدل بدون جداگر بر روی پی صلب کم‌تر است. این نتایج برای سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۴۰٪ نشان داد که: پیشینه پاسخ شتاب در سازه با جداگر بر روی خاک نسبت به سایر مدل‌ها به‌صورت قابل توجهی بیش‌تر است. همچنین



شکل ۱۷- نمودارهای مقایسه‌ای بیشینه پاسخ سازه ۵ طبقه دارای نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ برای حالت‌های M13، M14، M15، M16 و M17، (a) جابه‌جایی-زمان، (b) شتاب-زمان

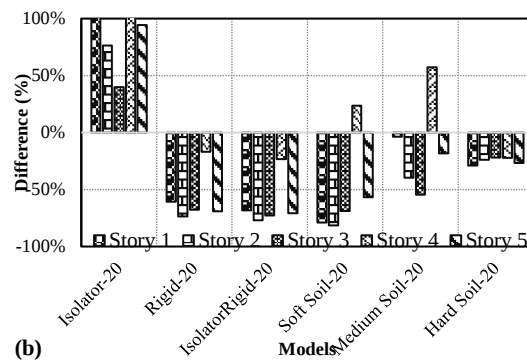
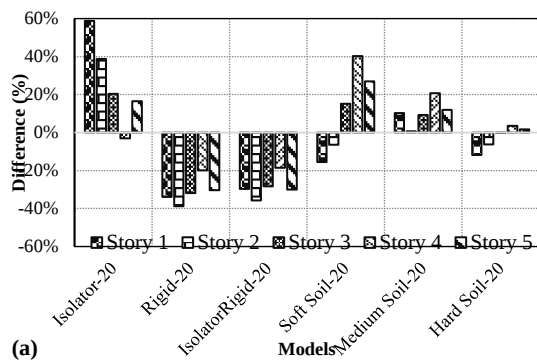
#### ۴- بحث و بررسی مقایسه‌ای نتایج

در این بخش بیشینه پاسخ سازه‌ها با نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ با تغییر پارامتر تعداد طبقات، نوع خاک و وجود جداگر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

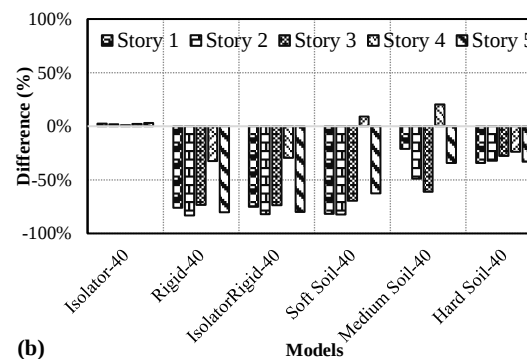
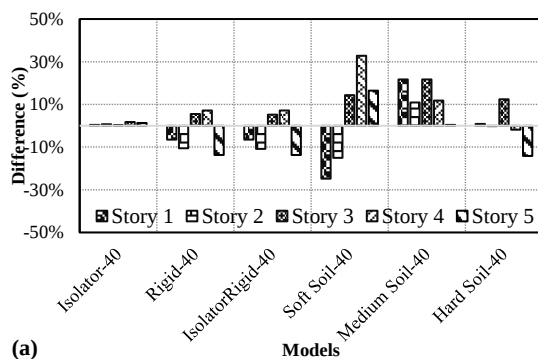
شکل (۱۸- a) و (۱۸- b) به ترتیب اختلاف بیشینه پاسخ جابه‌جایی و شتاب طبقات سازه با نامنظمی ۲۰٪ به‌عنوان مدل‌های مختلف مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۸- a) مشاهده می‌گردد، وجود جداگر باعث افزایش بیشینه پاسخ جابه‌جایی طبقات شده و وجود پی صلب یا به عبارتی صرف‌نظرکردن از اثر SSI باعث کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی گردیده است. تغییرات در نوع خاک و در نظر گرفتن خاک نرم (نوع IV) و خاک متوسط (نوع III) باعث افزایش بیشینه پاسخ جابه‌جایی شده است. در عین حال وجود خاک سخت (نوع II) باعث کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی شده است. همچنین مطابق شکل (۱۸- b) مشاهده می‌گردد که وجود جداگر باعث افزایش پاسخ بیشینه شتاب شده است. از طرف دیگر عدم در نظر گرفتن اثر SSI منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی بیشینه پاسخ شتاب در تمامی طبقات شده است. بیشینه پاسخ شتاب در خاک‌های نرم (نوع IV) و متوسط (نوع III) به استثنای طبقه چهارم کاهش یافته است و در خاک سخت (نوع II)، بیشینه پاسخ شتاب در تمامی طبقات کاهش یافته است.

