

تأثیر ابعاد شالوده در عملکرد لرزه‌ی سازه‌های میان‌مرتبه با توجه به آثار اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه و مقایسه با مدل مخروط

جهانگیر خزائی* (استادیار)

آزاده امیری (کارشناس ارشد)

مهرداد خلیل‌پور (دانشجوی دکتری)

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۷
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۴/۱، ص. ۱۳-۲۵

پی‌های سطحی از متداول‌ترین پی‌ها به عنوان تکیه‌گاه سازه‌های میان‌مرتبه در مناطق با خطر لرزه‌ی بالا هستند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه می‌تواند در پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها هنگام زلزله تأثیرگذار باشد. در پژوهش حاضر، یک سازه با قاب خمشی ۱۴ طبقه مستقر بر شالوده‌ی سطحی با ابعاد متفاوت بر روی محیط خاک به صورت سه بعدی با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شده است. شرایط مرزی بی‌نهایت جهت مرزهای میدان آزاد و همچنین المان‌های تماسی جهت مدل‌سازی لغزش و جدایش میان فونداسیون و المان‌های خاک در نظر گرفته شده است. دقت مدل مخروط به عنوان یک روش تقریبی نسبت به مدل دقیق صحت‌سنجی شده است. نتایج نشان می‌دهند که اندازه‌ی شالوده بر خصوصیات دینامیکی و پاسخ لرزه‌ی ساختمان به دلیل اندرکنش میان خاک - پی - سازه تأثیرگذار است. مدل مخروط با دقت مهندسی مناسب، کاربردی بودن و سرعت تحلیل بالا قادر به ارزیابی سختی دینامیکی خاک تحت اثر پدیده‌ی اندرکنش خاک - پی - سازه است.

واژگان کلیدی: اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه، مدل مخروط، نرم‌افزار آباکوس، پاسخ دینامیکی.

۱. مقدمه

سازه، با حالت میدان آزاد^۲ مشابه است و بنابراین، پاسخ لرزه‌ی ساختمان را می‌توان با فرض پای‌گیردار (ثابت) تحت اثر تحریک لرزه‌ی محاسبه کرد. در حالی که در شرایط واقعی و قرار گرفتن سازه روی خاک نرم مطابق نوشتاری در سال ۱۹۹۸، ابتدا حرکت میدان آزاد محیط خاک در غیاب حضور سازه بررسی و سپس با در نظر گرفتن سازه بر روی خاک، مشخصات دینامیکی سیستم محاسبه شد. در این حالت پاسخ لرزه‌ی سازه‌ی متأثر از حرکت امواج زلزله در لایه‌های خاک، برخورد این امواج به سازه و بازگشت به محیط خاک است.^[۲] بنابراین فرض اتصال صلب سازه به زمین به عنوان فرضی ساده‌کننده محسوب می‌شود، اما همواره صحیح نیست. در سال ۱۹۹۸ نشان داده شده است که در نظر گرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه موجب نزدیک‌تر شدن رفتار سازه به رفتار واقعی‌اش می‌شود؛ یعنی با توجه به نرم بودن خاک زیر سازه، سختی کلی سیستم کاهش و دوره‌ی تناوب طبیعی سیستم افزایش می‌یابد و در نتیجه در مقایسه با فرض اتصال صلب به زمین، سازه رفتار نرم‌تری از خود نشان می‌دهد.^[۳]

به منظور بررسی اندرکنش خاک - پی - سازه دو روش کلی وجود دارد: در روش اول، که روش زیرسازه^۲ نام دارد، سیستم خاک - سازه به دو قسمت تقسیم می‌شود

ساختمان‌ها از جمله سازه‌های قرارگرفته روی زمین هستند که در هنگام تجربه‌ی نیروی خارجی، مانند: زلزله، پاسخ سازه (نیروها و تغییرمکان‌ها) و پاسخ زمین (جابجایی و شتاب حرکت) به ارتباط متقابل میان سه سیستم خاک - پی - سازه و در واقع اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه (SFSI)^۱ هستند. در پژوهشی در سال ۱۹۷۴ بیان شده است که در نظر گرفتن سیستم خاک - پی - سازه در مقایسه با سیستم با پای ثابت (گیردار)، دو اثر اساسی در پاسخ سازه‌ی دارد: اول، افزایش تعداد درجات آزادی و تغییر خصوصیات دینامیکی سیستم و دوم، استهلاک بخش قابل توجهی از انرژی ارتعاشی سیستم خاک - سازه توسط انتشار امواج بازگشتی ناشی از ارتعاش به داخل محیط خاک و یا در اثر میرایی هیستریزس مصالح خاک. در هر صورت این بدان معناست که سیستم خاک - سازه نسبت به مدل معادل با پای ثابت (گیردار)، دوره‌ی تناوب طبیعی بیشتری دارد.^[۱] در آنالیز لرزه‌ی ساختمان‌ها، معمولاً خاک زیر پی صلب فرض می‌شود که در این حالت، تحریک‌های لرزه‌ی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۵/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۵/۹/۸، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۱۸.

DOI:10.24200/J30.2019.1428

دریافت طبقات، برش پایه، و دوره‌ی تناوب سازه‌ها در تمام مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

۲. مدل مخروط

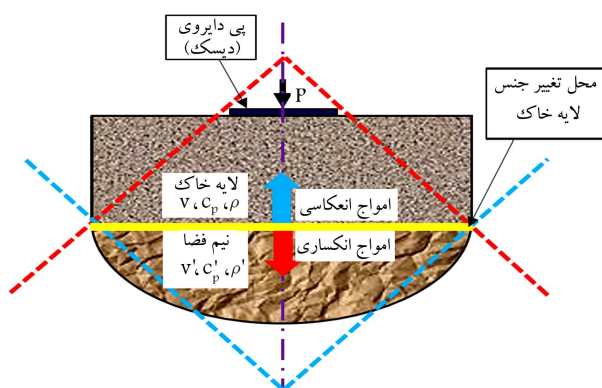
با توجه به اینکه سختی دینامیکی خاک به بسامد وابسته است، بررسی سیستم خاک - سازه فقط در حوزه‌ی بسامد ممکن است و این در حالی است که بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ها در حوزه‌ی زمان مقدور است. لذا استفاده از مدل‌های فیزیکی جایگزین خاک جهت محاسبه‌ی سختی دینامیکی محیط خاک مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در مدل‌های مذکور، ضریب‌های المان‌ها از بسامد مستقل است، لذا امکان تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی سیستم‌های خاک - سازه نیز فراهم شده است و سختی دینامیکی محیط خاک با دقت خوبی محاسبه می‌شود.^[۱۶] مدل‌های مخروطی براساس تئوری مقاومت مصالح یک بُعدی و به صورت میله و تیرهای مخروطی معرفی می‌شوند. در مدل مخروط، جهت انتشار امواج به سمت بیرون از منبع ارتعاش و در سطح مقطع مخروط است. در صورت وجود لایه‌بندی برای محیط خاک، در سطح مشترک لایه‌های خاک و در مرزی که جنس خاک تغییر می‌کند، امواجی انعکاسی و انکساری ایجاد می‌شوند که در مخروط‌های جداگانه‌ی انتشار می‌یابند (شکل ۲).

در ابتدا، در سال ۱۹۴۲ از مدل‌های مخروطی در برآورد سختی دینامیکی فونداسیون برای درجه آزادی افقی استفاده شده است.^[۱۷] سپس در سال ۱۹۷۴، نتایج مدل‌های مخروطی به درجه‌های آزادی چرخشی و پیچشی گسترش داده شد.^[۱۸] در ادامه، مفاهیم مدل‌های مخروطی برای فونداسیون قرار گرفته بر سطح محیط همگن نیمه بی‌نهایت،^[۱۹] و فونداسیون مدفون در محیط نیمه بی‌نهایت خاک، تعمیم یافت.^[۲۰] همچنین مدل‌های مخروطی برای تعیین سختی دینامیکی فونداسیون مدفون در محیط خاک لایه‌ی نیز قابل استفاده هستند.^[۱۷] در حال حاضر، سیر مطالعه و کاربرد مدل مخروط توسط پژوهشگران بسیاری در زمینه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی و همچنین مقایسه‌ی نتایج مدل مذکور با آیین‌نامه‌های جدید نیز ادامه یافته است.^[۲۱-۲۴]

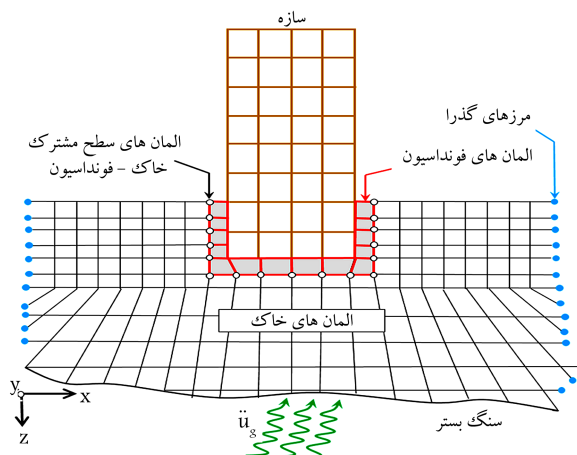
در روش مخروط، مدل هیستریزس خطی،^[۲۵] برای خاک در حین تحریک دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. این بدان معناست که تمام امواجی که به سمت بی‌نهایت منتشر می‌شوند، با کاهش دامنه مواجه می‌شوند و لذا می‌توان خاک را به سمت بی‌نهایت به صورت خطی در نظر گرفت و از تغییر شکل‌های غیرکشسان چشم‌پوشی کرد. همچنین در روش مذکور، پی صلب است و به صورت دیسک دایروی

