

بررسی تحریک ورودی ثبت شده در فونداسیون نواری سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون نواری مدفون

حسین جهان خواه* (استادیار)

علی اسماعیل پور (کارشناس ارشد)

پژوهشکده زئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

مهندسی عمران شهریه (تابش ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۲/۳، ص. ۷۱-۵۹

اندرکنش سینماتیک خاک - سازه، به عنوان عامل اثرگذار در تحریک ورودی سیستم، موضوع مطالعات متعددی در حوزهی اندرکنش خاک - سازه بوده است. با این حال در ادبیات فنی موجود، بررسی پدیدهی مذکور اغلب بدون احتساب اثرگذاری سازه‌های اطراف مطالعه شده است. در صورتی که اغلب سازه‌های موجود در محیط شهری، معمولاً تحت تأثیر حضور سازه‌های مجاور خود هستند. در پژوهش حاضر، تأثیر حضور فونداسیون نواری مدفون در تحریک ورودی به فونداسیون سطحی مجاور مطالعه شده است. در این راستا، از تحلیل دوبعدی به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس و فرض محیط کشتان همگن استفاده شده است. تحلیل‌های موجود در پژوهش حاضر در ۳ بخش: حوزهی زمان، حوزهی بسامد و محاسبات طیفی ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مجاورت فونداسیون‌ها می‌تواند منجر به تغییر قابل ملاحظه‌ای در تعداد مؤلفه‌های تحریک ورودی به فونداسیون سطحی و نیز محتوای بسامدی آن‌ها، به ویژه در بسامدهای بالا شود. همچنین نشان داده شده است که تغییر مذکور می‌تواند در جهت کاهش یا افزایش دامنه‌ی تحریک ورودی باشد.

واژگان کلیدی: اندرکنش سینماتیک، فونداسیون‌های نواری، مجاورت، تحریک ورودی.

۱. مقدمه

در برآورد پاسخ لرزه‌یی، دو عامل تحریک ورودی و مشخصات دینامیکی سیستم، نقش تعیین‌کننده‌ی ایفا می‌کنند. اندرکنش خاک - سازه هر دو عامل ذکر شده را دستخوش تغییر قرار می‌دهد. به گونه‌یی که تغییرات تحریک ورودی به واسطه‌ی انعطاف‌پذیری بستر، با عنوان اندرکنش سینماتیکی^۱ بحث می‌شود و تغییرات مشخصات دینامیکی سیستم و آثار آن در پاسخ لرزه‌یی با عنوان اندرکنش اینرشال^۲ بررسی می‌شود. اندرکنش سینماتیکی، محتوای بسامدی و نوع مؤلفه‌های ورودی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به دنبال آن، تغییراتی در پاسخ فونداسیون و سازه به وجود می‌آورد. در سال‌های اخیر، با توجه به رشد انبوه ساختمان‌ها و کاهش فضای مناسب احداث سازه‌های جدید در محیط شهری، سازه‌ها با تراکم زیاد، اغلب در مجاورت هم یا با فاصله‌ی کم از هم ساخته می‌شوند. بنابراین در زمان وقوع زلزله، سازه‌ها با توجه به بُعد و عمق مدفونی فونداسیون‌ها و متناسب با ارتفاعی که دارند، در یکدیگر تأثیر می‌گذارند. آثار مذکور با عنوان اندرکنش متقابل سازه - خاک - سازه شناخته

می‌شود. اثرگذاری ذکر شده همانند حوزه‌ی سیستم‌های خاک - سازه‌ی منفرد، در دو بخش اندرکنش سینماتیکی و اندرکنش اینرشال قابل بررسی است. در بخش اندرکنش سینماتیکی، حرکت ورودی فونداسیون که همان پاسخ فونداسیون تحت موج لرزه‌یی انتشار یافته به سطح زمین بدون بارگذاری خارجی است، بررسی می‌شود. در سال ۱۹۷۰، پدیده‌ی مذکور با مشاهده‌ی اختلاف دامنه و فاز حرکت میدان آزاد زمین و حرکت ورودی مؤثر سازه در بسامدهای بالا دریافت و اثر فیلترینگ نامیده شده است.^[۱] در بسیاری پژوهش‌های تحلیلی، تقریبی و آزمایشگاهی ارائه شده برای محاسبه‌ی اثر فیلترینگ و موج برگشتی، نشان داده شده است که تابع حرکت ورودی فونداسیون، متأثر از هندسه، نوع فونداسیون (سطحی یا مدفون) و همچنین نوع موج محرک و زاویه‌ی برخورد آن به فونداسیون است.^[۲-۴] در پژوهشی در سال ۱۹۸۳، اندرکنش سازه‌های همجوار متأثر از ۴ پارامتر سرعت موج برشی خاک، لختی سازه‌ها، بسامد طبیعی سازه‌ها و فاصله‌ی میان سازه‌ها تفسیر شده و نتیجه‌ی آن با مطالعه‌ی گروهی از سازه‌های انعطاف‌پذیر که بر فونداسیون استوانه‌یی صلب سطحی بنا شده و بر محیط خاکی نیمه‌بی‌نهایت قرار گرفته‌اند، به دست آمده است.^[۵] و در ادامه با استفاده از روش پیشنهادی ارائه شده، نتیجه گرفته شده است که مجاورت سازه‌ها،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۴/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۱۰/۱۹، پذیرش ۱۳۹۵/۱۱/۹

DOI:10.24200/J30.2018.1399

موجب کاهش دامنه‌ی پاسخ در بسامد تشدید شده است. میزان تأثیر ذکر شده در سازه‌هایی که در سنگ‌های سخت مدفون می‌شوند، بیشتر پیش‌بینی شده است. همچنین در پژوهش اخیر، عمدتاً آثار اندرکنش این‌رشتهال مدنظر قرار گرفته است.

نخستین مطالعات نیز در مورد تأثیر سازه‌های مجاور، شامل سازه‌های مدفونی چون تونل‌های مترو و همچنین فونداسیون‌های سطحی در اندرکنش سیستم‌های خاک - سازه در سال ۱۳۸۸ صورت گرفته و در نتایج ارائه شده، کاهش در میزان تابع تبدیل جابه‌جایی افقی و افزایش در تابع تبدیل دوران فونداسیون در مقابل افزایش بسامد بی‌بعد مشاهده شده است.^[۶]

همچنین در سال‌های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۸، اثر مجاورت فونداسیون‌های سطحی صلب دایره و مربع شکل بررسی شده و افزایش نسبت جرمی فونداسیون بارگذاری شده، دلیل انتقال بسامد پیک تشدید به سمت مقادیر کوچک‌تر و افزایش مقدار پیک تشدید شناخته شده است.^[۸،۷] برخی پژوهشگران نیز با استفاده از ترکیب روش‌های اجزاء محدود و اجزاء مرزی، اثر مجاورت سازه‌های واقع در فونداسیون‌های سطحی با شکل مربع را بررسی کرده‌اند.^[۱۰،۹] همچنین در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۸، اندرکنش فونداسیون‌های صلب سطحی که بر بستر هموژن، ایزوتروپ و کشسان واقع شده‌اند، با استفاده از مدل‌های مجزا بررسی و از فشر و میراگرهای مستقل از بسامد و فونداسیون‌هایی دارای جرم استفاده شده است. ضمناً نتایج در قالب توابع سختی و میرایی مستقل از بسامد ارائه شده است.^[۱۱،۱۲]

طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۴، نیز با هدف اطمینان از کفایت آیین‌نامه‌ی طراحی سازه‌های امن هسته‌یی، مجموعه‌ی کاملی از آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی انجام گرفته و در نهایت با تأیید نتایج مطالعات پیشین، تأثیر نحوه‌ی قرارگیری سازه و جهت برخورد امواج به سازه‌ها بررسی شده است. از مجموعه‌ی آزمایش‌های مذکور نتیجه گرفته شده است که دامنه‌ی پاسخ در بسامد طبیعی سیستم خاک - سازه و بسامد تشدید در زمانی که سازه‌ها به صورت موازی نسبت به جهت گسترش میدان موج قرار گرفته‌اند، در مقایسه با سازه‌ی منفرد کاهش یافته است و چنانچه ترتیب قرارگیری نسبت به جهت گسترش میدان موج حالت سری داشته باشد، پاسخ‌ها با افزایش دامنه مواجه می‌شوند.^[۱۳-۱۵]

همچنین در سال ۲۰۱۱ به بررسی جامع ادبیات فنی موجود در زمینه‌ی مطالعات اندرکنش سازه - خاک سازه پرداخته شده است.^[۱۶] در سال ۲۰۱۲ نیز با انجام آزمایش‌های تمام‌مقیاس بر روی سازه‌های واقع بر زمین دست‌نخورده، اثر پدیده‌ی مجاورت فونداسیون‌ها مطالعه و نتیجه‌گیری شده است که اگرچه اثر سازه‌های مجاور سطحی در یکدیگر قابل چشم‌پوشی است، اما با افزایش عمق دفن، فونداسیون‌ها آثار چشم‌گیری در یکدیگر خواهند داشت.^[۱۷] همچنین در سال ۲۰۱۳، با درنظر گرفتن تأثیر سازه‌های مجاور، اثر آن در کاهش تحریک ورودی ناشی از اندرکنش سینماتیکی به سیستم خاک - سازه چشم‌گیر بوده و درنظر گرفتن فونداسیون‌های مجاور، سبب کاهش جابه‌جایی بام نسبت به حالت فونداسیون سطحی منفرد شده است.^[۱۸]

در یک مطالعه‌ی عددی (۲۰۱۳)، نیز به بررسی مدل‌های سه‌بعدی از منظر پدیده‌ی مجاورت سازه‌های زیرزمینی (ایستگاه‌های زیرزمینی) و سازه‌های سطحی مستقر بر فونداسیون دارای شمع که بر محیط ویسکوکشسان چندلایه واقع شده‌اند، پرداخته شده است.^[۱۹] در پژوهش مذکور، اثر موقعیت سازه‌های مذکور نسبت به هم، جهت ارتعاش میدان موج لرزه‌یی، فاصله‌ی بین سازه‌ها، سرعت موج برشی، میرایی محیط خاکی، عمق و تعداد شمع‌های سازه‌ی سطحی بر اندرکنش سازه‌ها بر هم بررسی شده و دو عامل بسیار مهم در اندرکنش سازه‌ها: ۱. موقعیت سازه‌ها نسبت به هم و ۲. جهت ارتعاش میدان موج ورودی بیان شده است.^[۱۹] همچنین در سال

۲۰۱۴، اثر اندرکنش سازه‌های ایده‌آل بر یکدیگر در حین زلزله بررسی شده و نتایج نشان داده است که اثر پدیده‌ی مجاورت با توجه به تعداد و مشخصات دینامیکی سازه‌ها، فاصله‌ی بین و امیدانس آن‌ها نسبت به خاک، می‌تواند بسیار متغیر باشد؛ و ضمناً ایجاد حرکت پیچشی در فونداسیون‌ها در اثر پدیده‌ی مجاورت تأکید شده است.^[۲۰]