شکل (۱۹- a) و (۱۹- b) به ترتیب اختلاف بیشینه پاسخ جابه‌جایی و شتاب طبقات سازه با نامنظمی ۴۰٪ را نشان می‌دهد. برخلاف سازه با نامنظمی ۲۰٪، وجود جداگر باعث کاهش بسیار

جزئی و نامحسوس در بیشینه پاسخ جابه‌جایی شده است. این در حالی است که عدم در نظر گرفتن اثر SSI منجر به کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقات ۱، ۲ و ۵ شده است. وجود خاک نرم (نوع IV) باعث کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقات ۱ و ۲ و افزایش بیشینه پاسخ جابه‌جایی برای طبقات ۳ تا ۵ شده است. حضور خاک متوسط (نوع III) در زیر بستر پی منجر به افزایش بیشینه پاسخ جابه‌جایی در تمامی طبقات شده است. لازم به ذکر است که بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقه آخر (بام) به صورت جزئی افزایش یافته است. وجود خاک سخت (نوع II) به عنوان خاک زیر بستر پی نیز منجر به کاهش بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقات ۱، ۲ و ۴ شده و در طبقات ۳ و ۵ افزایش یافته است. با این وجود این تغییرات در طبقات ۱، ۲ و ۴ جزئی می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده در شکل (۱۹- b) نشان می‌دهد که بیشینه پاسخ شتاب طبقات در تمامی مدل‌ها در حضور جداگر به طور میانگین ۵۰ درصد کاهش یافته است. این پاسخ در مدل با جداگر نیز به طور جزئی افزایش یافته است. همچنین شایان ذکر است که بیشینه پاسخ شتاب در طبقه ۴ خاک نرم و خاک متوسط افزایش یافته است. از جهتی نیز مقایسه نمودارها بیانگر این است که در نظر گرفتن اثر SSI منجر به افزایش پاسخ شتاب است و همان‌طور که مشاهده می‌گردد در صورت صرف‌نظر از اثر SSI، پاسخ شتاب به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین در صورت اضافه کردن جداگر بازم پاسخ شتاب کاهش می‌یابد، ولی این مقدار قابل توجه نمی‌باشد.



شکل ۱۸- اختلاف بیشینه پاسخ طبقات سازه ۵ طبقه با نامنظمی ۲۰٪، (a) جابه‌جایی، (b) شتاب



شکل ۱۹- اختلاف بیشینه پاسخ طبقات سازه ۵ طبقه با نامنظمی ۴۰٪، (a) جابه‌جایی، (b) شتاب

خاک و نتیجتاً انتقال اثرات موج زلزله و تنش‌های ناشی از آن از خاک به سازه می‌باشد. در خاک سخت با توجه به افزایش چسبندگی، طراحی‌های متداول در راستای اطمینان است. در سازه‌های با جداگر بر روی پی صلب، صلبیت پی پاسخ جابه‌جایی سازه را به دلیل عدم تداخل موج‌ها کاهش می‌دهد. در سازه با جداگر نیز به دلیل انتقال رفتار زلزله به سازه از طرف خاک پاسخ جابه‌جایی افزایش می‌یابد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر SSI بر رفتار سازه‌های فولادی نامتقارن جداسازی‌شده از پایه مجهز به جداگرهای LRB با نامنظمی‌های هندسی مختلف پرداخته شد. به همین منظور، با مدل‌سازی اجزای محدود تعدادی مدل سازه‌ای در نرم‌افزار ABAQUS، اثرات تعداد طبقات و میزان نامنظمی پلان سازه، اثرات SSI و نوع خاک و همچنین اثر جداسازی و محل قرارگیری پی بر روی بستر نرم و صلب مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق حاضر به‌طور خلاصه به شرح زیر قابل بیان است:

