

# بررسی تأثیر فاصله‌ی ساختمان‌ها و سختی خاک در اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه در ساختمان‌های بلند

امیرحسین نوروزی (دانشجوی دکتری)

محسن گرامی\* (دانشیار)

رضا وهدانی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

عباس سیوندی‌پور (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و نقشه‌پردازی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان

مهندسی عمران شریف، زمستان (۱۳۹۹)  
دوری ۲ - ۳۶، شماره ۴/۱، ص. ۱۴۱-۱۵۲

آثار هم‌زمان خاک و چندین سازه، به عنوان اندرکنش شهر - ساختگاه (سازه - خاک - سازه) شناخته می‌شود، که در مناطق با تراکم ساختمانی زیاد، بسیار مهم است. به دلیل انتشار امواج بین سازه‌ها، لحاظ اثر اندرکنش شهر - ساختگاه باعث تغییر در پاسخ‌ها می‌شود. در بررسی موضوع اخیر، پارامترهای زیادی، از جمله: جنس خاک، میزان تراکم و نظم ساختاری شهری، ارتفاع ساختمان‌ها، شکل امواج زلزله و دوره‌ی تناوب اصلی سازه‌ها و خاک تأثیر دارند. در پژوهش حاضر، آثار نوع خاک (تیپ‌بندی استاندارد  $28^{\circ}$ ) و فواصل ساختمان‌ها بر روی این موضوع در پاسخ‌های بالای سازه و فونداسیون به صورت سه‌بعدی بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان این نکته را بیان کرد که وجود سازه‌ها در کنار یکدیگر با لحاظ اثر اندرکنش شهر - ساختگاه در خاک‌های مختلف موجب کاهش پاسخ‌های شتاب سازه (میانگین ۲۵٪) نسبت به حالت سازه‌ی منفرد می‌شود.

ah.norouzi64@gmail.com  
mgerami@semnan.ac.ir  
rvahdani@semnan.ac.ir  
a.sivandi@kgut.ac.ir

**واژگان کلیدی:** اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه، آثار شهر، میزان سختی خاک، اندرکنش شهر - ساختگاه، انتشار امواج زلزله.

## ۱. مقدمه

مستله‌ی SCI همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. مطالعات مذکور از تحلیل‌های با مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی شروع شده است، تا به تحلیل‌های سه‌بعدی پیشرفت کرده است.<sup>[۱، ۲]</sup> از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات ویرجین و بارد<sup>۲</sup> (۱۹۹۶)،<sup>[۵]</sup> اشاره کرد، که مجموعه‌ی از ساختمان‌ها به صورت بلوک‌های مستطیل‌شکل، کشسان و همگن، که در تماس با خاک بودند، را مدل‌سازی کردند و رفتار آنها را تحت امواج SH قرار دادند و دریافتند که اثر اندرکنش چندگانه‌ی خاک - سازه تا فاصله‌ی ۱ کیلومتری هم قابل توجه است و منجر به مدت و شدت زمان بیشتری می‌شود.

بعدها کلوتیا و آوبری<sup>۳</sup> (۲۰۰۱)،<sup>[۶]</sup> مسئله‌ی اندرکنش بین تعداد زیادی از ساختمان‌های بر روی یک نیم‌فضا را با به کار بردن یک مدل سه‌بعدی بررسی کردند و دریافتند که اندرکنش شهر - ساختگاه، میرایی تأثیر کمی در پاسخ دارد و زمانی که پدیده‌ی تشدید شهر - ساختگاه اتفاق می‌افتد، حرکت زمین دو نقطه‌ی اوج در بازه‌ی بسامدی دارد. این موضوع که شامل دو نقطه‌ی اوج در حوزه‌ی بسامد بود، در پژوهش‌های بوتین و روسیلون<sup>۴</sup> (۲۰۰۴)،<sup>[۷]</sup> نیز اشاره شده است.

با توجه به رشد شهرنشینی و تأثیر لرزش‌های ساختمان‌های درون‌شهر بر روی یکدیگر، به خصوص زمانی که شهرها بر روی حوضه‌های رسوبی و خاک‌های نرم قرار دارند، آثار اندرکنش خاک و چندین سازه در کنار هم به صورت ترکیبی مهم است. مسئله‌ی کنونی اندرکنش چندگانه‌ی ساختمان‌ها در مناطق پرتراکم شهری به عنوان اندرکنش شهر ساختگاه (SCI)<sup>۱</sup> شناخته شده است. در واقع سازه‌ها می‌توانند در انتشار امواج در سطح آزاد اثر بگذارند، به علاوه ارتعاش سازه‌های سطحی می‌تواند در خاک امواج لرزه‌یی ایجاد کند. در واقع در یک شهر، سازه‌ها مانند یک منبع لرزه‌یی و ارتعاشی ثانویه عمل می‌کنند. یکی از مسائل مهم در زمینه‌ی اشاره شده، انطباق بسامدهای اصلی و مهم لایه‌های خاک با سازه‌های روی سطح زمین است.<sup>[۱، ۲]</sup> اثر اندرکنش شهر - ساختگاه در حرکات حوزه‌ی آزاد بسیار مهم است و در بعضی نقاط باعث کاهش و در بعضی نقاط باعث افزایش ارتعاش می‌شود، که به جنس خاک و تراکم و نظم ساختاری شهری و... بستگی دارد.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۱/۲۶، پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۱۲.

DOI:10.24200/J30.2020.45799.2674

گوگن<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۲)<sup>[۸]</sup> یک مدل دوبعدی را برای تخمین اصلاحات حرکت لرزه‌یی زمین به دلیل حضور سازه‌ها در محیط شهری (مکزیکوسیتی) ارائه کردند و نتایجی شبیه با رکوردهای واقعی حرکت زمین در طول زلزله‌ی میچوآکان از طریق روی هم قرار دادن حرکت حوزه‌ی آزاد با سهم مشارکتی حرکت هر کدام از سازه‌ها، به طوری که مستقلاً در نظر گرفته شده بودند، به دست آوردند.

توسکا و ویرجین (۲۰۰۳)<sup>[۹]</sup> با استفاده از روش المان محدود، یک شهر دوبعدی را شبیه‌سازی کردند، که شامل ۱۰ بلوک همگن به صورت یک شهر غیرمتناوب و غیرهمگن، بر روی یک لایه خاک نرم بود و دریافتند که حضور سازه‌ها منجر به ایجاد موج‌های شبیه به موج لاو می‌شود، که در برگشت، دامنه و مدت زمان ارتعاش را افزایش می‌دهد.

بعدها گروبی<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۵)<sup>[۱۰]</sup> مدلی که توسکا و ویرجین (۲۰۰۳)<sup>[۹]</sup> به کار برده بودند، را با در نظر گرفتن این‌که سازه‌ها و خاک از واسطه‌هایی دارای اثر پراکندگی تشکیل شده‌اند، اصلاح کردند و دریافتند که اثر پراکندگی، لزوماً آثار غیرعادی را که در مطالعات اولیه یافت شده بود، حذف نمی‌کند.

سمبلت<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۰۴)<sup>[۱۱]</sup> حوضه‌های رسوبی در مناطق پرتراکم شهری را بررسی کردند و یک مدل از شهر منظم بر روی یک لایه خاک یک‌بعدی و یک مدل دیگر از همان شهر بر روی حوضه‌ی واقعی نایس فرانسه را بررسی کردند و دریافتند که در مقیاس حوضه‌ی رسوبی، اندرکنش شهر - ساختمانی می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجه در میدان امواج لرزه‌یی شود. بارد<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۰۵)<sup>[۱۲]</sup> نیز با توجه به مطالعات پژوهشگران مربوط به زلزله‌ی مکزیکو ۲۰۰۵ و پژوهش‌های خود در ارتباط با اثر اندرکنش شهر - ساختمانی نتایجی را ارائه کردند. از جمله زمانی که بسامد خاک و ساختمان‌ها منطبق باشند، اثر SCI تقویت می‌شود.

همچنین خام<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۰۶)<sup>[۱۳]</sup> پاسخ مدل‌های دوبعدی شهر - ساختمانی را در برابر موج SH منتشره در صفحه‌ی قائم، با استفاده از روش المان مرزی محاسبه کردند و دریافتند که اندرکنش‌های چندگانه، زمانی که پدیده‌ی تشدید شهر - ساختمانی اتفاق می‌افتد، تأثیر بیشتری دارند، که این موضوع منجر به یک کاهش اساسی در حرکت زمین داخل شهر و یک افزایش در خارج شهر می‌شود. سمبلت و همکاران (۲۰۰۸)<sup>[۱۴]</sup> با به کار بردن یک پروفیل دوبعدی حوزه‌ی رسوبی به جای مدل یک‌بعدی قبلی پیشنهاد شده توسط خام و همکاران (۲۰۰۶)<sup>[۱۳]</sup> آثار SCI را بیشتر بررسی کردند و دوباره به مطالعه‌ی حوزه‌ی نایس فرانسه به طول ۲۱۰۰ متر و بیشترین عمق ۶۰ متر، با شهرهای متفاوت بر روی آن پرداختند و نشان دادند که نتایج ناشی از تحلیل یک‌بعدی حوضه‌ی رسوبی، بسیار متفاوت با نتایج تجربی است.

سمبلت و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۱۵]</sup> در پژوهشی دیگر در ارتباط با اثر اندرکنش شهر - ساختمانی برای سازه‌هایی که بسامد مشخصه‌های نزدیک به لایه‌های سطحی خاک دارند، دوباره برای ساختمانی نایس فرانسه مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام دادند و تراکم ساختمان‌ها (تعداد ساختمان‌ها) نیز یک پارامتر مهم در نظر گرفته شد.

گوآسمیا<sup>۱۰</sup> (۲۰۱۴)<sup>[۱۶]</sup> پژوهش‌هایی در ارتباط با اثر اندرکنش شهر - ساختمانی با استفاده از روش المان محدود بر اساس خاک و سازه‌های موجود در کشور الجزایر انجام داد و پاسخ ساختمان‌های یک شهر ایده‌آل که شامل ۵ ساختمان بود، را در برابر رکوردهای واقعی شتاب زلزله‌ی بومرداس<sup>۱۱</sup> بررسی کرد. او در دو حالت بدون اندرکنش و با اندرکنش، پاسخ‌ها را محاسبه و مقایسه کرد تا اثر پدیده‌ی اندرکنش شهر - ساختمانی تا حدودی مشخص شود.