که قسمت اول سازه‌ی مستقر بر پی است و قسمت دوم خاک که یک مرز مشترک با پی سازه دارد و توسط تعدادی جرم، فنر و میراگر مدل می‌شود. روش دوم، سرعت عملیات را افزایش می‌دهد و انجام مطالعات پارامتریک را ممکن می‌سازد. روش‌های مذکور عموماً شامل روش‌هایی تقریبی^۲ هستند که در این میان مدل مخروط^۵ عملکرد و درک فیزیکی مناسب، نتایج قابل قبول و دقت مهندسی مطلوبی نسبت به سایر روش‌ها دارد.^[۴] در روش دوم یا روش مستقیم^۶، قسمتی از خاک همراه با سازه مدل می‌شود و حرکت میدان آزاد خاک بر روی مرزهای مصنوعی محیط اعمال می‌شود. معرفی مرزهای مصنوعی یک امر اجتناب‌ناپذیر است، زیرا نمی‌توان خاک نامحدود (فضای نیمه بی‌نهایت) را با تعدادی المان محدود مدل کرد و از طرف دیگر، مرزهای مجازی اگر به صورت ساده و بدون انجام تهیداتی استفاده شوند، باید به اندازه‌ی کافی دور باشند تا از انعکاس امواجی که انرژی ارتعاشی را به صورت تشعشعی دور می‌کنند، جلوگیری شود. این دسته از روش‌ها، روش‌هایی دقیق^۷ هستند و در این میان، روش اجزاء محدود^۸ کاربردی بوده و تعمیم آن به مسائل اندرکنش خاک - پی سازه ساده‌تر است (شکل ۱).^[۷-۵] در سال ۲۰۱۲، نیز به منظور بررسی افزایش دقت آنالیز مسائل اندرکنش خاک - پی - سازه، رفتار غیرخطی مصالح برای خاک و سازه در نظر گرفته شد که مسئله‌ی است که معمولاً مهندسان ژئوتکنیک در مورد سازه و مهندسان سازه در مورد خاک نادیده می‌گیرند.^[۸]

برخی پژوهشگران، پدیده‌ی اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه و تأثیر آن در پاسخ لرزه‌ی سازه‌ها را با مقایسه میان روش‌های زیرسازه و روش‌های عددی بررسی کردند.^[۹-۱۱] همچنین برخی دیگر بیان کردند که مدل‌های عددی پیشرفته نسبت به مدل‌های زیرسازه، مزایایی از جمله توانایی انجام آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی با در نظر گرفتن آثاری چون رفتار غیرخطی تنش - کرنش خاک و سازه، میرایی مصالح و میرایی تشعشعی، شرایط مرزی پیشرفته و المان‌های سطح مشترک را دارند.^[۱۲-۱۴] هدف اصلی نوشتار حاضر، بررسی اندرکنش دینامیکی خاک - پی - سازه در یک ساختمان فولادی ۱۴ طبقه با سیستم قاب خمشی و مقایسه‌ی نتایج آن با مدل تقریبی مخروط بوده است. بدین منظور مدل عددی سه بُعدی سیستم خاک - پی سازه در نرم‌افزار آباکوس،^[۱۵] تحت آنالیز تاریخیچه‌ی زمانی قرار گرفته و سپس نتایج با مدل مخروط متناظر و حالت سازه با اتصال صلب به زمین نیز مقایسه شده است. همچنین در تمام مدل‌ها، تأثیر غیرخطی بودن مصالح خاک و سازه نیز بررسی شده است. به علاوه به دلیل اهمیت اصطکاک میان سطح پی و خاک، محدوده‌ی از ضریب‌های اصطکاک بررسی و در نهایت پاسخ لرزه‌ی سازه، شامل:



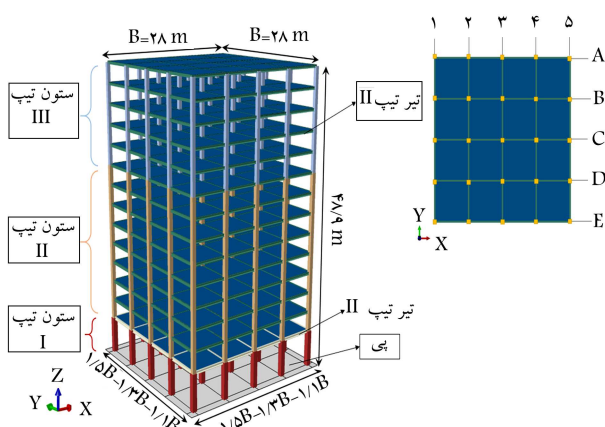
شکل ۲. مدل مخروط و انتشار امواج در محل تغییر جنس لایه‌های خاک.



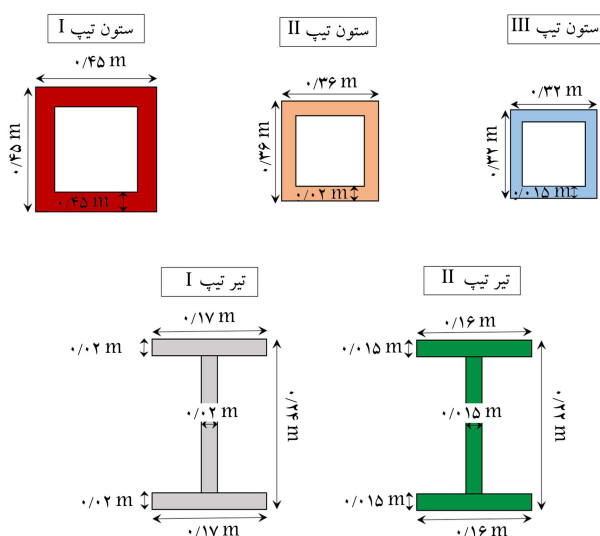
شکل ۱. سیستم خاک - پی - سازه.

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده.

چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	کشسانی مدول کشسانی ($\frac{kg}{m^2}$)	نسبت پواسون (ν)	تنش تسلیم ($\frac{kg}{m^2}$)	خمیری کرنش خمیری
۷۸۵۰	۲۷۱۱	۰٫۳	۳۴۱۶E۵	۰
۷۸۵۰	۲۷۱۱	۰٫۳	۴۳۰۷E۵	۰٫۰۵
۷۸۵۰	۲۷۱۱	۰٫۳	۵۰۹۹E۵	۰٫۱۴
۷۸۵۰	۲۷۱۱	۰٫۳	۴۹۴۷E۵	۰٫۲
۲۵۵۰	۱٫۲۲E۱۲	۰٫۲	-	-

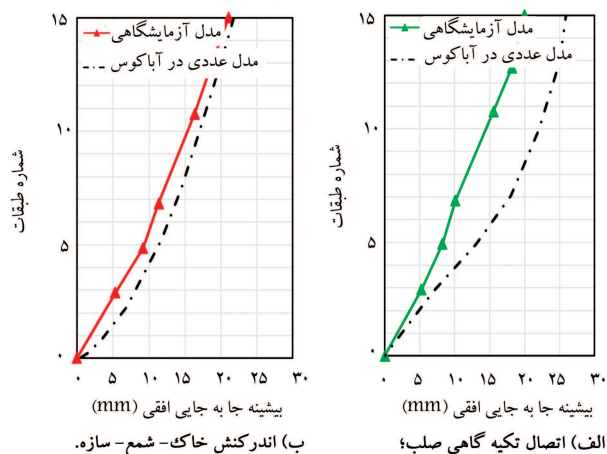


شکل ۶. پلان و مشخصات سازه.



شکل ۷. مشخصات مقاطع سازه.

المان‌های خاک از نوع C۳D۸ و برای المان‌های مرزی از المان‌های CIN۳D۸، که معرف مرزهای بی‌نهایت هستند، استفاده شده است. پاسخ دینامیکی المان‌های بی‌نهایت بر پایه‌ی در نظر گرفتن موج‌های صفحه‌یی^{۱۲} است که به صورت عمودی^{۱۳} به سمت مرزها حرکت می‌کنند و پاسخ در نزدیکی مرزها، مقدار دامنه به اندازه‌ی کافی کوچک دارد، به طوری که محیط کشسان خطی رفتار می‌کنند. معادله‌ی حاکم بر حرکت و میرایی موجود در مرزهای بی‌نهایت در معادله‌های ۴ و ۵ ارائه شده است.



شکل ۵. صحت‌سنجی سازه‌ی ۱۵ طبقه.