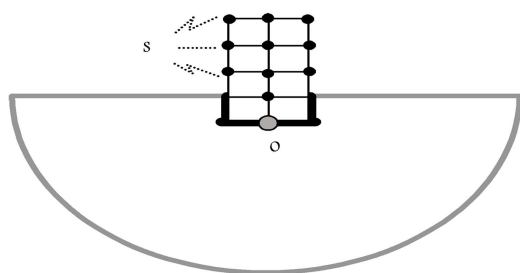
در پژوهش دیگری (۲۰۱۵)، نیز اثر امیدانس و عمق مدفونی زیرزمین برج فرمونت ۱۸۱ در سازه‌های مجاور با استفاده از روش‌های خطی معادل براساس آیین‌نامه‌ی ۲۰۱۲ NEHRP و تحلیل غیرخطی پوش‌آور با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA بررسی و بیان شده است که به دلیل عدم لحاظ لایه‌های نازک پروفیل خاک بستر برج در روش خطی معادل، اصطکاک کف فونداسیون نسبت به نیروی منفعل اطراف آن تقریباً دست بالا محاسبه می‌شود. از این رو تفاوت در محاسبه‌ی سختی فزرها در دو روش مذکور وجود دارد. همچنین با مقایسه‌ی نتایج اندرکنش سازه‌ی منفرد و خاک با اندرکنش سازه‌ی برج، خاک و سازه‌های اطراف نتیجه گرفته شده است که نیروی ایجادشده در اثر درنظرگرفتن پدیده‌ی مجاورت، در نیاز لرزه‌یی دیوارهای زیرزمین، دافراگم‌ها، و شفت تأثیر می‌گذارد.^[۲۱] همچنین در سال ۲۰۱۶، با استفاده از تحلیل‌های عددی، اثر اندرکنش متقابل و همجواری فونداسیون‌های مربع مدفون بررسی و تحریک ورودی به فونداسیون مدفون دارای جرم و پاسخ دینامیکی سازه‌های واقع بر آن در دو مؤلفه‌ی افقی و پیچشی مطالعه شده و یک نتیجه‌ی کلی به‌دست آمده است که مجاورت با فونداسیون صلب بدون جرم، موجب تغییرات چشم‌گیر در مؤلفه‌ی افقی حرکت ورودی و ایجاد مؤلفه‌ی پیچشی فونداسیون مدفون خواهد شد و نیز پاسخ دینامیکی سازه‌های واقع بر فونداسیون مدفون، متأثر از مجاورت با فونداسیون بدون جرم است. ضمناً همسان بودن بسامدهای اصلی افقی و پیچشی فونداسیون مدفون، عامل اثرگذاری بیشتر پدیده‌ی مجاورت بیان شده است.^[۲۲]

۲. طرح مسئله

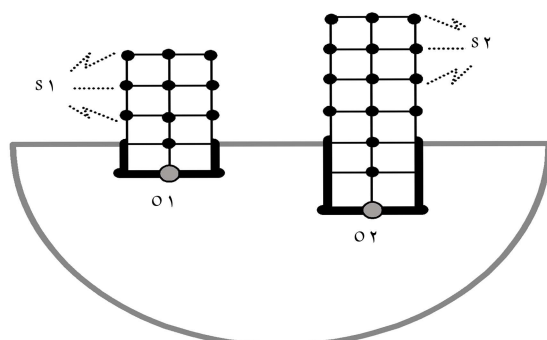
فونداسیون سطحی صلب بدون وزن تحت اثر تحریک برشی با جهت انتشار قائم (SV) که بر بستر هموژن، کشسان و فاقد میرایی واقع شده است، حرکت میدان آزاد سطح زمین را تجربه می‌کند. تحریک تجربه‌شده از طریق فونداسیون، محتوای بسامدی مشابه با میدان موج دارد و فقط دامنه‌ی آن ۲ برابر خواهد بود. نمونه‌ی از این فرایند در شکل ۱ مشاهده می‌شود که مطابق آن تحریک اعمالی به بستر، یک پالس جابه‌جایی افقی با شکل تابع توزیع نرمال و دامنه‌ی واحد است. فونداسیون سطحی نیز جابه‌جایی با شکل تابع توزیع نرمال و در همان جهت افقی با دامنه‌ی ۲ برابر دامنه‌ی اولیه را تجربه کرده است.

چنانچه فونداسیون مذکور از حالت سطحی به حالت مدفون تغییر وضعیت دهد، تحریک ورودی به آن با تحریک میدان آزاد متفاوت است. در شکل ۲الف، نمونه‌ی از فونداسیون مدفون نواری، صلب و بدون جرم نشان داده شده است. فونداسیون مدفون صلب به‌دلیل سختی متفاوتی که نسبت به محیط دارد، باعث ایجاد قیدهایی در برابر حرکت میدان آزاد می‌شود. در نتیجه، تحریک ورودی علاوه بر اینکه از لحاظ محتوای بسامدی با حرکت میدان آزاد متفاوت است، دامنه‌ی کمتر از دو برابر دامنه‌ی میدان موج خواهد داشت.

شکل ۲ب، نیز پدیده‌ی مذکور را نمایش می‌دهد. هراندازه عمق دفن فونداسیون بیشتر باشد، قیود حرکتی ایجادشده در درجه‌ی بیشتری، سختی سیستم را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و باعث می‌شود تفاوت مشاهده‌شده در دامنه و محتوای بسامدی



شکل ۳. نمایی شماتیک از مدل سیستم خاک - سازه.



شکل ۴. نمایی شماتیک از مدل سیستم‌های خاک - سازه‌ی مجاور.

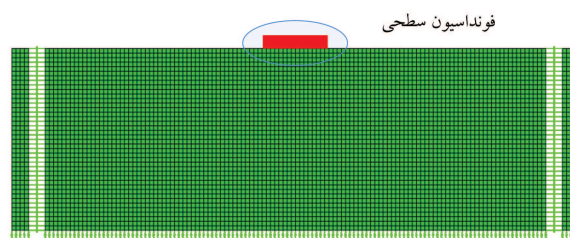
مدفون ایجاد می‌شود، تغییر کند. پدیده‌ی مذکور موجب می‌شود که پاسخ فونداسیون سطحی که در حالت انفراد برابر با تک مؤلفه‌ی حرکت افقی میدان آزاد است، به پاسخ در قالب ۳ مؤلفه‌ی: ۱. افقی تصحیح شده، ۲. قائم و ۳. چرخشی تغییر یابد. چنانچه مشخصات مجموعه‌ی محیط کشسان به علاوه‌ی فونداسیون‌های مجاور در چند درجه آزادی محدود متراکم شود، حل معادله‌ی تعادل دینامیکی حرکت را می‌توان با استفاده از تحلیل ماتریسی المان محدود انجام داد. نمایی از سیستم خاک - سازه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

گره‌های موجود در سیستم با توجه به محل قرارگیری در سیستم نامگذاری می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، گره‌های سازه‌ی ۳ و مرزی ۴ به ترتیب با زیرنویس‌های s و o نشان داده می‌شوند. چنانچه ترتیب شماره‌گذاری به نحوی باشد که ابتدا گره‌های سازه‌ی و سپس گره‌های مرزی شماره‌گذاری شوند، می‌توان معادله‌ی تعادل دینامیکی برای سیستم مشاهده‌شده در شکل ۳ را به صورت رابطه‌ی ۱ نوشت: [۲۳]

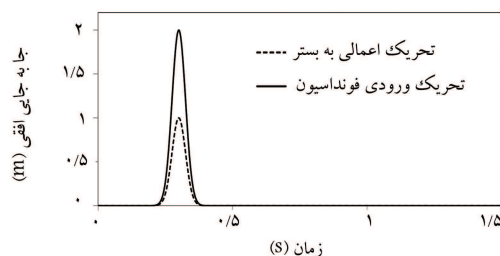
$$\begin{bmatrix} [S_{ss}] & [S_{so}] \\ [S_{os}] & [S_{oo}^s] + [S_{oo}^g] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_s^t\} \\ \{u_o^t\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ [S_{oo}^g] \{u_o^g\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

که در آن، ماتریس سختی مربوط به گره‌های سازه‌ی، مرزی و رابط بین سازه و مرز به ترتیب با S_{ss} ، S_{so} و S_{oo}^s نمایش داده شده است. همچنین حرکت و سختی فونداسیون با احتساب قید صلبیت آن پیش از احداث سازه به ترتیب با $\{u_o^g\}$ و $[S_{oo}^g]$ نشان داده می‌شوند. زیرنویس o در دو پارامتر مذکور نشان‌دهنده‌ی آن است که حرکت و سختی فوق در نقطه‌ی o محاسبه می‌شوند. u_o^t و u_o^g به ترتیب جابه‌جایی کل تجربه‌شده توسط گره‌های سازه‌ی و مرزی را نشان می‌دهند.

رابطه‌ی ۱ را می‌توان برای سیستم‌های خاک - سازه‌ی مجاور نیز تعمیم داد. نمایی از سیستم‌های خاک - سازه‌ی مجاور در شکل ۴ نشان داده شده است. گره‌های سازه‌ی و مرزی برای سازه‌ی اول به ترتیب با زیرنویس‌های $s1$ و $o1$ و برای سازه‌ی دوم به ترتیب با زیرنویس‌های $s2$ و $o2$ نشان داده می‌شوند. چنانچه دو سازه‌ی مجاور هم به صورت یک سازه‌ی واحد در نظر گرفته

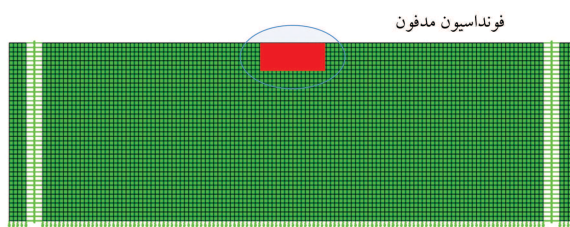


الف) مدل فونداسیون سطحی؛

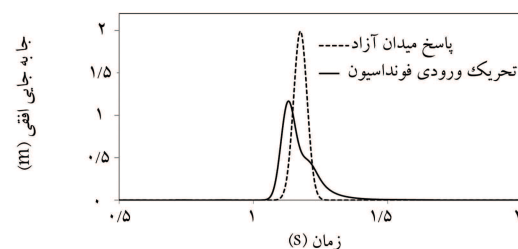


ب) تحریک اعمالی به محیط ورودی به فونداسیون سطحی.

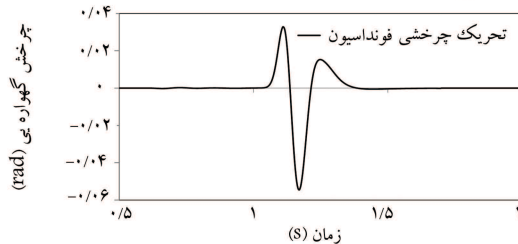
شکل ۱. فونداسیون سطحی.



