# مطالعه تجربی- تحلیلی اثرات اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های متداول با پی‌های سطحی و مدفون

**نقدعلی حسین‌زاده**، استادیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
**محمد داوودی**، استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله
**ابراهیم رعیت رکن‌آبادی**، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

## چکیده

در این مقاله، آثار اندرکنش دینامیکی خاک- سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای سطحی و مدفون در خاک به کمک آزمایشهای میز لرزان روی مدل‌های مقیاس شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه به عنوان نمایندهٔ ساختمانهای متداول در یک محیط شهری و دو مدل خاک نرم و نسبتاً نرم به عنوان نمایندهٔ زمینهای نوع *III* و *II* مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران با ضریب مقیاس هندسی ۰/۰۱ طراحی و ساخته شده‌اند. این مدل‌ها تحت زلزله‌های ۱۹۴۰ السنترو آمریکا و ۱۹۸۱ طبس ایران روی میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج مطالعات آزمایشگاهی با مدلسازی تحلیلی به کمک نرم‌افزار *Opensees* مقایسه شده است. مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که مدل رفتاری ساخته شده در نرم‌افزار قابلیت مدلسازی تأثیرات اندرکنش خاک- سازه را دارا می‌باشد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدفون بودن پی باعث کاهش اثرات اندرکنش خاک- سازه در سازه‌ها بین ۲ الی ۶ درصد می‌گردد. این کاهش با افزایش عمق مدفون شدگی شدیدتر می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** اندرکنش خاک- سازه، پی‌های مدفون، تستهای دینامیکی، مد گهواره‌ای، میز لرزان

## ۱- مقدمه

با گسترش تکنولوژی و شهرنشینی، پروژه‌های وسیع و گسترده‌ای طراحی و اجرا می‌شوند که بعضی از این طرحها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شود. با گذشت زمان مقیاس و اندازه این طرحها افزایش یافته و در این شرایط، با توجه به وضعیتهای ناشناخته یا عوامل در نظر گرفته نشده، ضریب اطمینان طراحی و به تبع آن قیمت تمام شده پروژه افزایش می‌یابد. یکی از این عوامل، وقتی بار دینامیکی به سازه وارد می‌شود، بر هم کنش خاک- پی- سازه است. تحلیل عکس‌العمل دینامیکی سازه‌هایی که تحت بارهای بالقوه زلزله در پایه خود قرار دارند، یکی از وظایف اصلی مهندسی زلزله می‌باشد. در دینامیک سازه تعیین تنشها و تغییرمکانهای سازه که تحت اثر بارهای دینامیکی مثل زلزله قرار دارد، از اهم مسائل است. اما در حالت کلی سازه با خاک اطراف خود در حال برهم‌کنش است، بنابراین بار وارده به محیط خاک اطراف سازه، در خلال تحریک زلزله باید در نظر گرفته شود. در مقایسه با سازه، خاک دارای قلمرو نامحدودی است که شرایط انتشار امواج در آن، باید در مدل دینامیکی به حساب آورده شود. در سالهای اخیر، کارهای زیادی روی برهم‌کنش دینامیکی سازه و خاک یا سنگ، برای انواع مختلف سازه انجام شده است. به ویژه برای سازه‌های سنگین و حجیم، مثل نیروگاه‌های اتمی، سدها، سکوهای ساحلی، پلها و سازه‌های بلند که بر روی خاک نرم بنا شده‌اند، برهم‌کنش بین سازه و پی بسیار مهم می‌باشد [۱].

اندرکنش دینامیکی خاک- سازه در اثر عبور امواج زلزله از بین سیستم خاک- سازه اتفاق می‌افتد. فونداسیون باعث به دام انداختن امواج لرزه‌ای می‌شود و انرژی آن را به سمت سازه می‌فرستد و سپس این انرژی از سازه به خاک برمی‌گردد.

در طی این فرآیند، حرکت زمین از آنچه در غیاب سازه اتفاق می‌افتد، متفاوت است. همچنین حرکت سازه هم نسبت به حالت سازه با پایهٔ گیردار متفاوت است. به دلیل وجود اثر اندرکنش خاک- سازه خاک حرکت اضافی را تجربه می‌کند. به طور کلی، اندرکنش خاک- سازه مجموعه‌ای از پدیده‌ها در پاسخ سازه است که توسط انعطاف‌پذیری خاک فونداسیون ایجاد می‌شود، همان طور که پاسخ لایه‌های خاک در اثر حضور سازه ایجاد می‌گردد. مدل کردن این تأثیرات به درجات آزادی اضافی و همچنین به کار بردن روشهای انتشار امواج نیاز دارد. به طورکلی، این پدیده باعث افزایش پریود سازه، افزایش سهم مد گهواره‌ای نسبت به پاسخ کل و معمولاً باعث کاهش برش پایه می‌شود.

کاهش پاسخ سازه ناشی از پراکندگی امواج از فونداسیون و انتشار انرژی لرزه‌ای سازه به درون خاک می‌باشد. هنگامی که خاک اطراف فونداسیون، پاسخ‌های غیرخطی کم تا متوسط را تجربه می‌کند، اندرکنش خاک- سازه باعث جذب انرژی امواج ارتعاشی شده و بنابراین باعث کاهش انرژی محرک سازه می‌گردد. مهمترین چالش در مورد طراحی لرزه‌ای در آینده این است که این مقدار اتلاف انرژی به صورت کمّی مشخص گردد و در طراحی سیستم خاک- سازه وارد شود [۲].

