



Research Article

Numerical Analysis and Optimization of Spring-Damper Model for Evaluating Soil-Structure Interaction in Semi-Buried Heavy Structures Under Seismic Loads

Farhad Pirmohammadi Alishah*¹, Kamal Emami²

*1**- Assistant Professor, Islamic Azad University, Shabestar Branch, Shabestar, Iran.

2- Assistant Professor, Islamic Azad University, Shabestar Branch, Shabestar, Iran.

Received: 16 April 2025; Revised: 23 May 2025; Accepted 24 May 2025; Published 22 June 2025

Abstract:

Soil-structure interaction (SSI) plays a crucial role in realistically predicting the behavior of structures compared to rigid base assumptions. In this study, the seismic response of semi-buried heavy structures was investigated using a mass-spring-damper model to capture SSI effects. Eleven soil samples with diverse behavioral characteristics were considered to compare the responses of structures with rigid supports and those with flexible, soil-supported bases. Numerical models were developed and analyzed using SAP2000 software. To ensure the reliability of the results, a benchmark SSI study from the literature was selected for validation, demonstrating an acceptable level of accuracy and convergence. Key soil properties for common construction soils were incorporated. Following careful selection and scaling of appropriate earthquake records according to Iranian seismic code (Standard No. 2800), nonlinear dynamic analyses were conducted. The findings clearly illustrate the significance of SSI, particularly for silty soils, where the interaction effect is pronounced. Incorporating SSI led to a considerable increase in base shear values, underscoring the necessity of accounting for these effects in the seismic design of heavy, semi-buried structures.

Keywords: *Soil-structure interaction, Seismic analysis, Semi-buried structures, Spring-damper model, Nonlinear dynamic analysis*

Cite this article as: Pirmohammadi alishah, F. and Emami, K. (2025). Numerical Analysis and Optimization of Spring-Damper Model for Evaluating Soil-Structure Interaction in Semi-Buried Heavy Structures Under Seismic Loads. *Civil and Project*, 7(4), -. <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.524306.1368>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه

<http://www.cpjournals.com/>

تحلیل عددی و بهینه‌سازی مدل فنر-میراگر برای ارزیابی اندرکنش خاک-سازه در سازه‌های سنگین نیمه‌مدفون تحت بارهای لرزه‌ای

فرهاد پیرمحمدی علیشاه^{۱*}، کمال امامی^۲

*- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران

۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران

تاریخ دریافت: ۲۷ فروردین ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۲ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۰۳ خرداد ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ تیر ۱۴۰۴

چکیده:

اندرکنش بین سازه و محیط خاک تکیه‌گاهی آن، رفتار واقعی سازه را به طور قابل توجهی در مقایسه با رفتار سازه با تکیه‌گاه صلب، تغییر می‌دهد. در این تحقیق جهت مقایسه رفتاری سازه‌های با تکیه‌گاه صلب و سازه‌های قرار گرفته بر روی سیستم جرم و فنر از ۱۱ نمونه خاک با مشخصات رفتاری مختلف استفاده گردیده است. مدل‌های عددی در نرم‌افزار SAP2000 تهیه شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. پیش از انجام مدل‌سازی عددی و جهت تامین اعتبار تحقیق اقدام به صحت‌سنجی یکی از مطالعات انجام گرفته در زمینه اندرکنش خاک و سازه گردید. نتایج صحت‌سنجی دارای میزان خطای قابل قبول بوده و شرایط لازم برای انجام ادامه تحقیق را فراهم نمود. با توجه به فراوان بودن انواع خاک به انتخاب چند نمونه از خاک‌های رایج در عملیات سازه‌ای بسنده گردید. پس از انتخاب رکوردهای مناسب برای انجام تحلیل و مدل‌سازی عددی با توجه به نیازهای مطالعاتی اقدام به انتخاب خروجی‌های مورد نیاز شد. جهت انجام تحلیل صحیح، رکوردهای انتخاب شده بر اساس ضوابط آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ همپایه گردیده و از تحلیل غیرخطی دینامیکی استفاده گردید. نتایج مطالعات با توجه به مدل‌سازی‌های انجام گرفته حاکی از حائز اهمیت بودن در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک و سازه می‌باشد. نتایج این مطالعات حاکی از اهمیت بسزای در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک و سازه علی‌الخصوص در خاک‌های سیلتی می‌باشد. همچنین با در نظر گرفته شدن اثرات اندرکنش خاک و سازه مقادیر برش پایه به صورت محسوس افزایش پیدا می‌کند که اهمیت بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه را بیش از پیش حائز اهمیت می‌نماید.

کلمات کلیدی:

اندرکنش خاک و سازه، تحلیل لرزه‌ای، سازه‌های نیمه‌مدفون، مدل فنر-میرایی، تحلیل دینامیکی غیرخطی

۱- مقدمه

اندرکنش خاک و سازه یکی از مسایل بسیار مهمی محسوب می گردد. خصوصاً برای سازه های سنگین و سخت که بر زمین های انعطاف پذیر ساخته شده اند این مساله پاسخ های سازه را تا حد قابل توجهی تغییر می دهد. بنابراین تاثیرات این اندرکنش در پاسخ های دینامیکی سازه در نظر گرفته شود. هنگامی که در مورد زمین لرزه صحبت میکنیم بیشتر به میزان و زمان پاسخ دهی شکل پذیری سیستم مقاومت جانبی سازه در برابر زلزله می پردازیم و کمتر اثرات رفتار زیرین خاک سازه را مد نظر میگیریم. طی وقوع یک پدیده زمین لرزه و بعد از آن زمین زیر سازه متحمل تغییر شکل های می شود که از شالوده سازه بر آن وارد می شود به همین ترتیب پاسخ دینامیکی سازه متاثر از رفتار تغییر یافته زیرین خاک خواهد بود. پاسخ لرزه ای یک سازه به عوامل متعددی نظیر نوع ساختگاه، مشخصات حرکت زمین و خاک زیرین اطراف سازه و ویژگی دینامیکی سازه وابسته است. برای سازه هایی که بر سنگ بستر و یا خاک های با سختی زیاد ساخته می شوند حرکت فنداسیون واقعا حرکت زمین می باشد که در تراز روی خاک ایجاد می شود که در اصطلاح به آن حرکت سطح آزاد زمین گفته میشود ولی در خاک های نرم این تعریف متفاوت از سیستم قبل می باشد. دلیل این تفاوت را باید در نحوه بازتاب و پراکندگی امواج لرزه ای منتشر شده در خاک فنداسیون سازه و همچنین انرژی تشعشعی ناشی از سازه جستجو کرد. به همین خاطر اثرات تغییر شکل و حرکت زمین در خاک زیرین سازه با حرکت سطح آزاد زمین در حالت قبل فرق اساسی دارد. از این رو پاسخ دینامیکی یک سازه بنا شده بر لایه های خاک نرم از نظر دامنه و محتوای فرکانسی اساساً با پاسخ دینامیکی سازه مشابه، بنا شده در سنگ بستر یا با خاک هایی با سختی بیشتر متفاوت می باشد (Jung, 2009).

اثرات اندرکنش خاک و سازه معمولاً در سه گروه دسته بندی می شود:

(الف) افزایش پیروی اصلی سیستم خاک و سازه (که بر خاک انعطاف پذیر و یا نرم ساخته شده اند)

(ب) تغییر در میرایی سیستم خاک و سازه که معمولاً همواره رو به افزایش است (که وابسته به ظرفیت جذب و استهلاک انرژی در خاک زیرین سازه و میرایی مصالح)

(ج) تغییر در پاسخ های لرزه ای سیستم مستقیم یا غیر مستقیم وابسته به دو آیتیم طیف شتاب افقی و تغییر در نیروی درونی اعضا می باشد.

اندرکنش خاک و سازه (SSI) یکی از مسائل اساسی در تحلیل لرزه ای سازه های سنگین و نیمه مدفون است که رفتار دینامیکی آن می تواند به طور قابل ملاحظه ای تحت تاثیر خواص خاک و شرایط پی قرار گیرد (Kausel, 2020; & Kaynia). Zhang et al., (2022) مطالعات نشان داده است که مدل سازی صحیح این اندرکنش می تواند تاثیر چشمگیری در افزایش دقت پیش بینی عملکرد سازه و کاهش آسیب های لرزه ای داشته باشد (Patra et al., 2023). پژوهش های معاصر نشان داده اند که غفلت از اندرکنش خاک-سازه، منجر به ارزیابی غیرواقعی نیروهای لرزه ای می شود (Khosravikia et al., 2019; Chen et al., 2023).

در سال های اخیر، توجه به اندرکنش خاک-سازه (Soil-Structure Interaction, SSI) در طراحی لرزه ای سازه های سنگین و نیمه مدفون نظیر مخازن زیرزمینی، سازه های هسته ای و زیرساختی افزایش یافته است. ساده انگاری رفتار بستر خاک می تواند منجر به خطاهای اساسی در پیش بینی پاسخ لرزه ای سازه شود، به ویژه وقتی بخش قابل توجهی از سازه در خاک مدفون است. سازه های نیمه مدفون اغلب زیر بارهای لرزه ای، پاسخ های متفاوتی نسبت به سازه های سطحی بروز می دهند. عدم درک کافی از رفتار دینامیکی خاک اطراف و اندرکنش بین آن و سازه می تواند منجر به طراحی های غیرایمن یا غیراقتصادی گردد. مدل سازی دقیق این اندرکنش حیاتی است. با تحقیق بیشتر هونگ و همکارانش در سال ۲۰۰۷ در زمینه المان های محدود این روش در بین محققان توجه بیشتری قرار گرفت. در حالت کلی پاسخ سازه وابسته به ویژگی های خاک مشخصات دینامیکی موجود نوع فنداسیون سازه و مشخصات فیزیکی سازه می باشد. برای مثال رسوبات نرم خاک میتواند منجر به طولانی شدن دوره تناوب امواج لرزه ای در سازه شود. گسیختگی خاک می تواند پاسخ لرزه ای سازه را بدتر کند. تاثیرات متقابل ساختار خاک میان سازه و حد متوسط ژئولوژیکی تحت بار لرزه ای بر سازه های سنگین بیشتر اهمیت دارد. با وجود اینکه در سازه های سبک و با

اهمیت کم میتوان از اثرات اندرکنش خاک و سازه صرف نظر کرد ولی در سازه های سنگین مانند ساختمان های بلند مرتبه و بزرگراه های طولانی اندر کنش خاک و سازه جز جدایی ناپذیر فرایند طراحی می باشد. در این تحقیق به سه هدف عمده پرداخته شده و در کنار آن برخی از پارامترهای رفتاری سازه مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

سه هدف عمده در این تحقیق عبارتند از:

الف) بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه در رفتار دینامیکی سازه

ب) بررسی تاثیر اندرکنش خاک و سازه در تغییرات در لایه های خاک در زیر سازه

ج) بررسی تاثیر تغییرات لایه های خاک در ساختگاه ها

۲- پیشینه تحقیق

اندرکنش خاک و سازه (SSI) به عنوان یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار لرزه ای سازه های سنگین و نیمه مدفون شناسایی شده است. بررسی های متعددی نشان داده اند که نادیده گرفتن اثر SSI می تواند منجر به طراحی غیرایمن یا غیرواقعی سازه ها گردد، به ویژه در خاک های نرم (Kaynia & Kausel, 2020; Zhang et al., 2022; Chen et al., 2023). تحقیقات اخیر مبتنی بر مدل سازی عددی و آزمایشگاهی بیانگر آن است که در نظر گرفتن اثرات واقع گرایانه پی و لایه های خاک، نقش قابل توجهی در افزایش یا کاهش برش پایه سازه دارد (Alavi & Gandomzadeh, 2020; Khosravikia et al., 2019). نمونه هایی از این مطالعات عبارتند از:

- Zhang et al. (2022) با بررسی تحلیلی اثرات SSI در سازه های زیرزمینی، نشان دادند که اندرکنش خاک-سازه می تواند منجر به افزایش قابل توجه پاسخ لرزه ای شود.
- Chen et al. (2023) با مدل سازی عددی، افزایش برش پایه تا ۳۵٪ را در خاک های سیلتی گزارش کردند.
- Khosravikia et al. (2019) اهمیت استفاده از مدل فنر-میراگر معادل را برای شبیه سازی دقیق تر سازه هایی که روی خاک های نرم قرار دارند، تایید نموده اند.