اثرات تعداد طبقات و مقدار نامنظمی بر بیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای اثرگذار است. در سازه با نامنظمی ۲۰٪، بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقات ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۴۹/۴، ۷۳/۱ و ۶۳/۷ درصد نسبت به سازه بدون نامنظمی

مقایسه نتایج ارائه‌شده در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان می‌دهد که به‌صورت عمومی افزایش نامنظمی منجر به افزایش اختلاف در جابه‌جایی طبقات می‌گردد. عدم در نظرگیری اثر SSI در تمامی مدل‌های سازه‌ای در حضور و عدم حضور جداگرهای لرزه‌ای منجر به افزایش نامنظمی در جابه‌جایی طبقات می‌گردد. تفاوت در نامنظمی ناشی از جابه‌جایی‌های طبقات در مدل‌های با نامنظمی ۲۰٪ و ۴۰٪ نسبت به مدل مرجع محسوس است. مقایسه خروجی‌های به‌دست‌آمده از شتاب مدل‌های مورد مطالعه نتایج مشابهی در اختیار قرار می‌دهد. بروز نامنظمی شدید در پاسخ جابه‌جایی طبقات در مدل‌های ساخته‌شده بر روی خاک نرم به‌صورت ملموسی قابل مشاهده است. به‌عنوان یک جمع‌بندی، عدم در نظرگیری اثر SSI در مدل‌های ساختمانی به‌خصوص در مدل‌هایی که اثرات سختی خاک به‌صورت قابل ملاحظه‌ای پایین باشد، در جهت اطمینان نبوده و عدم لحاظ کردن اثر SSI منجر به بروز اختلاف قابل ملاحظه در مقایسه با مدل‌های عادی می‌گردد. این موضوع احتمال وقوع خطراتی همچون تشکیل طبقه نرم و فروریزش کلی سازه را در اثر زلزله در پی خواهد داشت. علاوه بر این، مقایسات انجام‌شده نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثرات SSI در خاک‌های نرم و متوسط می‌بایست جهت مدل‌سازی واقع‌گرایانه‌تر در نظر گرفته شود. دلیل این امر کم‌بودن چسبندگی



به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که عدم در نظرگیری اثرات SSI در مدل‌های سازه‌ای بالاخص در مدل‌هایی که اثرات سختی خاک به صورت قابل ملاحظه‌ای پایین باشد، در جهت اطمینان طراحی نبوده و ممکن است منجر به بروز اختلاف قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با مدل‌های عادی (بدون اثر SSI) گردد که احتمال خسارت‌پذیری سازه را افزایش می‌دهد.

کاهش یافته است. مقادیر فوق برای طبقات ۱، ۲ و ۳ از سازه ۳ طبقه با نامنظمی ۴۰٪ به ترتیب کاهش ۱۰/۳۸، ۱۴/۲۸ و ۱۰/۸۱ درصدی را در مقایسه با سازه بدون نامنظمی نشان می‌دهد. در سازه ۷ طبقه با نامنظمی ۲۰٪ این اختلاف در بیشینه پاسخ جابه‌جایی برای طبقات ۱ الی ۵ به ترتیب ۱۶/۹۱، ۳۴/۴۷، ۲۷/۳۹، ۶/۳۱ و ۱۷/۰۰ درصد در مقایسه با سازه بدون نامنظمی کاهش یافته است. مقادیر فوق برای طبقات ۱ الی ۵ از سازه ۷ طبقه با نامنظمی ۴۰٪ به ترتیب ۳۰/۷۸، ۴۳/۲۴، ۳۶/۳۵، ۲۱/۷۳ و ۳۲/۶۴ درصد کاهش یافته است.