الف) مدل فونداسیون مدفون؛



ب) پاسخ میدان آزاد و تحریک افقی ورودی به فونداسیون؛



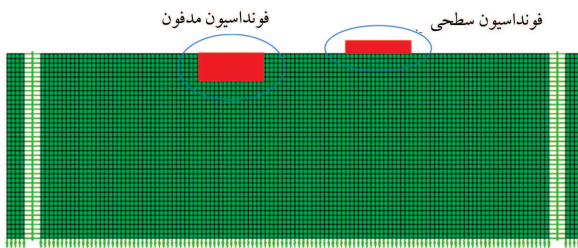
ج) تحریک چرخشی فونداسیون.

شکل ۲. فونداسیون مدفون.

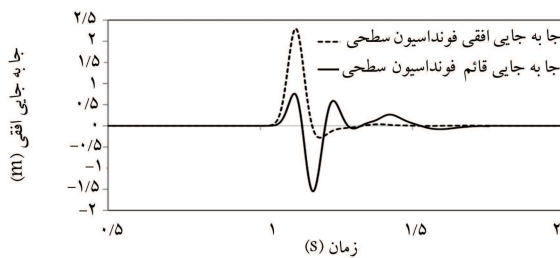
تحریک ورودی با حرکت میدان آزاد بیشتر شود. از طرفی، همان‌طور که در شکل ۲ج نشان داده شده است، فونداسیون در این حالت علاوه بر تحریک افقی، تحریک چرخشی را نیز تجربه می‌کند.

علاوه بر موارد بیان‌شده، حضور قید صلبیت فونداسیون مدفون سبب می‌شود که تحریک ورودی به فونداسیون‌های مجاور که تحت تأثیر امواج ساطع‌شده از فونداسیون

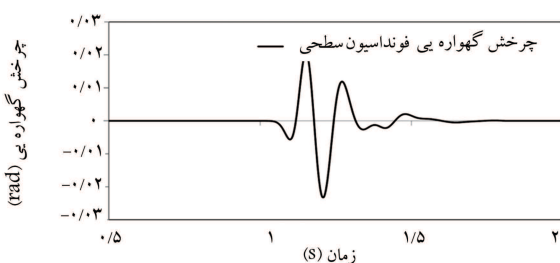
$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} [S_{s1s1}]_{m \times m} & \begin{matrix} \circ & m \times n \end{matrix} \\ \begin{matrix} \circ & n \times m \end{matrix} & [S_{s1s2}]_{n \times n} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [S_{o1s1}]_{m \times r} & \begin{matrix} \circ & m \times r \end{matrix} \\ \begin{matrix} \circ & n \times r \end{matrix} & [S_{s1o2}]_{n \times r} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [S_{s1o1}]_{r \times m} & \begin{matrix} \circ & r \times n \end{matrix} \\ \begin{matrix} \circ & r \times m \end{matrix} & [S_{o1s2}]_{r \times n} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} [S_{o1o1}]_{r \times r} & \begin{matrix} \circ & r \times r \end{matrix} \\ \begin{matrix} \circ & r \times r \end{matrix} & [S_{o1o2}]_{r \times r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [S_{o1o1}^g]_{r \times r} & [S_{o1o2}^g]_{r \times r} \\ [S_{o2o1}^g]_{r \times r} & [S_{o2o2}^g]_{r \times r} \end{bmatrix} \\ \left\{ \begin{matrix} \{u_{s1}^t\}_{m \times 1} \\ \{u_{s2}^t\}_{n \times 1} \\ \{u_{o1}^t\}_{r \times 1} \\ \{u_{o2}^t\}_{r \times 1} \end{matrix} \right\} & = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \circ & m \times 1 \\ \circ & n \times 1 \end{matrix} \\ [S_{o1o1}^g]_{r \times r} & [S_{o1o2}^g]_{r \times r} \\ [S_{o2o1}^g]_{r \times r} & [S_{o2o2}^g]_{r \times r} \end{bmatrix} \left\{ \begin{matrix} \{u_{o1}^g\}_{r \times 1} \\ \{u_{o2}^g\}_{r \times 1} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix} \quad (2)$$



الف) مدل همجواری فونداسیون‌های سطحی و مدفون؛



ب) تحریک افقی و قائم ورودی به فونداسیون سطحی؛



ج) تحریک چرخشی فونداسیون سطحی.

شکل ۵. فونداسیون‌های مجاور.

بررسی اثر پارامترهای بی‌بعد، از جمله عرض نسبی فونداسیون مدفون و فاصله‌ی نسبی بین دو فونداسیون، آثار پدیده‌ی مجاورت به شکل گسترده‌تری بررسی شود. همچنین سعی شده است تا تفاوت‌های ایجادشده در پاسخ فونداسیون سطحی در مجاورت با فونداسیون مدفون، نسبت به حالت انفراد در قالب نمودارهای تاریخیچه‌ی زمانی و همچنین طیف پاسخ شتاب افقی، قائم، و چرخشی ارائه شود. نمونه‌ی از اثر پدیده‌ی مجاورت در شکل ۵ نشان داده شده است. در شکل ۵الف، نمایشی از پدیده‌ی مجاورت و در شکل‌های ۵ب و ۵ج به ترتیب پاسخ‌های حرکت‌های انتقالی (افقی و قائم) و چرخشی نمایش داده شده‌اند. اثر مجاورت باعث می‌شود فونداسیون مدفون نیز که در حالت انفراد فقط تحریک‌های افقی تصحیح‌شده نسبت

شوند، به دلیل عدم ارتباط مستقیم بین گره‌های سازه‌ی دو سازه، در ماتریس سختی دینامیکی سازه‌ی یک‌پارچه، درایه‌های صفر نیز وجود دارد. چنانچه برای شماره‌گذاری گره‌ها، ابتدا از گره‌های سازه‌ی شروع شود، می‌توان رابطه‌ی ۱ را برای سیستم‌های خاک - سازه‌ی مجاور مطابق رابطه‌ی ۲ بازنویسی کرد. که در

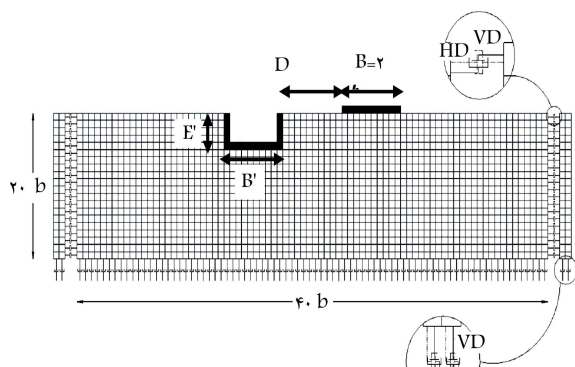
$$[S_{oi oj}^g] = \begin{bmatrix} S_{h_i h_j}^g & S_{h_i v_j}^g & S_{h_i r_j}^g \\ S_{v_i h_j}^g & S_{v_i v_j}^g & S_{v_i r_j}^g \\ S_{r_i h_j}^g & S_{r_i v_j}^g & S_{r_i r_j}^g \end{bmatrix} \quad \text{آن}$$

درجات آزادی فونداسیون‌های i و j در مرز است. مثلاً $S_{h_i h_j}^g$ ، درایه‌ی سختی دینامیکی درگیر درجات آزادی افقی فونداسیون‌های i و j در مرز را نشان می‌دهد. در رابطه‌ی اخیر، نمایه‌های h ، v و r به ترتیب نشان‌دهنده‌ی درجات آزادی افقی، قائم، و چرخشی هستند. پارامترهای m و n ، تعداد درجات غیرمرزی در هر یک از سازه‌ها هستند و برای هر دو سازه، درجات آزادی مرزی به ۳ درجه‌آزادی افقی، قائم و چرخشی محدود می‌شود.

$$\{u_{oi}^g\} = \begin{Bmatrix} u_{h_i}^g \\ u_{v_i}^g \\ u_{r_i}^g \end{Bmatrix} \quad \text{همچنین}$$

پژوهش حاضر، یافتن بردار تحریک مذکور برای یک فونداسیون سطحی نواری در مجاورت یک فونداسیون نواری مدفون است. جهت محاسبه‌ی بردار تحریک‌های ورودی، یک پالس نرمال از ضلع پایین مدل به آن وارد شده است. ابتدا در حالت عدم وجود فونداسیون‌ها، پاسخ سطح زمین ثبت می‌شود که همان پاسخ میدان آزاد است. سپس در حالت قرارگیری یک فونداسیون سطحی در کنار یک فونداسیون مدفون تحت همان تحریک قبل، حرکت‌های افقی، چرخشی و قائم فونداسیون سطحی محاسبه شده است. در ادامه در حوزه‌ی بسامد، پاسخ‌های افقی، چرخشی و قائم به دست آمده به پاسخ میدان آزاد تقسیم و توابع تبدیل موردنظر استخراج شده‌اند.

همان‌طور که در بخش مقدمه نیز بیان شد، عمده‌ی پژوهش‌های انجام‌شده در ادبیات فنی، معطوف به بررسی اندرکنش فونداسیون منفرد و یا سازه‌های منفرد با خاک بوده است. علاوه بر آن، پژوهش‌هایی که اثر پدیده‌ی مجاورت را در نظر گرفته‌اند، عمدتاً اثر اندرکنش سینماتیک و اینرشال را به صورت ترکیبی بررسی کرده‌اند. همچنین در بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌ی اندرکنش سیستم فونداسیون - خاک - فونداسیون، هندسه و مشخصات معینی از سیستم بررسی شده و کمتر به صورت پارامتری به تشریح مسئله پرداخته شده است. به علاوه در بیشتر پژوهش‌ها، آثار کاهش پدیده‌ی مجاورت گزارش شده و کمتر به ایجاد مؤلفه‌های چرخشی و خصوصاً قائم توجه شده است. از این رو در پژوهش حاضر، سعی شده است تا با



شکل ۷. تصویر شماتیک از مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس.

جدول ۱. پارامترهای هندسی سیستم.

پارامتر	تعریف
b	بعد مرجع (نصف عرض فونداسیون سطحی)
B	عرض فونداسیون سطحی
B'	عرض فونداسیون مدفون
E'	عمق فونداسیون مدفون
D	فاصله فونداسیون ها

نواری مجاور باشند. از این رو تمامی پارامترها به بعد مرجع (b) که برابر با نصف عرض فونداسیون سطحی است، مقیاس شده اند.