در این پژوهش، رفتار ۱۱ مدل سازه ای با مشخصات ژئوتکنیکی مختلف با استفاده از نرم افزار SAP2000 مورد تحلیل قرار گرفته است. ابتدا صحت سنجی مدل با مطالعات معتبر پیشین (Chen, X. & Shi, Y. (2013)) انجام شد که نتایج آن حاکی از دقت قابل قبول مدلسازی بود. در این تحقیق از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی مطابق با آخرین ویرایش آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ایران استفاده گردید. رکوردهای زلزله با توجه به ویژگی های طیفی و شرایط خاک های مورد مطالعه انتخاب و همپایه سازی شد (Jin et al., 2022) و (Stewart et al., 1999) نتایج نشان داد که اثرات SSI به ویژه در خاک های سیلتی می تواند منجر به افزایش قابل توجه (بین ۲۰-۳۵٪) در مقادیر برش پایه شود (Chen et al., 2023). مطالعات انجام شده با استفاده از روش های پیشرفته مدلسازی (Alavi & Gandomzadeh, 2020) تأیید می کند که در نظر نگرفتن اندرکنش خاک و سازه می تواند منجر به تخمین نادرست از پاسخ سازه، به ویژه در خاک های نرم گردد. این تحقیق بر اهمیت در نظر گرفتن SSI در طراحی سازه های واقع بر خاک های سیلتی تأکید دارد و نشان می دهد که این اثر می تواند پارامترهای طراحی را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد (Khosravikia et al., 2019) و (Mylonakis & Gazetas, 2000).

۳- روش تحقیق

در این تحقیق، به منظور بررسی و مقایسه رفتار لرزه ای سازه های سنگین نیمه مدفون با تکیه گاه صلب و سازه های قرار گرفته بر روی سیستم جرم-فنر، رویکرد مدل سازی عددی اتخاذ شده است. در ادامه، مراحل اصلی روش تحقیق به شرح زیر است:

۳-۱- مدل سازی عددی و معرفی نرم افزار

مدل سازی عددی سازه ها و سیستم خاک-سازه با استفاده از نرم افزار SAP2000 انجام شده است. برای شبیه سازی بهتر اندرکنش، دو حالت مختلف در نظر گرفته شد:

حالت اول: سازه با تکیه گاه صلب

حالت دوم: سازه با سیستم فنر-میراگر معادل که انعطاف خاک با پارامترهای مختلف منعکس می گردد.

۳-۲- مشخصات نمونه ها و پارامترهای مدل

در مجموع، یازده نوع خاک با خصوصیات ژئوتکنیکی متفاوت (مانند سرعت موج برشی، وزن واحد حجم، میرایی، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون) انتخاب و مدل سازی شد. ویژگی های مکانیکی خاک ها بر اساس جدول ۱ آورده شده اند. سازه مدل شده، قاب خمشی فولادی متوسط با سیستم دو بعدی می باشد.

۳-۳- انتخاب و همپایه سازی رکوردهای زلزله

برای تحلیل دینامیکی از سه رکورد زلزله مشهور (از جمله رکورد TCU۰۴۵ زلزله چی چی تایوان-۱۹۹۹) استفاده شد. رکوردها مطابق با آیین نامه استاندارد ۲۸۰۰ ایران انتخاب و همپایه سازی (Scaling) شدند تا اثرات مختلف طیفی و شرایط خاک پوشش داده شود.

۳-۴- روش تحلیل

به منظور اعتبارسنجی مدل عددی، نخست مدل تحقیق چن و شی (۲۰۱۳) (Chen & Shi) بازسازی و نتایج مدل حاضر با داده های مستند مقایسه شد. سپس، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی (Nonlinear Time History Analysis) بر روی هر دو حالت انجام شد تا رفتار لرزه ای در شرایط مختلف خاک و تکیه گاه بررسی شود. خروجی های اصلی شامل مقادیر جابجایی، برش پایه، تغییرات پریرود طبیعی و پاسخ مودال اعضا استخراج شد.

۳-۵- اعتبارسنجی

اعتبار مدل سازی عددی از طریق مقایسه نتایج با پژوهش معتبر بین المللی (Chen & Shi, 2013)؛ (Zhang et al., 2022) مورد ارزیابی قرار گرفت. همخوانی نتایج نشان دهنده قابلیت بالای مدل ارائه شده در شبیه سازی اندرکنش خاک-سازه بود.

۳-۱- مدل سازی عددی و معرفی نرم افزار SAP2000

نرم افزار SAP2000 یکی از قوی ترین و پرکاربردترین نرم افزارهای مهندسی سازه در جهان است که توسط شرکت CSI (Computers and Structures, Inc.) توسعه داده شده است. این نرم افزار برای تحلیل و طراحی انواع سازه ها (بتنی، فولادی، پل ها، سدها، سازه های صنعتی و ...) مورد استفاده قرار می گیرد. در ادامه به معرفی کامل SAP2000، کاربردهای آن، قابلیت ها و ارتباطش با موضوع "مدل فنر-میراگر و اندرکنش خاک-سازه" می پردازیم. SAP2000 دارای محیط گرافیکی کاربرپسند و قابلیت مدل سازی سه بعدی است. مبتنی بر تحلیل ماتریسی سازه ها است و می تواند انواع بارگذاری ها و تحلیل ها را پشتیبانی کند (استاتیکی، دینامیکی، مدلسازی غیرخطی و ...) و امکان استفاده از API و ماکرو جهت توسعه مدل های خاص کاربر وجود دارد. کاربرد این نرم افزار در مواردی نظیر مدل سازی و تحلیل قاب ها، دیوارهای برشی، طاق ها، سازه های مدفون و نیمه مدفون، تحلیل دینامیکی (روش طیفی و تاریخچه زمانی) و تحلیل غیرخطی، تحلیل اندرکنش خاک-سازه با مدل فنر-میراگر، تحلیل فونداسیون ها و پی های سطحی و عمیق و قابلیت مدلسازی اجزای خاص مانند میرایی های مختلف، جاذب ها و جداسازهای لرزه ای می باشد. مزایای استفاده از SAP2000 در پژوهش های عددی محیط کاربرپسند و دسترسی آسان به جداول و نتایج، الگوریتم های

تحلیلی قدرتمند با صحت تایید شده جهان و مناسب برای اعتبارسنجی مدل‌های ساده معادل یا مدل‌های عددی پیچیده‌تر می‌باشد. در SAP2000 این امکان وجود دارد که اندرکنش خاک-سازه را به صورت مدل فنر-میراگر تعریف کنید:

- تعریف مدل سازه: مدل سه‌بعدی سازه را با اعضای موردنظر (تیر، ستون، دیوار ...) ایجاد کنید.

- درج فنرها و میراگرها:

۱- در محل تماس پی یا کف و دیوار سازه با خاک، عضوهای فصل مشترک (Link) اضافه کنید.

۲- لینک‌ها را می‌توان در SAP2000 به عنوان فنر (Spring) یا میراگر (Damper) با سختی و میرایی دلخواه تعریف کرد.

۳- پارامترها را می‌توان بر اساس مدل‌های ژئوتکنیک مثلاً روابط (Gazetas) محاسبه و وارد نمود.

- تعیین مشخصات دینامیکی:

۱- تعریف شتابنگاشت زلزله (Time History) یا طیف پاسخ برای شبیه‌سازی بارگذاری لرزه‌ای.

- تحلیل و بررسی نتایج:

۱- مشاهده تغییر شکل‌ها، نیروی عکس‌العمل در فنرها، پاسخ دینامیکی سازه و ...

- راهنمای عملی:

• Link/Support Properties < Section Assign: تعریف سختی K و میرایی C برای هر Link

• Springs < Joints < Assign: اختصاص فنرهای خطی، غیرخطی یا میراگر

• Run Analysis < Analyze: اجرای تحلیل

۳-۲- مشخصات نمونه‌ها و پارامترهای مدل

با توجه به فرضیات تحقیق ۱۱ نمونه خاک با مشخصات فیزیکی متفاوت برای مدل‌های عددی در نظر گرفته شد. نمونه خاک‌های انتخاب شده متشکل از ۳ خاک رسی، ۲ یخ‌رفت، ۳ نمونه ماسه ای، ۲ نمونه مخلوط ماسه و شن و ۱ نمونه سیلتی می‌باشند. جهت فراهم نمودن شرایط مقایسه بین نمونه‌های انتخاب شده ۱ نمونه مدل اضافی بصورت تکیه‌گاه گیردار به مدل‌های عددی اضافه گردید. خاک یخ‌رفت عمدتاً در مناطق کوهستانی شمال غرب ایران، مخصوصاً در حواشی البرز و کوه‌های سهند و قره‌داغ گزارش شده است (محمودی و همکاران، ۲۰۲۲).

مطابق با مطالعات Wolf در سال ۱۹۸۹ مقادیر سختی و میرایی دورانی و محوری با استفاده از روابط زیر قابل استحصال

است:

$$k_x = \frac{8Ga}{2-\nu} \quad (۴-۱)$$

$$C_x = \frac{4.6}{2-\nu} \rho v_s a^2 \quad (۴-۲)$$

$$k_\theta = \frac{8Ga^3}{3(1-\nu)} \quad (۴-۳)$$

$$C_\theta = \frac{0.4}{1-\nu} \rho v_s a^4 \quad (۴-۴)$$

در روابط فوق G مدول برشی خاک، a ابعاد خاک معادلسازی شده با فنر، ν ضریب پواسون خاک، ρ چگالی خاک معادل سازی شده با فنر، v_s سرعت موج برشی در خاک، k سختی فنر و C میرایی فنر معادل می باشند. نمونه خاک های انتخاب شده و مشخصات خاک معادل سازی شده با فنر و میراگرهای معادل در جدول ۱ ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات خاک معادل سازی شده با فنر و میراگر

Soil Type	ν	G (kg/m ²)	V_s (m/s)	ρ (Kg/m ³)	k_x (kg/m)	k_θ (kg.m)	C_x (kg/s)	C_θ (kg.m ² /s)
Soft Clay	0.15	664805.21	150	1750	2874833	2085663	652703	123529
Hard Clay	0.25	3058103.98	250	2070	13979904	10873259	1360286	276000
Sandy Clay	0.25	5504587.16	330	2100	25163827	19571865	1821600	369600
Loose Glacial Till	0.2	3440366.97	350	2150	15290520	11467890	1923056	376250
Dense Glacial Till	0.2	18263676.52	480	2350	81171896	60878922	2882667	564000
Silty Sand	0.3	548890.46	255	1750	2583014	2091011	1207500	255000
Loose Sand	0.3	666509.84	270	1850	3136517	2539085	1351588	285429
Dense Sand	0.37	2418208.74	340	2100	11868509	10235804	2014969	453333
Loose Sand & Gravel	0.25	3995922.53	540	2070	18267074	14207725	2938217	596160
Dense Sand & Gravel	0.25	5871559.63	675	2150	26841415	20876656	3814714	774000
Silt	0.35	415298.07	200	1700	2013566	1703787	947879	209231