۴. مشخصات سیستم خاک - پی - سازه

در پژوهش حاضر، یک سازه‌ی ۱۴ طبقه و از نوع اسکلت فولادی با سیستم مقاوم در مقابل بار جانبی قاب خمشی ویژه در هر دو جهت، به عنوان یک سازه‌ی میان‌مرتبه انتخاب شده است. شکل پلان سازه، متقارن بوده و ۴ دهانه‌ی ۷ متری در هر دو جهت افقی داشته است (شکل ۶). ارتفاع طبقه‌ی اول، ۶ متر و سایر طبقات ۳٫۳ متر، همچنین ضخامت سقف‌ها ۲۵ سانتی‌متر و از نوع سقف مرکب در نظر گرفته شده است. مشخصات مصالح و مقاطع تیرها و ستون‌های سازه به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۷ ارائه شده است. این تذکر لازم است که ساختمان‌های مذکور در یک روند تحلیل استاتیکی و دینامیکی طیفی در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰،^[۳۱] طراحی و بر طبق ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰،^[۳۲] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان،^[۳۳] مقاطع نرمال و قابل قبول برای اجزاء آن اختیار شده است. محل احداث بنا در منطقه‌ی با خطر لرزه‌خیزی زیاد و خاک نوع III بوده است. پی سازه به صورت صلب و با ابعاد ۱٫۸، ۱٫۳ و ۱٫۵ برابر بعد ساختمان (B) در نظر گرفته شده است. جهت مدل‌سازی تیرها و ستون‌ها از المان Beam و برای پی از المان Shell در نرم‌افزار آباکوس،^[۱۵] استفاده شده و تحت تحریک دینامیکی زلزله قرار گرفته است. همچنین به منظور در نظر گرفتن آثار میرایی، از میرایی رایلی برای مدل‌ها استفاده شده است.^[۳۴]

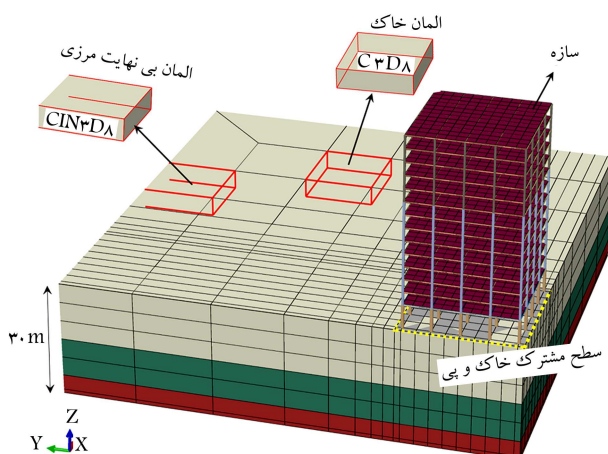
خاک در نظر گرفته شده در پژوهش حاضر، سه لایه و مشخصات مربوط به یک خاک ماسه‌یی متراکم و به صورت خشک در نظر گرفته شده است (جدول ۲). ابعاد محیط خاک در هر سه بعد برابر با ۳۰ × ۲۰۰ × ۲۰۰ متر است.

جدول ۲. مشخصات خاک.

ضخامت (m)	مدول کشسانی (MPa)	نسبت پواسون	چگالی ($\frac{kg}{m^3}$)	چسبندگی (KPa)	ϕ	سرعت موج برشی ($\frac{m}{s}$)	ξ
۱۵	۱۳۱/۸۹	۰/۳۳	۱۹۰۰	۱۰	۳۰	۱۶۰	۵
۱۰	۱۸۹/۸۹	۰/۲۹	۲۰۰۰	۲۰	۳۴	۱۹۰	۵
۵	۲۸۹/۴۷	۰/۲۲	۲۲۰۰	۲۵	۳۷	۲۴۱	۵

جدول ۳. ضریب‌های سختی دینامیکی خاک.

پای	K	افقی	قائم	چرخشی	پیچشی
۱/۱B	C	۷/۷۷۵۸e۸	۱/۳۵۲۶e۹	۱/۵۸۲۰e۱۱	۲/۰۳۲۴e۱۱
پای	K	۸/۴۲۷۵e۹	۱/۵۷۸۳e۱۰	۲/۵۸۳۶e۱۲	۳/۲۲۵۸e۱۲
۱/۳B	C	۹/۶۶۴۴e۸	۱/۷۴۹۵e۹	۲/۶۵۲۵e۱۱	۳/۳۲۴۳e۱۱
پای	K	۱/۰۰۳۴e۱۰	۱/۹۶۵۹e۱۰	۴/۱۰۲۰e۱۲	۳/۳۲۴۳e۱۱
۱/۵B	C	۱/۱۸۲۶e۹	۲/۲۱۹۴e۹	۴/۲۳۸۴e۱۱	۵/۱۶۶۳e۱۱



شکل ۸. مش بندی و معرفی المان‌های خاک.

جدول ۴. مشخصات زلزله‌های انتخابی.

نام زلزله	بزرگا (ریشتر)	فاصله از گسل $R_{jb}(Km)$	نوع مکانیزم گسلش	PGA (g)
طیس	۷/۳۵	۶۷	معکوس	۰/۴۰۹
نورث‌ریچ	۶/۶۹	۱۴۴	معکوس	۰/۰۶۴
دوزچه	۷/۱۴	۱۸۸	معکوس	۰/۰۳۸

به دست آمده با نمودارهای مرجع کتاب ولف^[۲۶]، نیز صحت‌سنجی شده‌اند. شکل ۹، نمونه‌یی از صحت‌سنجی‌های مذکور را برای ضرایب سختی دینامیکی در درجه آزادی افقی نشان می‌دهد، که در آن a_0 بسامد بی بُعد و $K(a_0)$ و $C(a_0)$ ضرایب سختی دینامیکی را نشان می‌دهند.

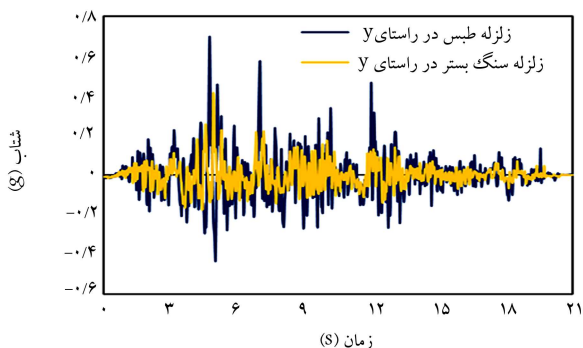
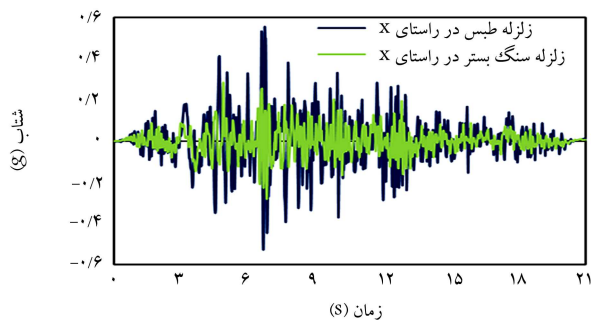
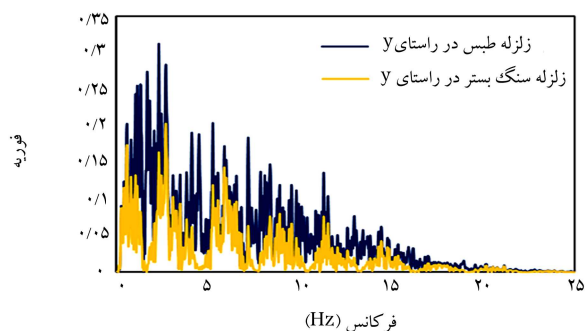
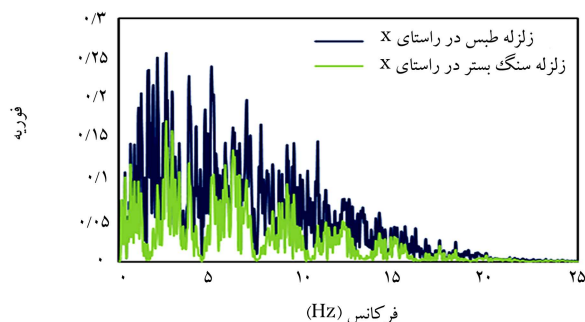
به منظور آنالیز لرزه‌یی سه زلزله‌ی طیس^{۱۴}، نورث‌ریچ^{۱۵}، و دوزچه^{۱۶} مطابق با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران انتخاب شده‌اند، که مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. به منظور تصحیح داده‌های زوج شتاب‌نگاشت، کلیه‌ی شتاب‌نگاشت‌ها بر مقدار بیشینه‌ی خود تقسیم شده و سپس طیف پاسخ داده‌های جدید با نسبت

$$\rho \ddot{u}_i = G \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + (\lambda + G) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (۴)$$

$$d_p = G \frac{\lambda + 2G}{C_p}; \quad d_s = \rho C_s \quad (۵)$$

که در آن‌ها، ρ ، G و λ مشخصات خاک، C_p و C_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی، d_p و d_s میرایی نرمال و برشی، u_i جابه‌جایی ذره، x_i و x_j محل نقطه‌ی مورد نظر هستند. با توجه به نوع المان‌های مرزی بی‌نهایت استفاده شده در کناره‌های محیط خاک، نیازی به اعتبارسنجی اندازه‌ی مدل با توجه به اطمینان کامل از گذرا بودن مرزها نیست، اما با این حال ذکر این نکته ضروری است که ابعاد استفاده شده بهینه‌ترین ابعاد به دست آمده نسبت به حالت‌های مختلفی است که مدل‌سازی و آنالیز جهت صحت‌سنجی مرزهای بی‌نهایت صورت گرفته است. نوع تماس میان سطح خاک و پی نیز از جمله پارامترهایی است که در مسئله‌ی اندرکنش خاک - پی - سازه حائز اهمیت است. سطح مشترک میان خاک و پی، در واقع همان المان‌های تماسی است که سطح بالای خاک را به سطح پایین پی متصل می‌کند. برای مدل‌سازی ویژگی‌های مکانیکی تماس دو سطح دو نوع سازوکار اندرکنش مماسی و نرمال به کار رفته است. ضریب اصطکاک بین پی و خاک $۰/۰۵$ ، $۰/۰۶$ ، $۰/۰۷$ ، $۰/۰۸$ ، $۰/۰۹$ و ۱ در نظر گرفته شده است، همچنین در اندرکنش نرمال، اجازه‌ی جداشدگی بین سطوح داده شده است. به علاوه اندرکنش بسته‌ی کامل (Tie) نیز به عنوان حالتی از اندرکنش میان سطوح خاک - پی در آنالیزها بررسی شده است. مش بندی سیستم خاک - پی - سازه و نمایش المان‌های بی‌نهایت استفاده شده در پژوهش حاضر در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