اثرات نوع خاک نیز در بیشینه پاسخ جابه‌جایی در هر دو مدل سازه با نامنظمی هندسی ۲۰٪ و ۴۰٪ قابل توجه است. بیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه با نامنظمی هندسی ۲۰٪ در طبقه آخر نسبت به سازه مرجع در خاک نرم، خاک متوسط و خاک سخت به ترتیب ۲۶/۸۷، ۱۱/۸۹ و ۱/۷۳ درصد افزایش یافته است. بیشینه پاسخ جابه‌جایی سازه با نامنظمی ۴۰٪ در طبقه آخر نسبت به سازه مرجع در خاک نرم و خاک متوسط به ترتیب ۱۶/۴۳ و ۰/۴۵ درصد افزایش و در خاک سخت ۱۴/۱۲ درصد کاهش یافته است.

اثرات جداگر و پی صلب که به صورت ساده‌تر صرف‌نظر کردن از اثرات SSI می‌باشد، نیز پارامتر مورد بررسی دیگری بوده که اثرات آن بر بیشینه پاسخ جابه‌جایی و شتاب حائز اهمیت است. اختلاف بیشینه پاسخ جابه‌جایی برای سازه با نامنظمی هندسی ۲۰٪ در طبقه آخر نسبت به سازه مرجع در حالت وجود جداگر، ۱۶/۴۹ درصد افزایش و در حالات قرارگیری بر روی پی صلب و قرارگیری با جداگر بر روی پی صلب به ترتیب ۳۰/۰۹ و ۳۰/۳۶ درصد کاهش یافته است. اختلاف بیشینه پاسخ جابه‌جایی برای سازه با نامنظمی هندسی ۴۰٪ در طبقه آخر نسبت به سازه مرجع در حالت وجود جداگر، ۱/۲۹ درصد افزایش و در حالات قرارگیری بر روی پی صلب و قرارگیری با جداگر بر روی پی صلب به ترتیب ۱۳/۶۵ و ۱۳/۶۵ درصد کاهش یافته است.

اثر نامنظمی ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ بر بیشینه پاسخ جابه‌جایی است که این مقادیر برای تمامی طبقات محاسبه گردیده است. بیشینه پاسخ جابه‌جایی در طبقات ۱ الی ۵ سازه با نامنظمی ۶۰٪ نسبت به سازه با نامنظمی ۲۰٪ به ترتیب ۳۶/۱۸، ۲۱/۱۵، ۸/۷۷، ۲۵/۳۶ و ۳۷/۲۹ درصد افزایش یافته است. این مقادیر نسبت به سازه با نامنظمی ۴۰٪ برای طبقات ۱ الی ۵ به ترتیب ۳۱/۲۵، ۱۲/۷۶، ۶/۹۵، ۱۵/۸۷ و ۲۱/۶۶ درصد افزایش یافته است.