علاوه بر پارامترهای هندسی، پارامتر بسامد بی بعد که در رابطه ۱ ارائه شده است، جهت نمایش نتایج حاصل از تحلیل استفاده شده است (رابطه ۳):

$$a_0 = \frac{\omega \cdot b}{V_s} \quad (3)$$

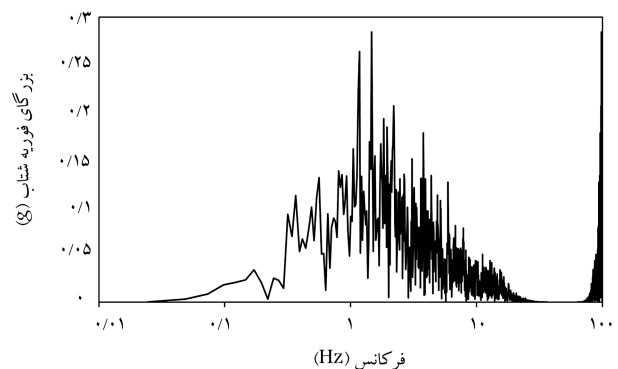
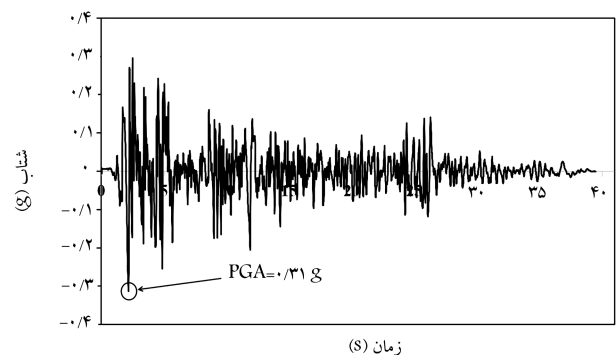
که در آن، ω و V_s به ترتیب بسامد دورانی تحریک و سرعت موج برشی محیط خاکی هستند. به منظور جذب امواج برگشتی از سوی فونداسیون ها، در پژوهش حاضر از مرزهای جاذب ویسکوز و ویسکوکشنان به ترتیب برای مرزهای جانبی و پایینی مدل، با پارامترهای ارائه شده در برخی پژوهش ها، استفاده شده است. [۲۶، ۲۵] با توجه به شکل ۷، المان های ویسکوز مرزهای جانبی و المان های ویسکوکشنان مرز پایینی در دو جهت مماسی و عمود بر مرز مدل، به ترتیب به عنوان جاذب امواج برگشتی برشی و محوری عمل می کنند.

در شکل ۷، VD و HD به ترتیب نشان دهنده میراگرهای جاذب امواج محوری و برشی هستند. در مرز پایین علاوه بر میراگرها، فنرهای VS و HS تعبیه شده اند. فنرهای مذکور موجب حذف جابه جایی ماندگار ناخواسته در سیستم می شوند. با توجه به توصیه های مراجع مذکور، جهت محاسبه ی ضرایب میرایی میراگرهای جاذب امواج محوری و برشی، به ترتیب از روابط ۴ و ۵ استفاده شده است:

$$C_{VD} = \rho \times A \times V_p \quad (4)$$

$$C_{HD} = \rho \times A \times V_s \quad (5)$$

ضمناً برای محاسبه ی ضرایب سختی فنرهای موازی و عمود بر سطح به ترتیب



شکل ۶. تاریخچه ی زمانی و تبدیل فوریه ی شتاب زلزله.

به میدان آزاد و نیز حرکت دورانی را تجربه می کرد، در اثر پدیده ی مجاورت، تحریک قائم را نیز تجربه کند. همچنین تحریک های افقی و چرخشی تجربه شده نیز با حالات فونداسیون مدفون متفرد متفاوت خواهد بود. لیکن بحث پاسخ فونداسیون مدفون در اثر پدیده ی مجاورت موضوع پژوهش حاضر نیست. لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در شکل ۵ از مجموعه نتایج پژوهش حاضر بوده و برای نمونه در بخش طرح مسئله ارائه شده است. به منظور تهیه ی طیف های پاسخ، از رکورد زلزله ی ال سنترو ۱۹۴۰ که در ایستگاه ایمپریال ولی ثبت شده است، در محاسبه ی پاسخ جابه جایی های افقی و قائم و نیز چرخش گهواره یی استفاده شده است. تاریخچه ی زمانی و تبدیل فوریه ی شتاب زلزله ی ال سنترو (۱۹۴۰) در شکل ۶ مشاهده می شود.

۳. مدل سازی

به منظور بررسی پدیده ی مجاورت فونداسیون های سطحی و مدفون، مدل های دوبعدی تهیه و تحلیل شده اند. برای مدل سازی سیستم، از روش مستقیم در نرم افزار اجزاء محدود آباکوس، [۲۴] استفاده شده است که در آن امکان محاسبه ی پاسخ حالات مختلف تحریک ورودی در اثر اندرکنش سینماتیک سیستم فونداسیون - خاک - فونداسیون وجود دارد. چگالی محیط خاکی در مدل سازی مذکور، ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ضریب پواسون آن ۰/۳ است. شمایی از مدل ساخته شده در نرم افزار آباکوس در شکل ۷ مشاهده می شود.

در جدول ۱، مشخصات هندسی مدل های مورد مطالعه در پژوهش حاضر ارائه شده است. در پژوهش حاضر تمامی پارامترها به صورت بی بعد معرفی شده اند. نمایش پارامترهای هندسی سیستم به صورت بی بعد موجب می شود که نتایج حاصل از تحلیل ها به جای یک سیستم خاص، نماینده ی یک کلاس از سیستم های فونداسیون

جدول ۲. مقادیر پیشنهادی برای ضریب آلفا [۲۵]

پارامتر اصلاح شده	محدوده تغییرات	مقدار توصیه شده
α_N	$1^\circ \sim 2^\circ$	۱/۳۳
α_T	$1^\circ \sim 5^\circ$	۰/۶۷

از روابط ۶ و ۷ استفاده شده است:

$$K_{VS} = \frac{\alpha_N G}{R} A \quad (۶)$$

$$K_{HS} = \frac{\alpha_T G}{R} A \quad (۷)$$

که در آن ها، ρ ، V_s ، V_p و G و R به ترتیب جرم مخصوص، سرعت موج برشی، سرعت موج قائم، مدول برشی، و ارتفاع محیط خاکی هستند. علاوه بر این، A مساحت مؤثر هر المان است که از حاصل ضرب بُعد المان دو بُعدی در ضخامت درون صفحه‌ی مدل نتیجه می‌شود. همچنین برای محاسبه‌ی ضرایب α_N و α_T از جدول ۲ استفاده شده است. لازم به ذکر است سرعت موج برشی که یکی از مهم‌ترین پارامترهای مطالعات اندرکنش خاک - سازه به شمار می‌رود، در بسامد بی‌بُعد تحریک مشاهده می‌شود. سایر پارامترهای بی‌بُعد در جدول ۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌منظور بررسی تأثیر فاصله‌ی نسبی بین فونداسیون‌ها، از فواصل نسبی D/b برابر ۱، ۲، ۴ و ۶ استفاده شده است. عرض نسبی فونداسیون سطحی (B/b) در پژوهش حاضر، ثابت و برابر ۲ در نظر گرفته شده است. ضمناً فونداسیون مدفون مقادیر عرض نسبی B'/b برابر ۱، ۲ و ۴ و همچنین عمق نسبی E'/b برابر ۱ دارد.

نحوه‌ی اعمال تحریک ورودی، یکی از مهم‌ترین عوامل در مدل‌های دینامیکی است. هدف اصلی در بررسی اندرکنش خاک - سازه بررسی سیستم تحت تحریک زلزله است. تحریک مذکور می‌تواند به‌صورت‌های مختلف شتاب، سرعت، جابه‌جایی و یا نیرو اعمال شود. همان‌طور که در بخش پیش شرح داده شد، تحریک استفاده‌شده در پژوهش حاضر، یک پالس جابه‌جایی با شکل تابع توزیع نرمال با جابه‌جایی و سرعت اولیه‌ی صفر است. تحریک مذکور پس از اعمال از کف مدل به سمت سطح آن گسیل می‌شود و پس از متأثر کردن فونداسیون‌ها، بخشی از امواج بازگشتی به سمت مرز پایین و بخشی دیگر به سمت مرزهای جانبی حرکت می‌کنند.

ابعاد المان در دقت مدل‌های عددی بسیار تأثیرگذار است. به‌صورت تئوری، استفاده از ابعاد المان کوچک در مدل‌های عددی، دقت بیشتری را نسبت به ابعاد المان بزرگ‌تر حاصل می‌کند. ریز کردن ابعاد المان سبب افزایش مدت زمان تحلیل می‌شود و با افزایش تعداد المان‌های مدل، گاهی اوقات تحلیل به‌دلیل عدم توانایی سخت‌افزاری غیرممکن است. پارامترهای دیگر مدل نیز همچون شرایط مرزی و همچنین گام زمانی حل در دقت مدل تأثیر دارند. به‌منظور حصول اطمینان از ابعاد المان می‌توان با انجام آنالیز حساسیت پاسخ‌ها به بُعد مش، پارامتر ذکرشده را به‌صورت بهینه تعیین کرد. پس از چند تحلیل از طریق مدل با ابعاد المان متفاوت و مقایسه‌ی میزان تغییر در پاسخ‌ها می‌توان بُعد المان را تعیین کرد. بُعد المانی که کاهش بیشتر آن سبب تغییر ناچیز در پاسخ‌ها شود، بُعد المان مناسبی است. همچنین از طریق مقایسه‌ی پاسخ مدل با پاسخ‌های دقیق نیز می‌توان بُعد المان را کنترل کرد. علاوه بر این حالت می‌توان از روابط ابعاد المان مناسب در مدل‌های دینامیکی که در ادامه بیان شده است، استفاده کرد.

ابعاد المان در آنالیزهای دینامیکی بسیار مهم‌تر از تحلیل‌های استاتیکی هستند. در پژوهشی در سال ۱۹۶۹، [۲۵] اثر ابعاد المان در تحلیل‌های دینامیکی بررسی شد

و با بررسی انتشار یک بُعدی موج از طریق میله با دو مصالح متفاوت نتیجه گرفته شد که پاسخ منطقی زمانی حاصل می‌شود که نسبت بُعد بزرگ‌ترین مش به طول موج کُندترین موج منتشره در محیط (موج با پایین‌ترین سرعت)، در حدود $\frac{1}{6}$ باشد. در پژوهش دیگری در سال ۱۹۷۳، [۲۷] دقت جابه‌جایی حاصل از یک پالس هارمونیک با فرض انتشار یک بُعدی موج در مدل اجزاء محدودی با بُعد المان‌های مختلف بررسی شده است. در پژوهش مذکور نشان داده شده است که پالس با بسامد بالا، فقط در مدل‌هایی با ابعاد مش کوچک قابل بررسی است. بر مبنای مطالعات مذکور، استفاده از بُعد المان در حدود $\frac{1}{8}$ الی $\frac{1}{6}$ برابر کوچک‌ترین طول موج منتشره، پاسخ‌های قابل اطمینانی را تولید می‌کند. با توجه به بُعد المان، می‌توان ناحیه‌ی بسامدی را، که ابعاد مش انتخابی در آن توانایی عملکرد مناسبی دارند، به‌دست آورد. از این رو هندسه‌ی مدل‌های دو بُعدی با استفاده از المان‌های ۴ گره‌یی CPE4R به ابعاد 0.25×0.25 متر در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده است. ابعاد مذکور براساس مرجع [۲۷] و توصیه‌های ارائه‌شده در پژوهش دیگری در سال ۱۳۹۳، انتخاب شده است. [۲۸]

۴. صحت‌سنجی نتایج

در بخش حاضر، ابتدا صحت مدل ساخته‌شده در برآورد اندرکنش سینماتیکی بررسی شده است. سپس در بخش‌های بعدی، از مدل مذکور جهت بررسی اثر اندرکنش سینماتیکی فونداسیون‌های نواری مجاور استفاده شده است. در بحث صحت‌سنجی، مقادیر به‌دست آمده از پژوهش حاضر در کنار مقادیر مشابه ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۸، نشان داده شده است. [۶] در شکل ۸ الف، مقادیر نرمال‌شده‌ی پاسخ افقی فونداسیون به پاسخ میدان آزاد در مقابل بسامد بی‌بُعد نشان داده شده است. ضمناً در شکل ۸ ب، مقادیر پاسخ‌های چرخشی استخراج‌شده در نرم‌افزار که در بُعد مرجع ضرب و به پاسخ میدان آزاد زمین نرمال شده است، مشاهده می‌شود. با دقت در شکل ۸ (الف و ب) مشاهده می‌شود که مقادیر به‌دست آمده از تحلیل اجزاء محدود در نرم‌افزار آباکوس، در مقایسه با نتایج ارائه‌شده در مرجع مذکور، دقت مناسبی دارد. [۶] در ادامه، بررسی شده است که همجواری فونداسیون‌های سطحی و مدفون چگونه می‌توانند در حرکت ورودی فونداسیون سطحی تغییر ایجاد کنند.

