

مطالعه‌ی عددی پارامترهای مؤثر در توزیع تغییرشکل غیرخطی سامانه‌ی سازه - خاک - سازه با تمرکز بر شناخت تغییرات پاسخ سازه

رضا اسماعیل‌زاده شهری (کارشناس ارشد)

عباس کرم‌الدین* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۸ (دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۰۷-۱۱۸)

در نوشتار حاضر، آثار مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ غیرخطی سامانه‌ی سازه - خاک - سازه شامل دوره‌ی تناوب سازه‌های اصلی (T_1) و مجاور (T_2)، فاصله‌ی سازه‌ها (d) و نوع خاک به‌صورت جامع بررسی شده است. هدف از نوشتار حاضر، شناخت اصولی آثار تغییر هر پارامتر در تغییرشکل غیرخطی سازه، بررسی الزام‌های آیین‌نامه‌یی و پیش‌بینی رفتار سازه بدون مدل‌سازی سازه‌ی مجاور است. برای این منظور ۶ سازه‌ی ۲ تا ۱۵ طبقه واقع بر دو نمونه خاک رس به‌صورت دوتایی در ۳ فاصله‌ی صفر، ۱۰ و ۲۵ متری مدل و با استفاده از روش تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحلیل شده‌اند. براساس نتایج، تکیه‌گاه نرم باعث افزایش شدید نسبت دررفت طبقه‌ی اول به حالت تکیه‌گاه ثابت می‌شود که کمینه‌ی نسبت مذکور ۱/۱ و بیشینه‌ی آن ۳/۶۱ است. از سویی دیگر، افزایش T_1 و T_2 منجر به افزایش تغییرشکل سازه می‌شود، به‌طوری که آثار T_1 دست‌کم ۲ برابر T_2 است. برای سازه‌های اصلی با T_1 در محدوده‌ی ۰/۷ تا ۱/۵ برابر دوره‌ی تناوب خاک، دررفت سازه دچار تشدید می‌شود. براساس یافته‌های پژوهش حاضر، فقط برای سازه‌های با دوره‌ی تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، افزایش فاصله‌ی سازه‌ها منجر به کاهش آثار سازه‌ی مجاور می‌شود. در نهایت با شناخت پارامترهای کلیدی اندرکنش سازه - خاک - سازه، روابطی جهت اصلاح الزام‌های آیین‌نامه برای تکیه‌گاه نرم ارائه شده است.

واژگان کلیدی: اندرکنش سازه - خاک - سازه، اندرکنش خاک - سازه، دررفت، جابه‌جایی جانبی، روش مستقیم.

r.eshahri@mail.um.ac.ir
a-karam@um.ac.ir

۱. مقدمه

در اغلب کارهای پژوهشی که نیاز به مدل‌سازی ساختمان دارد، از مدل‌سازی خاک زیر سازه صرف‌نظر می‌شود که این مسئله باعث بروز خطا در پاسخ سازه می‌شود. علاوه بر این، به دلیل احداث سازه‌ها در مجاور هم، هنگام وقوع زلزله، امکان انتقال امواج یک سازه به سازه‌ی دیگر از طریق خاک وجود دارد که باز هم به ایجاد خطا در پاسخ‌ها می‌انجامد. سامانه‌ی سازه - خاک - سازه علاوه بر منظور کردن سازه‌ی اصلی و خاک زیر آن (اندرکنش خاک - سازه)، سازه(های) مجاور و کل محیط خاک مؤثر در ارتباط سازه‌ها هنگام وقوع زلزله را در مدل‌سازی به حساب می‌آورد؛ لذا شناخت رفتار اساسی سازه‌ها و پیش‌بینی رفتار سازه‌ی اصلی قبل از احداث سازه‌ی مجاور هنگام وقوع زلزله، اهمیت بسیار بالایی دارد. از طرفی دیگر، به دلیل در نظر نگرفتن اندرکنش سازه - خاک - سازه (SSI)^۱ در استانداردهای لرزه‌یی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۱۱/۱۷، اصلاحیه ۱۳۹۷/۲/۱۵، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۲۳.

DOI:10.24200/J30.2018.50188.2291

به‌خصوص تغییرشکل سازه‌ها، اهمیت بررسی جامع پدیده‌ی اشاره شده در جهت ارائه‌ی راهکاری برای تأثیر دادن آثار اندرکنش مذکور در پاسخ سازه‌ها، دو چندان می‌شود.

از دهه‌ی ۷۰ میلادی، مطالعات بر روی اندرکنش سازه - خاک - سازه شروع شده است.^[۱] که فقط با در نظر گرفتن یک محیط کشسان به عنوان خاک و قرار دادن چند پی با شکل‌های مختلف به عنوان سازه روی خاک انجام شده است. در سال ۱۹۹۳، سلبی^[۲] نتایج مشاهده‌ها و تحلیل‌های خود در مورد پدیده‌ی اندرکنش سازه - خاک - سازه را ارائه کرد و در پژوهش‌های خود، نتایج پاسخ‌های دو سازه‌ی ۷ طبقه‌ی واقع در ایالت کالیفرنیا را که تحت اثر زلزله‌ی Whittier-Narrows در تاریخ ۱ اکتبر ۱۹۸۷ میلادی قرار گرفته بودند، نشان داد. دو سازه‌ی مذکور از قبل مجهز به وسایل ثبت ارتعاش بودند و دوره‌ی تناوب آن‌ها برابر با ۱/۵۴ و ۱/۳۲ ثانیه بود. علاوه بر تجهیز ساختمان‌ها به وسایل ثبت ارتعاش، ابزارهایی هم برای ضبط پاسخ میدان آزاد بر روی زمین در فاصله‌ی مشخص از سازه‌ها تعبیه شده بود.

براساس نتایج حاصل، مشخصات دینامیکی سازه‌ها در این حالت کاملاً متفاوت از مقادیر فرضی بود. همچنین کلیه‌ی مقادیر شتاب و جابه‌جایی طبقات بیشتر از مقادیر پاسخ میدان آزاد به‌دست آمده بود.

بررسی اندرکنش سازه - خاک - سازه نیازمند استفاده از مدل‌ها و روش‌های تحلیل مناسب است. مولیکن و کارابالیس (۱۹۹۸)،^[۴] یک مدل جداگانه متشکل از فنر و میراگر را ارائه کردند که قابلیت به‌کارگیری برای چند سازه‌ی مجاور را داشت. در پژوهش اخیر، رفتار سازه و خاک به صورت کشسان فرض و نقش سازه، پی و خاک نیز با استفاده از فنر و میراگر جایگزین شده بود. با مقایسه‌ی نتایج مدل مذکور و مدل‌های از قبل ایجاد شده در نرم‌افزار SASSI^۲،^[۵] مطابقت بسیار خوبی حاصل شد. نوع دیگری از مدل‌های استفاده شده برای بررسی اندرکنش سازه - خاک - سازه، استفاده از فنرهای دورانی برای خاک و فنرهای انتقالی برای سازه بود که الکساندر و همکارانش (۲۰۱۳)،^[۶] آن را ارائه کردند.