ساهر<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵)<sup>[۱۷]</sup> بر روی اثر شکل هندسی حوضه در اندرکنش شهر - ساختمانی و تأثیر آن در مشخصات حرکت زمین پژوهش کردند و سه حوزه‌ی

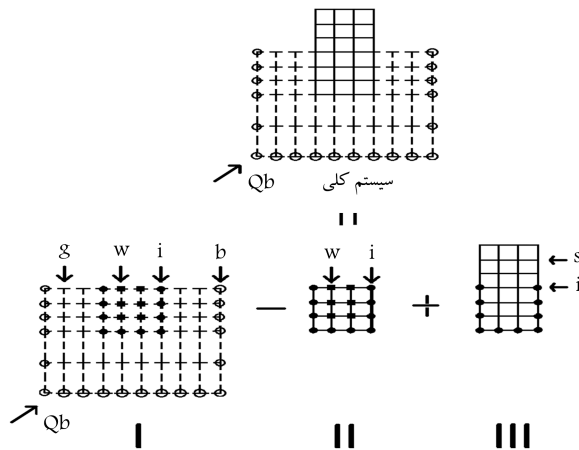
رسوبی با شکل‌های مستطیلی، دوزنقه‌یی و بیضی‌شکل در نظر گرفتند. از جمله نتایج کلی آنان این بود که شکل حوضه‌ی رسوبی، نقش بسیار مهمی در SCI دارد. در مطالعه‌ی تابردا و بیلاک<sup>۱۳</sup> (۲۰۱۰)<sup>[۱۸]</sup> هدف ارائه‌ی یک چهارچوب برای شبیه‌سازی زمین‌لرزه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و حضور ساختار محیطی در زمین‌ها و حوزه‌های بسیار ناهمگن و مطالعه‌ی اثر آنها در پاسخ نهایی زمین در مناطق بزرگ شهری در معرض خطر زلزله بود. به این منظور پژوهشگران مذکور از روش‌های اجزاء محدود استفاده کردند و دریافتند که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک در مقایسه با رفتار خطی باعث تغییر در بیشینه‌ی پاسخ سرعت و شتاب زمین و تغییر مکان‌های ماندگار و تاریخچه‌ی زمانی تغییر مکان و سرعت و شتاب در نقاط مشخص می‌شود. ایشیلروقلو<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۳)<sup>[۱۹]</sup> نیز از روش‌های عددی برای بررسی تأثیر سازه‌های بزرگ در زمان زلزله در پاسخ‌های اندرکنشی چندگانه‌ی گروه‌های سازه‌یی استفاده کرد و پس از مطالعه و بررسی سازه‌های متقارن به صورت جزئی، سازه‌های نامتقارن، که آثار پیچشی داشتند، شبیه‌سازی و بررسی شدند.

همچنین گوآدوتی<sup>۱۵</sup> (۲۰۱۲)<sup>[۲۰]</sup> با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی زلزله‌ی کریست چرج<sup>۱۶</sup>، مطالعاتی در ارتباط با مسئله‌ی انتشار امواج و پیچیدگی‌های آنها از حوزه‌ی دور به حوزه‌ی نزدیک و از حوزه‌ی نزدیک به ساختمانی با توجه به آثار اندرکنش خاک - سازه و همچنین اثر ساختمان‌های شهر در یکدیگر و توزیع خسارت در مناطق به ظاهر همگن و پارامترهای اساسی مسئله‌ی مذکور انجام داده است. شوان<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۱۶)<sup>[۲۱]</sup> مقایسه‌ی بین نتایج حالت تحلیلی (دقیق) و عددی با استفاده از روش المان مرزی و نتایج یک مدل آزمایشگاهی انجام دادند. ساهر و نارایان<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۶)<sup>[۲۲]</sup> تصحیح حرکت زمین را در حوزه‌ی رسوبی یک منطقه‌ی شهری با استفاده از روش تفریق محدود و بسکوکشان انجام دادند. کومار و نارایان (۲۰۱۷)<sup>[۲۳]</sup> نیز تأثیر SCI را بر روی یک مدل دوبعدی از سازه‌های نزدیک به هم در شرایط تشدید مضاعف با در نظر گرفتن شکل حوزه‌ی رسوبی زیرسازه‌ها بررسی کردند. کیتووانگ<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۷)<sup>[۲۴]</sup> تأثیر اندرکنش سازه‌های زیرزمینی مجاور را در یکدیگر در منطقه‌ی در هنگ‌کنگ انجام دادند. زینگ<sup>۲۰</sup> و همکاران (۲۰۱۸)<sup>[۲۵]</sup> یک مطالعه‌ی موردی به روش تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی با در نظر گرفتن اثر SCI با مدل کردن سازه‌های چند درجه‌ی آزادی در مقیاس منطقه‌یی انجام داده‌اند.

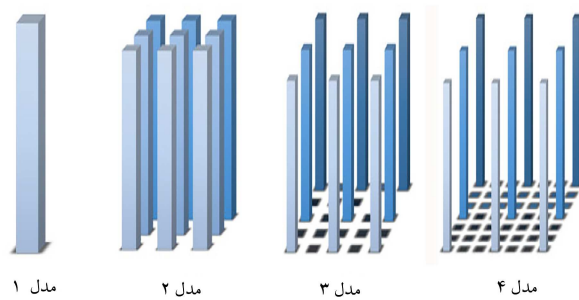
تاکنون مطالعات جامعی در ارتباط با تأثیر میزان سختی و نرمی خاک و تیپ‌های مختلف خاک در اثر SCI انجام نشده است، لذا در پژوهش حاضر سعی بر آن است تا بتوان با تغییرات میزان سختی خاک متناسب با خاک‌های دسته‌بندی شده در استاندارد ۲۸۰۰<sup>۲۶</sup> در زیر شهر ایده‌آل مدل‌سازی شده به صورت سه‌بعدی، تأثیر این تغییرات را تا حدودی بررسی کرد. در پژوهش حاضر، تأثیر پارامترهای فواصل ساختمان‌ها و جنس خاک در پاسخ‌های سازه و فونداسیون با لحاظ اثر اندرکنش شهر - ساختمانی با استفاده از مدل سه‌بعدی و چند درجه‌ی آزادی بررسی شده است، تا بتوان با توجه به اهداف طراحی سازه‌ها، نتایج دقیق‌تری از پاسخ سازه‌ها به دست آورد.

## ۲. مدل‌سازی سیستم اندرکنشی شهر - ساختمانی

برای مدل‌سازی سازه‌ها و خاک و تحلیل سیستم از نرم‌افزار SASSI ۲۰۰۰<sup>۲۷</sup> استفاده شده است، که به صورت تخصصی مربوط به تحلیل‌های اندرکنش خاک



شکل ۱. زیرسازه‌ها در روش حجم انعطاف‌پذیر.



شکل ۲. مدل‌های سازه‌ها به صورت شماتیک.

در هنگام وقوع زلزله، امواج در خاک منتشر می‌شوند و به سازه‌ها برخورد می‌کنند و منعکس می‌شوند و با امواج منتشر شده از سازه‌های مجاور برخورد می‌کنند و تداخل ایجاد می‌شود و باز هم به سازه‌ها برخورد می‌کنند. لذا در مطالعه‌ی حاضر، مسئله‌ی ذکر شده بررسی شده است، تا با توجه به اصول تئوری نرم‌افزار مورد نظر و حل معادله‌های حرکت امواج بتوان تا حدودی تأثیر آن را در پاسخ‌های سازه بررسی کرد.

در مطالعه‌ی حاضر، ۴ مدل به صورت سه‌بعدی ایجاد شده است، که مدل اول، یک سازه‌ی تک است و سه مدل بعدی، سه گروه شامل ۹ سازه‌ی یکسان بودند. سازه‌ها چند درجه‌ی آزادی با خصوصیات یکسان در تمام مدل‌ها بودند. در مدل‌های ۲ الی ۴، فاصله‌ی بین سازه‌ها به ترتیب ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر بوده است، که در شکل ۲ مدل‌ها به صورت شماتیک نشان داده شده‌اند. سپس پاسخ‌های سازه‌ی تک (مدل ۱) با سازه در وسط گروه (مدل‌های ۲ الی ۴) برای ۴ نوع خاک مستقلاً مقایسه شده‌اند، تا در هنگام انتشار امواج زلزله اثر سازه‌های مجاور در پاسخ‌های یکدیگر و تأثیر سختی خاک و فاصله‌ی سازه‌ها در بحث SCI بررسی شوند، که این نتایج هم برای گروه‌ی بام و هم گروه‌ی پایه ارائه شده است.

## ۱.۲. مدل‌سازی سازه

سازه در تمام مدل‌ها، یک ساختمان بتنی ۴۰ طبقه با ارتفاع طبقات ۴ متر، با پلان مربعی با مساحت ۲۵۰۰ مترمربع بوده است، که مشخصات هندسی و سازه‌ی همه‌ی طبقات مشابه است و هر طبقه شامل ۲۵ ستون با فواصل یکسان است، که در تمام پلان توزیع شده و ابعاد مقطع ستون‌ها ۸۰ × ۸۰ سانتی‌متر مربع بوده است؛ همچنین در ۴ گوشه‌ی پلان در همه‌ی طبقات، دیوار برشی بتنی به طول ۲۰ متر در

- سازه است، که حاصل چند رساله‌ی دکتری از دانشجویان دانشگاه برکلی است و قابلیت مدل‌سازی سازه و انتشار امواج در خاک را به صورت سه‌بعدی در فضای نیمه بی‌نهایت کشسان یا ویسکوکشسان در حوزه‌ی بسامدی دارد؛ همچنین خاک به صورت لایه‌بندی افقی تعریف می‌شود. نرم‌افزار  $\text{SASSI}^{2000}$  هم به روش زیرسازه و هم روش مستقیم می‌تواند تحلیل اندرکنش خاک - سازه را انجام دهد و از جمله مزایای آن، مدل‌سازی مرزهای جاذب و انتقالی و محاسبه‌ی ماتریس‌های امیدانس به صورت خودکار است؛ همچنین قابلیت اعمال رکوردهای شتاب زلزله به صورت موج‌های حجمی (S و P) یا سطحی (R و L) و یا ترکیبی از آنها را دارد، در واقع می‌توان معادله‌های انتشار امواج را مستقلاً به کار برد.