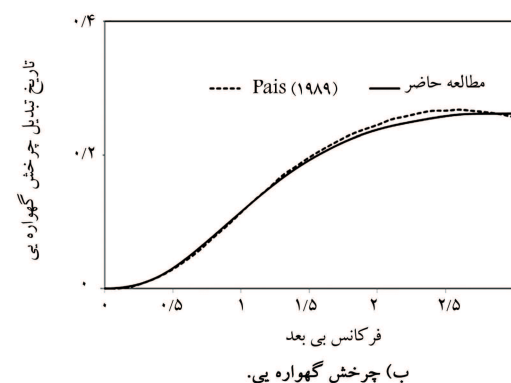
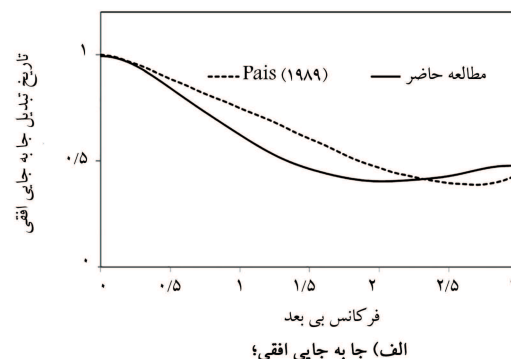
۵. ارائه و تفسیر نتایج

همان‌طور که قبلاً بیان شده است، فونداسیون مدفون تحت اثر میدان موج برشی SV با جهت انتشار قائم، می‌تواند تحریک‌های افقی و چرخشی را تجربه کند. همچنین در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون علاوه بر دو مؤلفه‌ی ذکرشده، مؤلفه‌ی قائم تحریک نیز نمایان می‌شود. باید توجه داشت که یک فونداسیون سطحی در حالت انفراد، فقط مؤلفه‌ی افقی تحریک را تحت میدان موج برشی مذکور تجربه می‌کند. این تحریک برابر با حرکت میدان آزاد زمین است. در شکل ۹، پاسخ افقی، قائم و چرخشی فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون در قالب ماتریسی ۱۲ تایی از نمودارها در حوزه‌ی زمان ارائه شده است. ستون‌های ماتریس ارائه‌شده در شکل ۹ به‌ترتیب از چپ به راست، تغییرات تاریخیجه‌ی زمانی شتاب افقی، قائم و چرخشی را نشان می‌دهند. همچنین تغییرات شتاب در ۳ مؤلفه‌ی معرفی‌شده نسبت به فاصله‌ی نسبی بین فونداسیون‌ها (D/b) در سطرها ماتریس ذکرشده ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات هندسی مدل خاک - فونداسیون.

بسامد بی بعد (a_0)	عرض نسبی سطحی (B/b)	عرض نسبی مدفون (B'/b)	فونداسیون	
			فاصله‌ی نسبی (D/b)	عمق نسبی اصلی (E'/b)
۵-۰	۲	۲ و ۴	۴ و ۲، ۱	۱

افزایش می‌یابد. به‌طوری که دوام تحریک واصله به فونداسیون سطحی در فاصله‌ی نسبی ۶، تقریباً ۲ برابر دوام تحریک ثبت شده برای فاصله‌ی نسبی واحد است. هر چند دامنه‌ی رکورد در مؤلفه‌ی افقی به سرعت کاهش می‌یابد. در ستون دوم از نمودارهای شکل ۹، تحریک‌های قائم نمایش داده شده است. در اولین نمودار از ستون دوم که مربوط به کمترین فاصله‌ی نسبی دو فونداسیون است، رکورد قائم در بیشترین حالت، بیشینه‌ی حدود ۱۰٪ بیشینه‌ی رکورد میدان آزاد و مدت دوامی حدود ۲ برابر آن دارد. با کاهش ابعاد فونداسیون مجاور، مقدار مذکور کاهش می‌یابد. چنانچه فاصله‌ی نسبی دو فونداسیون به عدد ۶ افزایش یابد، بیشینه‌ی دامنه‌ی شتاب به حدود ۳٪ بیشینه‌ی متناظر در رکورد میدان آزاد تقلیل می‌یابد، لیکن مدت دوام رکورد تا حدود ۳ برابر افزایش می‌یابد. تغییرات در تحریک‌های چرخشی ایجادشده به واسطه‌ی پدیده‌ی مجاورت، شرایط مشابهی را با تغییرات تحریک قائم نشان می‌دهد. با این تفاوت که نحوه‌ی تأثیر مقادیر چرخش بسته به ارتفاع سازه‌ی که بر آن بنا می‌شود، متفاوت است. لازم به ذکر است در فرایندهای طراحی لرزه‌ی متداول، همواره تحریک‌های افقی و قائم مد نظر قرار می‌گیرد و هیچ نوع تحریک چرخشی فونداسیون در محاسبات لحاظ نمی‌شود. از این رو اعمال تحریک چرخشی به فونداسیون سطحی در اثر پدیده‌ی مجاورت واقعیتی است که در رویکردهای طراحی متداول مغفول مانده است. لازم به ذکر است، بررسی جامع نحوه‌ی اثرگذاری پدیده‌ی مذکور در پاسخ کلی سازه، موضوع پژوهش حاضر نبوده و فقط به معرفی پدیده‌ی ذکرشده بسنده شده است.



شکل ۸. مقایسه‌ی نتایج استخراج شده از آباکوس و ارائه شده در پژوهش انجام شده در سال ۱۹۸۸ [۸]

۶. توابع تبدیل تحریک ورودی به فونداسیون سطحی

تحت اثر پدیده‌ی مجاورت

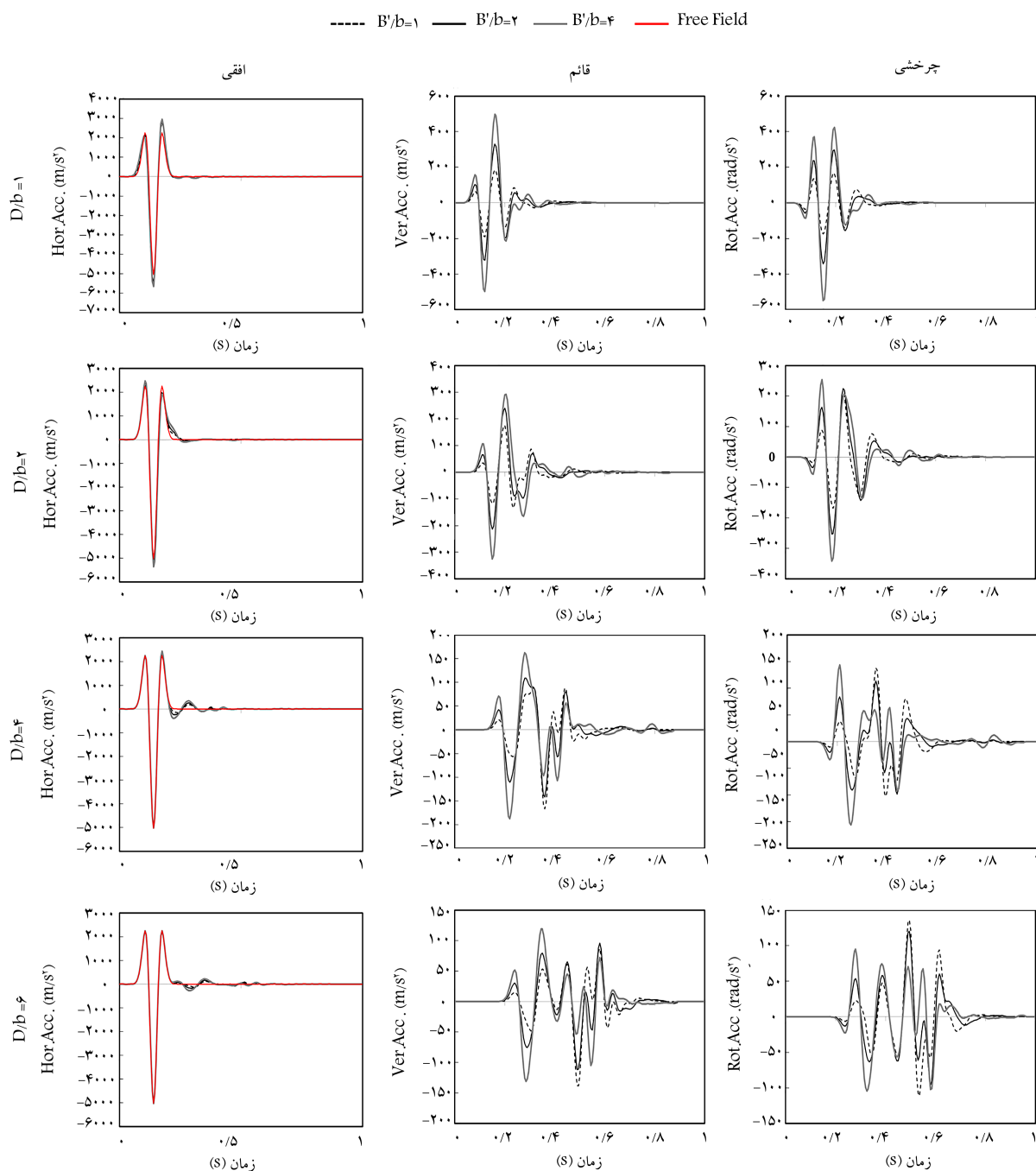
در بخش حاضر، به منظور نمایش تأثیر پدیده‌ی مجاورت در حوزه‌ی بسامد، توابع تبدیل تحریک ورودی به فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون ارائه شده است. مطابق شکل ۱۰، توابع تبدیل در حوزه‌ی بسامد و بر حسب پارامتر بی بعد a_0 مشاهده می‌شود.