روش‌های تحلیل قابل استفاده برای واکاوی اندرکنش سازه - خاک - سازه برای در نظر گرفتن بیشینه‌ی فرضیات واقعی، روش اجزاء محدود و اجزاء مرزی است. لین و همکارانش (۱۹۸۷)،^[۷] با استفاده از روش اجزاء محدود، اقدام به بررسی پارامتریک آثار مؤلفه‌های فاصله‌ی سازه‌ها، جهت قرارگیری سازه‌ها، مدفون‌شدگی پی و اینرسی سازه‌ها بر روی پاسخ در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه کردند. آن‌ها در مدل‌سازی خود، سازه را حذف کرده بودند و فقط پی‌ها بر روی خاک مدل و همچنین رفتار سامانه به صورت خطی و کشسان فرض شده بود. کیان و بسکاس (۱۹۹۵ و ۱۹۹۶)،^[۹،۸] نیز با استفاده از یک جزء مرزی چهارگوش درجه دوم، روش اجزاء مرزی را در حوزی بسامد برای استفاده در خاک توسعه دادند. با توجه به اینکه سازه‌های نیروگاه‌های هسته‌یی با فاصله‌های بسیار کمی از هم ساخته می‌شوند، اندرکنش سازه - خاک - سازه برای آن‌ها حائز اهمیت است. همچنین یو و همکارانش (۲۰۱۳)،^[۱۰] با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی، دو سازه‌ی نیروگاه هسته‌یی (ساختمان راکتور و توربین) را بررسی کردند. روش‌های اجزاء محدود و مرزی، قابلیت استفاده‌ی ترکیبی را هم دارند. سانتانا و همکارانش (۲۰۱۶)،^[۱۱] برای بررسی چند سازه‌ی مجاور از ایده‌ی اخیر استفاده کردند و در مدل خود، پی را کاملاً صلب در نظر گرفتند و سازه و خاک را به ترتیب با استفاده از اجزاء محدود مبتنی بر تئوری تیر تیموشنکو و اجزاء مرزی سه‌بعدی مدل‌سازی کردند. از دیگر روش‌های عددی که برای بررسی اندرکنش سازه - خاک - سازه کاربرد دارد، روش خطی معادل است که در آن ثابت برشی کاهش و میرایی افزایش می‌یابد. یکی از نقایص روش خطی معادل، عدم کاربرد آن در محدوده‌ی خاک نزدیک پی به علت رفتار غیرخطی شدید خاک است. قنذیل و بهنام‌فر،^[۱۲،۱۳] در جهت رفع نقص ذکر شده، به بررسی روش خطی معادل پرداختند و با کاهش بیشتر ثابت برشی و افزایش بیشتر میرایی، روش مذکور را برای تمامی سامانه کارآمد کردند.

در آیین‌نامه‌های لرزه‌یی فقط از آثار اندرکنش خاک - سازه (SSI)^۳ صحبت شده است؛ به طوری که با کاهش برش پایه در روش استاتیکی معادل و کاهش طیف تقاضای لرزه‌یی در تحلیل استاتیکی غیرخطی، آثار اندرکنش SSI را در نتایج تحلیل وارد کرده‌اند،^[۱۴-۱۶] در حالی که براساس آزمایش‌های انجام شده، اندرکنش سازه - خاک - سازه باعث افزایش ۴۶ و ۶۷ درصدی برش پایه و لنگر واژگونی سازه می‌شود.^[۱۷، ۱۸] همچنین اندرکنش‌های خاک - سازه و نیز سازه - خاک - سازه به دلیل حرکت دورانی و انتقالی پی باعث افزایش تغییرشکل‌های سازه می‌شوند؛^[۱۵] البته باز هم آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه که به مراتب شدیدتر از اندرکنش خاک - سازه است، در آیین‌نامه‌های طراحی منظور نشده است. با این اوصاف نیاز به بررسی‌های بیشتر در مورد اندرکنش سازه‌های مجاور محسوس است.

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه‌ی عددی مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در اندرکنش‌های سازه - خاک - سازه و نیز خاک - سازه شامل دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی (T_1) و سازه‌ی مجاور (T_2)، دوره‌ی تناوب خاک، فاصله‌ی سازه‌ها (d) و نوع خاک، در جهت شناخت و پیش‌بینی رفتار سازه‌ها و تعیین محدوده‌های تأثیرگذاری پارامترهای اصلی در پاسخ‌های سازه است. برای این منظور، دو سازه‌ی مجاور و خاک زیرشان با مشخصات مختلف، به عنوان یک سامانه‌ی سازه - خاک - سازه در نظر گرفته شده است. این سامانه‌ها با استفاده از تحلیل‌های تاریخیچه‌ی زمانی در محیط نرم‌افزار OpenSees^۴،^[۱۹] بررسی شده‌اند. تفاوت سامانه‌ها در مقادیر مختلف پارامترهای مؤثر در اندرکنش سازه - خاک - سازه است. از این رو در پژوهش حاضر، ۶ سازه‌ی فولادی در محدوده‌ی دوره‌ی تناوب ۰/۶۶۱ تا ۲/۵۴۱ ثانیه به صورت دویعدی در ۳ فاصله‌ی مختلف صفر، ۱۰ و ۲۵ متری با استفاده از ۸ رکورد زلزله، تحلیل تاریخیچه‌ی زمانی غیرخطی شده‌اند. دو نوع خاک به عنوان محیط نرم زیرسامانه‌ها در نظر گرفته شده است (در مجموع ۱۲۶ سامانه و نزدیک به ۱۰۰۰ تحلیل). پس از انجام تحلیل‌های غیرخطی، هر یک از سازه‌ها با استفاده از روش استاتیکی معادل آیین‌نامه به صورت تکیه‌گاه ثابت تحلیل شده‌اند. نهایتاً مطالعه‌ی عددی پیرامون آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه در پاسخ سازه‌ها با مقایسه‌ی نتایج حاصل از سامانه‌های سازه - خاک - سازه، سازه - خاک - سازه، سازه‌های با تکیه‌گاه ثابت و روش آیین‌نامه انجام شده است.

۲. اندرکنش خاک - سازه

۲.۱. آثار در پاسخ سازه

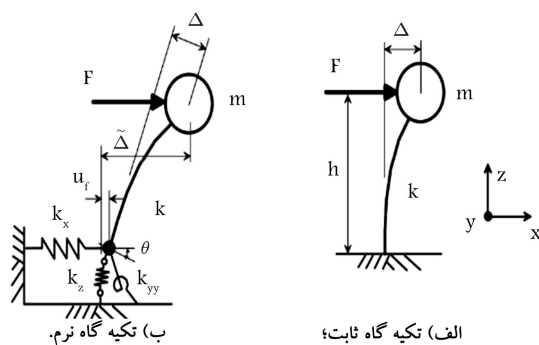
ساده‌ترین راه برای شناخت آثار تکیه‌گاه نرم، در نظر گرفتن فنرهایی در تکیه‌گاه یک سازه‌ی تک درجه آزادی، تحت اثر نیروی جانبی مطابق شکل ۱ است؛ در این حالت، جابه‌جایی سازه از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:^[۱۵]

$$\tilde{\Delta} = \Delta + u_f + \theta.h = \frac{F}{k} + \frac{F}{k_x} + \left(\frac{F.h}{k_{yy}} \right).h \quad (۱)$$

کلیه‌ی پارامترهای رابطه‌ی ۱ در شکل ۱ مشاهده می‌شود. براساس رابطه‌ی ۱، اندرکنش خاک - سازه (تکیه‌گاه نرم) به خاطر ایجاد تغییرشکل انتقالی (u_f) و دورانی (θ)، منجر به افزایش تغییرشکل سازه $\tilde{\Delta}$ می‌شود.

۲.۲. آیین‌نامه

یکی از مهم‌ترین معیارهای تحلیل و طراحی سازه‌ها، تغییرشکل آن‌هاست. در طراحی متعارف، ابتدا سازه تحلیل خطی می‌شود و برای تبدیل تغییرشکل‌های خطی به



شکل ۱. تغییرشکل سازه تحت اثر نیروی جانبی برای حالت ثابت و نرم.^[۱۵]

به دو پی مجاور است که یکی از آن‌ها تحت اثر بار دینامیکی قرار گرفته است. آن پی که بار خارجی ندارد، به دلیل مجاورت پی دیگر تحت اثر بار خارجی، دچار تغییرشکل شده است. این مسئله بیانگر اهمیت آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه است.

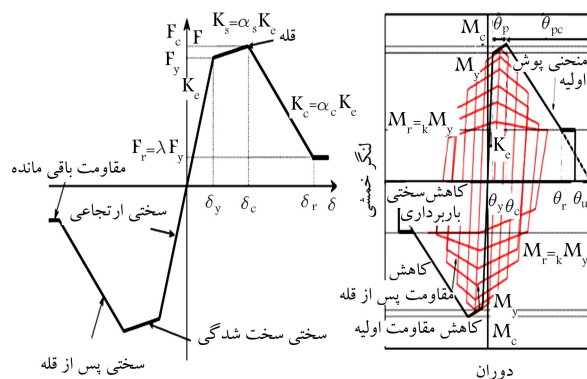
۴. مشخصات و مدل سازی سامانه

۱.۴. سازه‌ها

سازه‌های در نظر گرفته شده برای پژوهش حاضر، ۲، ۳، ۶، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه هستند. ارتفاع طبقات در هر سازه برابر با ۳ متر و طول هر دهانه برابر با ۵ متر در نظر گرفته شده است. برای طراحی سازه‌های مذکور از آیین‌نامه‌ی AISC ۳۶۰ [۲۲] استفاده شده است. سازه‌ها از نوع قاب خمشی ویژه با بار مرده‌ی ۷ و بار زنده‌ی ۲ کیلو نیوتن بر متر مربع و تنش تسلیم ۲۳۵ و تنش نهایی ۳۶۲ مگاپاسکال هستند. سقف سازه‌ها همگی به صورت دیافراگم صلب فرض شده است. مشخصات مقاطع سازه‌ها در جدول ۱ به صورت خلاصه ارائه شده است.