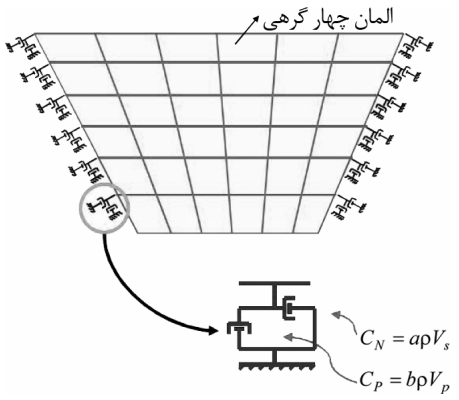
برای بررسی اثرات اندرکنش خاک- سازه در آیین‌نامه‌های طرح لرزه‌ای ضوابط محدودی وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان به استاندارد *ASCE-705* اشاره نمود که فصل ۱۹ این استاندارد به برررسی اثرات اندرکنش خاک- سازه در طرح لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی پرداخته است. لیکن ضوابط ارائه شده برای پی‌های سطحی بوده و در مورد پی‌های مدفون در خاک ضوابط خاصی ارائه نشده است. متأسفانه آیین‌نامه‌ها و استانداردهای ایران مانند استاندارد ۲۸۰۰ زلزله ایران ضوابطی در این خصوص ارائه نکرده‌اند. بنابراین مطالعه تجربی- تحلیلی اثرات اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه‌های متداول با پی‌های سطحی و مدفون می‌تواند در راستای تکمیل ضوابط آیین‌نامه‌های ساختمانی حائز اهمیت باشد. اطلاعات کامل از پیشینه و روشهای مختلف تحلیل اندرکنش خاک- سازه در مراجع [۲] تا [۴] ذکر شده است.

## ۲- تحلیل اندرکنش خاک- سازه به روش مستقیم

روش اجزای محدود در مسائل دینامیک خاک و فونداسیون، دارای یک مرحلهٔ اضافی برای تعریف محیط خاک است. این روش نیاز به تقسیم‌بندی و تعریف المانهای محدود در حجمِ مشخص از خاک دارد. این تقسیم‌بندی انرژی سیستم را محصور و مشخصات دینامیکی آن را از حالت طبیعی خارج می‌کند. برای حل این مسأله، معمولاً روش اجزای محدود به همراه مرزهای انتقالی به کار گرفته می‌شود. نتایج این فرمولاسیون ترکیبی معمولاً به عنوان روش اجزای محدود دینامیکی نام برده می‌شود. مرزهای انتقالی انتشار امواج به داخل یک محیط نیمه بینهایت را شبیه‌سازی می‌کنند و حوزهٔ دور را در رفتار سطح آزاد بیان می‌کنند (که از اندرکنش با دیگر سیستم‌های مکانیکی جدا شده است). در فرمولاسیون اصلی، مرزهای انتقالی به همراه حجمِ تقسیم‌بندی شده شامل فونداسیون و خاک اطراف می‌شدکه در اندرکنش با سازه قرار داشت. بنابراین مرزها معمولاً دور از فونداسیون قرار داشتند. اما با استفاده از روش حجم انعطاف‌پذیر، که شامل تعریف کل ناحیهٔ لایه‌بندی شده در یک فرم ریاضی می‌شود، دیگر نیاز به قرار دادن مرزهای انتقالی دور از فونداسیون نیست. سپس مرزهای انتقالی به تقسیم‌بندیهای ساده‌ای وصل می‌شوند: یک ستون قائم از المانهای چهار گرهی برای مسائل دو بعدی و یک ستون از المانهای استوانه‌ای برای ترکیب با مدل‌های سه بعدی. فرمولاسیون این ناحیه تقسیم‌بندی شده به صورت تقریبهای اجزای محدود بیان شده است. همین فرمول‌بندی برای هر گره خاک- فونداسیون تکرار می‌شود تا ماتریس سختی کل ناحیه لایه‌بندی شده به دست آید [۵].

نرم‌افزارهای مختلفی برای تحلیل مسأله اندرکنش خاک- سازه وجود دارد. به طور کلی نرم‌افزارهای عمومی که بر مبنای روش اجزای محدود هستند، توانایی انجام تحلیل مسائل اندرکنش را دارند. نرم افزارهای تخصصی مثل *Flush* و *Sassig* نیز به‌طور تخصصی به مسأله اندرکنش

خاک- سازه می‌پردازند. در این بین نرم‌افزار *Opensees* به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی مناسبتر به نظر می‌رسد. این نرم‌افزار قابلیت تحلیل مسائل خاک و سازه را به صورت غیرخطی در محیط دو یا سه بعدی داراست. برای محدود نمودن ابعاد شبکهٔ گسترده اجزای محدود مرزهای انتقالی قابل استفاده است. به این منظور، مطابق شکل (۱) با استفاده از تئوری لیسمر و قرار دادن میراگر در مرزها، می‌توان اثر انتشار امواج به خارج از محیط خاک را شبیه‌سازی نمود. در این شکل، $C_N$ ضریب میرایی میراگر عمود بر سطح، $C_p$ ضریب میرایی میراگر موازی با سطح، $V_s$ سرعت موج برشی خاک، $V_p$ سرعت موج فشاری خاک، $\rho$ وزن مخصوص خاک و $a$ و $b$ ضرایب متغیری هستند که به ابعاد المان بستگی دارند. همچنین این نرم‌افزار مجهز به زبان برنامه‌نویسی *TCI* است که استفاده از آن را برای مطالعات پارامتریک آسان می‌گرداند.