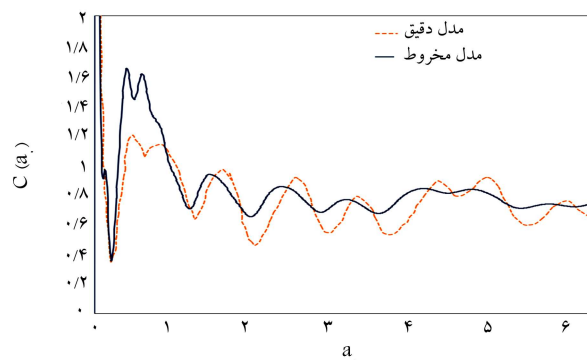
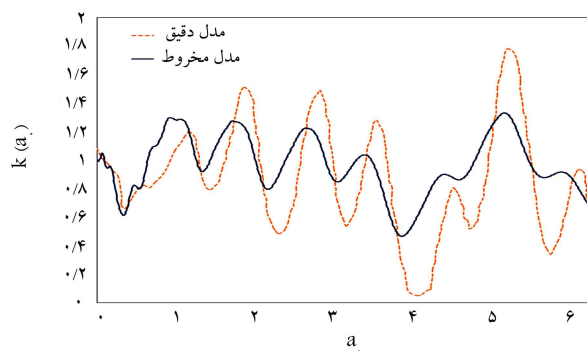
همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، به منظور تعریف خاک و مشخصات آن در مدل مخروط از نرم‌افزار کمان استفاده شده است، که در آن مشخصات خاک، شامل: لایه بندی، مدول برشی، ضریب پواسون، چگالی، میرایی و شعاع پی دایروی معادل در یک فایل متنی تعریف و سپس فایل مذکور توسط نرم‌افزار کمان فراخوانی و برای تمام درجه‌های آزادی به صورت جداگانه، ضریب‌های فنر و میراگر استخراج شده است. ضریب‌های مذکور در جدول ۳ ارائه شده است. این تذکر لازم است که ضریب‌های



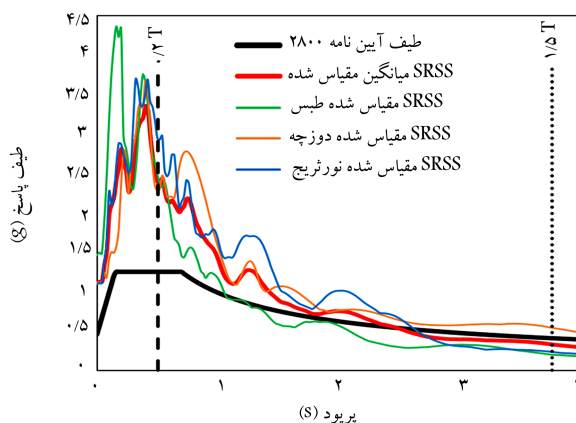
شکل ۱۱. شتاب‌نگاشت و طیف فوریه‌ی زلزله‌ی طیس در دو جهت x و y .

۵. بررسی نتایج

در نوشتار حاضر، به بررسی اندرکنش خاک - پی - سازه با استفاده از مدل مخروط و اجزاء محدود پرداخته شده است. در ابتدا سازه با پای صلب و در واقع بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - پی - سازه و سپس مدل‌های مخروط و اندرکنش خاک - پی - سازه، مدل‌سازی شده‌اند. پاسخ‌های مدل با پای صلب تحت زلزله‌ی طیس، به‌عنوان یک معیار مقایسه در بررسی اثر اندرکنش خاک - پی - سازه در مدل‌های با ابعاد فونداسیون و ضریب‌های اصطکاک متفاوت استفاده شده

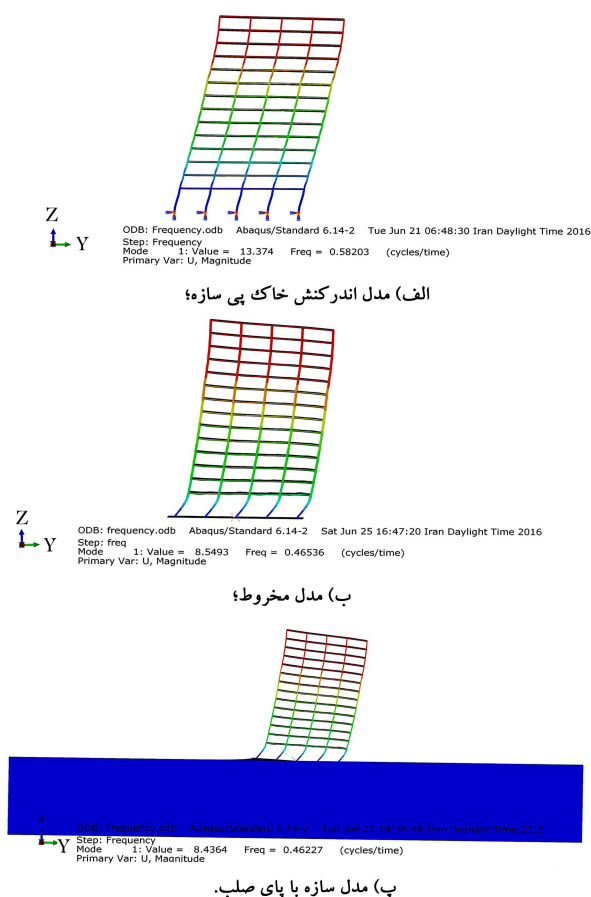


شکل ۹. صحت‌سنجی ضرایب سختی دینامیکی مدل مخروط با نمودارهای مرجع در درجه آزادی افقی. [۲۶]



شکل ۱۰. طیف اصلاح شده مطابق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران.

میرایی ۵٪ به‌دست آمده است. طیف‌های پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش جذر مجموع مربعات با یکدیگر ترکیب و یک طیف ترکیب واحد برای هر زوج ساخته می‌شود. طیف‌های پاسخ ترکیبی ۳ زوج شتاب‌نگاشت، متوسط‌گیری و در محدوده‌ی زمان‌های تناوب $0.2T$ و $1.5T$ با طیف طرح استاندارد موجود در آیین‌نامه زلزله مقایسه شد و ضریب مقیاس برابر با 1.7 و 1.5 به ترتیب برای زلزله‌های ذکر شده به‌دست آمد، تا در هیچ حالتی مقادیر متوسط از 1.3 برابر مقدار نظیر آن در طیف استاندارد کمتر نباشد (شکل ۱۰). از آنجا که هدف از پژوهش حاضر، بررسی رفتار دینامیکی اندرکنش خاک - پی - سازه است، لذا جهت بررسی، فقط زلزله‌ی طیس در آنالیزهای دینامیکی به‌عنوان تحریک ورودی انتخاب شده است. همچنین نیاز به محاسبه‌ی رکورد سنگ بستر به منظور اعمال به کف محیط خاک بود، لذا از نرم‌افزار DeepSoil جهت این آنالیز معکوس و تبدیل شتاب سطح خاک به سنگ بستر استفاده شده است (شکل ۱۱). [۲۵]



الف) مدل اندرکنش خاک پی سازه؛

ب) مدل مخروط؛

پ) مدل سازه با پای صلب.

شکل ۱۲. نتایج آنالیز مودال و بررسی بسامد طبیعی.

در هر سه نمودار نتایج دررفت مدل‌های با ضریب‌های اصطکاک ۰/۵ و ۰/۱، کمتر از مدل با پای صلب به دست آمده است، که به عنوان داده‌های غیر قابل قبول محسوب می‌شود و لذا در بررسی‌های آتی از ارائه‌ی آن‌ها در نمودارها چشم‌پوشی شده است.

اما به منظور بررسی نتایج سایر ضریب‌های اصطکاک مورد بررسی در نوشتار حاضر، اثر آن‌ها در جابه‌جایی بیشینه و برش پایه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، که مطابق آن افزایش ضریب‌های اصطکاک میزان برش پایه نیز در حال افزایش

جدول ۵. نتایج آنالیز مودال سازه‌ی ۱۴ طبقه.