به منظور بی بعدسازی مقادیر توابع تبدیل، مؤلفه‌های افقی و قائم حرکت فونداسیون سطحی به پاسخ میدان آزاد زمین نرمال شده است. همچنین توابع تبدیل چرخش گهواره‌ی فونداسیون از ضرب حرکت چرخشی فونداسیون در نصف عرض فونداسیون سطحی (b) و سپس نرمال کردن به پاسخ میدان آزاد زمین حاصل می‌شوند. بدین ترتیب حرکت گهواره‌ی نیز با دیمانسیون مشابه با حرکت‌های افقی و قائم بررسی می‌شود.

مشابه با شکل ۹، در شکل ۱۰ نیز نمودارها در قالب یک ماتریس ۱۲ تایی نمایش داده شده‌اند. تفاوت مهم نمودارهای شکل ۱۰ نسبت به نمودارهای شکل ۹ آن است که در نمودارهای شکل جدید می‌توان نحوه‌ی اثرگذاری پدیده‌ی مجاورت در هر بسامد از تحریک ورودی را جداگانه بررسی کرد. در حالی که در شکل ۹، اثر ترکیبی همه‌ی مؤلفه‌های بسامدی با هم مشاهده می‌شدند. تفکیک آثار مذکور

از آنجا که در حرکت میدان آزاد زمین، مقادیر مؤلفه‌های قائم و چرخشی برابر صفر است، در شکل ۹، نمودارهای حرکت قائم و چرخشی میدان آزاد زمین فقط در بخش مؤلفه‌ی افقی ارائه شده است. همان‌گونه که پیش از این نیز بیان شده است، نتایج براساس فواصل نسبی بین فونداسیون‌ها ارائه شده است. در هر نمودار با توجه به ابعاد نسبی فونداسیون مدفون مجاور، پاسخ فونداسیون سطحی با فواصل مجاورت نسبی (D/b) برابر با ۱، ۲، ۴ و ۶ با فونداسیون‌های مجاور با عرض نسبی (B'/b) برابر با ۱، ۲ و ۴ قرار گرفته است، ارائه شده است. عمق نسبی (E'/b) فونداسیون مجاور در تمامی نمودارها ثابت و برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

در نمودارهای شکل ۹، محور افقی، زمان تحلیل بر حسب ثانیه و محور قائم، نمودارهای افقی و قائم دامنه‌ی پاسخ بر حسب متر بر مجذور ثانیه است. همچنین محور قائم، نمودارهای چرخش بر حسب رادیان بر مجذور ثانیه است. با دقت در ستون اول نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه‌ی شتاب افقی فونداسیون سطحی با افزایش فاصله‌ی نسبی بین فونداسیون‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که در فاصله‌ی نسبی (D/b) برابر ۱، مقدار بیشینه‌ی شتاب مذکور حدوداً ۱۰٪ بیشتر از بیشینه‌ی شتاب میدان آزاد زمین است؛ اما با افزایش فاصله، مقدار ذکرشده‌ی شتاب کاهش یافته است، تا اینکه در فاصله‌ی نسبی ۶، با بیشینه‌ی شتاب میدان آزاد زمین برابر می‌شود. اما دوام تحریک‌ها با افزایش فاصله بین فونداسیون‌ها

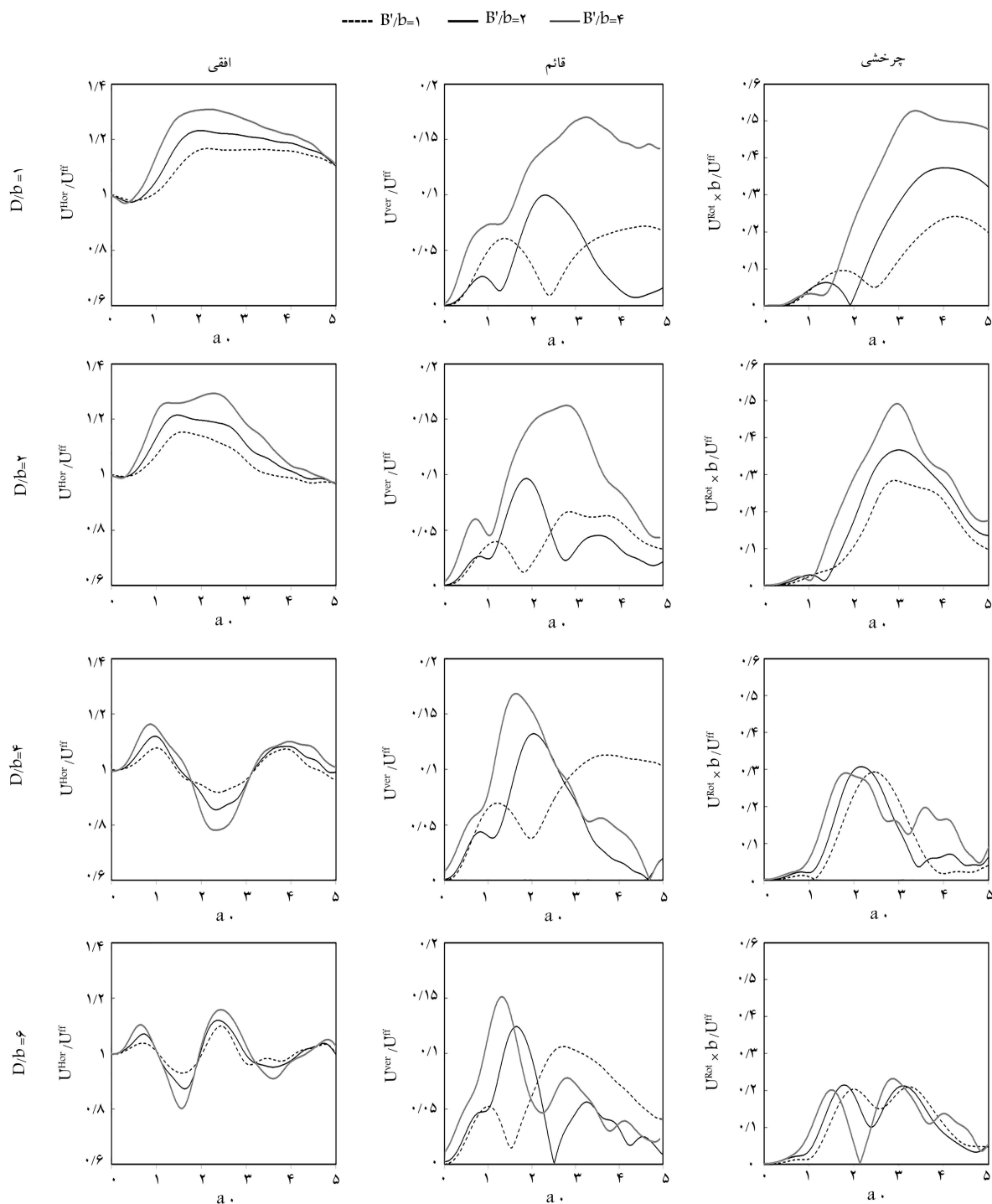


شکل ۹. مؤلفه‌های افقی، قائم و چرخشی شتاب ثبت شده در فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون با عمق نسبی B'/b برابر با ۱.

در صورت وجود فونداسیون مجاور تغییراتی چشم‌گیر داشته است. به عبارتی، تحریک افقی واصله به فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون دچار تغییر شده است که این تغییر تحریک در فواصل کم عمدتاً افزایش یافته و بیشینه‌ی آن به حدود ۳۰٪ افزایش می‌رسد. لیکن با افزایش فاصله، تحریک تغییرات افزایشی و کاهش را تجربه می‌کند، که مقدار آن به حدود ۲۰٪ می‌رسد. لازم به ذکر است در شکل ۹، به دلیل ترکیب آثار همه‌ی بسامدها، بیشینه‌ی اثر مجاورت به صورت افزایش ۱۰ درصدی دامنه‌ی حرکت نسبت به جابه‌جایی میدان آزاد مشاهده می‌شد. در حالی که با تفکیک آثار در حوزه‌ی بسامد مشاهده می‌شود که دامنه‌ی بسامدهای مختلف بین ۸ تا ۳۱٪ دامنه‌ی حرکت میدان آزاد متغیر است. به عبارت دیگر، تغییرات دامنه‌ی

امکان آن را فراهم می‌سازد تا حوزه‌ی اثرگذاری پدیده‌ی مجاورت ذکر شده به نحو جامع‌تری بررسی شود. ستون‌های هر یک از نمودارهای شکل ۱۰ به ترتیب از چپ به راست، تغییرات توابع تبدیل نرمال‌شده‌ی افقی، قائم و چرخشی را نشان می‌دهند. همچنین اثر تغییرات فاصله‌ی نسبی دو فونداسیون با مقایسه‌ی سطوح مختلف ماتریس مذکور قابل پی‌گیری است. در هر نمودار پاسخ‌ها برای عرض‌های نسبی ۱، ۲ و ۴ برای فونداسیون مدفون ترسیم شده است. همچنین عمق نسبی فونداسیون مدفون مجاور در همه‌ی نمودارها، ۱ لحاظ شده است.

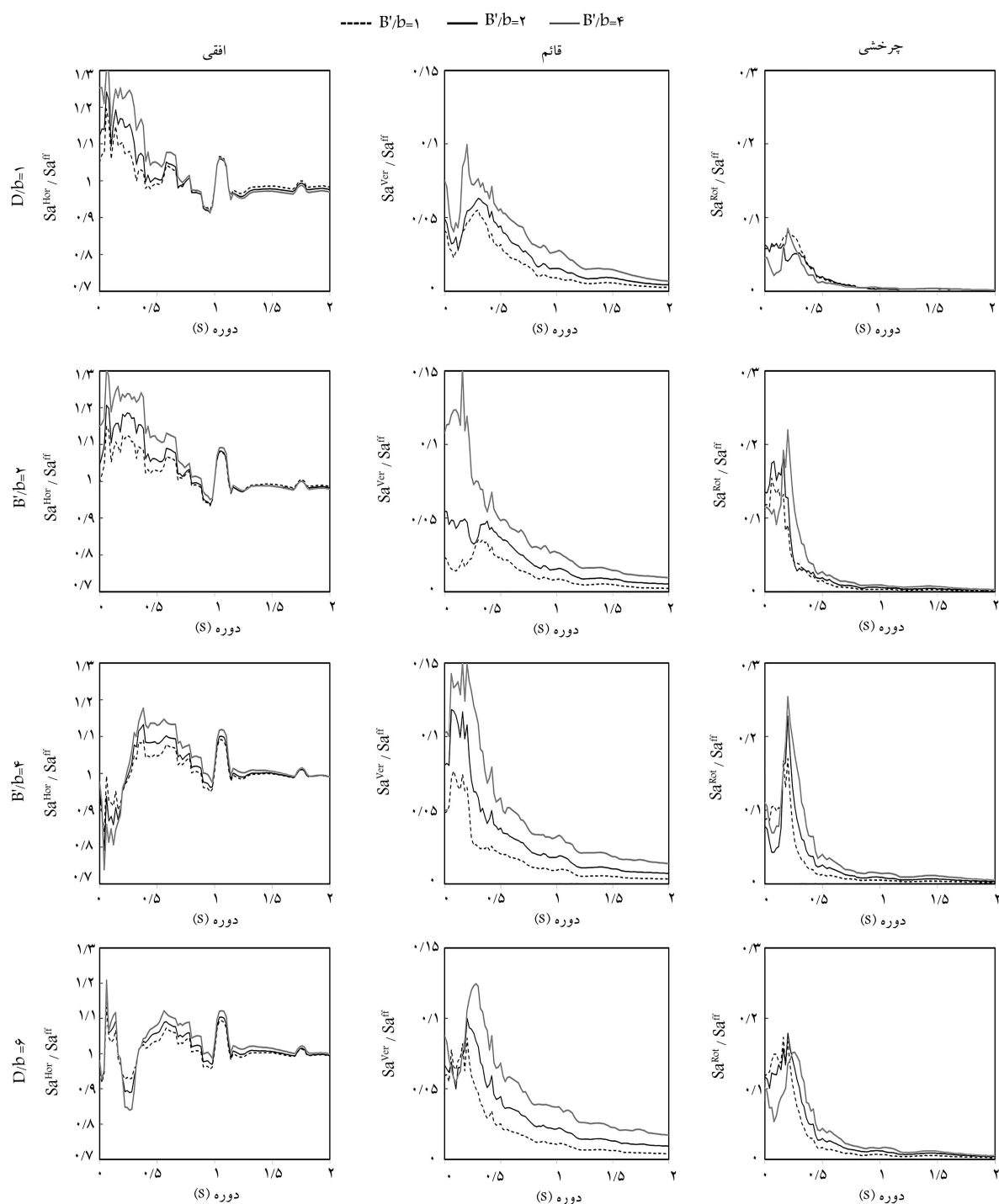
تحریک واصله به فونداسیون سطحی که در شرایط انفراد باید مؤلفه‌ی افقی برابر با پاسخ میدان آزاد زمین داشته باشد و مؤلفه‌ی قائم و چرخشی آن برابر با صفر باشد،