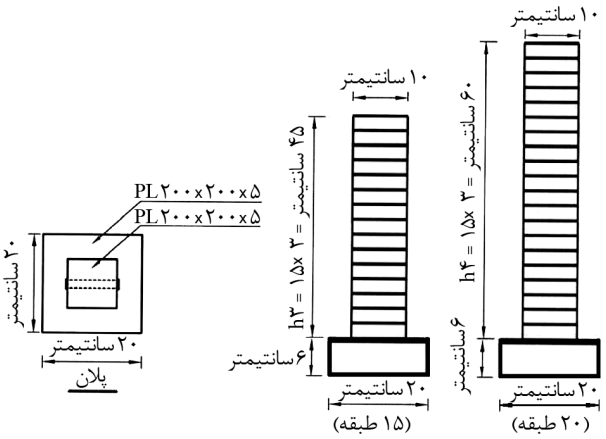



***شکل (۱):*** *المان مورد استفاده در مرزهای انتقالی.*

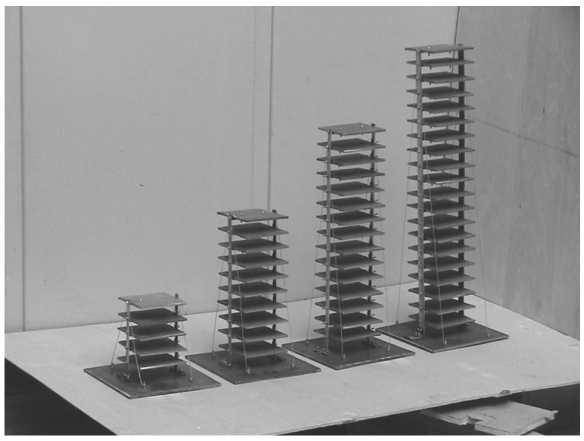
## ۳- مشخصات مدل‌های آزمایشگاهی

چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه برای مطالعهٔ سازه‌های سطحی و دو مدل ۱۵ و ۲۰ طبقه برای مطالعهٔ سازه‌های مدفون، در آزمایشگاه طراحی و ساخته شده‌اند. مشخصات مدل‌ها طوری در نظر گرفته شده‌اند که با شرایط نمونه‌های واقعی یک محیط شهری مشابه باشد. با توجه به امکانات موجود از جمله فضای آزمایشگاهی، ابعاد هندسی میز لرزان، ظرفیت جکهای هیدرولیکی و غیره ضریب مقیاس مدلسازی برابر ۰/۰۱= $\lambda$ انتخاب شده است. برای طرح مدل‌های مقیاس شده از تئوری تشابه هندسی و دینامیکی استفاده شده است. با توجه به این که ضرایب مقیاس برای شرایط $1g$ به دست آمده‌اند ($g$ شتاب جاذبه زمین است) در نتیجه شتابهای مدل و نمونه یکسان است.

برای تهیه مدل‌های سازه‌ای از سیستم قاب خمشی با اتصالات پیچ و مهره استفاده شده است. صفحات فولادی در تراز طبقات، سیستم کف صلب و جرم طبقه را تشکیل داده‌اند. پی‌ها به صورت یکپارچه، صلب و به شکل مربع می‌باشند. ارتفاع هر طبقه باربر ۳ سانتیمتر، وزن هر طبقه برابر ۰/۴ کیلوگرم و ابعاد پلان پی ۲۰x۲۰ سانتیمتر می‌باشند. مشخصات مدل‌های سازه‌ای در شکل (۲) و نمایی از مدل‌های ساخته شده نیز در تصویر (۱) ارائه شده است.




***شکل (۲):*** *مشخصات هندسی مدل‌های سازه‌ای ۱۵ و ۲۰ طبقه.*



***تصویر (۱):*** *نمایی از مدل‌های ساخته شده.*

هدف از طرح مدل‌های خاک این است که رفتار زمینهای نوع *III* و *II* مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران ویرایش دوم شبیه‌سازی شود. بنابراین سرعت

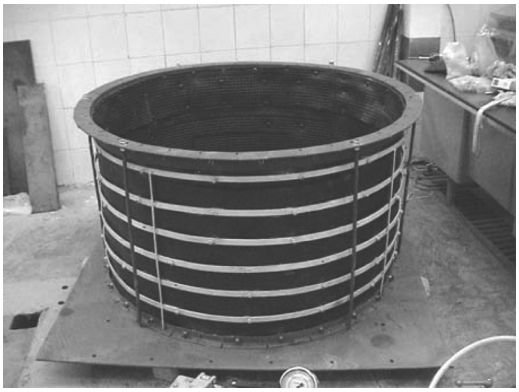
موج برشی مدل‌های مقیاس شده به ترتیب در حدود ۳۰ متر بر ثانیه و ۴۵ متر بر ثانیه مورد نظر می‌باشد. با آزمایش نمونه‌های مختلف در آزمایشگاه مکانیک خاک پژوهشگاه، این نتیجه‌گیری حاصل شد که خاکهای ریزدانه با رطوبت بالا علاوه بر این که سرعت موج برشی کمتری دارند از پایداری کافی در مقابل ارتعاشات متعدد نیز برخوردارند. بنابراین خاک رس لای‌دار مطابق استاندارد *ASTM* با رطوبت ۲۸ درصد برای مدل خاک نوع *III* و ۲۴ درصد برای مدل خاک نوع *II* انتخاب گردیده است.

یک ظرف استوانه‌ای شکل به قطر ۱۲۰ سانتیمتر و به ارتفاع ۷۰ سانتیمتر با جداره انعطاف‌پذیر برای نگهداری و نصب خاک روی میز لرزان طراحی و ساخته شده است. نمایی از این ظرف در تصویر (۲) ملاحظه می‌شود. جدارهٔ ظرف به صورت یک غشای لاستیکی نرم عمل می‌کند، به طوری که ایجاد تغییرشکلهای برشی در مدل خاک به راحتی امکانپذیر می‌باشد. حلقه‌های فولادی پیرامون دیواره نرم ضمن تأمین فشار جانبی محصورکننده از شکم دادن خاک و کاهش ارتفاع آن جلوگیری می‌کند. صفحهٔ فلزی تحتانی که مجموعهٔ ظرف و خاک داخل آن را به میز لرزان اتصال می‌دهد، به عنوان بستر سنگی عمل می‌کند. وزن مخصوص مدل خاک برابر $\gamma_s$ =۱۹ کیلونیوتن بر متر مکعب و نسبت پواسون آن برابر $\nu$ =۰/۴ و وزن مجموعه ظرف به علاوه خاک داخل آن در حدود ۱۵ کیلونیوتن می‌باشد. برای جزئیات طراحی ظرف به مرجع [۴] مراجعه شود.

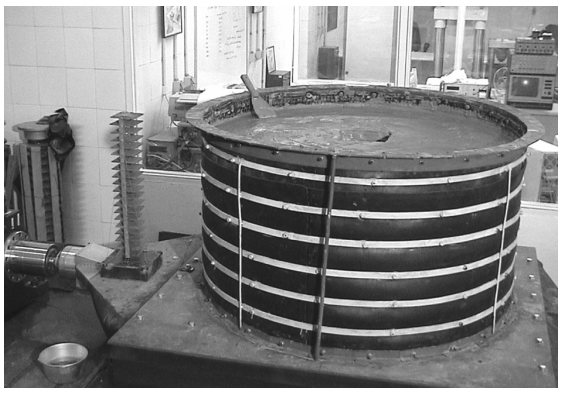
## ۴- برنامهٔ آزمایش روی میز لرزان

برای انجام آزمایشهای دینامیکی از میز لرزان پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله استفاده شده است. ابعاد این میز ۱/۲x۱/۴ متر می‌باشد که توسط یک سیستم هیدرولیکی با حداکثر نیروی ۵۰ کیلونیوتن به ارتعاش در می‌آید. محرک هیدرولیکی می‌تواند ترکیبی از امواج سینوسی، ذوزنقه‌ای، جاروی فرکانسی سینوسی و یا هر رکورد دلخواه نظیر زلزله واقعی را تولید کند. ارتعاشات به صورت یک بعدی و در جهت افقی تولید می‌شوند. قابلیت ارتعاشات قائم نیز وجود دارد.