معادله‌ی تعادل حاکم در نرم‌افزار  $\text{SASSI}^{2000}$  برای روش زیرسازه (حجم انعطاف‌پذیر) برای تحریک هارمونیک به صورت رابطه‌ی ۱ است:

$$[C] \{U\} = \{Q\} \quad (1)$$

که در آن،  $\{Q\}$  و  $\{U\}$  بردارهای نیرو و تغییرمکان و  $[C]$  ماتریس سختی دینامیکی در بسامد  $\omega$  هستند، که به ترتیب در روابط ۲ الی ۴ معرفی شده‌اند:

$$\{\hat{Q}\} = \{Q\} \exp(i\omega t) \quad (2)$$

$$\{\hat{U}\} = \{U\} \exp(i\omega t) \quad (3)$$

$$[C] = [K] - \omega^2 [M] \quad (4)$$

که در آن،  $[M]$  و  $[K]$  به ترتیب ماتریس کلی جرم و سختی هستند. معادله‌ی حرکت در رابطه‌ی ۱ با توجه به زیرسازه‌ها، به صورت رابطه‌ی ۵ نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} C_{ii}^{III} - C_{ii}^{II} + X_{ii} & -C_{iw}^{II} + X_{iw} & C_{is}^{III} \\ -C_{wi}^{II} + X_{wi} & -C_{ww}^{II} + X_{ww} & 0 \\ C_{si}^{III} & 0 & C_{ss}^{III} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_i \\ U_w \\ U_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ii}U_i' + X_{iw}U_w' \\ X_{wi}U_i' + X_{ww}U_w' \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

به طوری که با لاتویس‌های I، II و III، به ترتیب ارجاع دهنده به سه زیرسازه‌ی: حوزه‌ی آزاد، خاک حفاری شده و سازه هستند و زیر نویس‌های  $s$ ،  $w$  و  $i$  مشخص‌کننده‌ی گروه‌ها هستند، که در شکل ۱ مشاهده می‌شوند و ماتریس وابسته به بسامد  $\omega$   $[X_{ff}]$  یا  $\begin{bmatrix} X_{ii} & X_{iw} \\ X_{wi} & X_{ww} \end{bmatrix}$  که ماتریس امیدانس نامیده می‌شود، از مدل در زیرسازه‌ی I به دست می‌آید.

پس از محاسبه‌ی بردارهای تغییرمکان حوزه‌ی آزاد  $\{U\}$  و ماتریس امیدانس  $[X_{ff}]$  و بردار بار  $\{Q\}$  و ماتریس سختی دینامیکی  $[C]$  و حل معادله‌های مشخصه برای انواع موج‌ها و تعیین مقادیر مشخصه و بسامدهای مورد نظر، برای هر یک از موج‌ها معادله‌ی حرکت رابطه‌ی ۵ به صورت مستقل توسط نرم‌افزار حل می‌شود و بردارهای تغییرمکان گروه‌ی در اثر تحریک‌های لرزه‌ی به دست می‌آید.

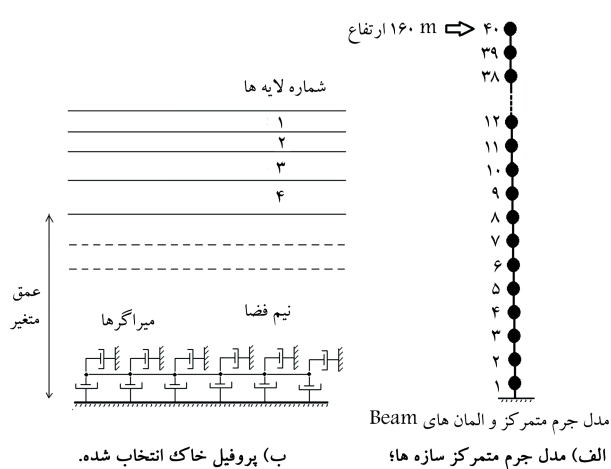
ماتریس مرزهای انتقالی نیز در جهت‌های افقی و عمودی محاسبه می‌شوند و انرژی ناشی از انعکاس امواج را به حوزه‌ی دور منتقل می‌کنند. مرزهای جاذب، که میراگرهای تابع سرعت موج‌های فشاری و برشی هستند، نیز در پایین لایه‌های خاک با اختیار کاربر تعریف می‌شوند، تا بتوان امیدانس نیم‌فضای پایین خط مبنا و پایه‌ی مدل را شبیه‌سازی و از بازگشت و محبوس شدن امواج در مدل مرتبط جلوگیری کرد.

جدول ۱. خواص هندسی مربوط به هر طبقه‌ی سازه.

جرم هر طبقه (kg)	سطح محوری (m <sup>2</sup> )	سطح برشی (m <sup>2</sup> )	مان اینرسی (m <sup>4</sup> )	مان اینرسی قطبی (m <sup>4</sup> )
$2/53 \times 10^6$	۱۲۰/۷۱	۱۰۰/۵۹	۵۷۵۸۵	۱۱۴۴۳۲

جدول ۲. مشخصات لایه‌های خاک برای تیپ ۲.

عمق (m)	سرعت موج (m/s)S	سرعت موج (m/s)p	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	عمق (m)	سرعت موج (m/s)S	سرعت موج (m/s)p	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
۱	۵۱۰	۸۹۰	۱/۶	۱۶	۴۹۱	۱۹۸۷	۱/۹
۲	۴۹۵	۱۰۵۵	۱/۶	۱۷	۴۹۲	۱۸۱۹	۱/۹
۳	۵۰۰	۱۱۱۵	۱/۷	۱۸	۴۹۹	۱۶۴۳	۱/۹
۴	۴۸۰	۱۲۴۰	۱/۷	۱۹	۵۳۱	۱۴۹۷	۱/۹
۵	۵۲۰	۱۳۶۵	۱/۸	۲۰	۵۰۱	۱۴۹۹	۱/۹
۶	۵۱۰	۱۳۵۲	۱/۸	۲۱	۵۳۲	۱۳۷۶	۱/۹
۷	۴۸۵	۱۳۸۰	۱/۸	۲۲	۵۳۳	۱۵۰۱	۱/۹
۸	۵۰۰	۱۳۷۴	۱/۹	۲۳	۵۰۳	۱۵۰۲	۱/۹
۹	۵۱۷	۱۴۱۱	۱/۹	۲۴	۵۴۱	۱۶۵۲	۱/۹
۱۰	۵۰۰	۱۴۳۵	۱/۹	۲۵	۵۲۸	۱۵۰۳	۱/۹
۱۱	۴۵۵	۱۵۸۹	۱/۹	۲۶	۵۷۰	۱۵۰۴	۱/۹
۱۲	۴۶۰	۱۹۸۶	۱/۹	۲۷	۶۱۱	۱۶۵۶	۱/۹
۱۳	۵۱۸	۲۰۰۴	۱/۹	۲۸	۷۱۲	۱۶۵۴	۱/۹
۱۴	۵۰۴	۲۲۹۴	۱/۹	۲۹	۷۱۳	۱۶۵۵	۱/۹
۱۵	۴۹۵	۲۰۷۸	۱/۹	۳۰	۷۱۳	۱۶۵۵	۱/۹



شکل ۳. نحوه‌ی مدل‌سازی خاک و سازه.

(۴) لحاظ شده‌اند. هر خاک با ۳۰ لایه‌ی ۱ متری مدل شده است. مشخصات خاک‌های نوع ۲ و ۳ در لایه‌های مختلف، که با استفاده از آزمایش Down Hole به دست آمده‌اند، در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند. این تذکر لازم است که مشخصات خاک‌های نوع ۱ و ۴ در لایه‌های مختلف به ترتیب با اعمال ضریب در مشخصات خاک‌های نوع ۲ و ۳ ایجاد شده است؛ به صورتی که میزان سرعت‌های موج برشی و فشاری در لایه‌های مختلف و میانگین سرعت‌ها، در محدوده‌ی سرعت موج برشی برای خاک مرتبط قرارگیرد، تا بتوان روند تغییرات خواص خاک در عمق را شبیه‌سازی کرد.

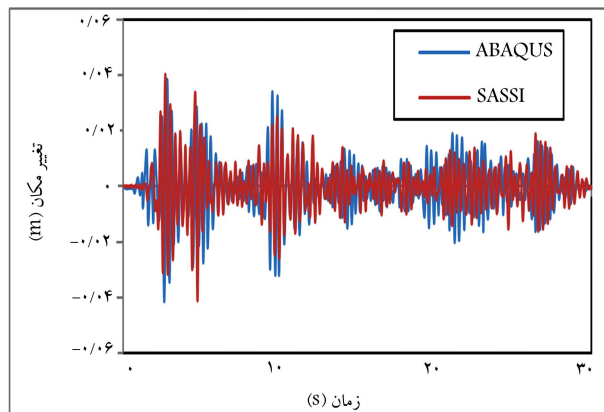
نظر گرفته شده است. دوره‌ی تناوب اصلی سازه، حدود ۳/۱۴ ثانیه بوده است. برای مدل کردن هر سازه از مدل جرم متمرکز و المان‌های Beam ۲۱ استفاده شده است، که در آن، طبقات به صورت جرم متمرکز مدل و با المان‌های Beam به هم متصل شده‌اند. مقدار هر جرم متمرکز، معادل جرم سازه در محدوده‌ی ارتفاعی همان جرم توده‌ی است. المان‌های Beam با توجه به خواص هندسی در محدوده‌ی ارتفاعی مورد نظر مدل شده‌اند و در آن از ۴۰ جرم متمرکز و ۴۰ المان Beam استفاده شده است. المان‌های مذکور، جرم‌های متمرکز را به یکدیگر و به پی متصل کرده و مشخصات آنها برای هر طبقه از ساختمان در جدول ۱ ارائه شده است. با استفاده از کنترل لنگر واژگونی و وزن سازه، یک فونداسیون بتنی مدفون به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ۵۰ × ۵۰ مترمربع و به ارتفاع حدود ۴ متر مدل شده است. برای فونداسیون از المان‌های SOLID (۸ گره‌یی) استفاده شده است. برای هر جرم متمرکز، سه درجه‌ی آزادی انتقالی در نظر گرفته شده و از درجه‌های آزادی دورانی صرف‌نظر شده است.