برای اعمال رفتار غیرخطی بر المان‌های سازه از مدل حالت خمیری متمرکز استفاده شده است. مدل حالت خمیری متمرکز به دلیل سرعت بالا و دقت بسیار نزدیک به حالت خمیری گسترده انتخاب شده است. با توجه به اینکه سیستم باربر جانبی از نوع قاب خمشی است، مفصل خمیری فقط در دو انتهای المان‌ها با استفاده از فنرهای غیرخطی و سایر قسمت‌های سازه به صورت کشسان در نظر گرفته شده‌اند. برای تعریف رفتار فنرها، مدل ایبارا - کروینکلر اصلاح شده [۲۳-۲۴] (شکل ۴) استفاده شده است. در شکل ۴، سختی کشسان (K_c) با استفاده از سختی دورانی عضو $K_{mem} (6EI/L)$ محاسبه می‌شود و سختی قسمت سخت‌شدگی (K_s) و پس از قله (K_c) به صورت کسری از سختی کشسان به دست می‌آید. ضریب سخت‌شدگی کرنشی (α_s) و پس از قله (α_c) فنر غیرخطی به ترتیب به ضریب سخت‌شدگی کرنشی ($\alpha_{s,mem}$) و ضریب پس از قله ($\alpha_{c,mem}$) منحنی رفتاری لنگر - دوران عضو بستگی دارد که مقدار آن‌ها برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است. [۲۳] سایر پارامترها که شامل ظرفیت شکل‌پذیری فنرها (δ_c/δ_y)، درصد مقاومت باقی‌مانده (κ_r)، بیشینه‌ی دوران (θ_u) و دوران‌های مشخص شده در شکل ۴ (θ_p و θ_{pc}) با استفاده از استاندارد ASCE 41 [۱۶] محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

برای محاسبه‌ی پارامترهای نشان داده شده در شکل ۴ روابط ۳ الی ۸ ارائه



شکل ۴. رفتار غیرخطی مفصل پلاستیک تعبیه شده در فنرهای دو انتهای المان‌ها. [۲۳، ۲۴]

غیرخطی، از ضریب بزرگ‌نمایی تغییرشکل (C_d) استفاده می‌شود؛ اما آثار تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر در ضریب بزرگ‌نمایی لحاظ نشده است. اندرکنش‌های خاک - سازه و نیز سازه - خاک - سازه باعث تغییر در مقادیر تغییرشکل سازه می‌شوند. در دستورالعمل‌های ASCE 7-10 [۱۴]، NIST GCR ۱۲-۹۱۷-۲۱ [۱۵] و استاندارد ۲۸۰۰ [۲۰] برای اصلاح پاسخ تغییرشکل سازه در ترازهای ارتفاعی، رابطه‌ی ۲ بیان شده است:

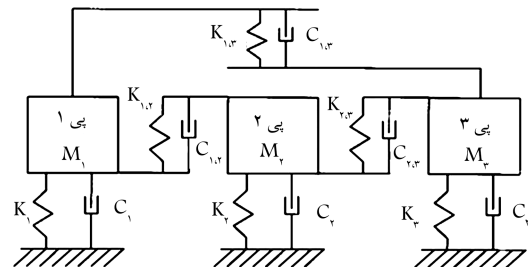
$$\tilde{\delta}_x = \frac{\tilde{V}}{V} \left[\frac{M_o h_x}{K_\theta} + \delta_x \right] \quad (2)$$

که در آن، \tilde{V} ، V ، M_o ، h_x و K_θ به ترتیب بیانگر برش پایه‌ی کاهش‌یافته در اثر اندرکنش خاک - سازه (براساس بند ۱۹-۲-۱ استاندارد ASCE 7-10 [۱۴]) و یا پیوست ۵ استاندارد ۲۸۰۰ [۲۰])، برش پایه‌ی حالت تکیه‌گاه ثابت، لنگر واگونی در پای سازه، ارتفاع تراز موردنظر، سختی حرکت گهواره‌ی پی و تغییرمکان جانبی سازه در حالت تکیه‌گاه ثابت است. با ضرب $\tilde{\delta}_x$ در C_d ، پاسخ غیرخطی سازه تحت اثر اندرکنش خاک - سازه به دست می‌آید. رابطه‌ی ۲، نقایصی از جمله عدم احتساب حرکت انتقالی و دورانی پی، عدم تأثیر مناسب اندرکنش حرکتی، تغییرشکل‌های غیرخطی خاک و اندرکنش سازه - خاک - سازه دارد؛ لازم به ذکر است که در استاندارد ASCE 7-10 [۲۱]، رابطه‌ی اخیر حذف شده است.

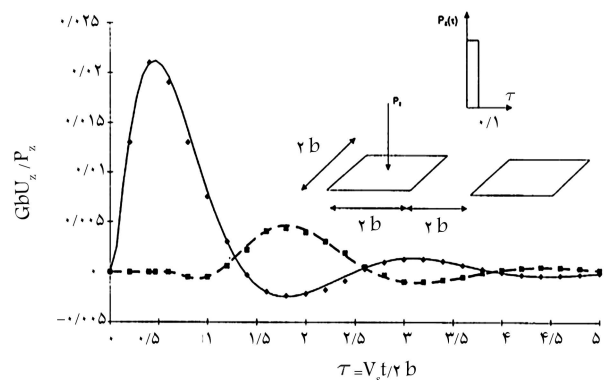
۳. اندرکنش سازه - خاک - سازه

برای بیان آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه در پاسخ سازه‌ها می‌توان از مدل مولیکن و کارابالیس [۴] استفاده کرد. آن‌ها مطابق شکل ۲، یک مدل جداگانه با استفاده از فنر و میراگرهای مختلف ارائه کرده‌اند.

همواره حضور یک سازه‌ی مجاور باعث تشدید پاسخ سازه‌ی اصلی می‌شود. برای بیان آثار مذکور شکل ۳، ارائه شده است. پاسخ‌های بیان شده در شکل ۳ مربوط



شکل ۲. مدل جداگانه‌ی مولیکن و کارابالیس. [۴]



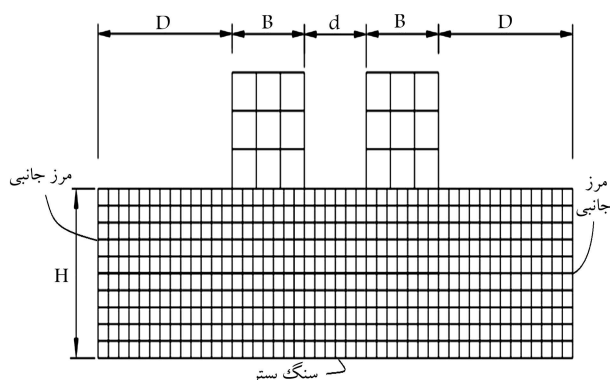
شکل ۳. پاسخ پی‌های مجاور تحت اثر بار دینامیکی اعمال شده به یکی از آن‌ها (خط پررنگ، پاسخ پی دارای بارگذاری و خط چین، پاسخ پی بدون بارگذاری). [۴]

جدول ۱. مشخصات مقاطع سازه‌ها و دوره‌ی تناوب‌شان.

تعداد طبقه	مقاطع		دوره‌ی تناوب (ثانیه)
	ستون	تیر	
۲	IPE۲۷۰,۲۴۰	IPE۳۰۰,۲۷۰	۰,۶۶۱
۳	BOX۲۰۰X۱۶,۱۸۰X۱۰	IPE۳۰۰,۲۷۰	۱,۰۳۵۲
۶	BOX۳۰۰X۲۵,۲۸۰X۲۰,۲۰۰X۱۶	IPE۳۶۰,۳۳۰,۲۷۰	۱,۳۵۹۲
۱۰	BOX۳۲۰X۲۰,۳۰۰X۲۵,۲۶۰X۱۶	IPE۴۵۰,۴۰۰,۳۳۰	۱,۷۲۷۹
۱۲	BOX۳۲۰X۲۵,۳۲۰X۲۰,۲۶۰X۱۶	IPE۴۵۰,۳۶۰,۳۰۰	۲,۰۸۸
۱۵	BOX۳۴۰X۲۵,۳۲۰X۲۵,۲۶۰X۲۰	IPE۴۵۰,۴۰۰,۳۳۰	۲,۵۴۱

جدول ۳. مشخصات ژئوتکنیکی خاک.