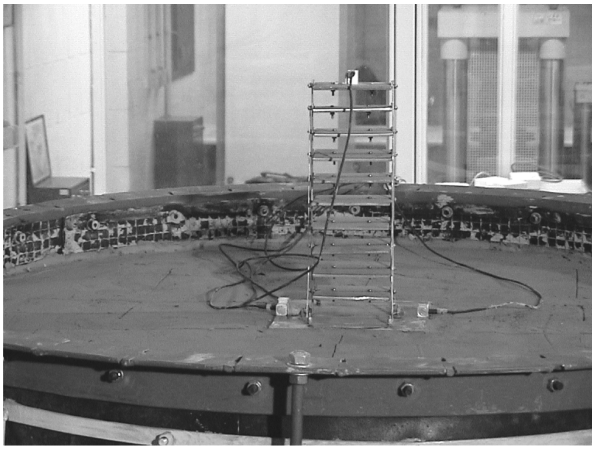
برنامهٔ آزمایش مدل‌ها شامل چهار مرحله می‌باشد. در مرحلهٔ اول، مدل‌های سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه با پایه صلب (بدون اندرکنش با خاک)، در مرحلهٔ دوم پاسخ سطح آزاد در غیاب مدل‌های سازه‌ای، در مرحلهٔ سوم اندرکنش سازه‌های سطحی و در مرحلهٔ چهارم اندرکنش سازه‌های ۱۵ و ۲۰ طبقه مدفون مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. مجموعهٔ آزمایشها شامل: ارتعاش آزاد مدل‌های سازه‌ای، آزمایش سرعت موج برشی خاک، آزمایش جاروی فرکانسی و آزمایش دینامیکی موج برشی خاک، آزمایش جاروی فرکانسی و آزمایش دینامیکی تحت زلزله‌های ۱۹۴۰ السنترو و ۱۹۷۸ طبس می‌باشد. این مراحل آزمایشی در دو فاز *I* و *II* برای دو نوع خاک مختلف انجام گرفته است. نمایی از آزمایشهای اندرکنش خاک- سازه برای سازه‌های با پایهٔ گیردار (بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک- سازه)، حرکت میدان آزاد خاک و اندرکنش سازه‌های سطحی روی میز لرزان به ترتیب در تصویرهای (۳) و (۴) نشان داده شده است.



***تصویر (۲):*** *نمایی از ظرف مدل ساخته شده.*



***تصویر (۳):*** *نمایی از آزمایشهای میدان آزاد و سازه با پایهٔ گیردار.*



**تصویر (۴):** *نمایی از آزمایشهای اندرکنش سازه‌های سطحی.*

## ۵- مدل عددی

با توجه به این که حل کل مسأله به روش اجزای محدود، پیچیدگی زیادی دارد، لذا به منظور بررسی صحت مش‌بندی و دقت مدلسازی عددی، مدل ساده شده‌ای ساخته شده و بررسیهای مقدماتی روی آن انجام می‌گیرد. این مدل ساده شده همچنین به منظور بررسی رفتار غیرخطی خاک مفید خواهد بود. برای نیل به این مقصود یکسری تست روی ستونی از خاک به صورت انتشار موج یک بعدی پیشنهاد می‌گردد:

الف) آنالیز پوش‌آور روی ستون خاک غیرخطی: به این منظور آنالیز استاتیکی غیرخطی (*Pushover*)، روی این مدل انجام می‌گیرد. با استفاده از آنالیز استاتیکی غیرخطی، رفتار غیرخطی خاک مشخص می‌گردد.

ب) آنالیز دینامیکی روی ستون خاک الاستیک: با اعمال نیروی زلزله روی ستونی از خاک الاستیک، می‌توان به توانایی مش‌بندی در ظاهر کردن امواج در محیط به صورت درست بدون فیلتر کردن فرکانسهای مناسب پی برد. این آزمایش همچنین اجازه انتخاب پارامترهای میرایی مناسب را می‌دهد. البته باید به این نکته توجه داشت که این میرایی، یک میرایی اضافی (ناچیز) است که برای پایداری طرح عددی استفاده می‌شود و راه اصلی برای اتلاف انرژی نیست. اتلاف انرژی اصلی در تغییرشکلهای غیرالاستیک سیستم خاک- سازه ایجاد می‌شود.

ج) آنالیز دینامیکی روی ستون خاک غیرخطی: در نهایت پایداری و دقت روش عددی را می‌توان با اعمال نیروی زلزله به ستونی از خاک غیرخطی سنجید. آنالیز دوم با احتساب کاهش ۵۰ درصدی در گام زمانی نباید اختلاف قابل‌توجهی در نتایج ایجاد کند. بنابراین می‌توان مطالعه نمود که چگونه عبور موجب از یک ماه الاستیک- پلاستیک، محتوای فرکانسی حرکت را تغییر می‌دهد [۶].

مشخصات مدل: مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل مطابق جدول (۱) می‌باشد.