- [13] Stehmeyer, E.H., Rizos, D.C. (2008), "Considering dynamic soil structure interaction (SSI) effects on seismic isolation retrofit efficiency and the importance of natural frequency ratio", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(6), 468-479.
- [14] Spyarakos, C.C., Maniatakis, C.A., Koutromanos, I.A. (2009), "Soil-structure interaction effects on base-isolated buildings founded on soil stratum", *Engineering Structures*, 31(3), 729-737.
- [15] Cavalieri, F., Correia, A.A., Crowley, H., Pinho, R. (2020), "Dynamic soil-structure interaction models for fragility characterisation of buildings with shallow foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106004>.
- [16] Krishnamoorthy, A., Anita, S. (2016), "Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model", *Structures*, 5, 44-57.
- [17] Luco, J.E. (2014), "Effects of soil-structure interaction on seismic base isolation", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, 167-177.
- [18] Firoj, M., Bahuguna, A., Kanth, A., Agrahari, R. (2022), "Effect of nonlinear soil-structure interaction and lateral stiffness on seismic performance of mid-rise RC building", *Journal of Building Engineering*, 59, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105096>.
- [19] Haiyang, Z., Xu, Y., Chao, Z., Dandan, J. (2014), "Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 208-218.
- [20] Athamnia, B., Ounis, A., Abdeddaim, M. (2017), "Effect of a Near Fault on the Seismic Response of a Base-Isolated Structure with a Soft Storey", *Slovak Journal of Civil Engineering*, 25(4), 34-46.
- [21] Hassan, A., Pal, S. (2018), "Effect of soil condition on seismic response of isolated base buildings", *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 10, 249-261.
- [22] Shoaie, P., Mahsuli, M. (2019), "Reliability-based design of steel moment frame structures isolated by lead-rubber bearing systems", *Structures*, 20, 765-778.
- [23] Ye, K., Xiao, Y., Hu, L. (2019), "A direct displacement-based design procedure for base-isolated building structures with lead rubber bearings (LRBs)", *Engineering Structures*, 197, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109402>.
- [24] Radkia, S., Rahnavard, R., Tuwair, H., Gandomkar, F.A., Napolitano, R. (2020), "Investigating the effects of seismic isolators on steel asymmetric structures considering soil-structure interaction", *Structures*, 27, 1029-1040.
- [1] Rahnavard, R., Naghavi, M., Abudi, M., & Suleiman, M. (2018), "Investigating Modeling approaches of Buckling-Restrained braces under cyclic Loads", *Case Studies in Construction Materials*, 8, 476-488.
- [2] Naeim, F., & Kelly, J.M. (1999), "Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice", John Wiley & Sons, Inc., University of California at Berkeley, USA.
- [3] Maddaloni, G., Caterino, N., Occhiuzzi, A. (2016), "Shake table investigation of a structure isolated by recycled rubber devices and magnetorheological dampers", *Structural Control and Health Monitoring*, 24(5), e1906.
- [4] Richiedei, D., Trevisani, A. (2017), "Simultaneous active and passive control for eigenstructure assignment in lightly damped systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 556-566.
- [5] Tena-Colunga, A., Eduardo Pérez-Rocha, L., Avilés, J., Cordero-Macías, C. (2015), "Seismic isolation of buildings for power stations considering soil-structure interaction effects", *Journal of Building Engineering*, 4, 21-40.
- [6] Bakhshandeh, M., Mahboubi Niazmandi, M. (2023), "Seismic response of base-isolated irregular steel structures equipped with lead-rubber bearing (LRB) isolators considering the effects of soil-structure interaction (SSI)", *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, 15(3).
- [7] Becker, T.C., Yamamoto, S., Hamaguchi, H., Higashino, M., Nakashima, M. (2015), "Application of isolation to high-rise buildings: a Japanese design case study through a US design code lens", *Earthquake Spectra*, 31(3), 1451-1470.
- [8] Sheikh, H., Van Engelen, N.C., Ruparathna, R. (2022), "A review of base isolation systems with adaptive characteristics", *Structures*, 38, 1542-1555.
- [9] Cancellara, D., DeAngelis, F. (2017), "Assessment and dynamic nonlinear analysis of different base isolation systems for a multi-storey RC building irregular in plan", *Computers & Structures*, 180, 74-88.
- [10] Clemente, P., Martelli, A. (2019), "Seismically isolated buildings in Italy: state-of-the-art review and applications", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, 471-487.
- [11] Scarfone, R., Morigi, M., Conti, R. (2020), "Assessment of dynamic soil-structure interaction effects for tall buildings: A 3D numerical approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128(1), <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105864>.
- [12] Novak, M., Henderson, P. (1989), "Base-isolated buildings with soil-structure interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 18, 751-765.