نوع خاک	V_s (m/s)	G_{max} (Kpa)	C_u (Kpa)	T_s (s)
۳ (۲۸۰۰)	۲۰۰	۷۲۰۰۰	۸۰	۰,۹۱
۴ (۲۸۰۰)	۱۷۰	۵۲۰۲۰	۴۵	۱,۰۸



شکل ۵. مشخصات ابعادی سامانه‌ی سازه - خاک - سازه.

جدول ۴. مقادیر عددی ابعاد سامانه‌ی سازه - خاک - سازه بر حسب متر.

تیپ خاک	D	B	H	d
۳ (۲۸۰۰)	۴۰	۱۵	۴۵	۲۵,۱۰,۰
۴ (۲۸۰۰)	۷۰	۱۵	۴۵	

کلی و جزئی سامانه به‌گونه‌ی انتخاب شود تا رفتار واقعی خاک شبیه‌سازی شود. ابعاد کلی سامانه (شکل ۵) با استفاده از روش سعی و خطا تعیین شده است، [۱۳] به طوری که با افزایش مقدار ابعاد، پاسخ سامانه پایدار بماند. از این رو پاسخ‌های سازه و خاک در محدوده‌ی مقادیر ارائه شده در جدول ۴ پایدار شده‌اند. ابعاد المان‌های خاک باید از ۰/۱ کوچک‌ترین طول موج زلزله کمتر باشد. [۲۵] کوچک‌ترین طول موج برای زلزله‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، ۲۸/۵ متر برای خاک ۳ و ۲۶/۱ متر برای خاک ۴ بوده است؛ از این رو مقدار ابعاد المان‌های خاک، ۲/۵ متر فرض شده است.

مدل رفتاری خاک از نوع کشسان خمیری است که روابط حوزه‌ی خمیری آن براساس نظریه‌ی چندصفحه‌ی به دست آمده و صفحات تسلیم آن از نوع ون‌میسز است. [۲۶] این رفتار بر روی المان‌های چهارگانه‌ی برای مدل‌سازی خاک اعمال شده است.

جدول ۲. پارامترهای رفتاری المان‌های فولادی.

پارامتر	مقدار
$\alpha_{e,mem}$	۰/۰۳
$\alpha_{s,mem}$	۰/۰۳
$(\delta_c/\delta_y)_{mem}$	مقاطع I شکل ۹ مقاطع باکس ۴
θ_u/θ_y	مقاطع I شکل ۱۱ مقاطع باکس ۶
κ	مقاطع I شکل ۰/۶ مقاطع باکس ۰/۲

شده‌اند: [۲۳]

$$\alpha_s = \frac{\alpha_{s,mem}}{n + 1 - n\alpha_{s,mem}} \quad (۳)$$

$$\alpha_c = \frac{\alpha_{c,mem}}{n + 1 - n\alpha_{c,mem}} \quad (۴)$$

$$\frac{\delta_c}{\delta_y} = \left[\left(\frac{\delta_c}{\delta_y} \right)_{mem} - 1 \right] (1 - \alpha_{s,mem}) n + \left(\frac{\delta_c}{\delta_y} \right)_{mem} \quad (۵)$$

$$\gamma_s = (n + 1) \gamma_{mem} \quad (۶)$$

$$K_e = (n + 1) K_{mem} \quad (۷)$$

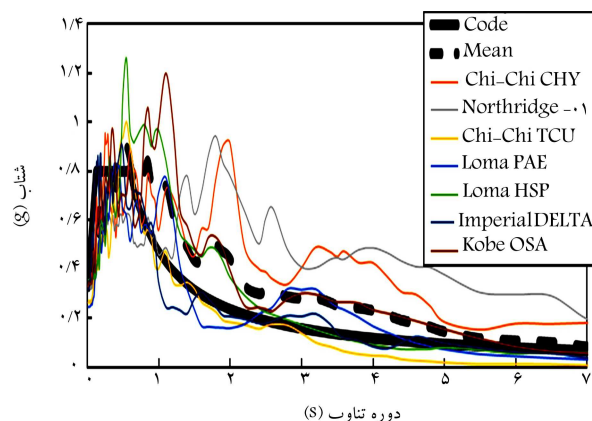
$$K_{bc} = \frac{n + 1}{n} K_{mem} \quad (۸)$$

که در آن‌ها مقدار n برابر با ۱۰ فرض شده است. [۲۳] n پارامتری برای تبدیل مفصل خمیری به فنر غیرخطی است؛ از این رو می‌توان گفت سختی کشسان فنر n برابر سختی کشسان دورانی عضو است.

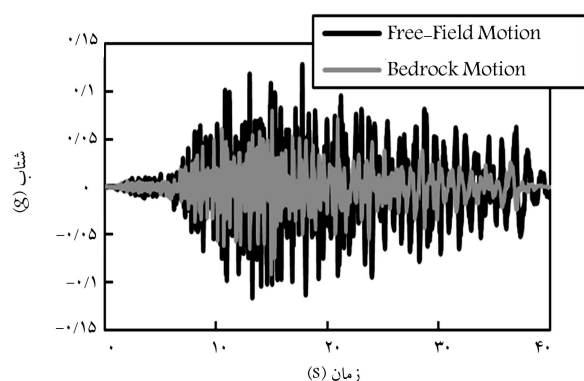
پی سازه‌ها به‌صورت نواری با عرض ۱ متر برای تمامی آن‌ها و ضخامت‌های ۱/۵ متر برای سازه‌ی ۱۵ طبقه، ۱/۲ متر برای سازه‌ی ۱۲ طبقه و ۱ متر برای سایر سازه‌ها در نظر گرفته شده است. بتن پی با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال فرض شده است.

۲.۴. خاک

برای تحلیل سامانه‌ها از دو نوع خاک رس استفاده شده است. مشخصات ژئوتکنیکی خاک‌ها در جدول ۳ ارائه شده‌اند و نام‌گذاری نوع خاک انتخابی براساس استاندارد ۲۸۰۰، انجام شده است. [۲۰] با توجه به اینکه در نوشتار حاضر، از روش مستقیم جهت مدل‌سازی سامانه‌ی سازه - خاک - سازه استفاده شده، لازم است تا ابعاد



شکل ۶. طیف رکوردهای زلزله به همراه طیف طرح استاندارد برای سازه‌ی ۱۰ طبقه روی خاک نوع ۳.



شکل ۷. رکوردهای زلزله‌ی اعمالی به سطح و سنگ بستر برای زلزله‌ی نورتریج در خاک تیپ ۴.

جدول ۵. رکوردهای زلزله و ضرایب مقیاس آن‌ها.