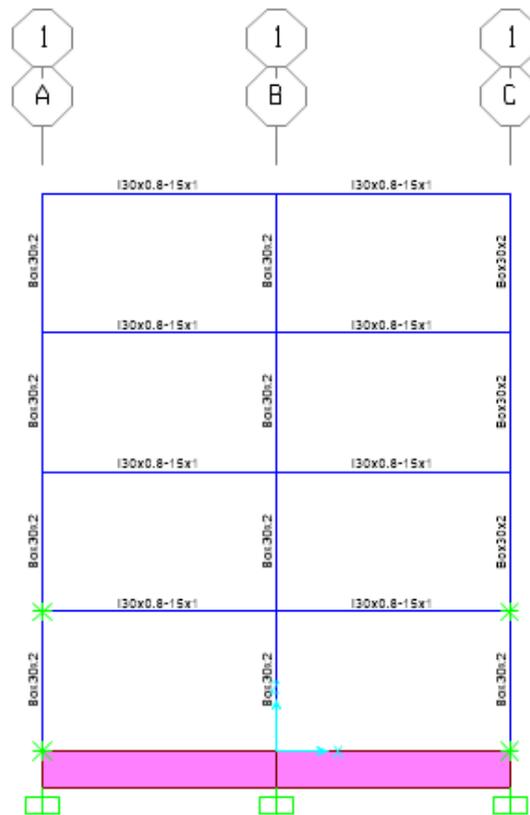
برای مدل سازی اندرکنش خاک-سازه، یکی از روش های مرسوم استفاده از مدل فنر-میراگر (Spring-Dashpot Model) است که در آن خاک به صورت مجموعه ای از فنرها (نماینده سختی خاک) و میراگرها (نماینده میرایی ذاتی خاک) مدل می شود. پارامترهای این مدل عبارتند از:

- سختی فنری (K): تابع مدول برشی خاک، هندسه پی و شرایط مرزی است.
- ضریب میراگر ζ : تابع میرایی مواد خاک و شرایط بارگذاری دینامیکی است.

برای سازه های نیمه مدفون، مدل سازی باید هم برای کف و هم برای دیوارهای جانبی انجام گیرد و اندرکنش سه بعدی در نظر گرفته شود. جهت بررسی اثرات اندرکنش خاک و سازه در سیستم سازه ای قاب خمشی متوسط فولادی ابتدا اقدام به انتخاب ساختمان ۴ طبقه با یک طبقه مدفون در زمین گردیده و مطابق با ضوابط مباحث ۶ و ۱۰ مقررات ملی ساختمان و آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، مورد تحلیل و طراحی قرار گرفت. یکی از دهانه های بحرانی ساختمان یاد شده به عنوان مدل پایه تحقیق حاضر انتخاب گردیده و بارهای وارد بر این دهانه مطابق با ضوابط مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان و با توجه به دهانه بارگیر آن در مدل اولیه، در نظر گرفته شد. فرضیات، آیین نامه ها و محاسبات مورد استفاده در طراحی ساختمان در جدول ۲ نشان داده شده است. در شکل ۲ مشخصات مقاطع انتخاب شده برای سیستم سازه ای ارائه گردیده است.

جدول ۱- آیین نامه ها، فرضیات و محاسبات مورد استفاده در طراحی مدل ها

آیین نامه های مورد استفاده	بارگذاری ثقیلی	مبحث ۶ مقررات ملی ساختمان				
	بارگذاری جانبی	آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰- ویرایش چهارم				
	طراحی	مبحث ۱۰ مقررات ملی ساختمان				
فرضیات اولیه	محل پروژه	شهر تبریز با خطر لرزه خیزی خیلی زیاد				
	تعداد طبقات	۴ طبقه (۱ طبقه مدفون در خاک)				
	سیستم سازه ای	قاب متوسط خمشی فولادی				
	مشخصات مصالح	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^2$, $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$				
	بارگذاری ثقیلی	$DL=800 \text{ kg/m}^2$, $LL=300 \text{ kg/m}^2$				
محاسبات مربوط به تحلیل ۴ طبقه	دوره تناوب (T)	ضریب بازتاب (B)	ضریب اهمیت (I)	ضریب رفتار (R)	شتاب مبنای (A)	ضریب زلزله (C)
	0.8623	2.75	1	5	0.35	0.1925



شکل ۲- مقاطع نهایی پس از تحلیل و طراحی برای سازه ۴ طبقه

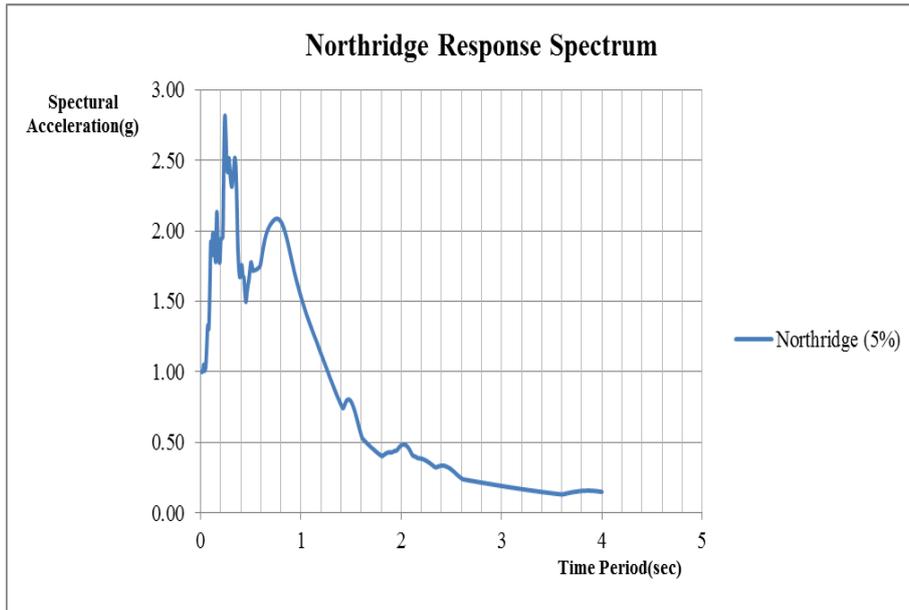
۳-۳- انتخاب و همپایه‌سازی رکوردهای زلزله

برای انجام تحلیل غیر خطی دینامیکی از سه رکورد زلزله استفاده شده است. مطابق آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم) چنانکه از سه زوج شتاب نگاشت برای انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی استفاده شود، خروجی های ماکسیمم هر یک از شتاب نگاشت ها برای اعمال در سازه در نظر گرفته می شود. زوج شتاب نگاشت های انتخاب شده مطابق استاندارد ۲۸۰۰ بایستی به روشی مناسب به مقیاس در آورده شوند. جهت انجام تحلیل های دینامیکی مطابق با ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ حداقل نیاز به ۳ رکورد زلزله وجود دارد. در این تحقیق ۳ رکورد Imperial، Northridge، El Centro و Valley جهت بررسی اثرات اندرکنش خاک سازه انتخاب گردیدند. دلیل انتخاب این سه زلزله (Northridge 1994، Imperial Valley 1979 و El Centro 1940) بدین خاطر می باشد که جزو رکوردهای شاخص با ویژگی های مختلف خاک، عمق و فاصله از کانون هستند که در مقالات متعدد معتبر برای تحلیل های مقایسه ای SSI استفاده شده است. همچنین مقدار شتاب بیشینه زمین (PGA) رکوردها مشابه با مقدار PGA برآورد شده برای شهر تبریز بر اساس ویژگی زلزله خیزی منطقه مرند-تبریز (حدود ۰/۳-۰/۳۵g طبق نقشه خطر لرزه ای و آیین نامه ۲۸۰۰) بوده، بنابراین از نظر شدت موثر در این منطقه، مقایسه مستقیم دارای اعتبار فنی است.

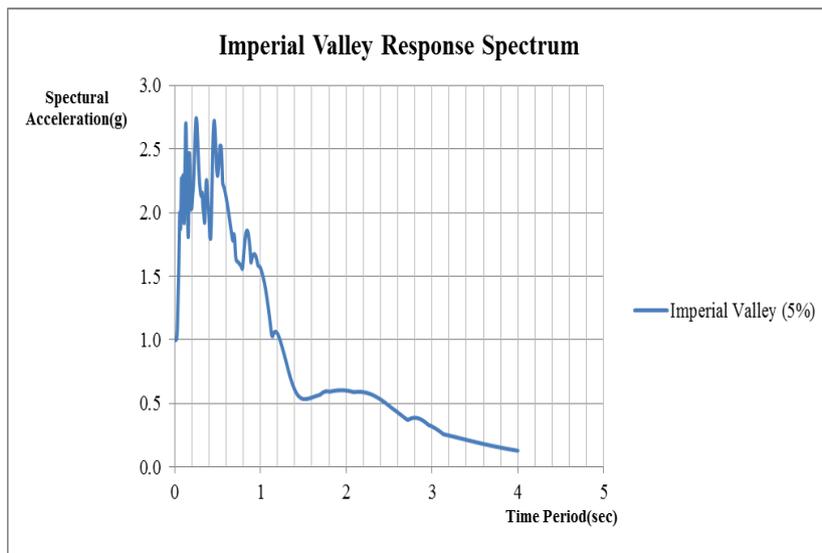
رکوردهای یاد شده بر اساس ضوابط ویرایش ۴ استاندارد ۲۸۰۰ و برای تحلیل ۲ بعدی سازه ها همپایه سازی گردیدند. با توجه به مشخصه رکوردهای انتخابی نیازی به اعمال ضریب همپایه سازی به رکورد ها وجود ندارد. در جدول ۴ مقدار شتاب حداکثری زمین در هر یک از زلزله های یاد شده ارائه گردیده است. در اشکال ۳ الی ۵ طیف پاسخ هر یک از زلزله های یاد شده برای میرایی ۵٪ استخراج و ارائه گردیده است. در شکل ۶ نیز طیف پاسخ نهایی با طیف طرح استاندارد اصلاح شده ارائه گردیده است.