شکل ۱۰. توابع تبدیل جابه‌جایی فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون با عمق نسبی E'/b برابر با ۱.

برخورد به فونداسیون سطحی، جابه‌جایی قائم با بیشینه‌یی در حدود ۱۵٪ بیشینه‌ی حرکت میدان آزاد در فواصل مختلف بین دو فونداسیون ایجاد کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در بازه‌ی مورد بررسی، هر چه فاصله‌ی فونداسیون‌ها بیشتر باشد، بیشینه‌ی مؤلفه‌ی قائم در بسامد کمتری رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود هر چه بسامد تحریک به سمت عدد صفر که معادل حالت استاتیکی است حرکت می‌کند، مقادیر مؤلفه‌ی قائم نیز به مقدار صفر متمایل می‌شوند. شتاب چرخشی فونداسیون سطحی که در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون به وجود آمده، نکته‌ی حائز اهمیتی

حرکتی در بازه‌ی ۲۰٪ کاهش تا ۳۰٪ افزایش برای بسامدهای مختلف در نوسان است. در حالتی که فاصله‌ی فونداسیون‌ها افزایش یابد، با انتقال قله‌های توابع تبدیل به سمت بسامدهای بی‌بعد کوچک‌تر، اندازه‌ی قله‌های مذکور نیز کاهش می‌یابد. از طرفی در اثر همجواری علاوه بر پاسخ افقی، پاسخ فونداسیون در ۲ مؤلفه‌ی قائم و چرخشی نیز مشاهده می‌شود. با افزایش فاصله‌ی بین فونداسیون‌ها، بسامدهای متناظر قله‌های توابع تبدیل و مقادیر آن‌ها در مؤلفه‌های قائم و چرخشی کاهش می‌یابد. با دقت در نمودارها می‌توان دریافت که امواج ساطع‌شده از فونداسیون مدفون پس از



شکل ۱۱. مؤلفه‌های افقی، قائم و چرخشی طیف پاسخ شتاب فونداسیون سطحی در اثر مجاورت با فونداسیون مدفون با عمق نسبی E'/b برابر با ۱.

۷. طیف پاسخ نرمال شده

با اعمال توابع تبدیل معرفی شده در بخش ۶ بر رکورد زلزله می‌توان اثر پدیده‌ی مجاورت فونداسیون‌ها را در تاریخچه‌ی زمانی و به تبع آن در طیف پاسخ شتاب زلزله بررسی کرد. به این منظور در پژوهش حاضر، تاریخچه‌ی زمانی شتاب زلزله‌ی ال‌سنتر که در بخش ۲ معرفی شد، استفاده شده است. برای این کار، ابتدا رکورد شتاب به حوزه‌ی بسامد منتقل می‌شود. از سوی دیگر، محور افقی توابع تبدیل حرکت

بوده که در نمودارهای شکل ۱۰ قابل مشاهده است. شتاب چرخشی مذکور در نزدیک‌ترین حالت دو فونداسیون بیشترین مقدار را دارد و با افزایش فاصله‌ی بیشینه، مقدار آن به حدود نصف تقلیل می‌یابد. همچنین با افزایش فاصله‌ی دو فونداسیون، بیشینه‌ی حرکت چرخشی در بسامد کمتری رخ می‌دهد. علاوه بر آن، همانند مؤلفه‌ی قائم مشاهده می‌شود که در بسامدهای نزدیک به صفر، مقادیر مؤلفه‌ی چرخشی نیز محو می‌شود. همچنین آثار مؤلفه‌ی تحریک، چنانچه سازه‌ی بلند بر روی فونداسیون سطحی احداث شده باشد، می‌تواند چشم‌گیر باشد.

ورودی بخش ۶ که در حوزه ی بسامد بر حسب بسامد بی بُعد a_0 نوشته شده است، بر حسب بسامد تحریک بازنویسی می شوند. در ادامه، تبدیل فوریه ی شتاب و توابع تبدیل اخیر در حوزه ی بسامد در هم ضرب می شوند و پس از انتقال به حوزه ی زمان، رکوردهای جدید را به دست می آورند. رکوردهای اخیر همان تحریک های ورودی به فونداسیون سطحی در اثر پدیده ی مجاورت خواهد بود. لازم به ذکر است توابع تبدیل مورد استفاده در بخش حاضر، همان توابع ارائه شده در شکل ۱۰ هستند. در ادامه، طیف پاسخ شتاب رکوردهای به دست آمده محاسبه شده است. با نرمال کردن طیف به دست آمده به طیف رکورد زلزله ی اولیه، اثر پدیده ی مجاورت در پاسخ طیفی فونداسیون مشاهده می شود. مشابه با شکل های ۹ و ۱۰، نتایج بخش حاضر نیز در قالب یک ماتریس ۱۲ تایی از نمودارها در شکل ۱۱ ارائه شده است. ستون های اول، دوم، و سوم از چپ به راست به ترتیب مؤلفه های افقی، قائم و چرخشی را نشان می دهند. همچنین هر سطر از نمودارها مربوط به یک فاصله ی نسبی بین فونداسیون هاست و اثر تغییرات بُعد نسبی فونداسیون مجاور مدفون بر فونداسیون سطحی در هر نمودار ارائه شده است. لازم به ذکر است نتایج بخش کنونی به طور نمونه برای Vs/b برابر با ۲۰ ترسیم شده است. در شکل ۱۱، طیف پاسخ شتاب برای مؤلفه های مختلف تحریک واصله به فونداسیون سطحی که به طیف پاسخ شتاب میدان آزاد زمین نرمال شده، ارائه شده است. محور افقی نمودارهای شکل ۱۱، دوره ی تناوب سازه برحسب ثانیه است. ضمناً محور قائم برای نمودارها از چپ به راست، طیف پاسخ شتاب رکوردهای به دست آمده از مؤلفه های افقی، قائم و چرخشی توابع تبدیل است.

همان طور که در نمودارهای شکل ۱۱ مشاهده می شود، طیف های پاسخ شتاب افقی فونداسیون سطحی عمدهً در مواردی که فونداسیون مدفون اندازه ی بزرگتری دارد، بیشترین مقدار را دارند. در طیف های مذکور و در دوره ی تناوب کمتر از ۰/۵ ثانیه، پاسخ فونداسیون سطحی در مجاورت با فونداسیون مدفون نسبت به طیف پاسخ میدان آزاد زمین، در بیشترین حالت حدوداً ۳۰٪ تغییر می کند. این تغییر بسته به فاصله ی بین فونداسیون ها می تواند کاهش یا افزایش یافته باشد. به طوری که برای دوره های تناوب صفر تا ۲/۰ ثانیه در فواصل نسبی ۱، ۲ و ۶، طیف پاسخ فونداسیون بیشتر از طیف میدان آزاد و در فاصله ی نسبی ۴، کمتر از آن است. همچنین برای برخی از نواحی دوره های تناوب ۲/۰ تا ۵/۰ ثانیه و برای فاصله ی نسبی ۶، مشاهده می شود که فونداسیون مجاور که ابعاد نسبی بزرگتری دارد، منجر به ایجاد دامنه ی کمتری در تحریک ورودی شده است. پدیده ی مذکور از آن جهت حائز اهمیت است که در نگاه اول تصور می شود هر چه فونداسیون مجاور بزرگتر باشد، حرکت تحمیلی به فونداسیون سطحی باید شدیدتر باشد. در حالی که نتایج نشان می دهد که استدلال ذکر شده همیشه صحیح نیست و در برخی نواحی طیف فونداسیون مجاور بزرگتر لزوماً منجر به تحریک ورودی بیشتر در فونداسیون هدف نمی شود. این نکته با رجوع به نتایج شکل ۱۰ نیز قابل تفسیر است. مثلاً در شکل مذکور برای نسبت فاصله ی ۶ و در تابع تبدیل حرکت افقی ورودی به فونداسیون سطحی مشاهده می شود که نمودار مربوط به فونداسیون مجاور با نسبت ابعادی $B'/b = 4$ در برخی نواحی بسامدی زیر نمودار مربوط به فونداسیون مجاور با نسبت ابعادی $B'/b = 1$ قرار گرفته است؛ زیرا در ناحیه ی مذکور، فونداسیون مجاور بزرگتر منجر به تحریک ورودی کمتری نسبت به فونداسیون مجاور کوچکتر شده است.

از دیگر نکات قابل ذکر در مورد مؤلفه ی افقی حرکت فونداسیون سطحی در اثر همجواری آن است که در بازه ی دوره ی تناوب ۰/۵ تا ۱/۲ ثانیه، عموماً افزایش مقدار طیف پاسخ نسبت به طیف پاسخ میدان آزاد زمین مشاهده می شود، که البته افزایش

مذکور برای فاصله ی نسبی ۴ و ۶ بیشتر به چشم می آید. در بازه ی مذکور، بیشترین تأثیر در حالتی مشاهده می شود که فونداسیون سطحی در مجاورت فونداسیون با بُعد نسبی بزرگتر باشد. در دوره های تناوب بالاتر از ۱/۲ ثانیه، طیف های شتاب افقی تقریباً مستقل از ابعاد فونداسیون مدفون و فاصله ی آن از فونداسیون سطحی است و فقط در بعضی از دوره های تناوب در اثر حضور فونداسیون مجاور، تغییراتی در طیف پاسخ مشاهده می شود.