**جدول (۱):** *مشخصات خاک مورد استفاده در پیش تحلیل.*

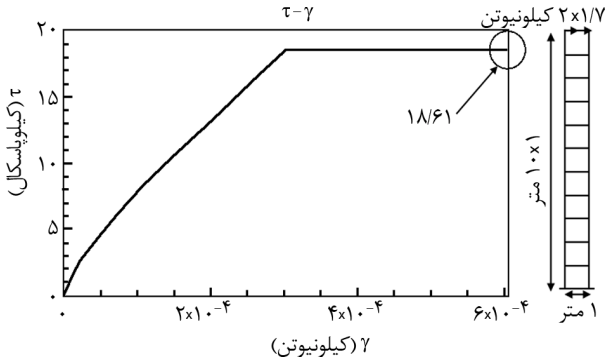
| | |
|---|---|
| $41/2^{\circ}$ درجه | زاویهٔ اصطکاک داخلی ($\varphi$) |
| ۱۰ کیلوپاسکال | مقاومت برشی زهکشی نشده ($C_u$) |
| ۱۹۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب | چگالی جرمی ($\rho$) |
| ۳۱۰ متر بر ثانیه | سرعت موج برشی ($V_s$) |

### ۵-۱- آنالیز پوش‌آور

مدل ساخته شده یک ستون قائم خاک به ارتفاع ۱۰ متر و عرض یک متر، با ابعاد المان یک متری در نظر گرفته شده مطابق شکل (۳) است. بعد از انجام آنالیز ثقلی، نیروی ۳/۴ کیلونیوتن به صورت تدریجی به نقاط بالای خاک وارد می‌گردد. مقاومت برشی مورد انتظار به صورت زیر است:

$$\tau_f = C_u + z \times \rho \times g \times \tan(\varphi)$$
$$= 10 + 0.5 \times 1.9 \times 9.81 \tan\times (41.2^{\circ}) = 18/16 kPa$$

که در آن $\tau_f$ تنش برشی خاک، $z$ فاصله مرکز المانی که تنش در آن اندازه‌گیری می‌شود تا سطح خاک (در این جا المان اول از روی سطح)، $C_u$ مقاومت برشی زهکشی نشده، $\rho$ چگالی جرمی، $g$ شتاب ثقل و $\varphi$ زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک می‌باشند. شکل (۳) نمودار کرنش برشی در مقابل تنش برشی خاک حاصل از آنالیز پوش‌آور برای اولین المان را نشان می‌دهد. تنش حداکثر به دست آمده برابر ۱۸/۶۱ کیلوپاسکال می‌باشد که با مقدار تئوری ٪۲/۵ اختلاف دارد. همچنین شیب قسمت اولیهٔ نمودار (حالت خطی) که برابر مدول برشی خاک می‌باشد، برابر $G$=۱۸۲۵۸ کیلوپاسکال می‌باشد که با مقدار به دست آمده از آزمایش (۱۸۲۵۹۰ کیلوپاسکال) تفاوت چندانی ندارد. بنابراین مدل رفتاری خاک در نرم‌افزار، تقریباً با تئوریهای موجود مطابقت دارد.




***شکل (۳):*** *مدل ساده شده و منحنی تنش برشی- کرنش برشی خاک حاصل از آنالیز پوش‌آور.*

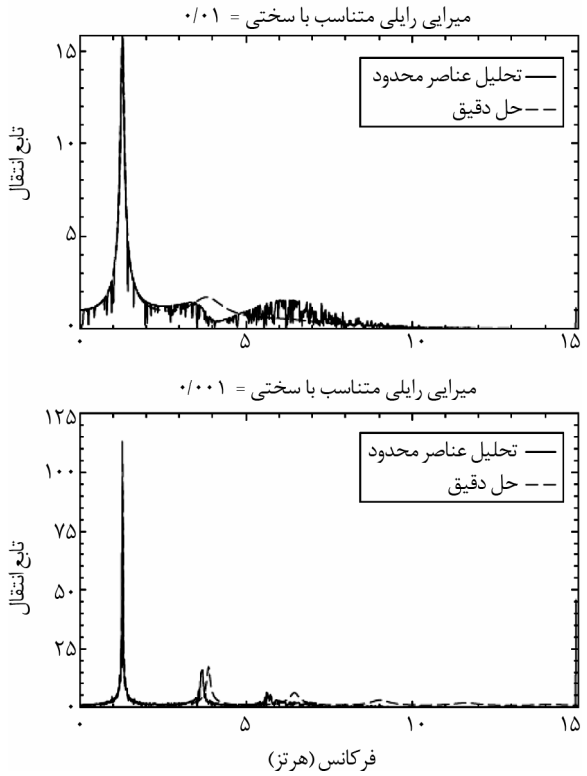
## ۵-۲- آزمایش دینامیکی روی ستون خاک در حالت الاستیک

به منظور بررسی صحت مش‌بندی مدل، عبور یک موج زلزله از طریق ستونی از خاک الاستیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی می‌توان صحت مش‌بندی مدل اجزای محدود را به مقدار کافی مناسب دانست که فرکانسهای تا حدود ۱۰ هرتز به درستی در مدل اجزای محدود حضور داشته باشد. یک راه مناسب برای بررسی این موضوع محاسبه و ارزیابی تابع انتقال بین بستر سنگی و سطح ستون خاک می‌باشد. از آن جایی که تابع انتقال به ورودی بستگی ندارد، لذا می‌توان آن را با راه حل تحلیلی مقایسه نمود. تابع انتقال لایهٔ خاک، بزرگنمایی فرکانسهای حرکت بین بستر و روی سطح خاک را بیان می‌کند [۶]:

$$TF(\omega)=\frac{1}{\cos\left(\omega H\sqrt{\frac{\rho}{G+i\omega\eta}}\right)} \qquad (۱)$$