جدول ۴- مقادیر حداکثر شتاب زمین برای رکوردهای انتخابی

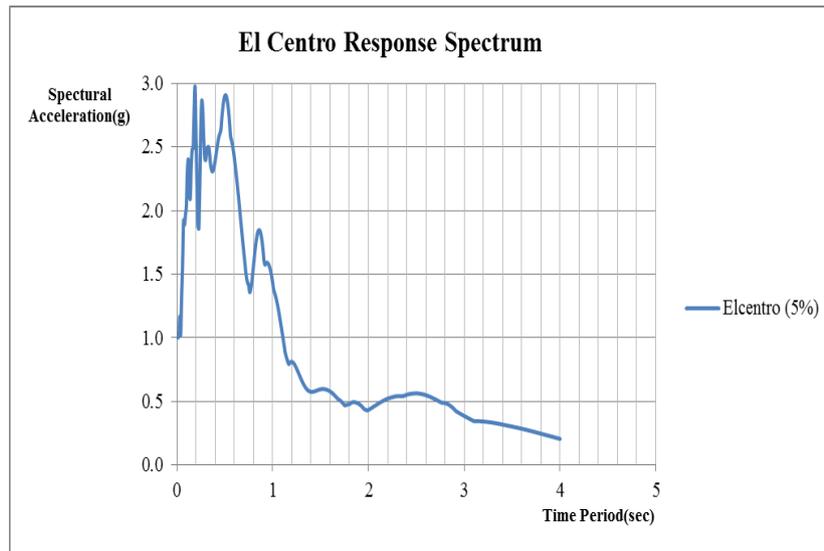
Record	PGA
Northridge	0.344
Imperial Valley	0.313
El Centro	0.319



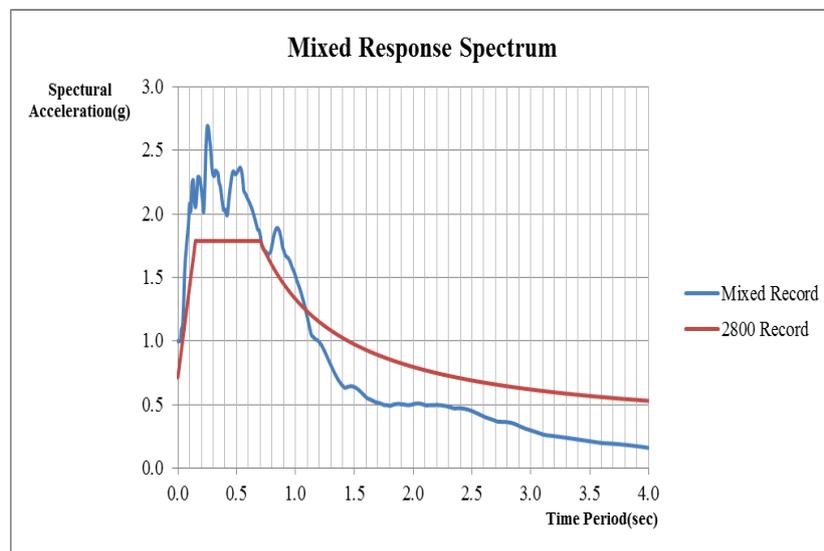
شکل ۳- طیف پاسخ زلزله Northridge



شکل ۴- طیف پاسخ زلزله Imperial Valley



شکل ۵- طیف پاسخ زلزله El Centro



شکل ۶- نمودار مقایسه ای طیف پاسخ نهایی و طیف طرح استاندارد

۴-۳- روش تحلیل

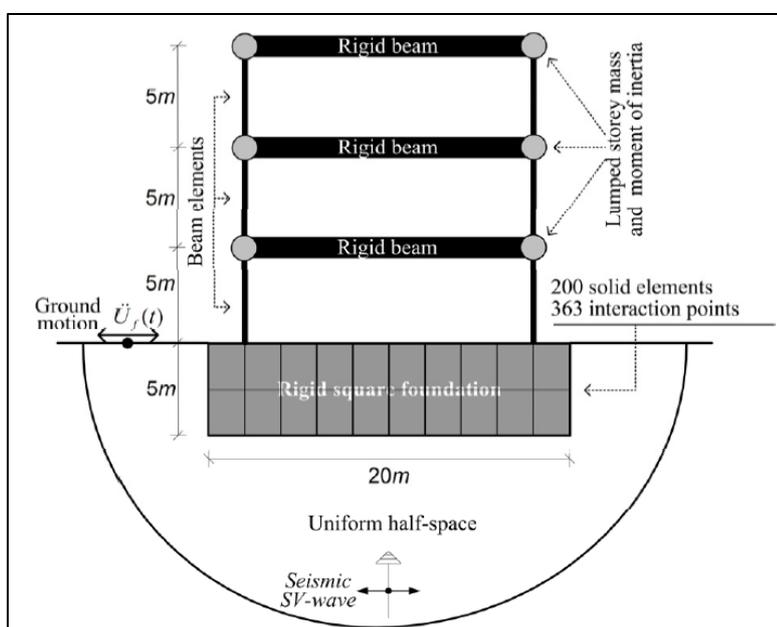
همانطور که پیشتر نیز اشاره گردید مدل های عددی انتخاب شده متشکل از ۱۲ مدل می باشد که یکی از مدل ها بر روی تکیه گاه صلب قرار می گیرد. مشخصات تمامی مدل ها یکسان بوده و تفاوت اصلی در خصوصیات خاک می باشد. در هر یک از مدل ها ۳ رکورد زلزله تشریح گردیده در بند ۴ به سازه اعمال می گردند. در تحلیل مدل های عددی در این تحقیق از روش دینامیکی غیر خطی مودال استفاده گردیده است. در این نوع از تحلیل با استخراج طیف طرح غیر خطی از هر یک از رکوردهای زلزله، بر اساس وزن موثر مودهای سازه میزان بار جانبی وارد بر آن محاسبه گردیده و به آن اعمال می گردد. در ادامه تحقیق به بررسی نتایج حاصل از تحلیل مدل های عددی پرداخته می شود.

۵-۳- اعتبارسنجی

در این تحقیق، برای اطمینان از دقت مدلسازی انجام شده، از مدل ارائه شده توسط Chen و Shi (2013) به عنوان مبنا استفاده گردید. این انتخاب به دلیل استفاده از روش مشابه (سیستم جرم-فنر) در مدلسازی اندرکنش خاک-سازه، در دسترس بودن کامل داده های تحقیق مذکور و پذیرش گسترده این مدل در مطالعات بین المللی مانند (Zhang et al., 2022) می باشد.

مدل مرجع با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 بازسازی شد که شامل: سیستم سازه‌ای قاب خمشی فولادی متوسط، رفتار صلب برای پی و تیرها و توزیع جرم متمرکز در نقاط اتصال تیر-ستون است. از رکورد افقی ایستگاه TCU045 در زلزله ۱۹۹۹ چی-چی تایوان استفاده شد که: $PGA = 0.36g$ ، مدت زمان مؤثر $= 40\%$ ثانیه و مطابق با استانداردهای بین‌المللی (ASCE 7-22) است. شاخص‌های مقایسه شامل طیف پاسخ شتاب در تراز سقف طبقه آخر، تغییر مکان‌های نسبی طبقات و توزیع برش پایه می‌باشد. مقایسه نتایج نشان داد حداکثر اختلاف در طیف پاسخ: $3/4\%$ (در محدوده فرکانس $2/5-3/5$ هرتز)، اختلاف میانگین تغییر مکان‌های نسبی $2/1\%$ و تفاوت در توزیع برش پایه کمتر از $2/8\%$ می‌باشد. منابع احتمالی اختلاف شامل: تفاوت‌های جزئی در الگوریتم‌های حل عددی بین نسخه‌های مختلف نرم‌افزار، تقریب‌های انجام شده در مدلسازی اجزای غیرسازه‌ای و تفاوت در روش‌های محاسبه میرایی (Khosravikia et al., 2019) می‌باشد. با توجه به اینکه کلیه اختلاف‌ها در محدوده قابل قبول (کمتر از 5%) قرار داشتند (Stewart et al., 2020)، مدل حاضر از اعتبار کافی برای انجام تحلیل‌های اصلی برخوردار است. این سطح از دقت برای مطالعات پارامتریک و مقایسه‌ای کاملاً مناسب تشخیص داده شد.

مشخصات این مدل نیز در جدول ۵ نشان داده شده است.



شکل ۷- مدل انتخاب شده جهت انجام صحت‌سنجی (چن و شی ۲۰۱۳)

جدول ۵- مشخصات مدل صحت‌سنجی (چن و شی ۲۰۱۳)

Zone	Parameter
Uniform Half-space	Poisson's ratio: 0.25 Shear-wave velocity: 500 m/s Material density: 2 Mg/m ³ Damping ratio for P-wave: 0.0005 Damping ratio for S-wave: 0.001
Square Foundation	Side length: 20 m Embedment depth: 5 m Foundation mass: 5000 Mg Foundation inertia: 177083 Mg·m ² Static stiffness: 4.16×10^7 kN/m Static stiffness: 5.58×10^9 kN·m
Upper structure	Storey mass: 2000 Mg Storey inertia: 66708 Mg·m ² Storey stiffness: 2.08×10^7 kN/m Model damping ratio: 5%

۴- مقایسه نتایج

پس از تحلیل دینامیکی غیر خطی هر یک از مدل ها نتایج در این قسمت نشان داده شده و مقایسه می گردند. نتایج مورد نظر برای مقایسه در این قسمت عبارت از مودهای ارتعاشی، برش پایه، تغییر مکان بام و جابه جایی طبقات می باشند.

۴-۱- مودهای نوسان سازه

جهت افزایش کارایی تحقیق خاک های با خواص مشابه مورد بررسی در گروه های مجزا دسته بندی گردیده و نتایج استحصال شده از مدل های اندرکنش خاک و سازه مستقلا با نتایج حاصل از تکیه گاه صلب مورد مقایسه قرار گرفته اند. در جداول ۶ الی ۱۰ مشخصات مودهای اصلی نوسان به ترتیب برای گروه خاک های رسی، یخرفتی، ماسه ای، ترکیب ماسه و شن و سیلتی به همراه مقایسه اختلاف در مودهای نوسان خاک های متفاوت ارائه گردیده است.

جدول ۶- مشخصات مودهای نوسان برای گروه خاک های رسی

Mode No	Time Period of Clay Base (sec)						
	Fix Based	Soft Clay	Difrence %	Hard Clay	Difrence %	Sandy Clay	Difrence %
1	0.862	1.049	22%	0.932	8%	0.911	6%
2	0.226	0.281	25%	0.249	10%	0.242	7%
3	0.104	0.202	94%	0.116	11%	0.111	7%
4	0.070	0.188	167%	0.115	64%	0.098	39%
5	0.052	0.150	187%	0.114	117%	0.096	84%
6	0.052	0.134	156%	0.102	94%	0.090	72%
7	0.024	0.092	276%	0.070	185%	0.061	148%
8	0.018	0.084	370%	0.045	154%	0.035	98%
9	0.018	0.033	84%	0.030	66%	0.028	58%
10	0.016	0.025	60%	0.023	43%	0.022	38%
11	0.015	0.023	56%	0.022	49%	0.022	46%
12	0.013	0.020	59%	0.018	38%	0.017	33%

جدول ۷- مشخصات مودهای نوسان برای گروه خاک های یخرفتی

Time Period of Glacial Till Base (sec)					
Mode No	Fix Based	Loose Glacial	Difrence %	Dense Glacial	Difrence %
1	0.862	0.929	8%	0.880	2%
2	0.226	0.248	10%	0.233	3%
3	0.104	0.114	10%	0.107	3%
4	0.070	0.112	59%	0.079	12%
5	0.052	0.111	113%	0.072	38%
6	0.052	0.100	90%	0.072	37%
7	0.024	0.068	180%	0.044	79%
8	0.018	0.044	144%	0.026	47%
9	0.018	0.029	64%	0.022	22%
10	0.016	0.022	42%	0.020	30%
11	0.015	0.022	49%	0.020	36%
12	0.013	0.018	37%	0.016	28%

جدول ۸- مشخصات مودهای نوسان برای گروه خاک های ماسه ای

Time Period of Sand Base (sec)							
Mode No	Fix Based	Silty Sand	Difrence %	Loose Sand	Difrence %	Dense Sand	Difrence %
1	0.862	1.062	23%	1.039	20%	0.940	9%
2	0.226	0.284	26%	0.279	23%	0.251	11%
3	0.104	0.210	102%	0.195	88%	0.121	17%
4	0.070	0.196	178%	0.182	158%	0.121	71%
5	0.052	0.153	192%	0.148	182%	0.116	121%
6	0.052	0.136	159%	0.133	153%	0.106	102%
7	0.024	0.095	288%	0.090	268%	0.072	196%
8	0.018	0.086	378%	0.082	361%	0.049	172%
9	0.018	0.033	85%	0.033	83%	0.030	68%
10	0.016	0.025	62%	0.025	60%	0.023	44%
11	0.015	0.023	57%	0.023	56%	0.022	50%
12	0.013	0.020	59%	0.020	58%	0.018	40%