- [25] Kazeminezhad, E., Kazemib, M.T., Mirhosseini, S.M. (2020), "Modified procedure of lead rubber isolator design used in the reinforced concrete building", *Structures*, 22, 45-73.
- [26] Zheng, W., Wang, H., Tan, P., Li, J., Liu, Y. (2022), "Numerical modeling and experimental validation of Sliding-LRBs considering hysteretic strength degradation", *Engineering Structures*, 262, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114374>.
- [27] Chopra, A.K. (1995), "Dynamics of Structures", Prentice.
- [28] McCrum, D.P., Broderick, B.M. (2014), "Seismic assessment of a steel braced plan mass symmetric/asymmetric building structure", *Journal of Constructional Steel Research*, 101, 133-142.
- [29] Askouni, P.K., Karabalis, D.L. (2021), "SSI influence on the seismic response of asymmetrical small, low-rise R/C buildings", *Structures*, 32, 1355-1373.
- [30] Manoukas, G.E. (2018), "Evaluation of a multimode pushover procedure for asymmetric in plan and non-regular in elevation R/C buildings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 742-775.
- [31] Terzi, V.G., Athanatopoulou, A. (2021), "Influence of soil structure interaction effects on the real elastic axis of asymmetric buildings", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106775>.
- [32] Etedali, S., Sohrabi, M.R. (2016), "A proposed approach to mitigate the torsional amplifications of asymmetric base-isolated buildings during earthquakes", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(2), 768-776.
- [33] AISC-341 (2010), "Seismic provision for structural steel buildings", American Institute of Steel Construction: Chicago.
- [34] "مبحث ششم مقررات ملی ساختمان بارهای وارد بر ساختمان"، (۱۳۹۲)، وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان، ویرایش سوم.
- [35] Computers and Structures, Inc. (2008), ETABS Theory Manual. Version 9.2.0. Copyright Computers and Structures, Inc.
- [36] ABAQUS Documentation. (2012), Version 6.14.
- [37] "مبحث پنجم مقررات ملی ساختمان مصالح و محصولات ساختمانی"، (۱۳۹۲)، وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان، ویرایش سوم.
- [38] Hibbit, D.B.K., Sorenson, P. (2004), ABAQUS Analysis User's Manual. Hibbit, Karlsson & Sorenson Inc, USA.
- [39] "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰"، (۱۳۸۹)، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش چهارم.
- [40] Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. (1993), *An Introduction to Seismic Isolation*. Wiley: Hoboken, NJ, USA.
- [41] Zheng, W., Wang, H., Li, J., Shen, H. (2020), "Parametric study of superelastic-sliding LRB system for seismic response control of continuous bridges", *Journal of Bridge Engineering*, 25(9), 04020062.
- [42] Komur, M.A. (2016), "Soft-story effects on the behavior of fixed-base and LRB base-isolated reinforced concrete buildings", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 381-391.
- [43] Providakis, C.P. (2008), "Effect of LRB isolators and supplemental viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations", *Engineering Structures*, 30(5), 1187-1198.
- [44] Usta, P. (2021), "Investigation of a Base-isolator system's effects on the seismic behavior of a historical structure", *Buildings*, 11, 217.
- [45] International Conference of Building Officials. (1997), *Uniform Building Code*. Whittier, CA.
- [46] Muhi, F.H., Mouli, D.C., Kumar, K.S., Babu, T.H. (2016), "Comparative behavior of structure with and without base isolation devices and detailed study on retrofitting of structures using SAP 2000", *International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*, 8(4), 643-649.
- [47] Gazi, H., Alhan, C. (2019), "Reliability of elastomeric-isolated buildings under historical earthquakes with/without forward-directivity effects", *Engineering Structures*, 195, 490-507.
- [48] Kelly, J.M. (1997), *Earthquake-Resistant Design with Rubber*. 2nd ed. London: Springer-Verlag.
- [49] Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. (1993), *An Introduction to Seismic Isolation*. London: John Wiley and Sons.
- [50] "نشریه ۳۶۰، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود"، (۱۳۹۲)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول.
- [51] "مبحث ششم مقررات ملی ساختمان بارهای وارد بر ساختمان"، (۱۳۹۸)، وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان، ویرایش چهارم.
- [52] Hejazi, F., Mohammadi Esfahani, H. (2021), *Interpretive Solutions for Dynamic Structures Through ABAQUS Finite Element Packages*. CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, LLC.
- [53] Torabi, H., Rayhani, M. (2014), "Three dimensional finite element modeling of seismic soil structure interaction in soft soil", *Computers and Geotechnics*, 60, 9-19.