در حالی که $\omega$ برابر فرکانس چرخشی، $H$ ضخامت لایه خاک بالای بستر سنگی، $\rho$ چگالی حجمی خاک، $G$ مدول برشی خاک، $\eta$ برابر ضریب میرایی و $i^2 = -۱$ می‌باشند. شکل (۴) مقایسهٔ تابع انتقال در حالت حل تحلیلی و تابع انتقال به دست آمده از تحلیل خطی مدل اجزای محدود را نشان می‌دهد. میرایی رایلی برای به دست آوردن ماتریس میرایی استفاده شده است:

$$C=\alpha M+\beta K \qquad (۲)$$

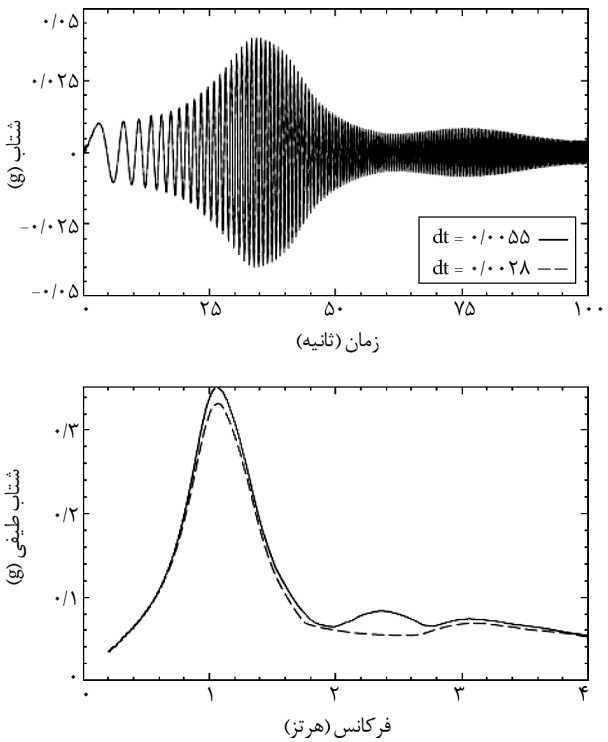



***شکل (۴):*** *مقایسهٔ تابع انتقال بین سطح و بستر سنگی لایه خاک در حالت تحلیلی و روش اجزای محدود.*

آنالیز با استفاده از میرایی رایلی متناسب با سختی با ضرایب $\beta$ =۰/۰۰۱ و $\beta$ =۰/۰۱ انجام شده است. میرایی متناسب با جرم اعمال نشده است ($\alpha$ =۰). با توجه به مشاهدات بالا، میرایی رایلی متناسب با سختی با $\beta$ =۰/۰۱ برای انجام آنالیزهای اجزای محدود انتخاب می‌گردد. با این انتخاب فرکانسهای بالاتر از ۱۰ هرتز از میرا می‌گردد.

## ۵-۳- آزمایش دینامیکی روی ستونی از خاک الاستیک- پلاستیک

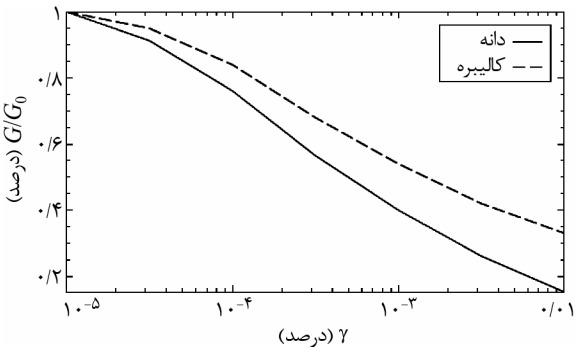
در گام بعدی ماده الاستوپلاستیک با معیار تسلیم *Von Mises* انتخاب می‌گردد. تحلیل یک بار با $dt$=۰/۰۰۵۵ و بار دیگر با $dt$=۰/۰۰۲۸ انجام می‌گیرد. شکل (۵) پاسخ شتاب سطح آزاد خاک و طیف پاسخ شتاب آن را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌گردد، اختلاف چندانی بین این دو تحلیل وجود ندارد. لذا ادامهٔ تحلیل‌ها با استفاده از $dt$=۰/۰۰۵۵ صورت می‌گیرد.




***شکل (۵):*** *شتابنگاشت و طیف شتاب پاسخ حاصل از تحلیل سطح آزاد با $dt$= ۰/۰۰۵۵ ،۰/۰۰۲۸*

## ۶- تغییرات مدول برشی خاک

منحنی تغییرات مدول برشی ($G$)، مهمترین پارامتر ورودی برای تحلیل پاسخ سطح آزاد ساختگاه می‌باشد. با استفاده از آزمایش سه محوری می‌توان منحنی تغییرات مدول برشی را برحسب کرنش برشی خاک به دست آورد. منحنی مدول برشی بر حسب کرنش برشی مطابق شکل (۶) می‌باشد. در این شکل، منحنی پیشنهادی سید و ادریس که در کتاب داس [۷] آورده شده برای زمینهای رسی نشان داده شده است. یک منحنی دیگر نیز که به عنوان منحنی کالیبره شده شناخته می‌شود، در این شکل مشاهده می‌گردد.




***شکل (۶):*** *منحنی تغییرات مدول برشی خاک برحسب کرنش برشی.*

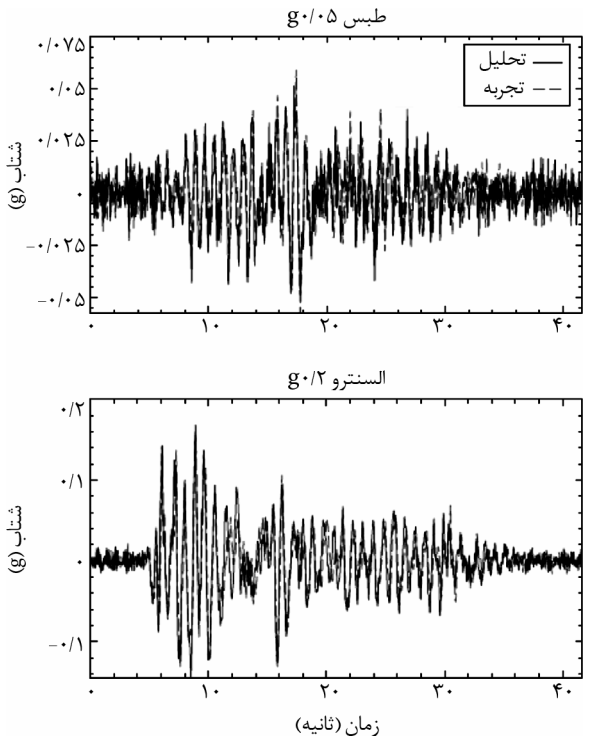
این منحنی از مقایسهٔ نتایج آنالیز اجزای محدود سطح آزاد با نتایج آزمایشهای میز لرزان حاصل شده است، به این معنا که به ازای زلزله‌های با شدتهای مختلف، مدول برشی ($G$) خاک طوری در نظر گرفته شده است که نتایج تحلیلی و آزمایشی با هم سازگار گردند.