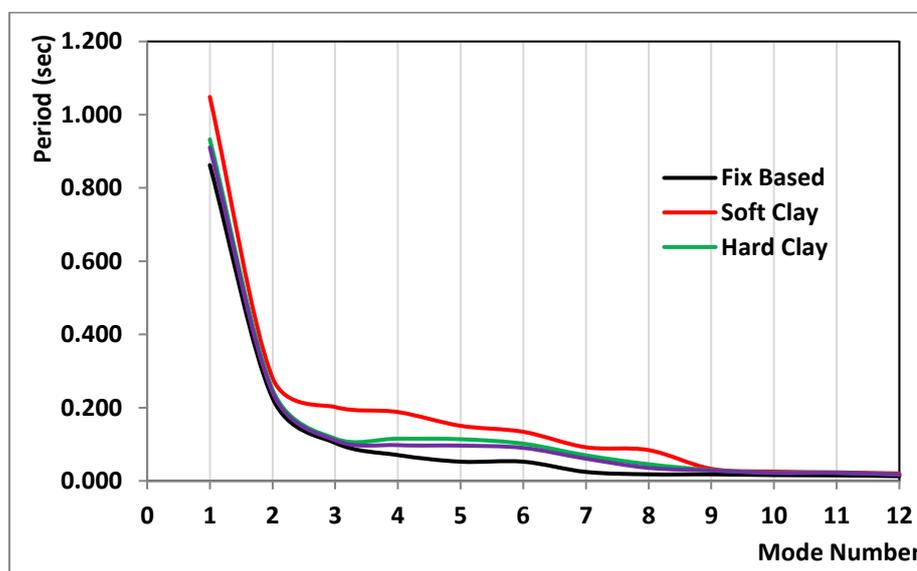
جدول ۹- مشخصات مودهای نوسان برای گروه خاک های مخلوط ماسه و شن

Time Period of Sand & Gravel Base(sec)													
Mo	de No	Fix	Based	Loose	Sand &	Gravel	Difren	ce %	Dense	Sand &	Gravel	Difren	ce %
1		0.8	62		0.923		7%		0.909			5%	
2		0.2	26		0.246		9%		0.241			7%	
3		0.1	04		0.114		10%		0.111			7%	
4		0.0	70		0.114		62%		0.096			36%	
5		0.0	52		0.112		114%		0.095			80%	
6		0.0	52		0.101		93%		0.089			70%	
7		0.0	24		0.066		168%		0.060			144%	
8		0.0	18		0.041		127%		0.034			93%	
9		0.0	18		0.030		65%		0.028			57%	
10		0.0	16		0.022		43%		0.022			38%	
11		0.0	15		0.022		49%		0.022			45%	
12		0.0	13		0.018		38%		0.017			33%	

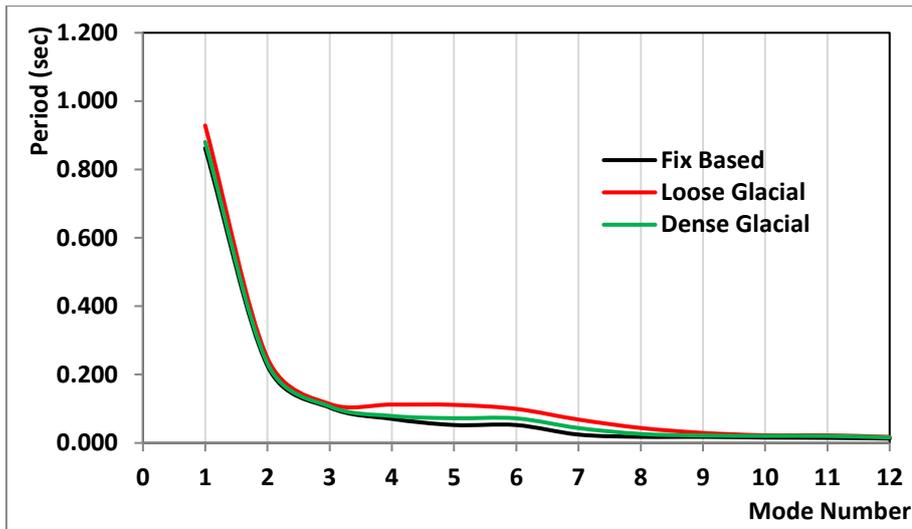
جدول ۱۰- مشخصات مودهای نوسان برای گروه خاک های سیلتی

Time Period of Silt Base (sec)						
Mode	No	Fix	Based	Silt	Difrence	%
1		0.862		1.096		21%
2		0.226		0.292		23%
3		0.104		0.230		55%
4		0.070		0.217		68%
5		0.052		0.159		67%
6		0.052		0.140		63%
7		0.024		0.103		76%
8		0.018		0.088		80%
9		0.018		0.033		46%
10		0.016		0.026		39%
11		0.015		0.024		36%
12		0.013		0.020		38%

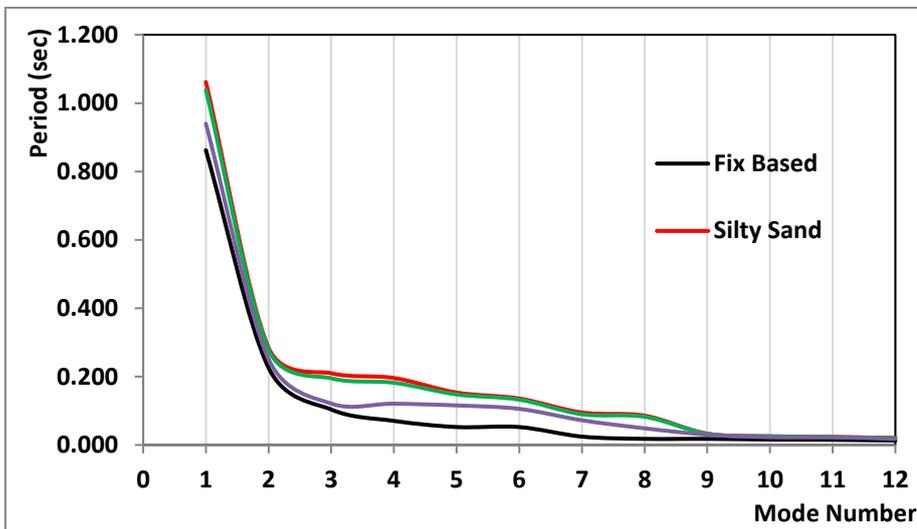
با ملاحظه و بررسی نتایج جداول ۶ الی ۱۰ ملاحظه می گردد اختلاف عمده در نوسان سازه در مدهای ۲ الی ۸ حادث می گردد. بیشترین اختلاف در مود نوسان، در خاک های رسی متعلق به رس نرم در مود ۸ ام نوسان می باشد. با تعمق در نتایج جدول ۵ می توان نتیجه گرفت که با افزایش مدول الاستیسیته میزان اختلاف در مود های نوسان سازه با تکیه گاه صلب و سازه دارای اندرکنش با خاک، کاهش می یابد. نتایج مشابه از بررسی جداول مربوط به خاک های یخرفتی و ماسه ای و ترکیب ماسه و شن قابل استحصال می باشد. بیشترین اختلاف در مود نوسان در کل های خاک های مورد مطالعه متعلق به خاک ماسه ای سیلتی و در مود ۸ ام نوسان می باشد. میزان اختلاف در پیوند نوسان در مود ۸ ام ۳۷۸٪ می باشد. با توجه به نتایج جدول ۹ ملاحظه می گردد که اثرات اندرکنش خاک و سازه کمترین تاثیر را بر روی خاک های سیلتی دارد چراکه نتایج ارائه گردیده در این جدول با نتایج سایر جداول تفاوت قابل ملاحظه ای دارند. بنابراین می توان نتیجه گرفت اثرات اندرکنش خاک و سازه در خاک های سیلتی با توجه به عدم تغییر قابل توجه پیوند ارتعاشی سازه تاثیر قابل ملاحظه ای بر برش پایه و میزان جذب انرژی نخواهد گذاشت. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول فوق می توان نتیجه گرفت اثرات اندرکنش خاک و سازه در مدهای بالاتر ارتعاشی و علی الخصوص مدهای میانی در تمامی خاک ها و بویژه خاک های ماسه ای و رسی قابل توجه بوده و در صورت قابل ملاحظه بودن درصد مشارکت جرمی مدهای میانی تاثیر بسزایی بر برش پایه، انرژی مستهلک شده و جابه جایی نسبی طبقات خواهد داشت. میزان اختلاف در مود اول نوسان در خاک های سست نسبت به خاک های متراکم بطور قابل ملاحظه ای بیشتر می باشد. در اشکال ۸ الی ۱۲ نتایج نموداری مدهای نوسانی سازه به تفکیک گروه خاک ارائه گردیده است.



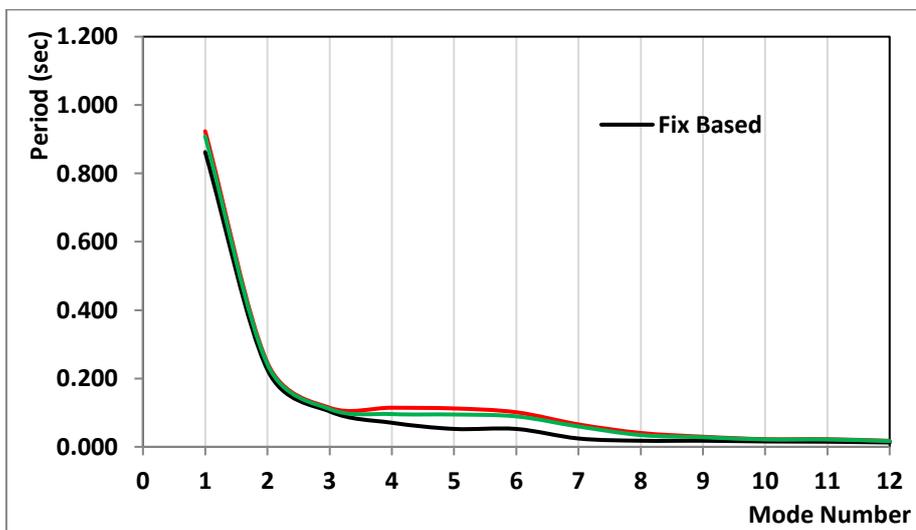
شکل ۸- نمودار مود های ارتعاشی سازه برای گروه خاک های رسی



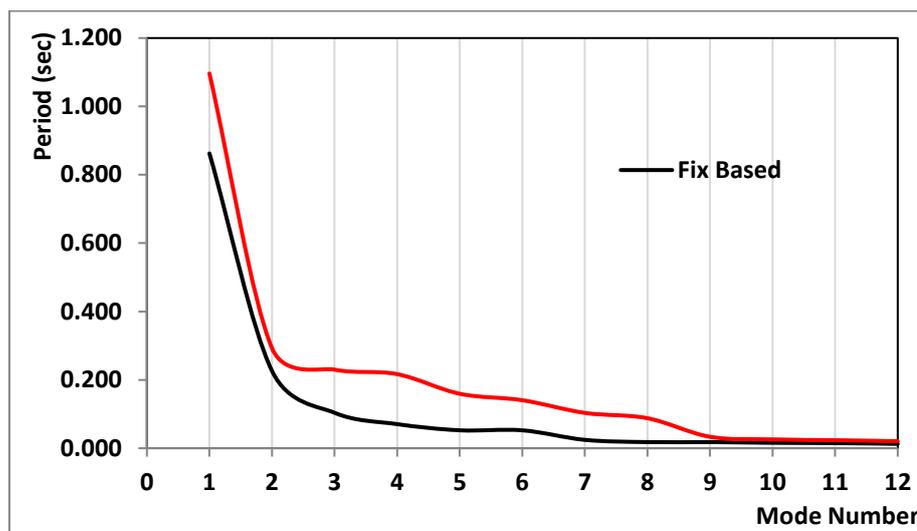
شکل ۹- نمودار مود های ارتعاشی سازه برای گروه خاک های یخرفتی