## ۲.۲. مدل‌سازی خاک

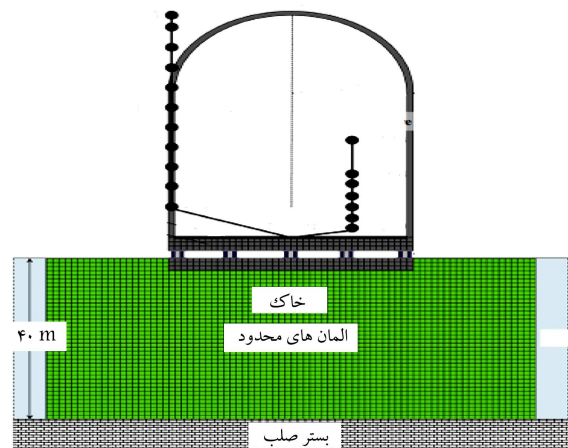
خاک مدل‌سازی شده در نرم‌افزار به صورت لایه‌بندی افقی است. در تحلیل حاضر، پروفیل خاک علاوه بر لایه‌های بالایی، شامل ۱۰ لایه‌ی اضافی با عمق متغیر همراه با میراگرهای ویسکوز است. ۱۰ لایه‌ی اضافی مذکور به اضافه‌ی میراگرها، که با اختیار کاربر اضافه می‌شوند، برای شبیه‌سازی نیم فضای نیمه بی‌نهایت هستند. در شکل ۳، مدل سازه و خاک به صورت جداگانه و شماتیک مشاهده می‌شود. خاک‌های هر نمونه بر اساس دسته‌بندی استاندارد ۲۸۰۰ (خاک نوع ۱ الی

جدول ۳. مشخصات لایه‌های خاک برای تیپ ۳.

عمق (m)	سرعت موج (m/s) S	سرعت موج (m/s) p	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	عمق (m)	سرعت موج (m/s) S	سرعت موج (m/s) p	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )
۱	۳۱۰٫۵	۲۷۰۲٫۹	۱٫۶	۱۶	۳۶۲٫۹	۱۸۸۱٫۹	۱٫۸
۲	۳۰۵	۲۶۴۸	۱٫۶	۱۷	۳۶۴	۲۲۸۱٫۵	۱٫۷۵
۳	۳۱۵٫۶	۳۰۰۹٫۷	۱٫۴	۱۸	۳۷۷٫۴	۲۰۲۱٫۸	۱٫۷۵
۴	۳۱۹	۳۱۶۴٫۱	۱٫۴	۱۹	۳۸۸٫۴	۲۲۹۰٫۶	۱٫۷۵
۵	۳۱۵	۳۲۳۸٫۵	۱٫۵	۲۰	۳۸۰٫۳	۲۴۵۴٫۳	۱٫۷۵
۶	۳۰۴	۳۲۷۵٫۱	۱٫۶۵	۲۱	۳۶۸	۲۷۲۵٫۸	۱٫۷۵
۷	۳۲۲٫۹	۳۲۹۳٫۲	۱٫۶۵	۲۲	۳۴۹٫۴	۲۱۹۶	۱٫۷۵
۸	۳۳۱٫۸	۳۳۱۱٫۳	۱٫۶۵	۲۳	۳۶۹	۲۱۹۹	۱٫۷۵
۹	۳۵۳٫۷	۲۷۲۶	۱٫۶۵	۲۴	۳۷۳٫۳	۲۰۳۸٫۹	۱٫۸
۱۰	۳۵۹٫۵	۲۰۰۶٫۲	۱٫۷۵	۲۵	۳۹۲٫۹	۲۰۳۹٫۶	۱٫۸
۱۱	۳۷۳٫۴	۲۰۰۵٫۱	۱٫۷۵	۲۶	۳۷۳٫۹	۲۳۱۱٫۶	۱٫۸
۱۲	۳۶۱٫۴	۲۰۱۴٫۲	۱٫۷۵	۲۷	۳۷۴٫۱	۲۴۷۶٫۲	۱٫۸
۱۳	۳۶۴٫۱	۱۶۶۵٫۱	۱٫۸	۲۸	۳۶۳٫۹	۲۳۳۹٫۱	۱٫۸
۱۴	۳۵۶٫۸	۱۳۷۲٫۸	۱٫۸	۲۹	۳۷۳٫۱	۲۰۷۰٫۴	۱٫۸
۱۵	۳۶۱٫۵	۱۳۷۳	۱٫۸	۳۰	۳۸۸٫۱	۲۱۱۱٫۸	۱٫۸



شکل ۵. تطبیق خروجی تاریخی زمانی تغییر مکان گره بالایی سازه به دست آمده از نرم افزار SASSI<sup>۲۰۰۰</sup> با نرم افزار آباکوس.



شکل ۴. مدل مربوط به یک راکتور هسته‌ای توسط نرم افزار آباکوس.<sup>[۳۰]</sup>

روش‌های متعدد مدل کردن آن، با توجه به شکل ۵ و جدول ۴، به نظر می‌رسد هم در زمان اتفاق و هم مقادیر نقاط پیک، تطابق قابل قبولی وجود دارد و در هر دو تحلیل، بیشترین تغییر مکان در پیک اول اتفاق افتاده است، که در حدود ۴ سانتی‌متر با اختلافی در حدود ۲٫۴٪ است.

#### ۴. تحلیل اندرکنش شهر - ساختگاه

تحلیل اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه برای مدل‌های مختلف سازه‌ی با فواصل مختلف بر روی خاک‌های مختلف انجام شده است. پاسخ‌های تغییر مکان و شتاب در ۲ نقطه روی فونداسیون و بام ساختمان مقایسه شده‌اند. در شکل ۶، پلان سازه‌ی تکی و گروه سازه‌ی (به نمایندگی از مدل‌های ۲ الی ۴) به صورت شماتیک رسم شده و سازه‌ی وسط گروه‌ها، که مبنای مقایسه با حالت تکی است، با دایره‌ی قرمز دور آن در وسط گروه مشخص شده است.

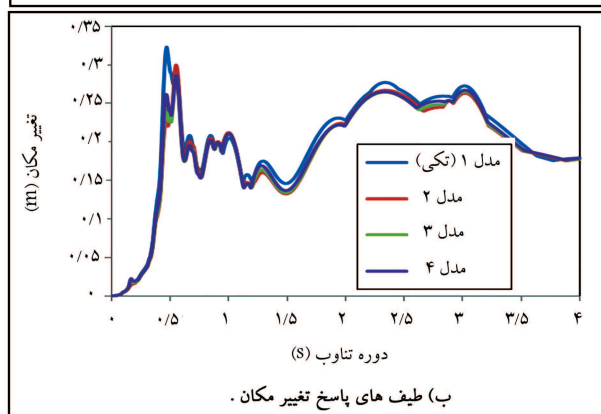
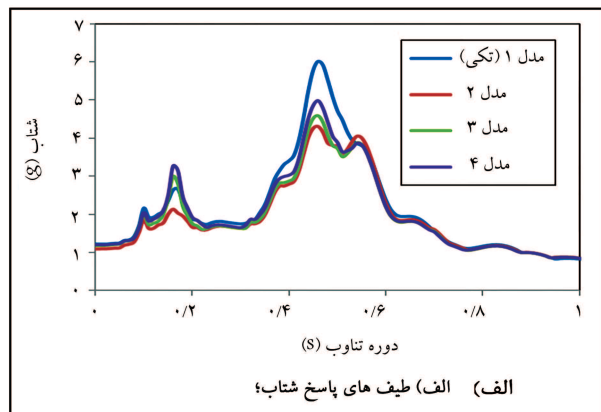
#### ۳. تحلیل صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل، از نتایج مربوط به پژوهش Lee و همکاران،<sup>[۲۸]</sup> استفاده شده است. در پژوهش حاضر، یک راکتور هسته‌ای توسط نرم افزار آباکوس<sup>۲۲</sup> به صورت دوبعدی مدل شده است (شکل ۴). مشخصات سازه (StickModel) و خاک (به صورت لایه‌بندی افقی) و بستر در نوشتار مرتبط به طور کامل ارائه شده است، که به صورت مشابه در نرم افزار SASSI<sup>[۲۷]</sup> مدل شده و از زلزله‌ی السنترو<sup>۲۳</sup> (۱۹۴۰) (مؤلفه‌ی N-S) در تحلیل حاضر استفاده شده است.

در شکل ۵، پاسخ تغییر مکان گره‌ی بالای سازه‌ی حاصل از نوشتار مرتبط و نتایج به دست آمده از نرم افزار SASSI مقایسه شده است. در جدول ۴، نیز در نقاط پیک، مقادیر بیشینه‌ی پاسخ حاصل از تحلیل آباکوس و SASSI ارائه شده است. با توجه به وجود عدم قطعیت‌های زیاد در بحث اندرکنش خاک و سازه و

جدول ۴. مقایسه‌ی پاسخ‌ها در نقاط پیک.

۲۶٫۴	۱۴٫۱	۹٫۷	۲٫۷	زمان (ثانیه)
۱٫۶	۱٫۳	۳٫۴	۴٫۱	بیشینه‌ی تغییر مکان (ABQUS)(cm)
۱٫۹	۱٫۴	۲٫۵	۴	بیشینه‌ی تغییر مکان (SASSI)(cm)
۱۵	۷٫۱	۲۱٫۸	۲٫۴	اختلاف (درصد)



شکل ۵. طیف‌های پاسخ گره بالا برای خاک تیپ ۱.