زلزله	ایستگاه	بزرگا (ریشتر)	فاصله (کیلومتر)	سازه (طبقه)					
				۲	۳	۶	۱۰	۱۲	۱۵
خاک نوع ۳									
Chichi	CHY۰۳۳	۷٫۶	۴۳٫۸۲	۵٫۰۳	۴٫۶۷	۴٫۲۷	۴	۳٫۷۵	۳٫۲۴
Northridge	CMR۱۸۰	۶٫۷	۳۴٫۷۸	۴٫۷۹	۴٫۲۹	۳٫۵	۲٫۹۴	۲٫۷۲	۲٫۳۱
Chichi	TCU۱۴۱	۷٫۶	۲۴٫۱۹	۲٫۴۴	۲٫۳۱	۲٫۲۴	۲٫۱۱	۲٫۰۴	۲
Loma Prieta	PAE۰۵۵	۶٫۹	۳۰٫۵۶	۱٫۳۱	۱٫۲۱	۱٫۱۸	۱٫۱۴	۱٫۱۳	۱٫۱
Loma Prieta	HSP۰۰۰	۶٫۹	۲۷٫۶۷	۰٫۹	۰٫۸۲	۰٫۷۸	۰٫۷۴	۰٫۷	۰٫۶۴
Imperial Valley-۰۶	DLT۲۶۲	۶٫۵	۲۲٫۰۳	۱٫۳۳	۱٫۳۵	۱٫۳۴	۱٫۳۱	۱٫۲۹	۱٫۳۲
Kobe	OSA۰۰۰	۶٫۹	۲۱٫۳۵	۳٫۹۴	۳٫۴۸	۳٫۳۱	۳٫۱۳	۳٫۰۵	۲٫۷۴
Kobe	YAE۰۰۰	۶٫۹	۲۷٫۷۷	۱٫۶۷	۱٫۵۴	۱٫۴۸	۱٫۳۸	۱٫۳	۱٫۲۱
خاک نوع ۴									
Superstition Hills-۰۲	IVW۳۶۰	۶٫۵	۲۳٫۸۵	۱٫۱۴	۱٫۱۲	۱٫۰۸	۱٫۰۵	۱٫۰۶	۰٫۹۷
Loma Prieta	A۱۰۹۰	۶٫۹	۴۳٫۷۷	۰٫۸۴	۰٫۷۶	۰٫۷۳	۰٫۷۰	۰٫۶۶	۰٫۶۱
Northridge	WAT۱۸۰	۶٫۷	۴۵٫۴۴	۲٫۴۴	۲٫۵۵	۲٫۷۱	۲٫۸۹	۲٫۸۶	۲٫۸۶
Chichi	CHY۰۵۴	۷٫۶	۴۸٫۴۹	۲٫۲۹	۲٫۰۹	۱٫۹۹	۱٫۹۴	۱٫۹۶	۱٫۹۴
Tottori	SMN۰۵EW	۶٫۶	۴۵٫۷۳	۱٫۸۸	۲٫۳۵	۲٫۶۲	۲٫۶۴	۲٫۶۹	۳٫۱۷
Iwate	MYG۰۰۵N	۶٫۹	۳۰٫۳۸	۱٫۰۰	۰٫۹۱	۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۸۲	۰٫۷۵
El Mayor	E۰۳۲۷۰	۷٫۲	۴۰٫۹۶	۱٫۲۸	۱٫۳۴	۱٫۳۹	۱٫۳۸	۱٫۳۷	۱٫۳۳
Darfield	REHSN۰۲E	۷٫۰	۱۹٫۴۸	۰٫۷۸	۰٫۷۲	۰٫۷۲	۰٫۷۳	۰٫۷۳	۰٫۷۳

۳.۴. میرایی

در تحلیل دینامیکی سامانه‌ی سازه - خاک - سازه لازم است تا میرایی سازه و خاک به‌طور مناسبی لحاظ شود. برای این منظور، میرایی سازه با استفاده از میرایی رایلی و با در نظر گرفتن درصد میرایی ۵٪^[۲۰] برای مودهای اول و سوم تعریف شده است. میرایی خاک برای مستهلک کردن امواج بازتاب شده از سازه و پی به درون محیط خاک تعریف می‌شود. لذا در پژوهش حاضر، میراگرهای ویسکوز در راستای دو مرز قائم سامانه با ضریب میرایی ρAV_s که در آن ρ چگالی خاک، A سطح مقطع مشترک میراگر و V_s سرعت موج برشی هستند، تعبیه شده‌اند.

۵. رکوردهای زلزله

دو گروه ۸ تایی از رکوردهای زلزله متناسب با نوع خاک مدل، از پایگاه اطلاعاتی PEER^[۲۷]، برای تحلیل دینامیکی سامانه‌ها انتخاب شده‌اند. مطابق استاندارد ASCE۷^[۱۱] در محدوده‌ی ۰٫۲ تا ۱٫۵ برابر دوره‌ی تناوب هر سازه، باید طیف میانگین رکوردهای زلزله از طیف طرح آیین‌نامه بالاتر باشد؛ بر این اساس، ضرایب مقیاس در جدول ۵ و طیف رکوردهای زلزله در شکل ۶ ارائه شده است.

برای استفاده از رکوردهای زلزله در تحلیل سامانه‌ی سازه - خاک - سازه، باید تبدیل به رکوردهای اعمالی در سنگ بستر شوند؛ زیرا شتاب‌نگاشت‌های موجود، پاسخ سطح زمین (میدان آزاد) هستند. برای این منظور می‌توان رکوردهای زلزله‌ی موجود را به‌عنوان تحریک در بالاترین سطح مدل خاک بدون سازه اعمال کرد. پس از تحلیل مدل خاک، پاسخ به‌دست آمده برای تراز سنگ بستر به‌عنوان رکوردهای جدید استفاده می‌شود. در شکل ۷، مقایسه‌ی بین رکورد اعمالی به سطح و خروجی آن در سنگ بستر انجام شده است.

۶. نتایج

در جهت مطالعه‌ی جامع اندرکنش سازه - خاک - سازه، دو مجموعه‌ی شتاب‌نگاشت‌های بیان‌شده در بند ۵، به سامانه‌ها اعمال شده‌اند. در بخش حاضر، نتایج تحلیل سامانه‌ها شامل دررفت بین طبقاتی و جابه‌جایی طبقات ارائه شده است. لازم به ذکر است در شکل‌هایی که در ادامه‌ی بخش حاضر ارائه شده‌اند، برای نشان دادن نتایج اندرکنش سازه‌های مجاور از عبارت $SSI-Sn$ استفاده شده است که در آن، n بیانگر تعداد طبقات سازه‌ی مجاور و برای بیان نتایج اندرکنش خاک - سازه از عبارت $SSI-Sn$ استفاده شده است که n نشان‌دهنده‌ی تعداد طبقات سازه‌ی اصلی است.

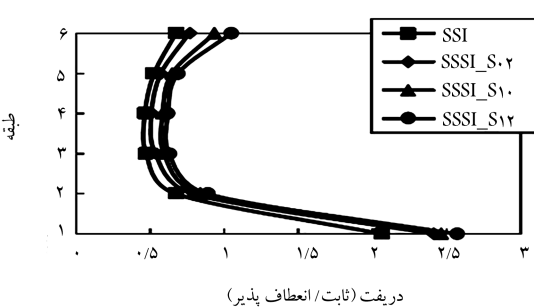
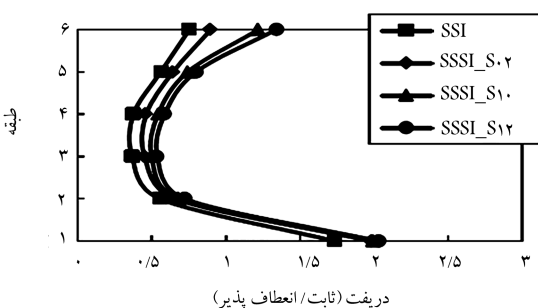
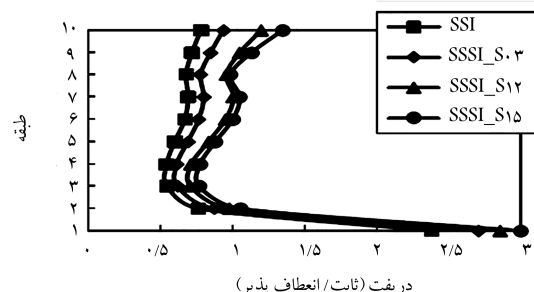
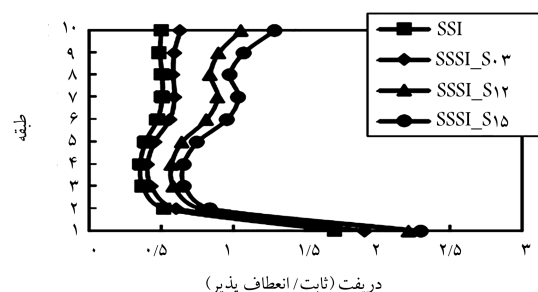
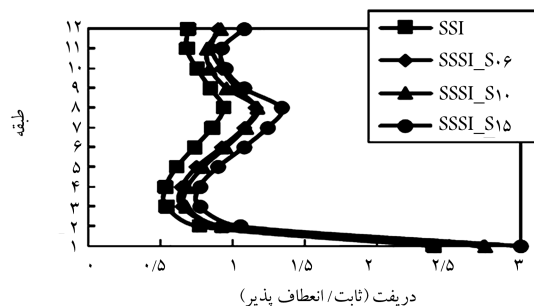
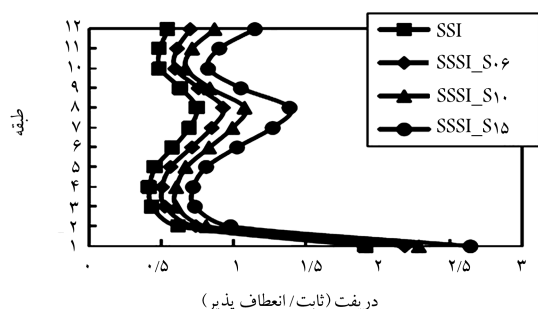
۱.۶. تغییر شکل سازه‌ها