در مؤلفه ی قائم طیف های نرمال شده، روند تغییرات طیف پاسخ با مؤلفه ی افقی متفاوت است. به گونه یی که با افزایش فاصله ی نسبی از $D/b = 1$ به $D/b = 2/4$ ، ابتدا افزایش مؤلفه ی قائم مشاهده می شود. لیکن با افزایش مجدد فاصله ی نسبی از $D/b = 4$ به $D/b = 6$ ، مقدار بیشینه ی طیف دوباره کاهش می یابد. این روند بیشتر در حالت وجود فونداسیون مجاور با نسبت ابعادی $B'/b = 4$ مشاهده می شود. بیشینه ی مقدار طیف های قائم نرمال شده در فاصله ی نسبی ۴ اتفاق می افتد، که حدود ۰/۱۵ طیف شتاب میدان آزاد است. لازم به ذکر است، با افزایش فاصله، تفاوت بین طیف های مربوط به ابعاد مختلف نسبی فونداسیون مجاور به صورت قابل مشاهده یی حفظ شده است که مورد اشاره شده در ۲ مؤلفه ی دیگر مشاهده نمی شود.

در آخرین بخش از نمودارهای شکل ۱۱، طیف های پاسخ حاصل از مؤلفه ی چرخشی حرکت فونداسیون ترسیم شده است. اغلب این طیف ها حساسیت کمتری به ابعاد فونداسیون مدفون و فاصله ی نسبی بین دو فونداسیون دارند. استقلال ایجاد شده در تمامی نمودارهای مؤلفه ی چرخشی به وضوح مشهود است. اما برخلاف انتظار اولیه، برای دوره های تناوب کمتر از ۰/۲ ثانیه، وجود فونداسیون مجاور با ابعاد بزرگتر اغلب باعث کاهش بیشتر پاسخ دورانی شده است. این پدیده را نیز می توان با توجه به تغییرات توابع تبدیل نمایش داده شده در شکل ۱۰ تفسیر کرد. با توجه به این واقعیت که در شکل ۱۱ برای برخی بسامدهای تحریک، اثر مجاورت با فونداسیون بزرگتر در برخی بسامدهای تحریک، منجر به ایجاد دامنه های کمتری از حرکت چرخشی ورودی به فونداسیون سطحی می شود. از این رو انتظار می رود که روند ذکر شده در طیف های پاسخ نیز مشابه آنچه پیشتر بیان شد، تکرار شود.

۸. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، اثر مجاورت یک فونداسیون نواری مدفون در تحریک ورودی به فونداسیون مجاور سطحی بررسی شده است. در این راستا، از مدل دو بُعدی اجزاء محدود از یک محیط خاک همگن ایزوتروپ نیمه بی نهایت استفاده شده است.

مشخصات هندسی و نحوه ی قرارگیری فونداسیون های مورد بررسی در قالب پارامترهای بی بُعد فاصله ی نسبی، عرض نسبی و عمق دفن نسبی که همگی نسبت به بُعد فونداسیون سطحی سنجیده شده اند، بیان شده است. نتایج پژوهش حاضر، در ۳ بخش ارائه شده است. بخش نخست، پاسخ جابه جایی فونداسیون سطحی برای پارامترهای بی بُعد مختلف تحت رکورد نمادین پالس با شکل تابع توزیع نرمال محاسبه و چگونگی اثرگذاری پدیده ی مجاورت بحث شده است. از نتایج اصلی بخش نخست می توان به تأثیر پدیده ی مجاورت در ایجاد دو تحریک جدید قائم و چرخشی در فونداسیون سطحی اشاره کرد. پدیده ی مذکور دامنه ی حرکت افقی را نیز در برخی موارد افزایش می دهد. همچنین مدت دوام تحریک های جدید ایجاد شده تا حدود ۲ برابر مدت دوام پاسخ حالت انفرادی قابل افزایش است.

پاسخ‌های مؤلفه‌های قائم و چرخشی به ترتیب بیشینه‌هایی برابر ۳° و ۲۵ درصد طیف پاسخ میدان آزاد نشان می‌دهند. لازم به ذکر است نتایج پژوهش حاضر علی‌رغم پارامتری بودن، فقط به عنوان طرح اهمیت مسئله‌ی اثر مجاورت در تحریک ورودی ارائه شده و جهت دست‌یابی به نتایج کاربردی، مطالعات بیشتری مورد نیاز است.

تقدیر و تشکر

مطالعه‌ی حاضر، در راستای طرح پژوهشی به شماره‌ی ۶۲۴ مصوب پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله و تحت حمایت پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام شده است. از این روال حمایت‌های پژوهشگاه مذکور، تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

پانویس‌ها

1. kinematic interaction
2. inertial interaction
3. structural nodes
4. boundary nodes

منابع (References)

1. Yamahara, H. "Ground motions during earthquakes and the input loss of earthquake power to an excitation of buildings", *Soils and Foundations*, **10**(2), pp. 145-161 (1970).
2. Scanlan, R.H. "Seismic wave effects on soil-structure interaction", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **4**(4), pp. 379-388 (1976).
3. Ray, D. and Jhaveri, D.P. "Effective seismic input through rigid foundation filtering", *Nuclear Engineering and Design*, **45**(1), pp. 185-195 (1978).
4. Hoshiya, M. and Ishii, K. "Evaluation of kinematic interaction of soil-foundation systems by a stochastic model", *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **2**(3), pp. 128-134 (1983).
5. Lee, T.H. and Wesley, D.A. "Soil-structure interaction of nuclear reactor structures considering through-soil coupling between adjacent structures", *Nuclear Engineering and Design*, **24**(3), pp. 374-387 (1973).
6. Pais, A.L. "Dynamic coupling of multiple structures through soil", PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1988).
7. Karabalis, D.L. and Mohammadi, M. "Foundation-soil-foundation dynamics using a 3-D frequency domain BEM", In *Boundary Elements XIII*, pp. 447-456, Springer, Netherlands (1991).

در بخش دوم، آثار مجاورت در قالب توابع تبدیل حوزه‌ی بسامد و برای پارامترهای مشابه بخش نخست بررسی شده است. از مهم‌ترین نتایج بخش دوم می‌توان به افزایش دامنه‌ی پاسخ در فواصل نسبی کم و در محدوده‌ی وسیعی از بسامدهای تحریک اشاره کرد. همچنین در پاسخ‌های قائم و چرخشی می‌توان به این نکته اشاره کرد که هر چند با افزایش فاصله‌ی نسبی فونداسیون‌ها، دامنه‌ی پاسخ کاهش می‌یابد؛ اما بیشینه‌ی دامنه‌ی پاسخ در بسامدهای پایین‌تر رخ داده، که در طیف‌های پاسخ می‌تواند تأثیر بیشتری داشته باشد. در بخش سوم، آثار مجاورت در قالب طیف پاسخ برای رکورد نمونه‌ی ال‌سنترو و پارامتر نمونه‌ی Vs/b برابر با ۲۰ ترسیم شده است. در بخش مذکور مشاهده شده که قله‌ی پاسخ مؤلفه‌ی افقی در فواصل نسبی کم، بیشتر متمایل به دوره‌های تناوب کمتر از ۰/۵ ثانیه است. اگر چه در فواصل نسبی بزرگ‌تر، قله‌ی مذکور به حدود ۰/۵ ثانیه انتقال می‌یابد و همچنین تا مرز ۲۰٪ افزایش پاسخ در برخی حالات مشاهده می‌شود. همچنین

8. Karabalis, D.L. and Mohammadi, M. "3-D dynamic foundation-soil-foundation interaction on layered soil", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **17**(3), pp. 139-152 (1998).
9. Wang, S. and Schmid, G. "Dynamic structure-soil-structure interaction by FEM and BEM", *Computational Mechanics*, **9**(5), pp. 347-357 (1992).
10. Lehmann, L. and Antes, H. "Dynamic structure-soil-structure interaction applying the symmetric galerkin boundary element method (SGBEM)", *Mechanics Research Communications*, **28**(3), pp. 297-304 (2001).
11. Mohammadi, M. and Karabalis, D.L. "Dynamic 3-D soil-railway track interaction by BEM-FEM", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **24**(9), pp. 1177-1193 (1995).
12. Mulliken, J.S. and Karabalis, D.L. "Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3-D foundations and structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**(7), pp. 687-710 (1998).
13. Kitada, Y., Hirotani, T. and Iguchi, M. "Models test on dynamic structure-structure interaction of nuclear power plant buildings", *Nuclear Engineering and Design*, **192**(2), pp. 205-216 (1999).
14. Tatsuo, Y., Kitada, Y., Iguchi, M. and et al. "Model test on dynamic cross interaction of adjacent buildings in nuclear power plants", In *12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand (2000).
15. Kitada, Y. and Iguchi, M. "Model test on dynamic cross interaction of adjacent buildings in nuclear power plants-an outline and outcomes of the project", In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada (2004).
16. Menglin, L., Huaifeng, W., Xi, Ch. and et al. "Structure-soil-structure interaction: Literature review", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(12), pp. 1724-1731 (2011).

17. Clouteau, Di., Broc, D., Devesa, G. and et al. "Calculation methods of structure-soil-structure interaction (3SI) for embedded buildings: Application to NUPEC tests", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **32**(1), pp. 129-142 (2012).
18. Mason, H.B., Trombetta, N.W., Chen, Z. and et al. "Seismic soil-foundation-structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **48**, pp. 162-174 (2013).
19. Wang, H.-F., Lou, M.-L., Chen, X. and et al. "Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **54**, pp. 31-38 (2013).
20. Isbilibroglu, Y.D., Taborda, R. and Bielak, J. "Multiple structure-soil-structure interaction and coupling effects in building clusters", Southern California Earthquake Center (SCEC) Contribution (2014).
21. Ellison, K.C., Masroor, A.M., Almufti, I. and et al. "Structure-soil-structure interaction analysis in a highly seismic, dense urban regeneration zone", *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand (1-4 Nov., 2015).
22. Wen, X., Zhou, F. and Zhu, H. "Influence of an adjacent structure on the horizontal and torsional input motion of an embedded foundation", *Advances in Structural Engineering*, **20**(3), pp. (2016).
23. Wolf, J.P., *Dynamic Soil Structure Interaction*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall (1985).
24. ABAQUS, Abaqus Version 6.11, Dassault Systemes SIMULIA Corporation, Providence, RI (2011).
25. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, pp. 859-877 (1969).
26. Jingbo, L., Yixin, D., Xiuli, D. and et al. "3D viscous-spring artificial boundary in time domain", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **5**(1), pp. 93-102 (2006).
27. Ulrich, C.M. and Kuhlemeyer, R.L. "Coupled rocking and lateral vibrations of embedded footings", *Canadian Geotechnical Journal*, **10**(2), pp. 145-160 (1973).
28. Esmaeilpour, A. "Study on the effect of rigid strip foundations adjacency on kinematic soil-foundation interaction", M.Sc. Thesis (In Persian) (2015).