## ۷- مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی

برای تحلیل نتایج آزمایشگاهی از نرم‌افزار *Opensees* استفاده شده است. بررسیها نشان می‌دهد که نتایج تجربی و تحلیلی پاسخ سطح آزاد و همچنین پاسخ نوک مدل‌های سازه‌ای توافق بسیار خوبی با هم دارند. شکل (۷) مقایسهٔ بین شتاب خروجی حاصل از تحلیل و آزمایش مدل خاک را نشان می‌دهد. بیشترین تفاوت به پاسخ مدهای بالاتر مربوط می‌شود. تفاوتهای جزئی در نتایج تجربی- تحلیلی به خطاهای آزمایشگاهی و فرضیات مدلسازی عددی مربوط می‌شوند.

## ۸- فرکانس و میرایی مدل‌های سازه‌ای

با بررسی نتایج آزمایشها و تحلیل‌ها، مشخصات دینامیکی مدل‌های سازه‌ای برای خاک نوع *III* در محدودهٔ




***شکل (۷):*** *مقایسهٔ شتابنگاشت حاصل از تحلیل و آزمایش سطح آزاد خاک.*

ارتعاشات پردامنه ($PGA \approx ۰/۳g$) مطابق جداول (۲) و (۳) به دست می‌آیند. نتایج این جداول به خوبی آثار مهم اندرکنش خاک- سازه را در کاهش فرکانس و افزایش میرایی مدل‌های سازه‌ای نسبت به مدل‌های با پایهٔ گیردار را نشان می‌دهد.

***جدول (۲):*** *مقایسهٔ فرکانس (Hz) تجربی و تحلیلی مدل‌های سازه‌ای (خاک نوع III)*

| مدل سازه‌ای | بدون اندرکنش | | با اندرکنش (سطحی) | | با اندرکنش (مدفون) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | آزمایش | تحلیل | آزمایش | تحلیل | آزمایش | تحلیل |
| ۵ طبقه | ۱/۵۵ | ۱/۵۵ | ۱/۵۴ | ۱/۵۴ | _ | ۱/۵۴ |
| ۱۰ طبقه | ۰/۸ | ۰/۸۲ | ۰/۶۸ | ۰/۷۹۲ | - | ۰/۷۹۹ |
| ۱۵ طبقه | ۰/۵۴ | ۰/۵۳۳ | ۰/۵۰ | ۰/۵۱ | ۰/۵۱۸ | ۰/۵۱۸ |
| ۲۰ طبقه | ۰/۳۷۴ | ۰/۳۷۷ | ۰/۳۵۵ | ۰/۳۵۵ | ۰/۳۶۳ | ۰/۳۶۳ |

***جدول (۳):*** *مقایسهٔ میرایی (درصد) تجربی و تحلیلی مدل‌های سازه‌ای (خاک نوع III).*

| مدل سازه‌ای | بدون اندرکنش | | با اندرکنش (سطحی) | | با اندرکنش (مدفون) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | آزمایش | تحلیل | آزمایش | تحلیل | آزمایش | تحلیل |
| ۵ طبقه | ۰/۴۳ | ۰/۶۶ | ۰/۹۳ | ۱/۱۸ | _ | ۱/۱۲ |
| ۱۰ طبقه | ۷/۰۳ | ۶ | ۲/۹ | ۱۳ | - | ۱۲/۵ |
| ۱۵ طبقه | ۱/۴۵ | ۱/۹۸ | ۲/۲۶ | ۲/۷ | ۱/۴۷ | ۲/۷۷ |
| ۲۰ طبقه | ۱/۵۷ | ۱/۸۲ | ۲/۵۸ | ۲/۴۷ | ۲/۴۲ | ۲/۳۵ |

همان طور که ملاحظه می‌شود، فرکانسهای حاصل از تحلیل و آزمایش توافق خوبی با یکدیگر دارند؛ ولی در مورد میرایی‌ها مقداری اختلاف وجود دارد، که در مورد سازه ۱۰ طبقه این اختلاف بیشتر است. این امر به دلیل لقی اتصالات سازه ۱۰ طبقه می‌باشد که به صورت نیمه صلب عمل کرده و میزان گیرداری اتصالات آن وابسته به دامنهٔ حرکت می‌باشد.

## ۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، چهار مدل سازه‌ای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه به عنوان نمایندهٔ ساختمانهای واقعی در یک محیط شهری (مانند تهران) برای مطالعهٔ تجربی اثرات اندرکنش خاک- سازه روی میز لرزان طراحی و ساخته شده‌اند. دو مدل خاک به عنوان نمایندهٔ زمینهای نوع *III* ($V_s$=۳۱۰ متر بر ثانیه) و *II* ($V_s$=۴۳۰ متر بر ثانیه) مطابق طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران برای این مطالعه در نظر گرفته شده است. همچنین یک مدل خاک اضافی نرم به عنوان نمایندهٔ زمینهای نوع *IV* ($V_s$=۱۵۰ متر بر ثانیه) برای مطالعات تحلیلی انتخاب شده است. با توجه به امکانات موجود از قبیل فضای آزمایشگاه و مشخصات میز لرزان ضریب مقیاس مدلسازی برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است.

در بخش مطالعات تحلیلی توافق خوبی بین نتایج تجربی و مدلسازی عددی به روش عناصر محدود مشاهده می‌شود. این توافق به خصوص برای پاسخ سطح آزاد خاک بسیار خوب است. پاسخ تجربی- تحلیلی در مد اصلی خاک و سازه توافق خوبی دارند، لیکن قدری تفاوت در پاسخ مدهای بالاتر مدل‌های سازه‌ای دیده می‌شود. بخشی از تفاوتهای موجود در نتایج تجربی به منابع مختلف خطاهای آزمایشگاهی مربوط می‌شود. مدهای ارتعاشی نامطلوب میز لرزان (قائم، گهواره‌ای و پیچشی) خطاهایی را در نتایج آزمایشی به وجود می‌آورد. به علاوه، خطاهای مربوط به تراز و امتداد نصب شتاب‌سنجها از منابع دیگر خطاهای آزمایشگاهی محسوب می‌شود. همچنین خطاهایی نیز در مدلسازی تحلیلی وجود دارد که عمدتاً به مدل غیرخطی، شرایط سطح تماس بین خاک و سازه، تغییر مشخصات خاک در ارتفاع و همچنین اثرات سه بعدی خاک مربوط می‌شود. مجموعهٔ این خطاها می‌تواند تطابق نتایج تجربی و تحلیلی را بر هم زند. در بعضی شرایط، با استفاده از روشهای میانگین‌گیری آماری می‌توان این خطاها را کاهش داد. به هر حال، تطابق خوب بین نتایج تجربی و تحلیلی نشان می‌دهد که مجموعه خطاهای یاد شده نقش مهمی را ایفاء نمی‌کنند.