مدل اندرکنشی	مدل مخروط	مدل با اتصال صلب	بسامد (Hz)	جرم موثر مودی (Kg)	مود اول
۰/۴۶۲۳	۰/۴۶۵۴	۰/۵۸۲۰	۰/۴۶۲۳	۸/۵۶۰۶۲E۶	
۰/۴۶۲۳	۰/۴۶۵۴	۰/۵۸۲۰	۰/۴۶۲۳	۸/۵۶۰۶۲E۶	
۰/۵۷۸۳	۰/۵۷۸۷	۰/۷۱۸۲۳	۰/۵۷۸۳	۱/۳۰۷۰۰E۹	
۱/۳۴۵۰	۱/۳۴۹۹	۱/۵۷۶۷	۱/۳۴۵۰	۸/۱۰۲۳۵E۶	

است. به همین منظور ابتدا آنالیز مودال برای تمام مدل‌ها صورت گرفته است. نتایج بسامد طبیعی و جرم موثر مودی مدل‌ها در ۴ مود اولیه، در جدول ۵ ارائه شده است.

همچنین سازه‌ی تغییرشکل یافته در بسامد طبیعی اول و در مدل‌های مختلف در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه، دوره‌ی تناوب طبیعی سازه نسبت به سازه با اتصال صلب به زمین افزایش یافته است. همچنین نتایج مدل مخروط و مدل اندرکنشی تطابق مناسبی را نشان می‌دهند و اختلافی در حدود ۱٪ دارند.

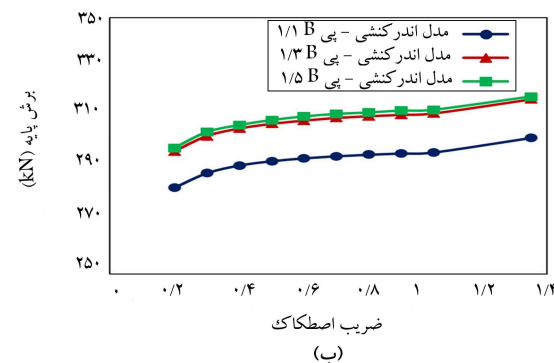
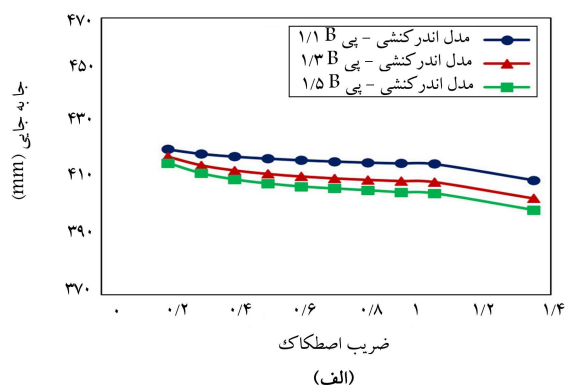
نتایج مدل‌های عددی سه بُعدی برای سازه‌ی ۱۴ طبقه‌ی قرارگرفته بر روی فونداسیون‌های با ابعاد متفاوت و ضریب‌های اصطکاک مختلف در مقایسه با مدل مخروط و سازه با اتصال صلب که تحت زلزله‌ی طیس قرار دارند، در ادامه خلاصه و مقایسه شده‌اند. نمودارهای دررفت طبقات برای مدل‌های با فونداسیون ۱/۸B و ۱/۳B و ۱/۵B به ترتیب در شکل ۱۳ (الف، ب و پ) ارائه و با مدل سازه با اتصال صلب مقایسه شده‌اند. دررفت طبقات مطابق با رابطه‌ی ۶ محاسبه شده است:

$$Drift = \frac{d_{i+1} - d_i}{h} \quad (۶)$$

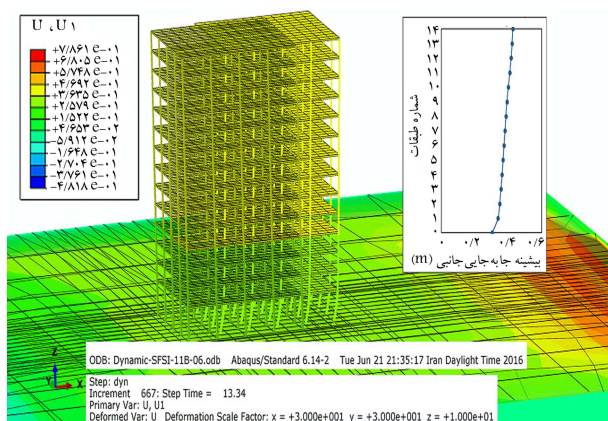
که در آن، d_{i+1} جابه‌جایی طبقه‌ی $i + 1$ ام، d_i جابه‌جایی طبقه‌ی i ام و h ارتفاع طبقه هستند.

این تذکر لازم است که دررفت‌های به دست آمده در تمام حالات مطابق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم، از میزان بیشینه‌ی دررفت مجاز ۲٪ فراتر نرفته است که عملکرد مطلوب سازه را نشان می‌دهد. از طرفی، افزایش ابعاد فونداسیون کاهش بیشینه‌ی دررفت طبقات را به دنبال خواهد داشت. به عنوان مثال، افزایش ابعاد فونداسیون از ۱/۸B تا ۱/۵B کاهش در حدود ۱۰٪ را نشان می‌دهد. همچنین همان‌طور که مورد انتظار بود، در تمام حالات با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - پی - سازه، روند افزایش دررفت طبقات ملاحظه می‌شود.

با مقایسه‌ی مدل‌های اندرکنشی با ضریب‌های اصطکاک متفاوت ملاحظه می‌شود که در مدل اندرکنشی با ضریب اصطکاک ۰/۵ و ۰/۱، نتایج دور از واقعیتی حاصل می‌شود. این مسئله به این علت است که با در نظر گرفتن ضریب‌های مذکور، مدل‌ها به حالت بدون اصطکاک نزدیک می‌شوند و لذا اثر اندرکنشی مورد انتظار ناشی از اصطکاک میان سطح مشترک خاک و پی به سازه منتقل نمی‌شود و عملکرد مناسبی در مدل‌ها وجود نخواهد داشت. همان‌طور که مشخص است،



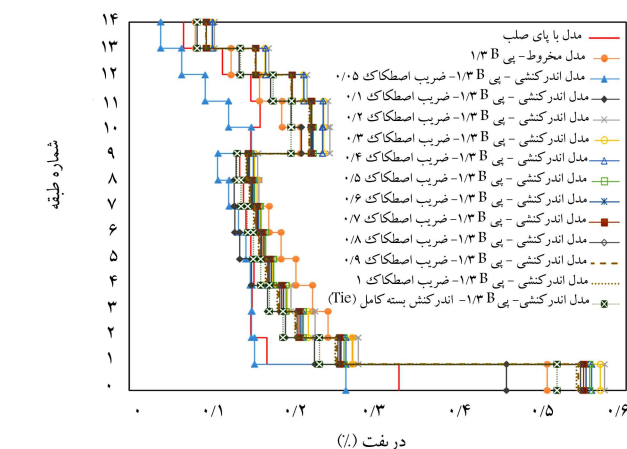
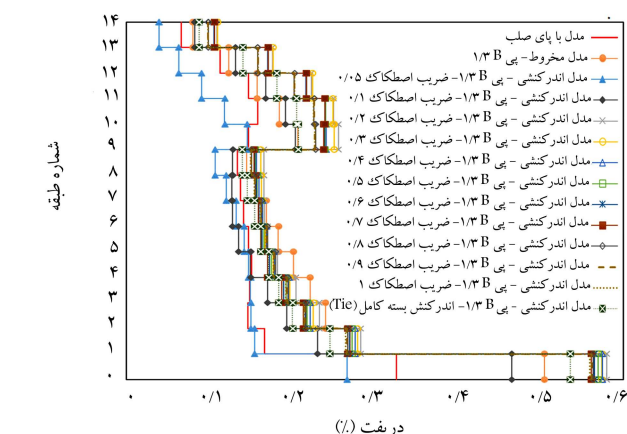
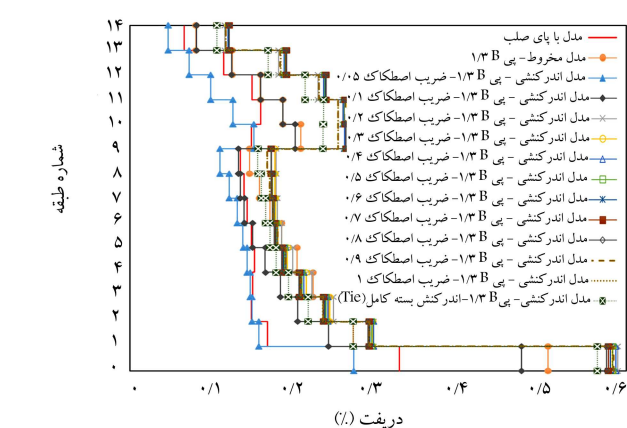
شکل ۱۴. بررسی تأثیر ضریب اصطکاک میان سطح مشترک خاک و فونداسیون بر جابه‌جایی و برش پایه‌ی سازه.