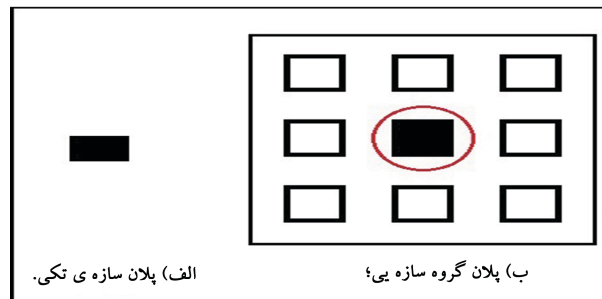
با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ می‌توان بیان کرد که در خاک تیپ ۱، بیشترین اختلاف در طیف پاسخ شتاب و در سازه‌های با دوره‌های تناوبی بین ۰٫۴ و ۰٫۵ s است. طیف‌های پاسخ شتاب و تغییر مکان فونداسیون و بالای سازه در خاک تیپ ۲ در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان بیان کرد که در خاک تیپ ۲، بیشترین اختلاف در طیف پاسخ شتاب و در سازه‌های با دوره تناوب‌هایی بین ۰٫۴ و ۰٫۷ s است.

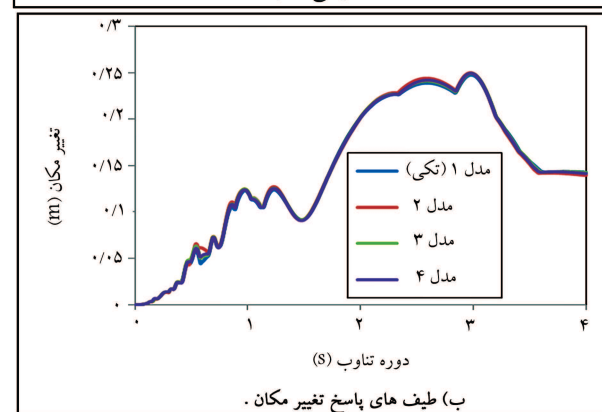
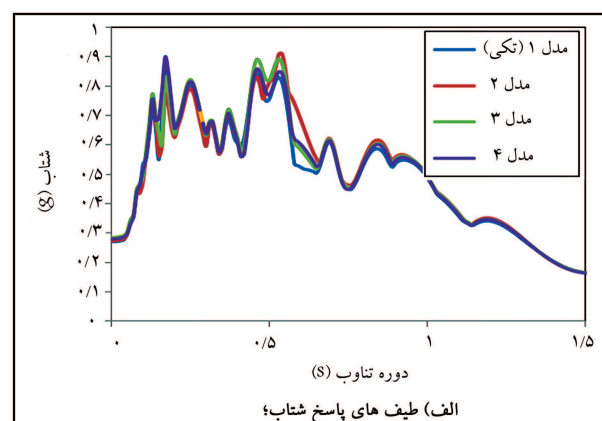
طیف‌های پاسخ شتاب و تغییر مکان روی فونداسیون و بالای سازه در خاک تیپ ۳ در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مقایسه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توان بیان کرد که در خاک تیپ ۳، بیشترین اختلاف در طیف پاسخ شتاب و در سازه‌های با دوره‌های تناوبی بین ۰٫۳ و ۰٫۹ s است. طیف‌های پاسخ شتاب و تغییر مکان روی فونداسیون و بالای سازه در خاک تیپ ۴ در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقایسه شده‌اند.

با توجه به شکل‌های ۱۳ و ۱۴ می‌توان بیان کرد که در خاک تیپ ۴، بیشترین اختلاف در طیف پاسخ شتاب و در سازه‌های با دوره‌های تناوبی بین ۰٫۴ و ۱٫۵ s است. به طور کلی برای گره‌های پایه و بالا برای ۴ تیپ خاک، در نظر گرفتن اثر SCI



شکل ۶. پلان مدل‌های سازه‌یی.

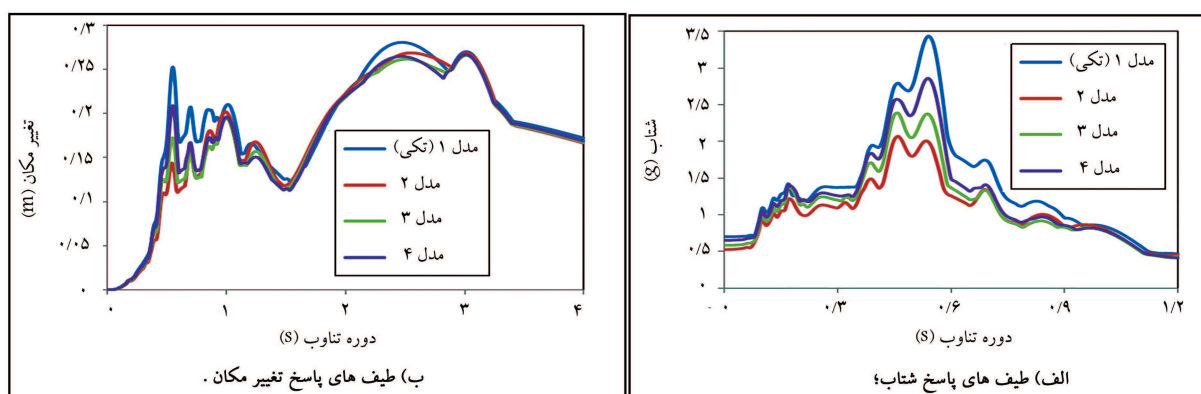
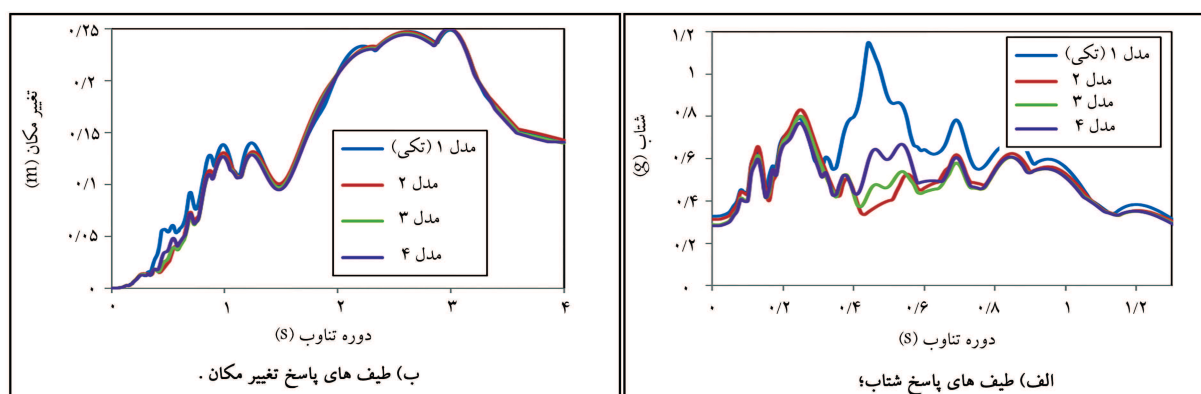
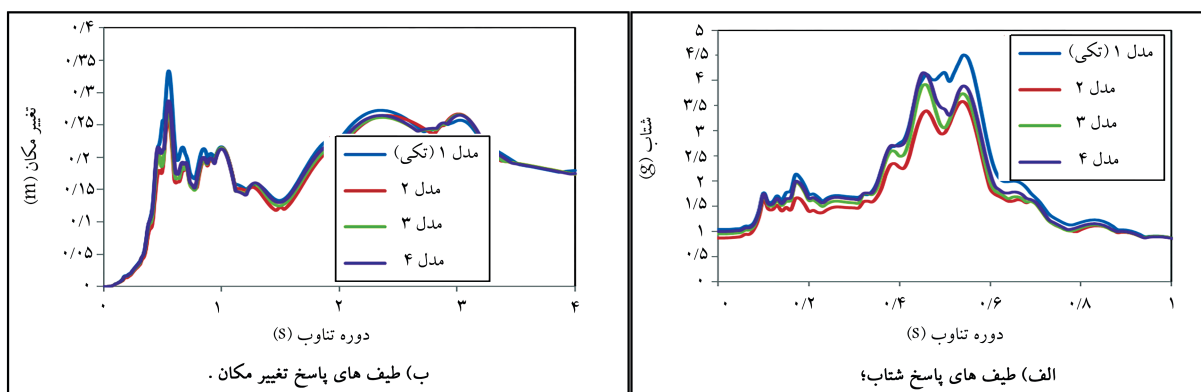
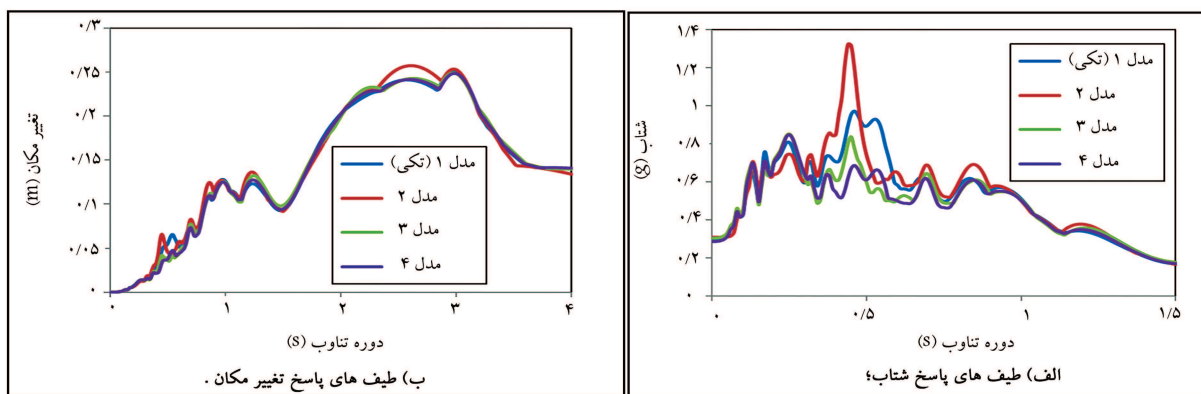


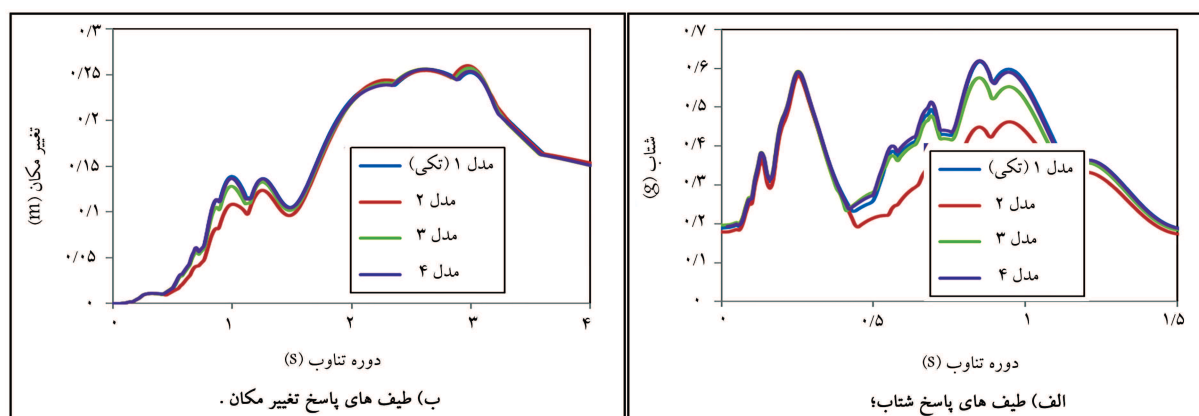
شکل ۷. طیف‌های پاسخ گره فونداسیون برای خاک تیپ ۱.