شکل ۱۰- نمودار مود های ارتعاشی سازه برای گروه خاک های ماسه ای



شکل ۱۱- نمودار مود های ارتعاشی سازه برای گروه خاک های مرکب از ماسه و شن



شکل ۱۲- نمودار مود های ارتعاشی سازه برای گروه خاک های سیلتی

با توجه به نمودارهای ارائه شده بصورت کاملاً ملموس ملاحظه می گردد که عمده اختلاف بوجود آمده در پریود نوسان در خاک های رسی مربوطه به مدهای ۲ الی ۹ می باشد. در خاک های ماسه ای نیز به مانند خاک های رسی عمده اختلاف بوجود آمده در مدهای ۲ الی ۹ نوسان می باشد. این در حالی است که در خاک های مرکب از ماسه و شن و خاک های یخرفتی تفاوت عمده در مدهای نوسان مربوط به مدهای ۴ الی ۸ می باشد. در نهایت در خاک های سیلتی از مود ۱ الی ۹ دارای دوره تناوب کاملاً متفاوت با سازه دارای تکیه گاه صلب است. قابل تامل است که در تمامی خاک های مورد مطالعه اختلاف عمده در دوره نوسان سازه پس از مود ۹ ام حادث نمی گردد. با نظر به نتایج ارائه شده می توان نتیجه گرفت که خاک های رسی و ماسه ای با توجه به اختلاف قابل توجه در مدهای نوسان نیاز بیشتری به بررسی اندرکنش خاک و سازه دارند چرا که اختلاف قابل توجه در مدهای بالاتر این نوع خاک ها بطور قابل ملاحظه ای بر مقدار برش پایه سازه قرار گرفته بر روی آنها اثر می گذارد.

۴-۲- برش پایه

مقادیر برش پایه برای رکوردهای انتخابی زلزله پس از همپایه نمودن آنها به تفکیک گروه خاک های انتخابی استخراج گردیدند. نتایج بدست آمده حاکی افزایش میزان جذب انرژی زلزله با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه می باشد. نتایج حاصل از استخراج برش پایه برای نمونه های مختلف خاک به تفکیک گروه در جداول ۱۱ الی ۱۵ ارائه گردیده است. در شکل های ۱۳ الی ۱۷ نمودارهای میله ای مقایسه ای برش پایه برای خاک های متفاوت و به تفکیک گروه ارائه گردیده است.

جدول ۱۱- مقادیر برش پایه برای گروه خاک های رسی

OutputCase	Base Shear of Clay (kgf)			
	Fix Based	Soft Clay	Hard Clay	Sandy Clay
Northridge	175336	229081	233535	234699
Imperial Valley	162506	206887	249475	250518
El Centro	154657	175739	231677	244265

جدول ۱۲- مقادیر برش پایه برای گروه خاک های یخرفتی

OutputCase	Base Shear of Glacial Till (kgf)			
	Fix Based	Loose	Dense	Glacial
Northridge	175336	234485	239339	
Imperial Valley	162506	248574	237656	
El Centro	154657	235512	230243	

جدول ۱۳- مقادیر برش پایه برای گروه خاک های ماسه ای

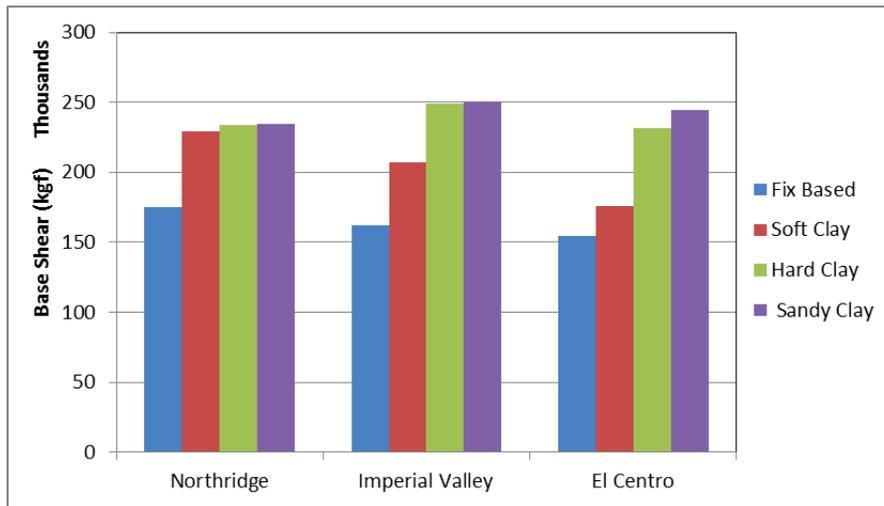
OutputCase	Base Shear of Sand (kgf)				
	Fix Based	Silty	Loose	Dense	Sand
Northridge	175336	243900	222113	231024	
Imperial Valley	162506	205934	213219	253405	
El Centro	154657	157637	187329	225337	

جدول ۱۴- مقادیر برش پایه برای گروه خاک های مرکب از ماسه و شن

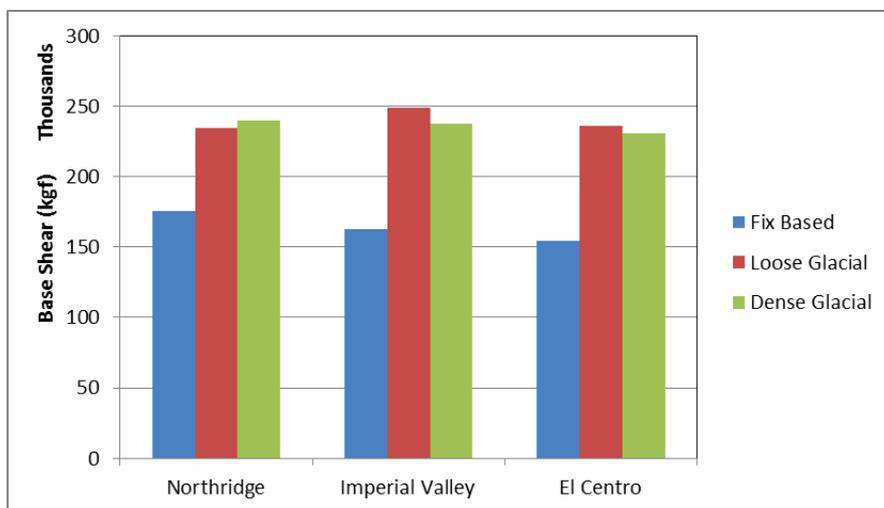
OutputCase	Base Shear of Sand & Gravel (kgf)			
	Fix Based	Sand & Loose	Sand & Dense	Gravel
Northridge	175336	234875	235716	
Imperial Valley	162506	247272	251035	
El Centro	154657	241382	244117	

جدول ۱۵- مقادیر برش پایه برای گروه خاک های سیلتی

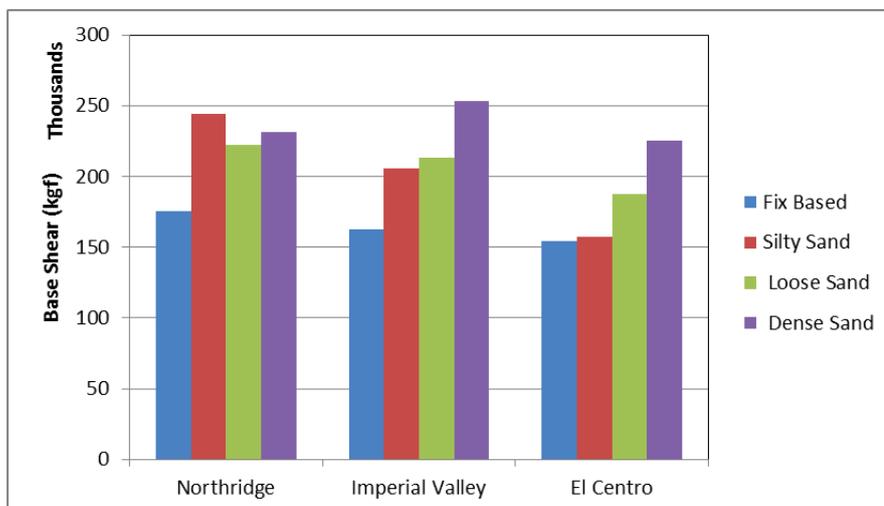
OutputCase	Base Shear of Silt (kgf)	
	Fix Based	Silt
Northridge	175336	252880
Imperial Valley	162506	198044
El Centro	154657	149545



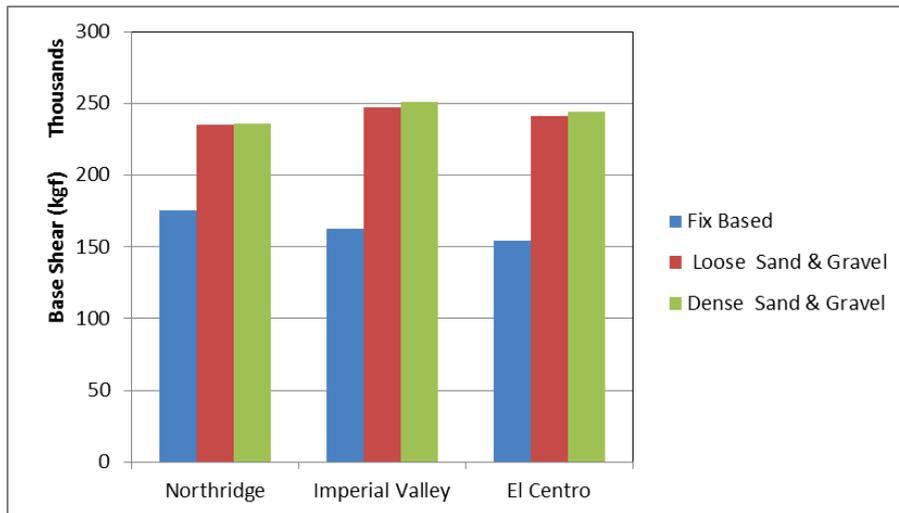
شکل ۱۳- نمودار میله ای مقادیر برش پایه در خاک های رسی در زلزله های انتخابی



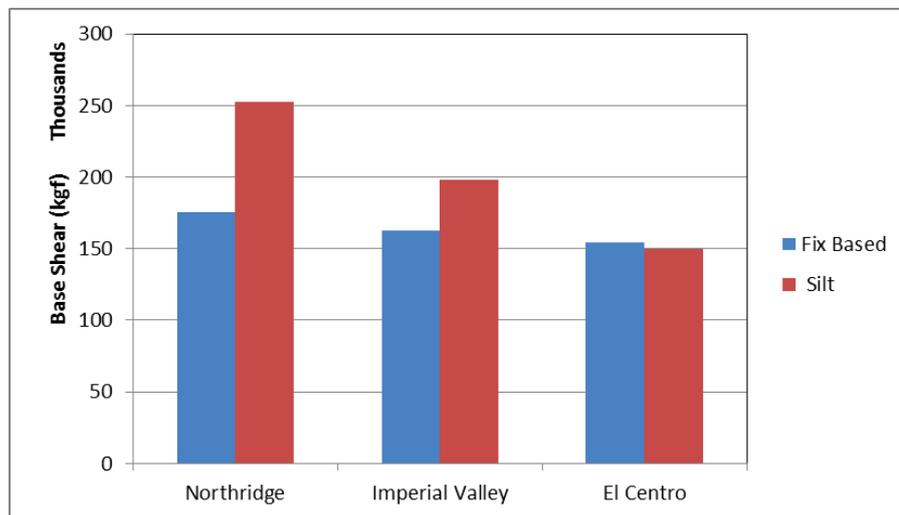
شکل ۱۴- نمودار میله ای مقادیر برش پایه در خاک های یخرفتی در زلزله های انتخابی