۱.۱.۶. دررفت بین طبقاتی

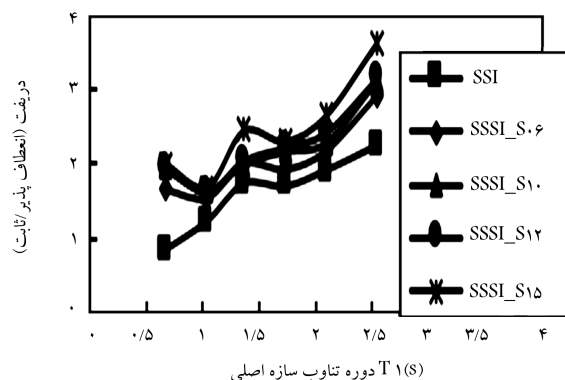
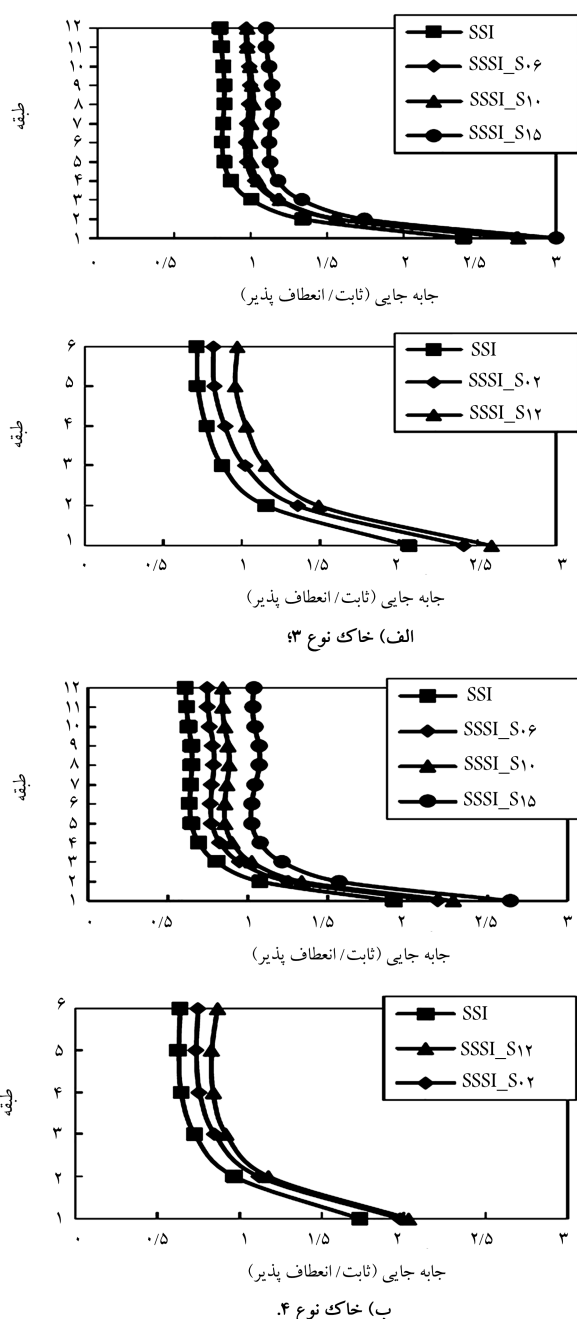
مقادیر دررفت بین طبقاتی سازه‌ها در حالت‌های اندرکنش سازه - خاک - سازه و همچنین خاک - سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در شکل ۸ مشاهده می‌شود که مطابق آن، وجود تکیه‌گاه نرم باعث افزایش شدید دررفت طبقه‌ی اول سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت شده است. در بین سامانه‌های سازه - خاک - سازه با فاصله‌ی

صفر، کمینه‌ی نسبت دررفت ۱/۱ برای سازه‌های ۲ طبقه‌ی مجاور هم و بیشینه‌ی آن، ۳/۶۱ برای سازه‌های ۱۵ طبقه‌ی مجاور هم است. در بین سامانه‌های خاک - سازه، به غیر از سازه‌ی ۲ طبقه که نسبت دررفت آن ۰/۸۴ است، در سایر سامانه‌ها، تکیه‌گاه نرم منجر به تمرکز تغییرشکل‌ها در طبقه‌ی اول و افزایش زیاد آن نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت شده است؛ در حالی که در سایر طبقات، تغییرات نسبت دررفت نظم مشخصی ندارند. لازم به ذکر است با کاهش ارتفاع (کاهش دوره‌ی تناوب) سازه‌ی مجاور، توزیع نسبت دررفت طبقات به جز طبقه‌ی اول، یکنواخت می‌شود. بنابراین می‌توان گفت اندرکنش سازه - خاک - سازه نسبت به اندرکنش خاک - سازه و تکیه‌گاه ثابت، منجر به افزایش زیاد تغییرشکل سازه به‌خصوص طبقه‌ی اول می‌شود که در این صورت نیاز به تمهیداتی در آیین‌نامه جهت عدم ایجاد طبقه‌ی نرم است.

بر اساس شکل ۸، با افزایش ارتفاع سازه، مقادیر نسبت دررفت افزایش می‌یابد، که شدت این افزایش در طبقه‌ی اول بیشتر است. افزایش ارتفاع سازه‌ی مجاور هم بر مقدار نسبت دررفت می‌افزاید. برای وضوح بیشتر این مسئله، شکل ۹ ترسیم شده است که محورا فقی آن، دوره‌ی تناوب کلیه‌ی سازه‌ها و محور قائم آن، نسبت دررفت طبقه‌ی اول (بیشینه‌ی مقدار) است که مطابق آن با افزایش دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و مجاور، مقادیر نسبت دررفت افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شدت تأثیر



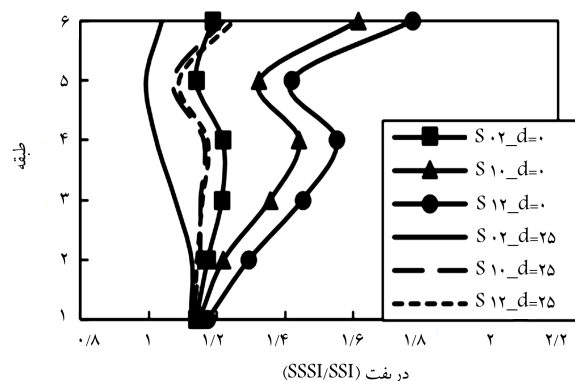
شکل ۸. نسبت دررفت بین طبقاتی در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر به حالت تکیه‌گاه ثابت برای سازه‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ طبقه در فاصله‌ی صفر نسبت به سازه‌ی مجاور SSI بیانگر اندرکنش سازه‌ی اصلی و $SSSI-Si$ بیانگر مجاورت سازه‌ی اصلی با سازه‌ی i طبقه‌ی.



شکل ۹. نسبت دریفت طبقه اول در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر به حالت تکیه‌گاه ثابت برای خاک نوع ۴ و فاصله‌ی صفر (T_1)، دوره‌ی تناوب سازه‌های اصلی).

جدول ۶. مقایسه‌ی درصد تأثیر دوره‌ی تناوب سازه‌ها بر نسبت دریفت برای خاک نوع ۴.

درصد افزایش	نسبت دریفت	سازه‌ی	
		مجاور	اصلی
۳۷	۲٫۶۴	۱۵	۱۲
	۳٫۶۱	۱۵	۱۵
۱۵	۳٫۱۵	۱۲	۱۵
	۳٫۶۱	۱۵	۱۵



شکل ۱۰. دریفت طبقات سازه‌ی ۶ طبقه در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه نسبت به اندرکنش خاک - سازه برای خاک نوع ۴ در دو فاصله‌ی (d) صفر و ۲۵ متری.