زلزله‌ی استفاده شده در پژوهش حاضر، مؤلفه‌ی افقی زلزله‌ی ال سنترو (۱۹۴۰) (مؤلفه‌ی N-S) با مدت زمان حدود ۳۰ ثانیه و با PGA حدود ۰٫۳۲g است.

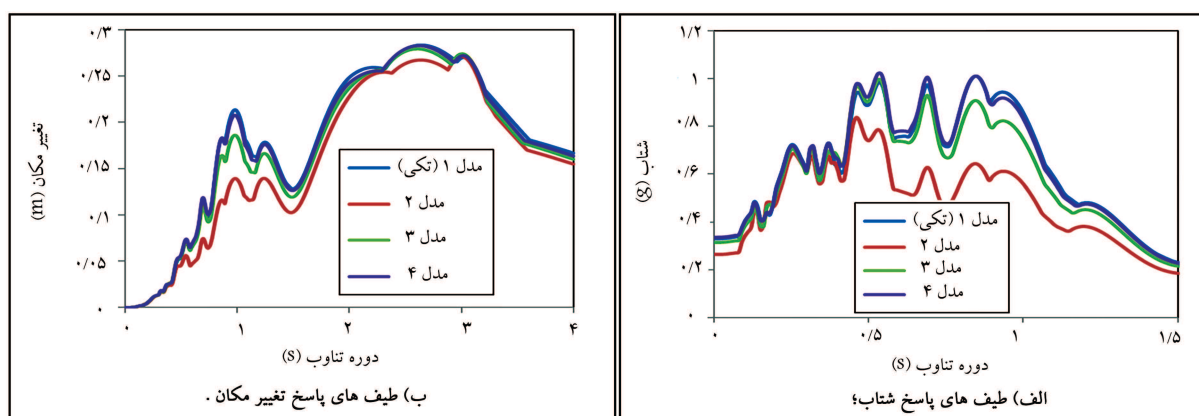
#### ۱.۴. مقایسه‌ی طیف پاسخ

طیف‌های پاسخ شتاب و تغییر مکان روی فونداسیون و بالای سازه در خاک تیپ ۱ در شکل‌های ۷ و ۸ مقایسه شده‌اند.





شکل ۱۳. طیف‌های پاسخ گره فونداسیون برای خاک تیپ ۴.



شکل ۱۴. طیف‌های پاسخ گره بالا برای خاک تیپ ۴.

کاهش یافته و نتایج و پاسخ‌های سازه‌ی وسط گره به پاسخ‌های سازه‌ی تکی نزدیک‌تر و با کاهش سختی خاک، مسئله‌ی مذکور نمایان‌تر شده است، به طوری که در خاک تیپ ۴ مقادیر طیف در مدل ۴ (دورترین حالت سازه‌ها در گره) با مدل ۱ (سازه‌ی تکی) منطبق شده است، که با توجه به تأثیر میرایی خاک و فاصله‌ی زیاد سازه‌ها، موج‌هایی که از سازه‌ها منعکس می‌شوند، نمی‌توانند در سازه‌ی مجاور خیلی تأثیرگذار باشند و در نتیجه این اتفاق منطقی به نظر می‌رسد.

## ۲.۴. مقایسه‌ی بیشینه‌ی پاسخ‌ها

در پژوهش حاضر، علاوه بر بیشینه‌ی پاسخ شتاب و تغییرمکان، پارامتر  $RMS^{24}$  پاسخ‌های شتاب و تغییرمکان فونداسیون و سازه به صورت جداگانه نیز مقایسه شده است. پارامتر  $RMS$  به نوعی دامنه‌ی پاسخ‌های گره را در کل زمان ارتعاش شامل می‌شود (رابطه‌ی ۶):

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}} \quad (6)$$

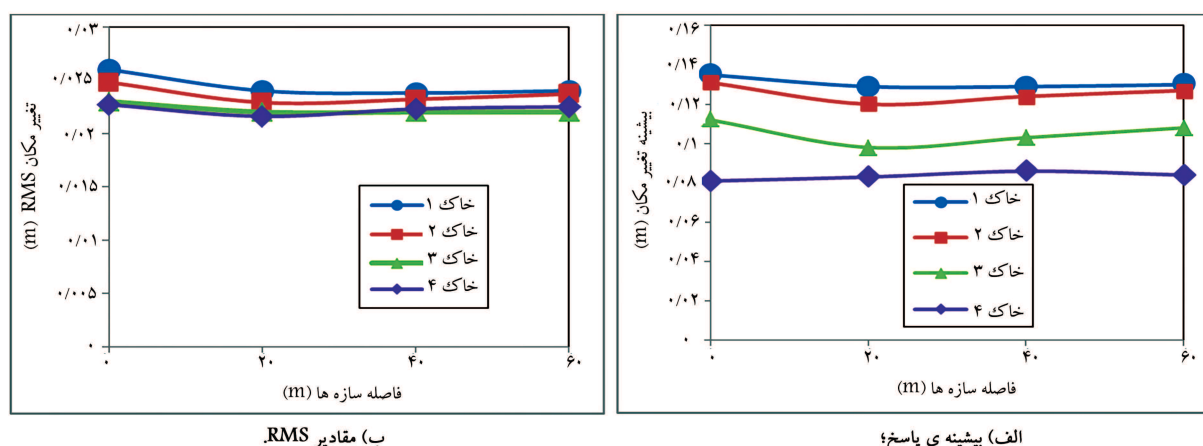
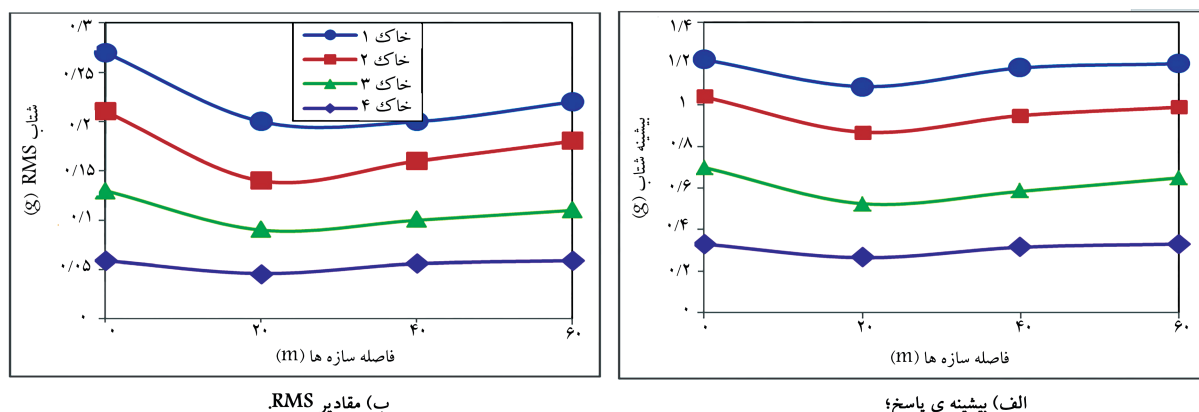
که در آن،  $y_i$  دامنه‌ی پاسخ‌ها و  $n$  تعداد نقاط نمودار تاریخچه‌ی زمانی (تعداد پاسخ‌ها) است.

در گروه‌های سازه‌ی، پاس‌های سازه‌ی وسط ارائه شده است. پاسخ‌های بیشینه‌ی

یعنی تأثیر ارتعاش ساختمان‌های مجاور در یکدیگر (مقایسه‌ی مدل ۱ با مدل‌های دیگر) باعث کاهش مقادیر طیف می‌شود و با کاهش سختی خاک تأثیر پدیده‌ی ذکر شده در بازه‌ی دوره‌ی تناوب بزرگتری مشاهده می‌شود، البته تأثیر  $SCI$  در تغییر مقادیر طیف شتاب بیشتر از طیف تغییرمکان است. گاهی اوقات اثر  $SCI$  باعث افزایش مقادیر طیف شده است، که می‌تواند به دلیل ترکیب‌های پیچیده‌ی دینامیکی و تطابق بسامدی بعضی از موده‌های ارتعاشی خاک و سازه‌های مجاور و زلزله باشد. با توجه به نمودارها می‌توان گفت با کاهش سختی خاک، اثر  $SCI$  در کاهش مقادیر طیف بیشتر می‌شود. همچنین تأثیر  $SCI$  در پاسخ‌های گره‌ی بالا بیشتر از گره‌ی پایه است، به خصوص برای طیف‌های تغییرمکان.

اثر  $SCI$  در طیف‌های تغییرمکان حدوداً در دوره‌های تناوب بین ۰/۵ و ۱/۵ در طیف‌های شتاب در دوره‌های تناوب بین ۰/۴ و ۱ الی ۱ بیشتر مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارها، در نظر گرفتن پدیده‌ی  $SCI$ ، تأثیر قابل توجهی در تعداد نقاط پیک و رزونانسی و محل اتفاق آنها نداشته است. همچنین برای خاک‌های نوع ۱ و ۲، در طیف‌های شتاب مربوط به گره‌ی پایه نسبت به گره‌ی بالا (با یا بدون در نظر گرفتن اثر  $SCI$ )، تعداد نقاط پیک و رزونانسی بیشتری مشاهده می‌شود، ولی در خاک‌های نوع ۳ و ۴ بر عکس تعداد زیاد نقاط رزونانسی در خاک‌های نوع ۱ و ۲ در گره‌ی پایه، می‌تواند به دلیل انطباق دوره‌های تناوب اصلی امواج زلزله و خاک با دوره‌های تناوب اصلی انتقالی و چرخشی پایه در خاک‌های سخت باشد. با افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها (مقایسه‌ی بین مدل‌های ۲ الی ۴)، آثار  $SCI$





سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۲۸٪ کاهش و برای سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۲۲٪ افزایش یافته است.