شکل ۱۵. نمایش کانتورهای جابه‌جایی در مدل اندرکنشی با ضریب اصطکاک ۰٫۰۶

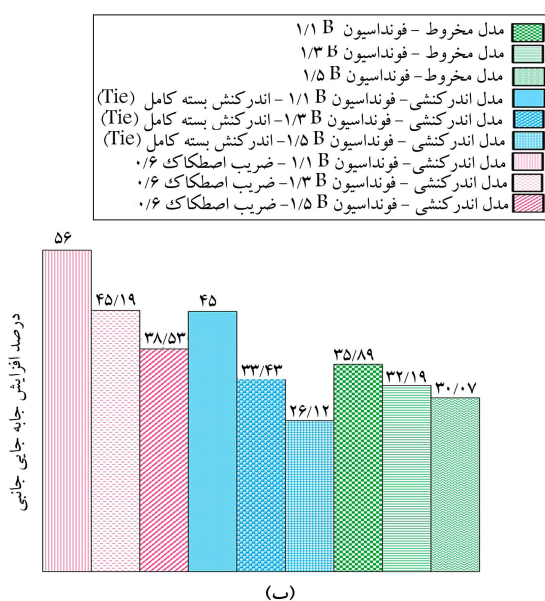
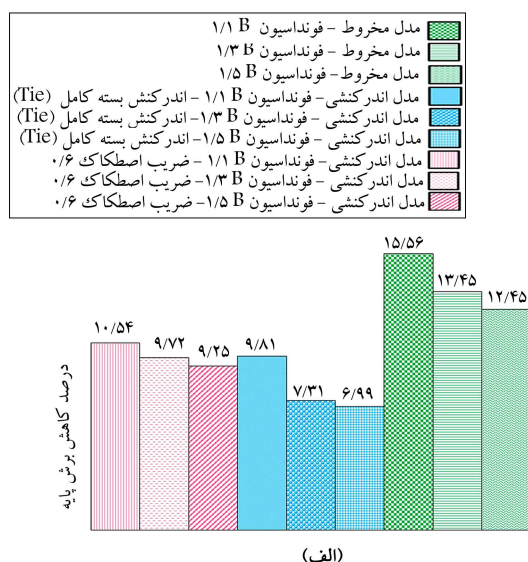
گرفت که برای کنترل سازه تحت بار لرزه‌ای، افزایش ابعاد فونداسیون می‌تواند راه‌حل مناسب‌تری نسبت به افزایش مقاطع سازه‌ای باشد. همچنین ضریب اصطکاک ۰٫۰۶ محلی است که برش پایه، کمینه‌ی مقدار را دارد و لذا به‌عنوان ضریب اصطکاک انتخاب می‌شود. همچنین نمای سه‌بعدی کانتورهای جابه‌جایی جانبی طبقات سازه‌ی تغییرشکل‌یافته برای مدل اندرکنشی با فونداسیون به ابعاد ۱/۸ B و ضریب اصطکاک ۰٫۰۶، در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.

در شکل ۱۶، نیز بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی طبقات در مدل‌های اندرکنشی، سازه با پای صلب و مخروط با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای اندازه‌گیری جابه‌جایی جانبی، جابه‌جایی فونداسیون از طبقات جدا شده است، یعنی جابه‌جایی طبقات نسبت به فونداسیون به‌عنوان مبدأ نشان داده شده است. همچنین بیشینه‌ی جابه‌جایی



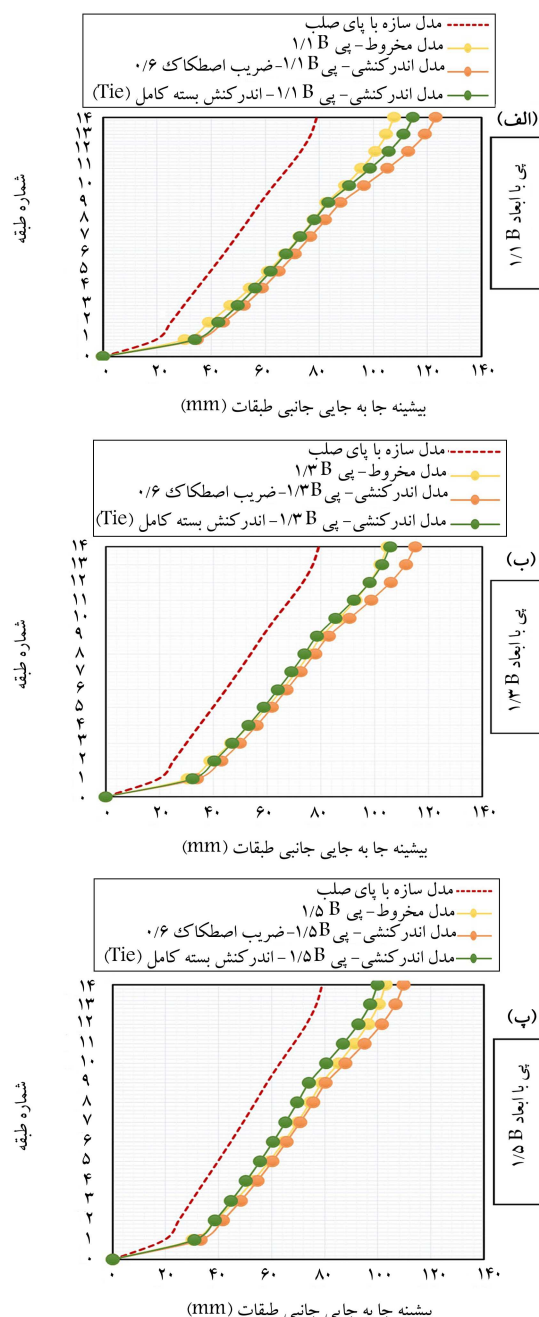
شکل ۱۶. دریفت طبقات مدل‌ها.

بوده و در ضریب اصطکاک حدود ۰٫۰۶، مقادیر برش پایه تقریباً ثابت شده است؛ تا در نهایت، برای ضریب اصطکاک مدل بسته‌ی کامل (Tie) به بیشینه‌ی میزان خود می‌رسد. از طرفی، کمترین مقادیر برش پایه در مدل با فونداسیون ۱/۸ B رخ می‌دهد و با افزایش ابعاد فونداسیون، میزان برش پایه نیز افزایش یافته است. اما در مورد جابه‌جایی، با افزایش ضریب اصطکاک روندی کاهشی آغاز شده است، تا به کمترین مقدار جابه‌جایی در مدل بسته‌ی کامل (Tie) برسد. در این حالت با افزایش ابعاد فونداسیون، جابه‌جایی‌های کمتری نیز ملاحظه می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه



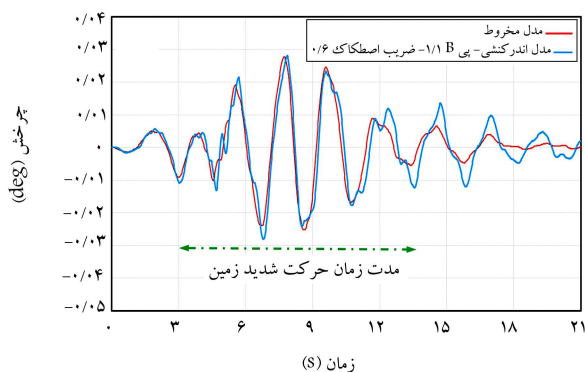
شکل ۱۷. الف) درصد کاهش برش پایه، ب) درصد افزایش جابه‌جایی سازه در حالت اندرکنشی و مخروط نسبت به سازه با پای صلب.

اصطکاک برای سطح مشترک خاک و پی تعریف نمی‌شود و با توجه به نتایج می‌توان نشان داد که اندرکنش سطح مشترک خاک و پی در مدل مخروط از نوع بسته کامل (Tie) است، هر چند در مورد اندرکنش با ضریب اصطکاک ۰/۶ نیز تطابق مناسبی میان نتایج مشاهده می‌شود. به عنوان مثال، در مدل با ابعاد فونداسیون ۱/۸B، اختلاف مدل مخروط با مدل اندرکنشی با ضریب اصطکاک ۰/۶ و Tie، به ترتیب در حدود ۱۰ و ۶ درصد است (شکل ۱۶الف)، در حالی که در مدل فونداسیون با ابعاد ۱/۳B مدل مخروط با مدل اندرکنش Tie تطابق کامل دارد (شکل ۱۶ب). به علاوه با افزایش ابعاد فونداسیون از ۱/۸B تا ۱/۵B، مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی طبقات در حال کاهش است و لذا کمترین مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی در مدل فونداسیون با ابعاد ۱/۵B اتفاق می‌افتد (شکل ۱۶پ). درصد افزایش جابه‌جایی جانبی طبقات و کاهش برش پایه نسبت به سازه با اتصال صلب به ترتیب در شکل (۱۷ الف و ب) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در

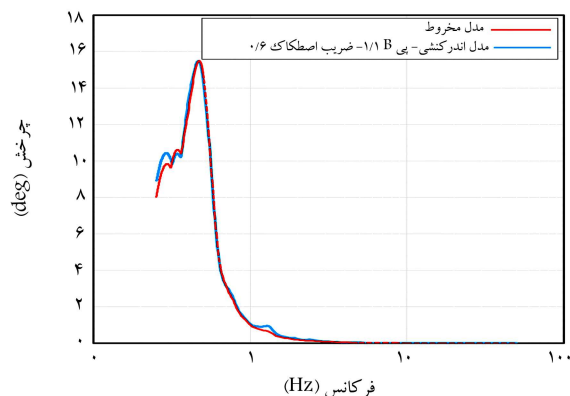


شکل ۱۶. مقایسه‌ی بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی طبقات در مدل‌های سازه با اتصال صلب، مخروط و اندرکنشی.