افزایشی دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی (T_1) بیشتر از سازه‌ی مجاور است. در جدول ۶، مقایسه‌ی بین درصد تأثیر تغییرات مشابه دوره‌ی تناوب سازه‌ها در تغییر شکل آن‌ها ارائه شده است که مطابق آن در صورت تغییر سازه‌ی اصلی از ۱۲ طبقه به ۱۵ طبقه، نسبت دریفت، ۳۷٪ افزایش می‌یابد؛ ولی تغییر سازه‌ی مجاور از ۱۲ طبقه به ۱۵ طبقه، منجر به افزایش ۱۵٪ نسبت دریفت می‌شود.

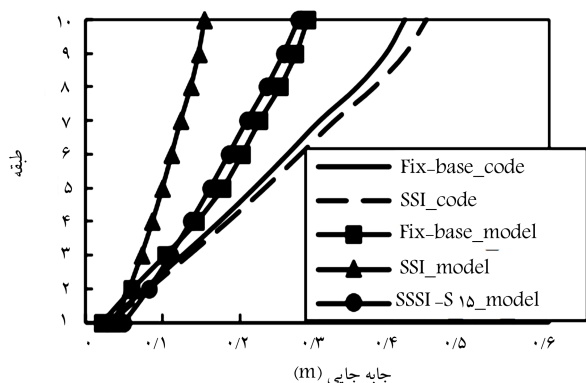
برای مقایسه‌ی دریفت در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه نسبت به حالت اندرکنش خاک - سازه، شکل ۱۰ ترسیم شده است که مطابق آن، هر چه آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه شدیدتر شده است (به معنی افزایش دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و مجاور)، نسبت دریفت در طبقات بالاتر افزایش بیشتری نسبت به طبقات پایین‌تر یافته است؛ البته در $\frac{1}{3}$ ارتفاع بالایی سازه‌ها، نسبت دریفت دچار کاهش ناگهانی شده است، ولی در طبقه‌ی آخرین کاهش

شکل ۱۱. جابه‌جایی جانبی سازه‌های ۶ و ۱۲ طبقه با تکیه‌گاه نرم نسبت به تکیه‌گاه ثابت در فاصله‌ی صفر.

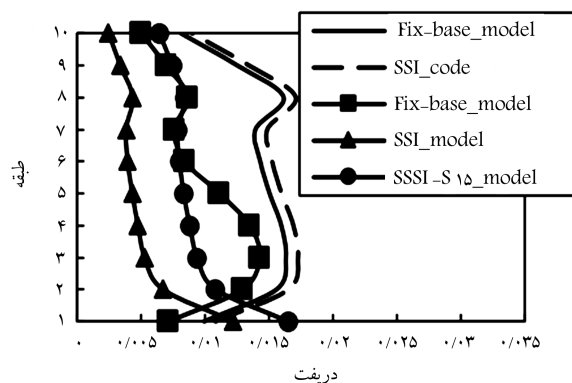
جبران شده است. با کاهش زیاد دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور و یا افزایش فاصله‌ی سازه‌ها، تمرکز نسبت دریفت به طبقه‌ی اول منتقل شده است. از دیگر نتایج قابل مشاهده در شکل ۱۰، آثار بیشتر اندرکنش سازه - خاک - سازه نسبت به اندرکنش خاک - سازه است که در تمامی سامانه‌ها مشهود است.

۲.۱.۶. جابه‌جایی جانبی طبقات

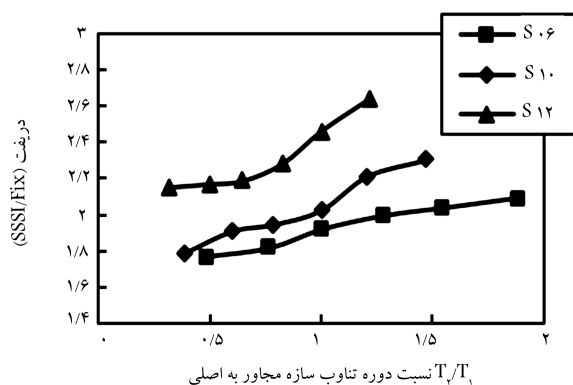
با توجه به شکل ۱۱ که نشان‌دهنده‌ی توزیع جابه‌جایی جانبی طبقات در حالت تکیه‌گاه نرم نسبت به تکیه‌گاه ثابت است، مشابه پاسخ دریفت، بیشترین نسبت جابه‌جایی در طبقه‌ی اول رخ داده است. کلیه‌ی سازه‌هایی که در مجاورت سازه‌ی



شکل ۱۳. جابه‌جایی جانبی سازه‌ی ۱۰ طبقه در حالت تکیه‌گاه ثابت و انعطاف‌پذیر براساس آیین‌نامه (code) و نتایج مدل حاضر (model) برای خاک نوع ۴.



شکل ۱۲. دریفت سازه‌ی ۱۰ طبقه در حالت تکیه‌گاه ثابت و انعطاف‌پذیر براساس آیین‌نامه (code) و نتایج مدل حاضر (model) برای خاک نوع ۴.



شکل ۱۴. دریفت طبقه‌ی اول سازه‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ طبقه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در مجاورت سایر سازه‌ها برای خاک نوع ۴ و فاصله‌ی صفر ($S \leq 0$) بیانگر سازه‌ی اصلی با T_1 طبقه، دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و T_2 دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور.

۱.۳.۶. دوره‌ی تناوب سازه‌ها

دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و مجاور که در نوشتار حاضر به ترتیب با T_1 و T_2 نشان داده شده است، مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در اندرکنش سازه - خاک - سازه هستند. شکل ۹، بخشی از آثار پارامترهای مذکور را بیان کرده است. برای بررسی راحت و واضح‌تر آثار دوره‌ی تناوب سازه‌ها، شکل ۱۴ ترسیم شده است که براساس آن با افزایش دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و مجاور آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه افزایش یافته است. با بررسی شیب نمودارها می‌توان گفت تأثیر دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور تا نسبت دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور به اصلی $(T_2/T_1) = 0.67$ ، نسبت به مقادیر بزرگ‌تر از ۰.۶۷ کمتر است؛ به‌طوری‌که در مقادیر T_2/T_1 بزرگ‌تر از ۰.۶۷، افزایش زیادی در مقادیر نسبت دریافت مشاهده می‌شود. از سویی دیگر، با کاهش دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی به کمتر از ۱/۳۵، ثانیه، اثر دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور به علت کاهش شیب منحنی کم شده است؛ از این رو اثر اندرکنش سازه - خاک - سازه برای سازه‌های بلند بیشتر بوده و در صورت وجود سازه‌ی هم‌تراز و یا بلندتر در مجاور یک سازه‌ی بلند، اندرکنش سازه - خاک - سازه بیشترین اثر خود را می‌گذارد.

در پژوهش حاضر برای سازه‌ی ۶ طبقه با دوره‌ی تناوب ۱/۳۵ ثانیه بر روی خاک نوع ۴، با تغییر سازه‌ی مجاور از ۳ طبقه به ۱۵ طبقه، نسبت دریافت ۳۲٪ افزایش یافته است، در حالی‌که این تغییر برای سازه‌ی ۱۲ طبقه با دوره‌ی تناوب ۹/۲ ثانیه، منجر به افزایش ۹۰ درصدی نسبت دریافت شده است که البته افزایش

۱۵ طبقه قرار گرفته‌اند، جابه‌جایی تمامی طبقات‌شان از حالت تکیه‌گاه ثابت بیشتر شده و با افزایش دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی و مجاور، مقادیر نسبت جابه‌جایی افزایش یافته‌اند. از طرفی دیگر، علاوه بر طبقه‌ی اول در طبقه‌های دوم و سوم هم مقادیر نسبت جابه‌جایی حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه از حالت تکیه‌گاه ثابت بیشتر شده است. براساس شکل ۱۰، اثر خاک نوع ۳ از خاک ۴ در نسبت جابه‌جایی بیشتر بوده و کمینه‌ی تفاوت پاسخ‌های مربوط به دو خاک مذکور، ۸٪ است.