شکل ۱۵- نمودار میله ای مقادیر برش پایه در خاک های ماسه ای در زلزله های انتخابی



شکل ۱۶- نمودار میله ای مقادیر برش پایه در خاک های مرکب از ماسه و شن در زلزله های انتخابی



شکل ۱۷- نمودار میله ای مقادیر برش پایه در خاک های سیلتی در زلزله های انتخابی

با بررسی مقادیر برش پایه با توجه به نمودارها و جداول فوق ملاحظه می گردد که مقدار برش پایه به غیر از زلزله El Centro در خاک سیلتی در تمامی زلزله ها برای سازه با تکیه گاه صلب کمتر از سازه هایی است که در آنها اثر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه رکوردهای انتخاب شده برای ارزیابی اثرات اندرکنش خاک و سازه مربوط به زلزله های حوضه نزدیک گسل می باشد، تشدید ناشی از اثرات اندرکنش خاک و سازه قابل توجه می باشد چراکه مقادیر برش پایه با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش با توجه به استانداردهای طراحی تفاوت چندانی با صلب در نظر گرفتن تکیه گاه ها ایجاد نمی نماید و به همین دلیل اثرات اندرکنش خاک و سازه در بسیاری از مطالعات با توجه به اهمیت ناچیز آن نادیده گرفته می شود. ولی با بررسی نتایج حاصل از جداول و نمودارهای برش پایه این تحقیق ملاحظه می گردد که چشم پوشی از اثرات اندرکنش خاک و سازه علی الخصوص در زلزله های حوضه نزدیک گسل با کم در نظر گرفتن مقادیر برش پایه منجر به طراحی ضعیف تر المان های سازه ای گردیده و سازه را در برابر زلزله ها مستعد خرابی بیشتر می نماید.

۳-۴- جابه جایی طبقات

در راستای بررسی شکل پذیری سازه و کنترل جابه جایی جانبی طبقات اندازه این جابه جایی در تمامی طبقات سازه ای برای ساختمان ها استخراج گردیده و مقادیر آن ها جهت ارزیابی با مقادیر استحصال گردیده از ساختمان واقع بر تکیه گاه صلب مورد مقایسه قرار گرفته است. در جداول ۱۶ الی ۲۶ مشخصات مربوط به جابه جایی طبقات در تمامی خاک های مورد مطالعه ارائه گردیده است. اشکال ۱۸ الی ۲۲ نیز به مقایسه نموداری جابه جایی طبقات به تفکیک گروه های خاک انتخاب شده برای مطالعه حاضر، پرداخته است.

جدول ۱۶- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر خاک رسی نرم

Soft Clay								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Soft Clay	Fix Based	Soft Clay	Fix Based	Soft Clay	Fix Based	Soft Clay
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.06	0	0.05	0	0.05	0.000	0.054
2	0.13	0.21	0.13	0.20	0.13	0.18	0.133	0.198
3	0.32	0.37	0.31	0.37	0.31	0.32	0.314	0.353
4	0.47	0.50	0.46	0.51	0.46	0.45	0.464	0.484

جدول ۱۷- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر خاک رسی سفت

Hard Clay								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Hard Clay	Fix Based	Hard Clay	Fix Based	Hard Clay	Fix Based	Hard Clay
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.000	0.023
2	0.13	0.16	0.13	0.16	0.13	0.15	0.133	0.158
3	0.32	0.34	0.31	0.32	0.31	0.28	0.314	0.314
4	0.47	0.49	0.46	0.43	0.46	0.39	0.464	0.439

جدول ۱۸- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر خاک رسی ماسه ای

Sandy Clay								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Sandy Clay	Fix Based	Sandy Clay	Fix Based	Sandy Clay	Fix Based	Sandy Clay
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000	0.017	0.000	0.017	0.000	0.017	0.000	0.017
2	0.133	0.154	0.133	0.150	0.134	0.155	0.133	0.153
3	0.315	0.334	0.312	0.300	0.314	0.317	0.314	0.317
4	0.472	0.489	0.457	0.417	0.462	0.437	0.464	0.448

جدول ۱۹- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر یخرفت سست

Loose Glacial Till								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Average	
	Fix Based	Loose Glacial Till	Fix Based	Loose Glacial Till	Fix Based	Loose Glacial Till	Fix Based	Loose Glacial Till
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.022	0.000	0.023	0.000	0.022	0.000	0.022
2	0.13	0.160	0.133	0.161	0.134	0.147	0.133	0.156
3	0.32	0.338	0.312	0.314	0.314	0.291	0.314	0.314
4	0.47	0.492	0.457	0.429	0.462	0.401	0.464	0.441

جدول ۲۰- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر یخرفت متراکم

Dense Glacial Till								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Average	
	Fix Based	Dense Glacial Till	Fix Based	Dense Glacial Till	Fix Based	Dense Glacial Till	Fix Based	Dense Glacial Till
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000	0.009	0.000	0.009	0.000	0.009	0.000	0.009
2	0.133	0.143	0.133	0.143	0.134	0.150	0.133	0.145
3	0.315	0.323	0.312	0.311	0.314	0.328	0.314	0.321
4	0.472	0.482	0.457	0.443	0.462	0.468	0.464	0.464

جدول ۲۱- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر ماسه سیلتی

Silty Sand								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Average	
	Fix Based	Silty Sand	Fix Based	Silty Sand	Fix Based	Silty Sand	Fix Based	Silty Sand
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.064	0.000	0.053	0.000	0.048	0.000	0.055
2	0.13	0.215	0.133	0.199	0.134	0.176	0.133	0.197
3	0.32	0.368	0.312	0.364	0.314	0.318	0.314	0.350
4	0.47	0.501	0.457	0.499	0.462	0.438	0.464	0.479

جدول ۲۲- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر ماسه سست

Loose Sand								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Loose Sand	Fix Based	Loose Sand	Fix Based	Loose Sand	Fix Based	Loose Sand
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.058	0.000	0.053	0.000	0.048	0.000	0.053
2	0.13	0.208	0.133	0.206	0.134	0.183	0.133	0.199
3	0.32	0.365	0.312	0.372	0.314	0.327	0.314	0.355
4	0.47	0.499	0.457	0.508	0.462	0.452	0.464	0.486

جدول ۲۳- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر ماسه متراکم

Dense Sand								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Dense Sand	Fix Based	Dense Sand	Fix Based	Dense Sand	Fix Based	Dense Sand
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000	0.025	0.000	0.027	0.000	0.024	0.000	0.025
2	0.133	0.164	0.133	0.168	0.134	0.152	0.133	0.162
3	0.315	0.341	0.312	0.324	0.314	0.290	0.314	0.318
4	0.472	0.492	0.457	0.441	0.462	0.390	0.464	0.441

جدول ۲۴- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر مخلوط ماسه و شن سست

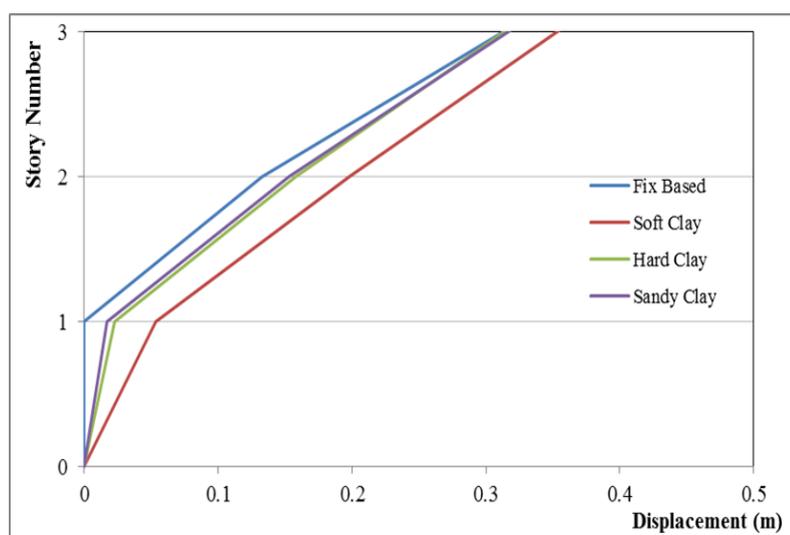
Loose Sand & Gravel								
Story No	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Loose Sand & Gravel	Fix Based	Loose Sand & Gravel	Fix Based	Loose Sand & Gravel	Fix Based	Loose Sand & Gravel
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.020	0.000	0.021	0.000	0.020	0.000	0.020
2	0.13	0.158	0.133	0.157	0.134	0.149	0.133	0.154
3	0.32	0.336	0.312	0.310	0.314	0.300	0.314	0.315
4	0.47	0.490	0.457	0.425	0.462	0.413	0.464	0.443

جدول ۲۵- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر مخلوط ماسه و شن متراکم

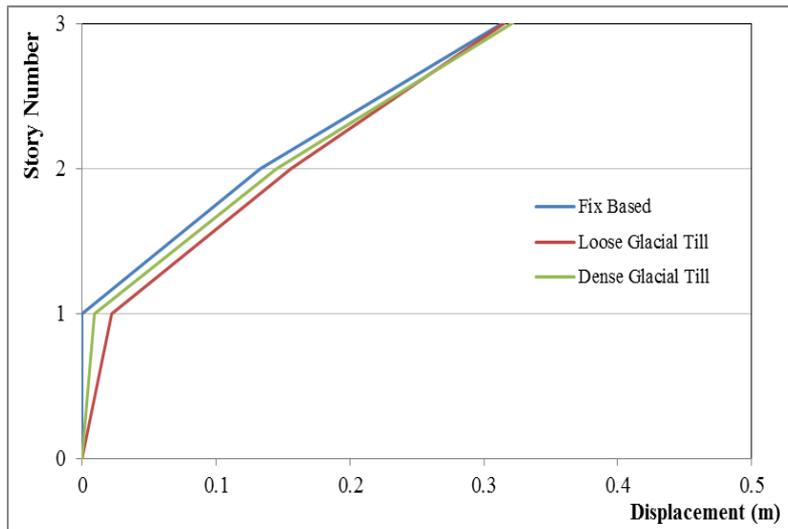
Story No	Dense Sand & Gravel							
	Northridge		Imperial Valley		El Centro		Avarage	
	Fix Based	Dense Sand & Gravel	Fix Based	Dense Sand & Gravel	Fix Based	Dense Sand & Gravel	Fix Based	Dense Sand & Gravel
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.000	0.016	0.000	0.017	0.000	0.017	0.000	0.016
2	0.133	0.153	0.133	0.148	0.134	0.156	0.133	0.152
3	0.315	0.333	0.312	0.298	0.314	0.319	0.314	0.317
4	0.472	0.488	0.457	0.416	0.462	0.441	0.464	0.448