برای خاک تیپ ۴، بیشینه‌ی پاسخ شتاب در گره بالای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۲۰٪ کاهش و در سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۲۷٪ افزایش یافته است. همچنین شتاب RMS گره بالای سازه برای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۲۲٪ کاهش و برای سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۲۹٪ افزایش یافته است.

در نتیجه‌گیری کلی می‌توان بیان کرد که برای هر ۴ تیپ خاک، اختلاف زیادی در مقادیر بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان و همچنین تغییر مکان RMS سازه در وسط گروه‌های سازه‌ی مختلف نسبت به سازه‌ی تکی وجود ندارد (به طور میانگین برای خاک تیپ ۱ الی ۴ به ترتیب حدود ۵، ۸، ۸ و ۳ درصد کاهش) و می‌توان گفت که افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها از یک گروه به گروه دیگر نیز تفاوت چندانی در پاسخ‌ها ایجاد نکرده است.

پاسخ‌های بیشینه‌ی شتاب و شتاب RMS پایه‌ی سازه بر اساس تغییرات نوع خاک و فاصله‌ی ساختمان‌ها از یکدیگر در شکل ۱۷ مقایسه شده‌اند.

پاسخ‌های بیشینه‌ی تغییر مکان و تغییر مکان RMS پایه‌ی سازه بر اساس تغییرات نوع خاک و فاصله‌ی ساختمان‌ها از یکدیگر در شکل ۱۸ مقایسه شده‌اند.

برای خاک‌های تیپ ۱، ۲ و ۴ اختلاف زیادی در مقادیر بیشینه‌ی پاسخ شتاب

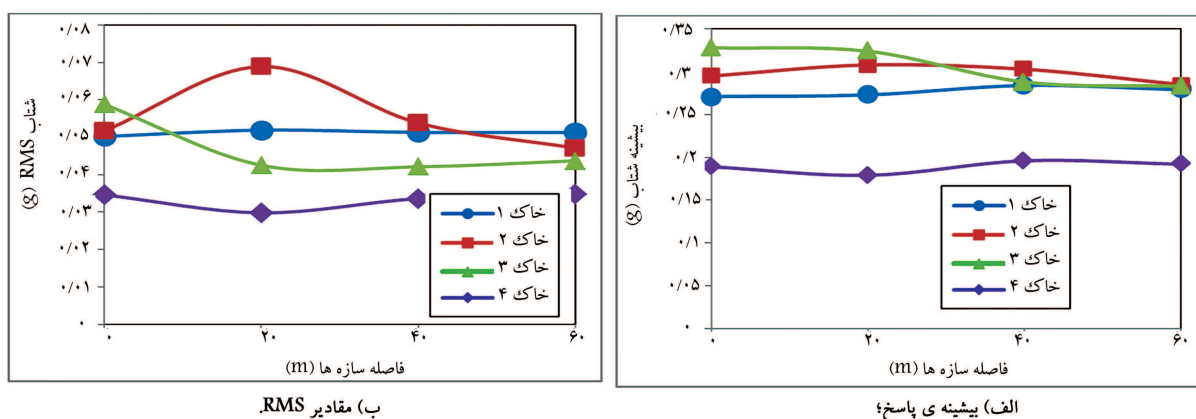
شتاب و شتاب RMS بالای سازه بر اساس تغییرات نوع خاک و فاصله‌ی ساختمان‌ها از یکدیگر در شکل ۱۵ مقایسه شده‌اند.

پاسخ‌های بیشینه‌ی تغییر مکان و تغییر مکان RMS بالای سازه بر اساس تغییرات نوع خاک و فاصله‌ی ساختمان‌ها از یکدیگر در شکل ۱۶ مقایسه شده‌اند.

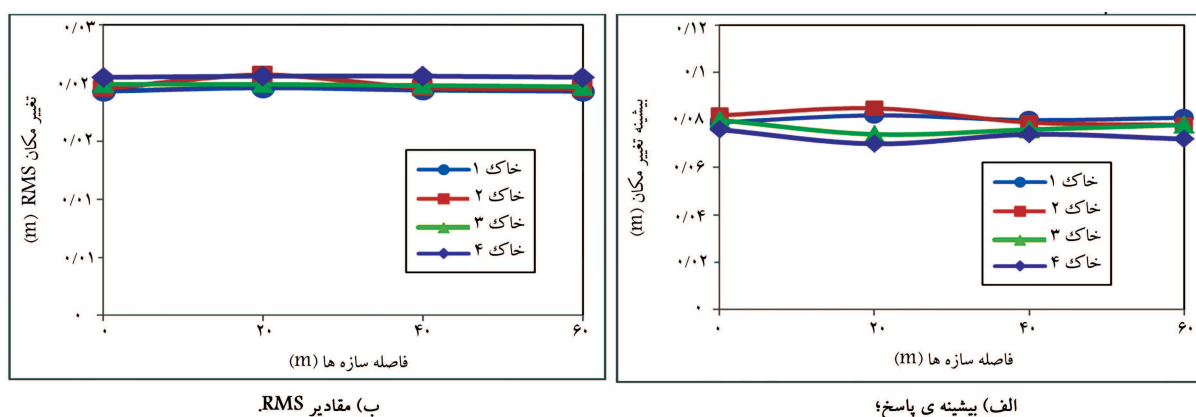
برای خاک تیپ ۱، بیشینه‌ی پاسخ شتاب در گره بالای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک (مدل ۱)، حدود ۱۰٪ کاهش و در سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۱۰٪ افزایش یافته است (تأثیر افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها از مدل ۲ به مدل ۴ و نزدیک شدن پاسخ به حالت سازه‌ی تکی). همچنین شتاب RMS گره بالای سازه برای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۲۶٪ کاهش و برای سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۹٪ افزایش یافته است.

برای خاک تیپ ۲، بیشینه‌ی پاسخ شتاب در گره بالای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۱۶٪ کاهش و در سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۱۴٪ افزایش یافته است. همچنین شتاب RMS گره بالای سازه برای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۳۴٪ کاهش و برای سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۳۰٪ افزایش یافته است.

برای خاک تیپ ۳، بیشینه‌ی پاسخ شتاب در گره بالای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تک، حدود ۲۵٪ کاهش و در سازه‌ی وسط مدل ۴ نسبت به مدل ۲، حدود ۲۴٪ افزایش یافته است. همچنین شتاب RMS گره بالای سازه برای



شکل ۱۷. مقایسه‌ی پاسخ‌های شتاب فونداسیون در خاک‌های مختلف.



شکل ۱۸. مقایسه‌ی پاسخ‌های تغییر مکان فونداسیون در خاک‌های مختلف.

و نمودارهای تاریخی‌های زمانی پاسخ تغییر مکان در بسیاری از نقاط بر هم منطبق هستند و حتی افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها از یک گروه به گروه دیگر نیز تفاوت چندانی در پاسخ‌ها ایجاد نکرده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر اندرکنش شهر-ساختمان در پاسخ‌های گره پایه و بام سازه با در نظر گرفتن تأثیر سختی خاک و فاصله‌ی سازه‌ها بررسی شده است. در واقع، ۳ گروه سازه‌ی (هر گروه شامل ۹ سازه) مدل شده‌اند، که در هر گروه ارتفاع و فاصله‌ی سازه‌ها یکسان و اختلاف بین سه گروه، فاصله‌ی بین سازه‌هاست؛ همچنین سازه به صورت تکی مدل شده است. سپس هر سه گروه و همچنین سازه‌ی تک به صورت جداگانه بر روی ۴ نوع خاک در تحلیل‌های مستقل تحت اثر زلزله قرار گرفتند. پاسخ‌های سازه‌ی تک نیز با سازه در وسط گروه‌ها برای ۴ نوع خاک به صورت مستقل مقایسه شده است، تا در هنگام انتشار امواج زلزله، اثر سازه‌های مجاور در پاسخ‌های یکدیگر بررسی شود. در پژوهش حاضر مشخص شد که در حالت کلی پاسخ سازه در گروه نسبت به سازه‌ی تکی کاهش می‌یابد، یعنی سازه‌های مجاور باعث کاهش پاسخ‌های یکدیگر و با کاهش سختی خاک، تأثیر پدیده‌ی مذکور بیشتر می‌شود. همچنین، با افزایش فاصله‌ی سازه‌ها در گروه، تأثیر پدیده‌ی اخیر کاهش می‌یابد و پاسخ‌های سازه در گروه به سازه‌ی تکی نزدیک می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در پژوهش حاضر، به طور کلی برای گره روی

پایه‌ی سازه در وسط گروه‌های سازه‌ی مختلف نسبت به سازه‌ی تکی وجود ندارد (کمتر از ۵٪)، ولی برای خاک تیپ ۳ در مدل‌های ۳ و ۴ (افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها) بیشینه‌ی پاسخ شتاب سازه‌ی وسط نسبت به سازه‌ی تکی به طور میانگین در حدود ۱۳٪ کاهش یافته است همچنین برای خاک تیپ ۳، مانند بقیه‌ی تیپ‌های خاک، اختلاف زیادی در بیشینه‌ی پاسخ شتاب سازه در وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تکی وجود ندارد (حدود ۱٪).