طبقات براساس بیشینه‌ی جابه‌جایی طبقه‌ی آخر و در هر دو جهت x و y بررسی شده و بیشینه‌ی مقدار آن‌ها که در جهت x است، مبنای محاسبات در نظر گرفته شده است. مطابق شکل‌های مذکور با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه، جابه‌جایی جانبی طبقات در تمام مدل‌ها نسبت به مدل با اتصال صلب، روندی افزایشی دارد. به عنوان مثال، جابه‌جایی جانبی سازه در مدل فونداسیون با ابعاد ۱/۸B برای سازه با اتصال صلب ۷۹/۱۷ میلی‌متر و در مدل اندرکنشی با فونداسیون ۱/۸B، ۱۲۳/۱۷ میلی‌متر به دست آمده است، که حدود ۵۵/۵۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. مدل مخروط با مدل اندرکنشی به خصوص در مدل با اندرکنش Tie، تطابق مناسبی را نشان می‌دهد. دلیل این مسئله آن است که در مدل مخروط نیز ضریب



الف) در حوزه زمان؛



ب) در حوزه فرکانس.

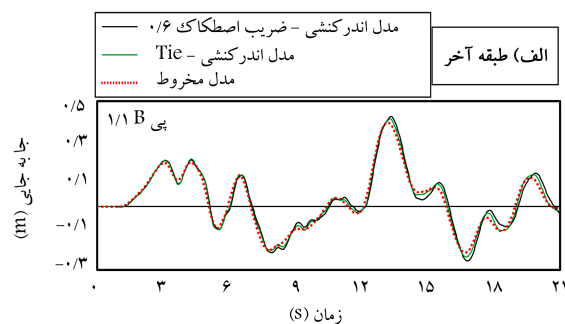
شکل ۱۹. تاریخچه‌ی زمانی چرخش پی در مدل مخروط و مدل اندرکنشی با پی به ابعاد $1/8B$ و ضریب اصطکاک 0.06 .

سازه‌ی ۱۴ طبقه‌ی قرارگرفته روی پی با ابعاد $1/8B$ نشان می‌دهد. چرخش پی هنگامی رخ می‌دهد که نیروهای اینرسی ایجادشده در سازه موجب فشار در یک سمت و کشش در سمت دیگر شوند.

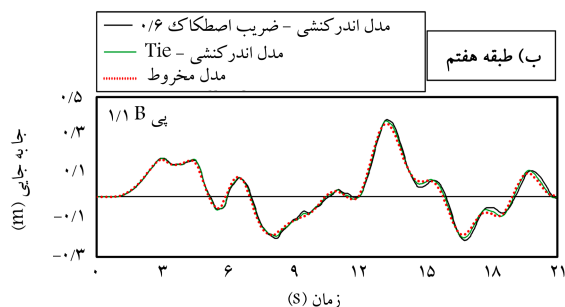
این بدان معنی است که پی در یک سمت دچار نشست و در سمت دیگر دچار بلندشدگی می‌شود. همچنین میزان چرخش پی و در نتیجه چرخش سازه، پارامتری کلیدی است که مستقیماً در مقادیر بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی، که سازه در هنگام زلزله تجربه می‌کند، تأثیرگذار است. به منظور مقایسه‌ی دقیق‌تر دو مدل مذکور از نمودارهای آریاس^{۱۷}، که نمایانگر مدت زمان حرکت شدید زمین هستند، استفاده شده است. در واقع به‌صورت کمی فاصله‌ی زمانی بین ۵٪ و ۹۵٪ که در طی آن سهم زیادی از انتگرال مربع شتاب (یا شدت شتاب نگاشت بنا بر روش توزیع تجمعی انرژی) در رکورد زلزله‌ی موردنظر وجود دارد، دوره‌ی حرکت شدید زمین در نظر گرفته می‌شود. مقدار آریاس مطابق رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^\infty [a(t)]^2 dt \quad (7)$$

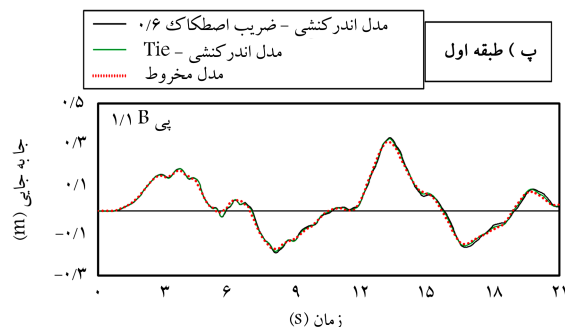
بنابراین مقایسه‌ی نتایج زاویه‌ی چرخش پی مدل مخروط با مدل اندرکنشی در مدت حرکت شدید زمین که بسیار حائز اهمیت است، نشان می‌دهد که مدل مخروط روند بسیار مناسبی را نسبت به مدل اندرکنشی نشان می‌دهد و در مواردی با دقت قابل قبول حتی انطباق کامل نیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۹ الف). (شکل ۱۹ ب) نیز پاسخ زاویه‌ی چرخش در حوزه‌ی بسامد به‌صورت لگاریتمی را نشان می‌دهد،



الف) آخر؛



ب) هفتم (میانی)؛



پ) اول: در مدل‌های اندرکنشی و مخروط.

شکل ۱۸. مقایسه‌ی تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی در طبقات.

شکل مذکور مشخص است با درنظرگرفتن اثر اندرکنش خاک-پی-سازه، جابه‌جایی جانبی طبقات نسبت به حالت سازه با اتصال صلب به زمین افزایش یافته است. بیشترین درصد افزایش جابه‌جایی جانبی طبقات مربوط به مدل، اندرکنشی - پی با ابعاد $1/8B$ - ضریب اصطکاک 0.06 و کمترین مقدار به مدل، اندرکنشی - پی با ابعاد $1/8B$ - اندرکنش Tie، است. ملاحظه می‌شود که نتایج مدل‌های مخروطی به نتایج مدل‌های اندرکنشی متناظر با ضریب اصطکاک 0.06 تطابق بهتری دارد. در مورد برش پایه نیز ملاحظه می‌شود که با درنظرگرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه، چه با مدل مخروط و چه با مدل اندرکنشی، برش پایه کاهش می‌یابد. البته میزان کاهش برش پایه در مدل‌های مخروطی بیشتر از مدل‌های اندرکنشی است. همچنین با افزایش ابعاد فونداسیون برش پایه، کاهش کمتری را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی دقیق‌تر نتایج، تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی در ۳ طبقه‌ی اول، هفتم، و آخر برای مدل‌های مخروط و اندرکنشی با یکدیگر مقایسه شده‌اند (شکل ۱۸). همان‌طور که مشخص است، روند جابه‌جایی و تغییرات آن در مدل مخروط و اندرکنشی بسیار نزدیک به هم هستند. به خصوص در طبقه‌ی اول این تطابق مشهودتر است. شکل ۱۹، تاریخچه‌ی زمانی زاویه‌ی چرخش پی را برای

که مجدداً ملاحظه می‌شود نتایج مدل مخروط تطابق و دقت قابل قبولی با مدل اندرکنشی از خود نشان می‌دهد.

۶. نتیجه گیری

در نوشتار حاضر، یک سازه ۱۴ طبقه به عنوان نماینده‌ی از سازه‌های میان‌مرتبه با مصالح غیرخطی و بر روی پی‌های با ابعاد $1/18B$ ، $1/3B$ و $1/5B$ به صورت سه بُعدی و تحت زلزله‌ی طیس در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و آنالیز شد. همچنین ضریب‌های اصطکاک متفاوتی از محدوده‌ی $0/5$ تا 1 و همچنین اندرکنش بسته‌ی کامل (Tie) به عنوان شرایط اصطکاکی سطوح مشترک خاک و پی در نظر گرفته شد. در واقع هدف نوشتار حاضر، بررسی تأثیر ضریب‌های اصطکاک و ابعاد پی در مسئله‌ی اندرکنش خاک - پی - سازه است. همچنین مدل تقریبی مخروط برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - سازه معرفی شد. تمام مدل‌های اندرکنشی با مدل مخروطی متناظر مقایسه شده‌اند. مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

۱. نتایج آنالیز مودال نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - پی - سازه، دوره‌ی تناوب سازه نسبت به مدل سازه با اتصال صلب افزایش می‌یابد. افزایش دوره‌ی تناوب سازه در واقع به معنای وقوع رفتار نرم‌تری از سازه است، که در واقعیت نیز اتفاق می‌افتد. این میزان افزایش دوره‌ی تناوب در مدل‌های مخروطی نیز مشاهده می‌شود، که تطابق مناسبی با مدل اندرکنشی نیز دارد و اختلاف حدود ۱٪ در نتایج آنالیز مودال ملاحظه می‌شود.