با مروری بر نتایج تجربی و تحلیلی ارائه شده می‌توان مهمترین یافته‌های این تحقیق را به شرح زیر خلاصه نمود. بدیهی است که نتایج ارائه شده به مشخصات و شرایط حاکم بر آزمایش مدل‌های مقیاس شده بستگی دارد و با تغییر مشخصات سیستم خاک- پی- سازه می‌توان نتایج بیشتری به دست آورد. با توجه به این که تئوری شبیه‌سازی و روابط مقیاس در طراحی و آزمایش مدل‌های خاک- سازه در نظر گرفته شده است، بنابراین نتایج به دست آمده به ساختمانهای واقعی در یک محیط شهری قابل‌تعمیم می‌باشد که عبارتند از:

۱- اندرکنش خاک- سازه باعث افزایش پریود ارتعاشی مدل‌های سازه‌ای می‌شود. این افزایش در زمینهای نرم و نسبتاً نرم (خاکهای نوع $IV$ و $III$) قابل‌توجه بوده ولی در زمینهای نسبتاً سخت (خاک نوع $II$) ناچیز است. نتایج مطالعات تجربی- تحلیلی نشان می‌دهند با افزایش نسبت $\bar{h}/r$ پریود سازه‌ها نیز افزایش بیشتری می‌یابد. این تغییرات برای سازه‌های با نسبت $\bar{h}/r > ۲/۸$ در خاک نوع $III$ در حدود ۶ درصد و در خاک نوع $IV$ به حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد.

۲- اندرکنش خاک- سازه باعث افزایش میرایی مدل‌های سازه‌ای می‌گردد. نتایج حاصل از مطالعات تجربی- تحلیلی نشان می‌دهند با افزایش نسبت $\bar{h}/r$، تغییرات میرایی سازه‌ها کاهش می‌یابد، به طوری که سازه‌های کوتاهتر بیشترین افزایش میرایی را دارا می‌باشند. این تغییرات برای سازه‌های $\bar{h}/r > ۰/۹۳$ (۵ طبقه) در خاک نوع $III$ حدود ۲۰ درصد و در خاک نوع $IV$ حدود ۱۶۰ درصد افزایش می‌یابد، که از اثرات اندرکنش خاک- سازه ناشی می‌شود.

۳- تغییرات پریود مدل‌های سازه‌ای در سازه‌های مدفون نسبت به سازه‌های سطحی کاهش می‌یابد، به طوری که تغییرات پریود سازه‌های با ۶ متر عمق مدفون‌شدگی (معادل ۲ طبقه سازه‌ای)، سازه‌های سطحی می‌باشد. ممکن است این امر به دلیل تماس قسمت مدفون سازه با خاک کنار خود باشد که می‌تواند انرژی ورودی به سازه را جذب نماید.

۴- تغییرات میرایی مدل‌های سازه‌ای در سازه‌های مدفون نسبت به حالت سطحی کاهش می‌یابد، اما این تغییرات برای سازه‌های کوتاه قابل اغماض بوده و تنها در سازه‌های بلند (با نسبت $\bar{h}/r > ۲/۸$) قابل‌توجه است.

۵- مقایسهٔ نتایج تجربی و تحلیلی در مورد سازه‌های با اندرکنش خاک- سازه و بدون آن، نشان می‌دهد که مدل تحلیلی ایجاد شده توسط نرم‌افزار به خوبی توانایی شبیه‌سازی رفتار مدل‌های آزمایشگاهی را دارا می‌باشد. مدل تحلیلی ایجاد شده توانایی شبیه‌سازی فرکانس مود اول سازه‌ها را به خوبی داراست، لیکن قدری تفاوت در مدهای بالاتر مشاهده می‌شود. همچنین این مدل می‌تواند میرایی سازه‌ها را تا حد زیادی به درستی برآورد کند، به طوری که روند کاهش درصد میرایی در هر دو مدل آزمایشگاهی و تحلیلی مشاهده می‌شود.

## ۱۰- مراجع


۱. گتمیری، بهروز و حائری، سیدمحسن (۱۳۷۵). *راهنمای تحلیل برهم‌کنش دینامیکی خاک- سازه و اثرات آن بر واکنش دینامیکی سازه*، بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، مرکز مطالعات مقابله با سوانح طبیعی ایران، ویرایش چاپ اول.

2. Trifunac, M.D., Hao, T.-Y., and Todorovska, M.I. (2001). Full-scale experimental studies of soil-structure interaction, Tsukuba, Japan.

3. Baziar, M. and Khani, M.H. (2007). Dynamic soil-structure interaction analysis using the scaled boundary finite-element method, Ph.D Dissertation School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia.

۴. حسین‌زاده، نقدعلی (۱۳۸۲). *مطالعه تجربی اثرات اندرکنش خاک- سازه در پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای منفرد و مجاور هم روی میز لرزان*، پایان‌نامه دکترا، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.

5. Garcia, M.I. and Julio, A. (2002). Reduction of seismically induced structural vibrations considering soil-structure interaction, Ph.D Dissertation, Bochum.

6. Boris, J., Zhaohui, Y., Zhao, Ch., Guanzhou, J., Kallol, S., Taiebat, M., Matthias, P., and Tafazzoli, N. (2008). Lecture notes on computational geomechanics: inelastic finite elements for pressure sensitive materials, Chapter 8, Tech. Report Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis.

7. Das, B.M. (1993). Principles of soil dynamics, PWS-KENT Publication, Chapter 5, 205-210.