برای خاک تیپ ۱، اختلاف زیادی در شتاب RMS پایه‌ی سازه در وسط گروه‌های سازه‌ی مختلف نسبت به سازه‌ی تکی وجود ندارد (به طور میانگین کمتر از ۵٪) برای خاک تیپ ۲، شتاب RMS برای سازه‌ی وسط مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تکی، در حدود ۳۳٪ افزایش داشته است و برای سازه‌ی وسط مدل‌های ۳ و ۴ نسبت به سازه‌ی تکی اختلاف زیادی وجود ندارد (به طور میانگین کمتر از ۵٪) برای خاک تیپ ۳، شتاب RMS برای سازه‌ی وسط مدل‌های ۲، ۳ و ۴ نسبت به سازه‌ی تکی به طور میانگین در حدود ۲۸٪ کاهش یافته و افزایش فاصله‌ی بین سازه‌ها از یک گروه به گروه دیگر، تفاوت چندانی در پاسخ‌ها ایجاد نکرده است (کمتر از ۵٪) برای خاک تیپ ۴، شتاب RMS برای سازه‌ی وسط گروه مدل ۲ نسبت به سازه‌ی تکی در حدود ۱۴٪ کاهش یافته است و برای سازه‌ی وسط مدل‌های ۳ و ۴ نسبت به سازه‌ی تکی، اختلاف زیادی وجود ندارد (به طور میانگین کمتر از ۵٪). برای هر ۴ تیپ خاک، اختلاف زیادی در مقادیر بیشینه‌ی پاسخ تغییر مکان و همچنین تغییر مکان RMS پایه‌ی سازه در وسط مدل‌های ۲، ۳ و ۴ (گروه‌های سازه‌ی) نسبت به سازه‌ی تکی (مدل ۱) وجود ندارد (به طور میانگین کمتر از ۵٪).

در حدود ۵ الی ۱۰ درصد). البته تأثیر اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه در شتاب RMS با کاهش سختی خاک کمتر شده است. این تذکر لازم است که در خاک تیپ ۲، بیشترین تأثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه در شتاب RMS مشاهده می‌شود (به طور میانگین در حدود ۳۵٪).  
تأثیر اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه بر روی گره بالای سازه به طور میانگین در حدود ۱۰٪ نسبت به گره پایه بیشتر شده است.  
به طور کلی هم برای گره بالا و هم گره پایه‌ی سازه، تأثیر اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه در پاسخ‌های تغییرمکان ناچیز بوده است (به طور میانگین در حدود ۵٪).  
در نتیجه برای مقاصد طراحی لرزه‌ی سازه‌ها، به دلیل وجود سازه‌های مجاور، باید پاسخ‌های سازه‌ها را اصلاح کرد تا نتایج نزدیک‌تر به واقعیت را به دست آورد و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از خسارت پس از زلزله انجام شود. البته آثار SCI تابع عوامل متعدد و بسیار پیچیده است. لذا برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر باید پارامترها و مشخصات بیشتری بررسی شود؛ از جمله تأثیر شکل امواج زلزله (موج‌های سطحی و حجمی)، پیکربندی نامنظم ساختمان‌ها در خاک‌های مختلف، آثار شکل و مکانیزم شکست گسل‌های منطقه و غیره، که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده در نظر گرفته شوند.

فونداسیون می‌توان گفت تأثیر اندرکنش سازه‌ها در یکدیگر در خاک تیپ ۳ نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر است، به طوری که اختلاف بیشینه‌ی پاسخ شتاب در حالت گروهی نسبت به حالت تکی در حدود ۱۰٪ نسبت به سایر خاک‌ها بیشتر است.  
برای گره بالای سازه، مقادیر بیشینه‌ی پاسخ‌ها (هم شتاب و هم تغییرمکان) و همچنین شتاب و تغییرمکان RMS برای سازه‌ی تکی بیشتر از سازه در وسط گروه‌های سازه‌ی مختلف است (برای پاسخ‌های شتاب به طور میانگین در حدود ۲۵٪) و این یعنی زمانی که سازه‌ها در کنار هم قرار می‌گیرند، باعث کاهش در پاسخ‌های یکدیگر می‌شوند و همچنین این اختلاف برای مدل ۱، که سازه‌ها به هم نزدیک‌تر هستند، نسبت به مدل‌های ۳ و ۴ بیشتر است (برای پاسخ‌های شتاب به طور میانگین در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد)، (البته این اختلاف برای پاسخ‌های تغییرمکان کمتر از پاسخ‌های شتاب است).

این تذکر لازم است که تأثیر اندرکنش چندگانه‌ی سازه - خاک - سازه برای خاک‌های مختلف متفاوت است. به طور کلی برای گره بالای سازه، تأثیر اندرکنش شهر - ساختگاه در مقادیر بیشینه‌ی شتاب با کاهش سختی خاک بیشتر شده است (به طور میانگین در حدود ۵ الی ۱۰ درصد). همچنین با کاهش سختی خاک، تأثیر فاصله‌ی سازه‌ها در بیشینه‌ی پاسخ شتاب بیشتر شده است (به طور میانگین

## پانویس‌ها

1. site-city interaction
2. Wirgin & Bard
3. Clouteau & Aubry
4. Roussillon
5. Gueguen
6. Groby
7. Semblat
8. Bard
9. Kham
10. Gouasmia
11. Boumerdès
12. Sahar
13. Taborda & Bielak
14. Isbilioğlu
15. Guidotti
16. Christchurch
17. Schwan
18. Naryan
19. Xinzhen
20. system for analysis of soil-structure interaction
21. lumped-mass stick model
22. ABAQUS
23. EL Centro
24. root mean square

## منابع (References)

1. Ngamkhanong, C. and Kaewunruen, S. "The effect of ground borne vibrations from high speed train on overhead line equipment (OHLE) structure considering soil-

structure interaction", *Science of The Total Environment*, **627**, pp. 934-941 (2018).

2. Karatzetzou, A. and Pitilakis, D. "Modification of dynamic foundation response due to soil-structure interaction", *Journal of Earthquake Engineering*, **22**(5), pp.861-880 (2018).
3. Vicencio, F. and Alexander, N.A. "Higher mode seismic structure-soil-structure interaction between adjacent building during earthquakes", *Engineering Structures*, **174**, pp. 322-337 (2018).
4. Aldaikh, H., Alexander, N.A., Ibrahim, E. and et al. "Two dimensional numerical and experimental models for the study of structure-soil-structure interaction involving three buildings", *Computers & Structures*, **150**, pp. 79-91 (2015).
5. Wirgin, A. and Bard, P.-Y. "Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico city", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(3), pp. 914-920 (1996).
6. Clouteau, D. and Aubry, D. "Modifications of the ground motion in dense urban areas", *Journal of Computational Acoustics*, **09**(04), pp. 1659-1675 (2001).
7. Boutin, C. and Roussillon, P. "Assessment of the urbanization effect on seismic response", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**(1), pp. 251-268 (2004).
8. Gueguen, P., Bard, P.-Y. and Chavez-Garcia, F.J. "Site-city seismic interaction in Mexico City-like environments: An analytical study", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**(2), pp. 794-811 (2002).
9. Tsogka, C. and Wirgin, A. "Simulation of seismic response in an idealized city", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **23**(5), pp. 391-402 (2003).

10. Groby, J.-P., Tsogka, C. and Wirgin, A. "Simulation of seismic response in a city-like environment", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pp. 487-504 (2005).
11. Semblat, J.-F., Kham, M., Bard, P.-Y. and et al. "Could \site-city interaction modify site effects in urban areas?", *In Canadian Association for Earthquake Engineering, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada. International Association for Earthquake Engineering. Paper 1978* (2004).
12. Bard, P., Chazelas, J., Gueguen, P. and et al. "Site-City interaction. In Assessing and managing earthquake risk", *C.S. Oliveira, A.Roca and X. Goula Eds, Springer*, p. 530 (2005).
13. Kham, M., Semblat, J.-F., Bard, P.-Y. and et al. "Seismic site-city interaction: Main governing phenomena through simplified numerical models", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(5), pp. 1934-1951 (2006).
14. Semblat, J.-F., Kham, M. and Bard, P.-Y. "Seismic-wave propagation in alluvial basins and influence of site-city interaction", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(6), pp. 2665-2678 (2008).
15. Semblat, J.-F., Kham, M., Gueguen, P. and et al. "Site-City interaction through modifications Of site effects", *arXiv.org physics* (2009).
16. Gouasmia, A. "Seismic wave propagation in soil-structures systems", *civil and Environmental Research ISSN 2224-5790 (Paper)*, ISSN **6**(5), pp. 2225-0514 (2014).
17. Sahar, D. and Narayan, J.P. "Study of role of basin shape in the site-city interaction effects on the ground motion characteristics", *Nat. Hazards*, **75**, pp. 1167-1186 (2015).
18. Taborda, R. and Bielak, J. "Three dimensional nonlinear soil and site-city effects in urban regions", *PhD thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA. AAI3438461* (2010).
19. Isbilibroglu Y. "Coupled soil-structure interaction effects of symmetric and asymmetric buildings in urban regions", *Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carnegie Mellon University* (2013).
20. Guidotti, R. "Near-field earthquake ground motion rotations and relevance on civil engineering structures", *Ph. D. Thesis, Politecnico di Milano* (2012).
21. Schwan, L., Boutin, C., Padr'on, L.A., and et al. "Site-city interaction: theoretical, numerical and experimental crossed-analysis", *Geophysical Journal International*, **205**, pp. 1006-1031 (2016).
22. Sahar, D. and Naryan, J. "Quantification of modification of ground motion due to urbanization in a 3D basin using viscoelastic finite-difference modeling", *Natural hazards*, **81**(2), pp. 779- 806 (2016).
23. Kumar, N. and Naryan, J. "Quantification of site-city interaction effects on the response of structure under double resonance condition", *Geophysical Journal International*, **212**, pp. 422-441 (2017).
24. Kato, B. and Wang, G. "Ground motion simulation in an urban environment considering site-city interaction: a case study of kowloon station, Hong Kong", *3rd Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers, University of Illinois, Urbana-Champaign, United States* (Aug. 11-12 2017).
25. Xinzhen, L., Yuan, T., Gang, W. and et al. "A numerical coupling scheme for nonlinear time-history analysis of buildings on a regional scale considering site-city interaction effects", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **47**(13), pp.2708-2725 (2018).
26. *Standard No. 2800 Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*, 4th Edition (2013).
27. Lysmer, J., Ostadan, F., Tabatabaie, M. and et al. "Computer program ", »sassi2000 « *University of California, Berkeley* (2000).
28. Lee, J.-H., Kim, J.- K. and Kim, J.-H. "Nonlinear analysis of soil-structure interaction using perfectly matched discrete layers", *The Journal of Computers and Structures*, **142**, pp. 28-44 (2014).