۲. بررسی دریافت طبقات نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک - پی - سازه، دریافت طبقات نسبت به سازه با اتصال تکیه‌گاهی صلب افزایش می‌یابد. این افزایش در تمام مدل‌های مخروط و مدل‌های اندرکنشی به جز مدل‌هایی که ضریب‌های اصطکاک $0/5$ و $0/1$ دارند، رخ می‌دهد. این مسئله نشان می‌دهد که این ضریب‌های اصطکاک به دلیل کوچک بودن به مدل‌های بدون اصطکاک شبیه هستند و لذا در بررسی ضریب‌ها کنار گذاشته می‌شوند. از میان محدوده‌ی ضریب‌های انتخاب شده با افزایش ضریب اصطکاک به سمت ۱، جابه‌جایی‌ها در حال کاهش و برش پایه در حال افزایش است تا در ضریب

اصطکاک $0/6$ روندی تقریباً ثابت ملاحظه می‌شود. لذا این ضریب با توجه به میزان کمینه‌ی برش پایه به عنوان ضریب اصطکاک انتخاب شده است.

۳. سازه با پی بزرگ‌تر نسبت به سازه با پی کوچک‌تر حرکت گهواره‌یی کمتری خواهد داشت (با میزان حرکت گهواره‌یی کمتری روبرو می‌شود). در واقع پی بزرگ‌تر نیروهای داخلی بیشتری را به خود جذب می‌کند و لذا برش پایه بیشتر می‌شود، اما جابه‌جایی طبقات کاهش می‌یابد. در نتیجه انتخاب ابعاد بزرگ‌تر برای پی سازه نسبت به انتخاب مقاطع سازه‌یی بزرگ‌تر، به منظور کنترل سازه تحت بارهای لرزه‌یی پیشنهاد می‌شود.

۴. نتایج مدل‌های مخروطی در بیشینه‌ی جابه‌جایی جانبی طبقات و برش پایه نشان از عملکرد صحیح مدل مذکور به عنوان روشی ساده در اعمال اثر اندرکنش خاک - پی - سازه است. مدل‌های مخروطی با مدل‌های اندرکنشی Tie و ضریب اصطکاک $0/6$ مقایسه شده است، که در هر دو حالت تطابق مناسبی به خصوص در مدل‌های اندرکنشی Tie ملاحظه می‌شود. به منظور بررسی دقیق‌تر پاسخ‌های سازه، نمودارهای تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی برای طبقات اول، هفتم و آخر سازه و همچنین زاویه‌ی چرخش پی، نیز بررسی شده‌اند که در همه‌ی موارد مدل‌های مخروط با دقت قابل قبولی نتایجی مشابه با مدل‌های اندرکنشی ارائه می‌دهند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت مدل تقریبی مخروط با در نظر گرفتن ضریب‌های سختی دینامیکی خاک توسط فنرها و میراگرهایی در تمام درجه‌های آزادی می‌تواند به خوبی بیانگر اثر خاک در مسائل اندرکنش خاک - پی - سازه باشد.

به طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که اثر اندرکنش خاک - پی - سازه در تحلیل‌های دینامیکی سازه‌ی میان‌مرتبه قابل ملاحظه است. اهمیت این موضوع در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم نیز عنوان شده است. در حال حاضر به دلیل دشواری مدل‌سازی محیط خاک در مدل‌های عددی به خصوص در حالت‌های سه بُعدی، معمولاً نقش خاک نادیده گرفته می‌شود، در حالی که می‌توان با بهره‌گیری از مدل تقریبی مخروط و جایگزین کردن محیط خاک با فنرها و میراگرهای معادل، نتایج قابل قبولی را با دقت بسیار مناسبی نسبت به مدل‌های اندرکنشی ملاحظه کرد. لذا می‌توان از مدل مخروط به عنوان روشی ساده و کاربردی که دقت مهندسی مطلوبی دارد، در محاسبات لرزه‌یی سیستم‌های خاک - پی - سازه استفاده کرد.

پانویس‌ها

1. soil foundation structure interaction
2. free field
3. substructure method
4. approximate method
5. cone model
6. direct method
7. rigorous method
8. finite element method

9. Matlab
10. Conan
11. laminar
12. plane body wave
13. orthogonal
14. Tabas
15. Northridge
16. Duzce
17. arias intensity

منابع (References)

1. Veletsos, A.S. and Meek, J.W. "Dynamic behaviour of building-foundation systems", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **3**(2), pp. 121-138 (1974).
2. Wolf, J.P. "Soil-structure-interaction analysis in time domain", *Nuclear Engineering and Design*, **111**(3), pp. 381-393 (1989).
3. Gazetas, G. "Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues", *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, **2**, pp.1119-1174 (1998).
4. Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice Hall int. (1985).
5. Bathe, K.-J. and Wilson, E.L. "Numerical methods in finite element analysis", p.543 (1976).
6. Veletsos, A. "Design concepts for dynamics of soil-structure interaction", In *Developments in Dynamic Soil-Structure Interaction*, Springer, pp. 307-325 (1993).
7. Givens, M.J. "Dynamic soil-structure interaction of instrumented buildings and test structures", UCLA, PhD thesis (2013).
8. Bao, Y. and et al. "Seismic evaluation of soil-foundation-superstructure system considering geometry and material nonlinearities of both soils and structures", *Soils and Foundations*, **52**(2), pp. 257-278 (2012).
9. Sbartai, B. "Dynamic interaction of two adjacent foundations embedded in a viscoelastic soil", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **16**(03), pp. 1450110 (2015).
10. Sameti, A.R. and Ghannad, M.A. "Equivalent linear model for existing soil-structure systems", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, pp. 1450099 (2014).
11. Chen, L. "Dynamic interaction between rigid surface foundations on multi-layered half space", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **16**(05), pp. 1550004 (2016).
12. Tabatabaiefar, Hamid Reza, Fatahi, S.B. and Samali, B. "An empirical relationship to determine lateral seismic response of mid-rise building frames under influence of soil-structure interaction", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, **23**(7), pp. 526-548 (2014).
13. Hokmabadi, A.S. and Fatahi, B. "Influence of foundation type on seismic performance of buildings considering soil-structure interaction", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **16**(08), pp. 1550043 (2016).
14. Tabatabaiefar, H.R. and Fatahi, B. "Idealisation of soil-structure system to determine inelastic seismic response of mid-rise building frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **66**, pp. 339-351 (2014).
15. Manual, A.U.s., Version 6.5, Hibbitt, Karlsson and Sorensen. Inc., Pawtucket, RI (2004).
16. Wu, W.H. and Lee, W.H. "Systematic lumped-parameter models for foundations based on polynomial-fraction approximation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**(7), pp. 1383-1412 (2002).
17. Wolf, J.P. and Meek, J.W. "Cone models for a soil layer on a flexible rock half-space", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **22**(3), pp. 185-193 (1993).
18. Veletsos, A. and Nair, V.D. "Torsional vibration of viscoelastic foundations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **100**(3), pp. 225-246 (1974).
19. Meek, J.W. and Wolf, J.P. "Cone models for homogeneous soil", *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**(5), pp. 667-685 (1992).
20. Meek, J.W. and Wolf, J.P. "Why cone models can represent the elastic half-space", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **22**(9), pp. 759-771 (1993).
21. Pradhan, P., Baidya, D. and Ghosh, D. "Dynamic response of foundations resting on layered soil by cone model", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**(6), pp. 425-434 (2004).
22. Nakamura, N. "A practical method for estimating dynamic soil stiffness on surface of multi-layered soil", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **34**(11), pp. 1391-1406 (2005).
23. Pradhan, P. and et al. "Dynamic response of machine foundation on layered soil: Cone model versus experiments", *Geotechnical and Geological Engineering*, **26**(4), pp. 453-468 (2008).
24. Worku, A. "Soil-structure-interaction provisions: A potential tool to consider for economical seismic design of buildings", *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, **56**(1), pp. 54-62 (2014).
25. Mohammad Hasan Baziar, Z.G., *Oil Dynamics*, Iran, Tehran: Iran University of Science and Technology, 536 p. (In Persian) (2012).
26. Wolf, J.P. and Deeks, A.J. "Foundation vibration analysis: A strength of materials approach", Butterworth-Heinemann (2004).
27. Rahnema, H. and et al. "The inspection of site characteristics on far field dynamic stiffness of soil-structure systems", In *Coupled SSI Analyses Using the Cone Model*.
28. MatLab, M. "The language of technical computing", The MathWorks, Inc., <http://www.mathworks.com> (2012).
29. Mohaseb, S. and Abdollahi, B. "Soil-structure interaction analyses using cone models", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, **10**(4), pp. 167 (2009).
30. Hokmabadi, A.S., Fatahi, B. and Samali, B. "Physical modeling of seismic soil-pile-structure interaction for buildings on soft soils", *International Journal of Geomechanics*, **15**(2), pp. 04014046 (2015).

31. SAP, C. "Linear and nonlinear static and dynamic analysis and design of three-dimensional structures", Berkeley (CA, USA), Computers and Structures Inc. (2011).
32. Standard, I. 2800, Seismic Resistant Design of Buildings-Code of Practice.
33. Standard, I. The 10th Issue of National Building Regulations.
34. Ju, S.H. and Ni, S.H. "Determining Rayleigh damping parameters of soils for finite element analysis", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **31**(10), pp. 1239-1255 (2007).
35. Hashash, Y.M.A. and et al. "DEEPSOIL V6.1, user manual", Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL (2016).