جدول ۲۶- جابه جایی طبقات در مدل واقع بر سیلت

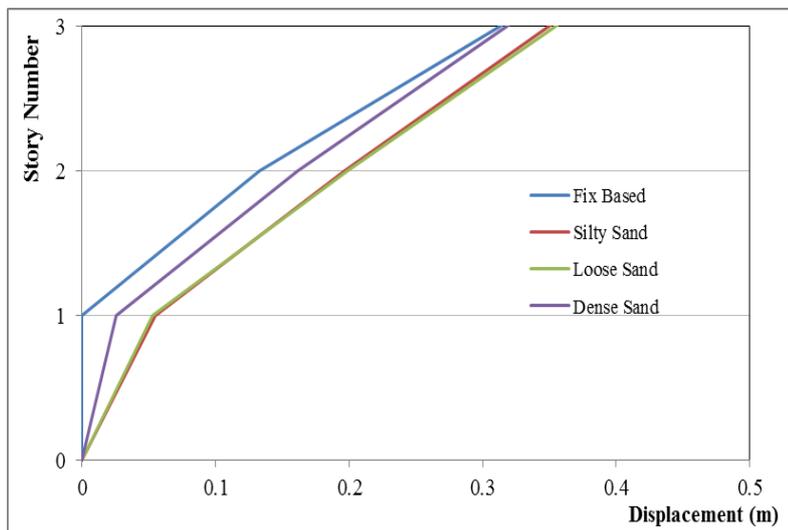
Story No	Silt							
	Northridge		Imperial Valley		Elcentro		Avarage	
	Fix Based	Silt	Fix Based	Silt	Fix Based	Silt	Fix Based	Silt
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.071	0.000	0.052	0.000	0.046	0.000	0.056
2	0.13	0.215	0.133	0.187	0.134	0.159	0.133	0.187
3	0.32	0.372	0.312	0.339	0.314	0.292	0.314	0.334
4	0.47	0.504	0.457	0.469	0.462	0.405	0.464	0.459



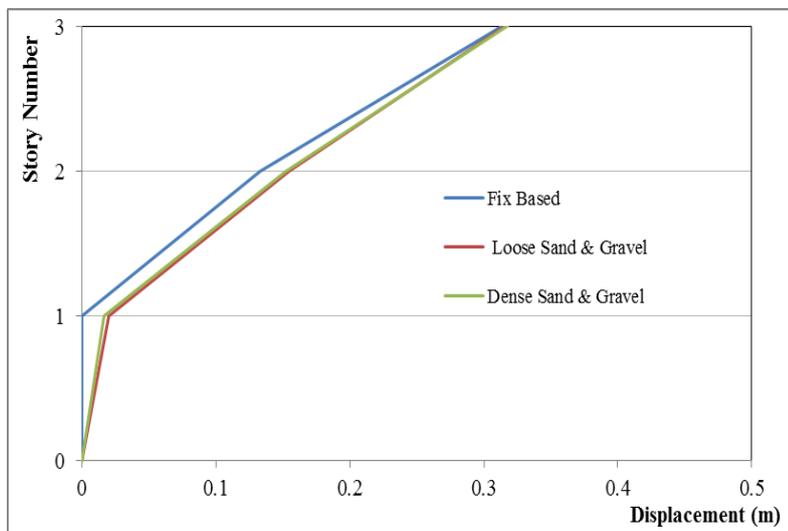
شکل ۱۸- میزان جابه جایی طبقات سازه ای در خاک های رسی



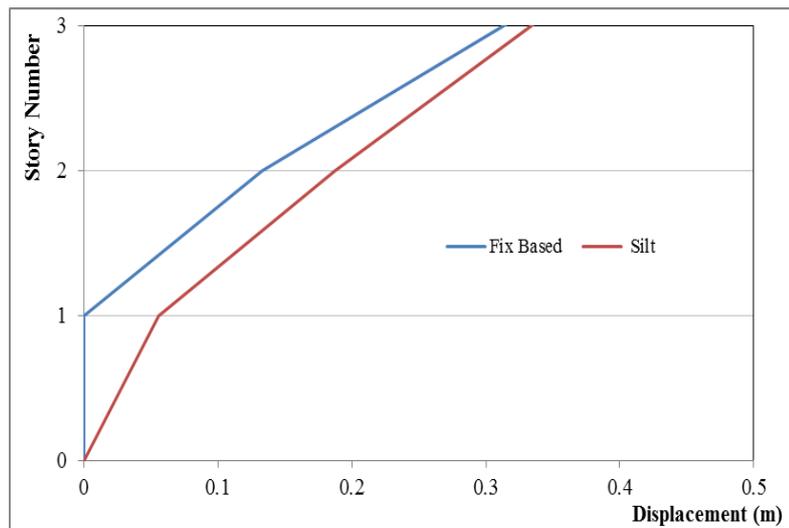
شکل ۱۹- میزان جابه جایی طبقات سازه ای در خاک های یخرفتی



شکل ۲۰- میزان جابه جایی طبقات سازه ای در خاک های سیلتی



شکل ۲۱- میزان جابه جایی طبقات سازه ای در خاک های مرکب از ماسه و شن



شکل ۲۲- میزان جابه جایی طبقات سازه ای در خاک های سیلتی

با توجه به نتایج ارائه شده در جداول و نمودارهای فوق ملاحظه می گردد که خاک های ماسه ای و رسی سست دارای بیشترین تغییر مکان در مقایسه با سایر خاک ها می باشند. همچنین جابه جایی طبقات در خاک یخرفتی متراکم بسیار نزدیک به تکیه گاه صلب می باشد. عمده ترین مسئله مشهود و قابل استحصال از مطالب فوق مقادیر جابه جایی طبقه اول در مدل های واقع بر خاک می باشد. همانطور که قابل پیش بینی است مدل واقع بر تکیه گاه صلب تا طبقه اول به دلیل وجود تکیه گاه امکان جابه جایی نخواهد داشت و این در حالی است که در مدل های واقعی تر جابه جایی طبقه اول دارای مقادیر قابل ملاحظه ای می باشد. جابه جایی طبقه اول منجر به فشرده شدن خاک در یک طرف سازه و رها سازی خاک در طرف دیگر آن می شود. بار ناشی از فشار خاک در صورت در نظر گرفته نشدن اثرات اندرکنش خاک و سازه به تنهایی می تواند اثرات جبران ناپذیری به سازه احداث شده وارد نماید.

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

عمده تفاوت دوره تناوب سازه در مودهای بالاتر در تمامی گروه های خاک در مودهای دوم الی هشتم حادث می گردد. بیشترین اختلاف در مود نوسان در کل های خاک های مورد مطالعه متعلق به خاک ماسه ای سیلتی و در مود هشتم نوسان بوده و میزان اختلاف آن ۳۷۸٪ می باشد. اثرات اندرکنش خاک و سازه کمترین تاثیر را بر روی خاک های سیلتی دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت اثرات اندرکنش خاک و سازه در خاک های سیلتی با توجه به عدم تغییر قابل توجه پریود ارتعاشی سازه تاثیر قابل ملاحظه ای بر برش پایه و میزان جذب انرژی نخواهد گذاشت. اثرات اندرکنش خاک و سازه در مودهای بالاتر ارتعاشی و علی الخصوص مودهای میانی در تمامی خاک ها و بویژه خاک های ماسه ای و رسی قابل توجه بوده و در صورت قابل ملاحظه بودن درصد مشارکت جرمی مودهای میانی تاثیر بسزایی بر برش پایه، انرژی مستهلک شده و جابه جایی نسبی طبقات خواهد داشت. میزان اختلاف در مود اول نوسان در خاک های سست نسبت به خاک های متراکم بطور قابل ملاحظه ای بیشتر می باشد. بنابراین جذب انرژی ناشی از حرکت شدید زمین در این نوع از خاک ها به مقدار قابل ملاحظه ای کمتر خواهد بود. خاک های رسی و ماسه ای با توجه به اختلاف قابل توجه در مودهای نوسان نیاز بیشتری به بررسی اندرکنش خاک و سازه دارند چرا که اختلاف قابل توجه در مودهای پایین تر این نوع خاک ها بطور قابل ملاحظه ای بر مقدار برش پایه سازه قرار گرفته بر روی آنها اثر می گذارد. مقادیر برش پایه در سازه واقع بر تکیه گاه صلب کمتر از سازه هایی است که در آنها اثر اندرکنش خاک و سازه در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج حاصل ملاحظه گردید که چشم پوشی از اثرات اندرکنش خاک و سازه علی الخصوص در زلزله های حوضه نزدیک گسل با کم در نظر گرفتن مقادیر برش پایه منجر به طراحی ضعیف تر المان های سازه ای گردیده و سازه را در برابر زلزله ها مستعد خرابی بیشتر می نماید. در خاک های سیلتی دامنه جابه جایی ساختمان در طول ارتعاش سازه

در نقاط مختلفی دچار نوسان شده و تفاوت قابل توجهی با دامنه جابه جایی ساختمان واقع بر تکیه گاه صلب از خود نشان می دهد. این اختلاف تا اندازه ای است که حتی ماهیت جابه جایی های ثابت شده به کلی متفاوت گردیده و دامنه نوسان سازه نیز تغییر می نماید. مدل واقع بر تکیه گاه صلب تا طبقه اول به دلیل وجود تکیه گاه امکان جابه جایی ندارد و در مدل های واقع بر بستر خاک جابه جایی طبقه اول دارای مقادیر قابل ملاحظه ای می باشد. جابه جایی طبقه اول منجر به فشرده شدن خاک در یک طرف سازه و رها سازی خاک در طرف دیگر آن می شود. رفتار خاک های ماسه ای سست و رس سست به طور قابل توجهی به یکدیگر شباهت داشته و در تمامی خروجی های استحصال گردیده دارای مقادیری نزدیک به هم می باشند. این در حالی است که رفتار ماسه متراکم بطور قابل توجهی متفاوت از رفتار رس سخت می باشد.

مراجع

- Alavi, E., & Gandomzadeh, A. (2020). Nonlinear Soil-Structure Interaction Modeling for Heavy Embedded Structures. *Engineering Structures*, 216, 110780.
- ASCE 7-22 (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers.
- Building and Housing Research Center (BHRC). (2019). "Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (Standard No. 2800)," 4th Edition, Tehran, Iran.
- Computers and Structures, Inc. (2023). SAP2000 v24 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures – User Manual. California, USA.
- Chen, Q., Li, S., Shi, Y. (2023). Numerical Study of SSI Effects on Base Shear of Structures in Silty Soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 167, 107469.
- Chen, X., & Shi, Y. (2013). Soil-Structure Interaction Analysis of Seismic Response in Underground Structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 12(1), 1-8.
- Jin, X., Zhang, Y., & He, F. (2022). Selection and Scaling of Earthquake Ground Motion Records for SSI Analysis. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 51(7), 1682-1699.
- Jung, S.K. (2009). Influence of Soil-Structure Interaction on the Seismic Response of Building Structures. *Journal of Structural Engineering*, 135(4), 482-492.
- Hong, Z., et al. (2007). Three-dimensional finite element analysis of soil-structure interaction for underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(4), 433-441.
- Kaynia, A.M., & Kausel, E. (2020). Advances in Soil-Structure Interaction Analysis: Theory and Applications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133, 106128.
- Khosravikia, F., Alavi, E., Gandomzadeh, A. (2019). Use of Equivalent Spring-Damper Models to Simulate Subsurface SSI Effects. *International Journal of Civil Engineering*, 17(6), 771-786.
- Mylonakis, G., & Gazetas, G. (2000). Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues. *Geotechnique*, 50(3), 333-355.
- Patra, S.K., Mukherjee, S., Dey, S., & Gupta, S. (2023). Influence of Soil-Structure Interaction on Seismic Assessment of Subsurface Structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21, 1919-1946.
- Stewart, J.P., Seed, R.B., & Idriss, I.M. (1999). Earthquake Ground Motion Scaling Procedures for Geotechnical Applications. *Earthquake Spectra*, 15(2), 171-205.
- Vafaei, B., Ghassemi, M.R., & Habibnejad Korayem, A. (2021). Evaluation of Glacial and Alluvial Soil Deposits in Northwestern Iran. *Journal of Earth System Science*, 130, 215.
- Zhang, M., Wang, X., & Wei, X. (2022). Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Performance of Underground Structures. *Engineering Structures*, 266, 114536.