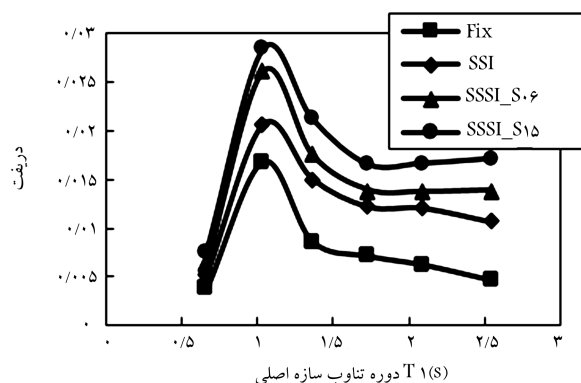
۲.۶. مقایسه‌ی نتایج با آیین‌نامه

در استانداردهای ASCE 7-10^[۱۲] و ۲۸۰۰^[۲۰] برای منظور کردن آثار تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر، فقط آثار SSI به‌صورت رابطه‌ی ۲ در نظر گرفته شده است؛ از این رو می‌توان آن را با نتایج پژوهش حاضر مقایسه کرد. شکل ۱۲، مقادیر دریفت سازه‌ی ۱۰ طبقه را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. توزیع تغییرشکلی که آیین‌نامه برای تکیه‌گاه نرم در نظر گرفته است، مطابق همان تغییرشکل حالت تکیه‌گاه ثابت است که این مسئله منجر به بروز خطا در تغییرشکل طبقات می‌شود، به‌طوری‌که تمرکز تغییرشکل‌ها به جای طبقه‌ی اول در طبقات بالاتر است. علاوه بر این، مقادیر محاسبه شده از طریق آیین‌نامه برای سامانه‌ی خاک - سازه در شکل ۱۲ و سایر سازه‌ها کمتر از مقادیر به‌دست آمده از سامانه‌های مدل حاضر است که باعث عدم اعتماد به روابط آیین‌نامه می‌شود. کمینه‌ی تفاوت مقادیر آیین‌نامه و مدل در کلیه‌ی سازه‌ها برابر با ۴٪ است.

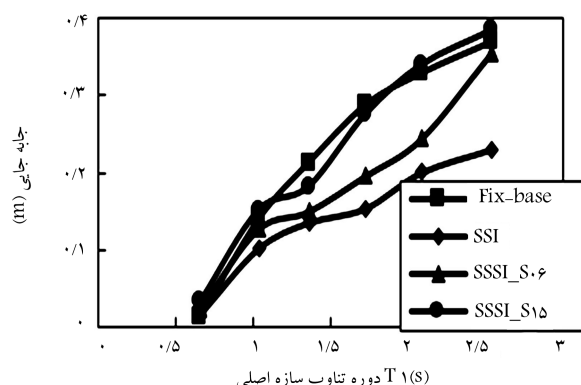
در شکل ۱۳، مقایسه‌ی بین مقادیر جابه‌جایی جانبی سازه‌ی ۱۰ طبقه در حالت‌های مختلف تکیه‌گاهی براساس آیین‌نامه و مدل حاضر انجام شده است. در پاسخ جابه‌جایی هم پدیده‌ی تمرکز تغییرشکل‌ها در طبقه‌ی اول لحاظ نشده و همچنین مقادیر آیین‌نامه برای سامانه‌ی خاک - سازه از مدل کمتر است که کمینه‌ی آن در کلیه‌ی سازه‌ها ۷٪ است.

۳.۶. آثار پارامترهای کلیدی

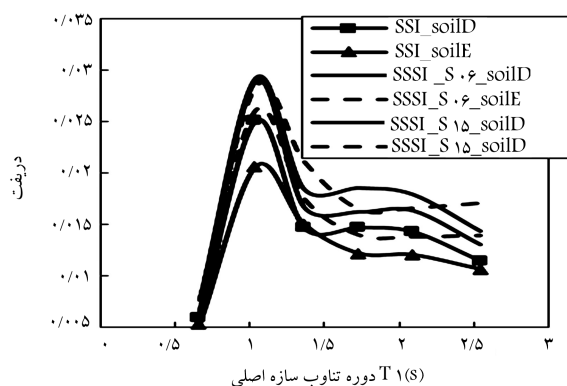
در تحلیل سامانه‌های اندرکنش سازه - خاک - سازه، مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در پاسخ سازه‌ها، دوره‌ی تناوب سازه‌ها، فاصله‌ی آن‌ها، و نوع خاک هستند. در بخش حاضر به تفکیک، هر یک از پارامترهای ذکرشده بررسی شده است.



شکل ۱۶. طیف پاسخ دررفت سازه‌ها در حالات مختلف تکیه‌گاهی برای خاک نوع ۴.



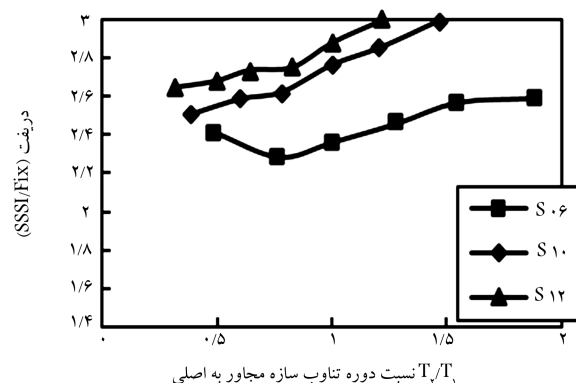
شکل ۱۷. جابه‌جایی بام سازه‌ها در حالت تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر و ثابت در فاصله صفر سازه‌ها و بر روی خاک نوع ۴.



شکل ۱۸. طیف پاسخ دررفت سازه‌ها در حالت‌های مختلف تکیه‌گاهی.

۲.۳.۶. نوع خاک

در شکل ۱۸، آثار نوع خاک در پاسخ‌های سازه مشاهده می‌شود که مطابق آن در محدوده مورد بررسی، پاسخ سامانه‌های مدل شده بر روی خاک نوع ۳ از خاک نوع ۴ بیشتر است؛ با این تفاوت که برای سازه‌های کوتاه (علی‌الخصوص محدوده تشدید پاسخ) نسبت پاسخ خاک نوع ۳ به خاک نوع ۴ بیشتر از سازه‌های بلندتر است. در سامانه‌های خاک - سازه، دررفت تمامی سازه‌های واقع بر خاک نوع ۳ بیشتر از خاک نوع ۴ شده است؛ اما با توجه به روند پاسخ‌ها، در دوره تناوب تقریبی ۲/۶ ثانیه، پاسخ مربوط به خاک نوع ۴ از خاک نوع ۳ پیشی گرفته است. در سامانه‌های سازه - خاک - سازه نتایج با کمی تفاوت به وجود آمده است. برای

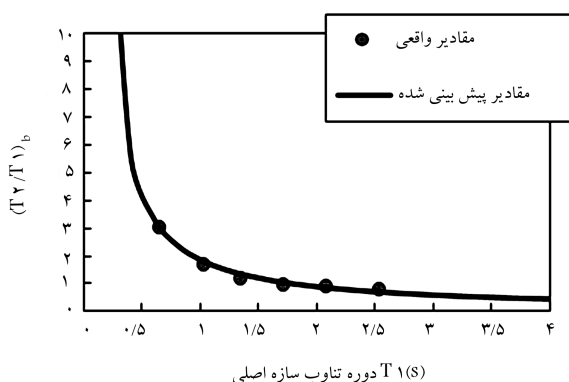


شکل ۱۹. دررفت طبقه اول سازه‌های ۶، ۱۰ و ۱۲ طبقه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در مجاورت سایر سازه‌ها برای خاک نوع ۳ و فاصله صفر (SSI) بیانگر سازه اصلی با ۱۲ طبقه، دوره تناوب سازه اصلی و T_2 دوره تناوب سازه مجاور.

مذکور با کاهش دوره تناوب سازه اصلی کمتر می‌شود. در مورد سازه‌های واقع بر خاک نوع ۳ هم این مسئله مشاهده می‌شود. تفاوت رفتاری سازه‌های موجود بر خاک‌های نوع ۳ و نوع ۴، در نرخ افزایش و مقادیر است. در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که نرخ افزایش نسبت دررفت، دچار افت یا خیز ناگهانی نمی‌شود، ولی مقادیر آن از مقادیر متناظر در شکل ۱۴ بیشتر است. از طرفی برای سازه‌ی ۶ طبقه واقع بر خاک نوع ۳ در مجاورت سازه‌ی ۳ تا ۱۵ طبقه، نرخ افزایش نسبت دررفت ۱۷٪ است. به عبارت دیگر، در خاک نوع ۳، افزایش دوره تناوب (بلندتر بودن) سازه‌ی مجاور، تأثیر کمتری نسبت به خاک نوع ۴ در دررفت سازه داشته است.

بررسی مقادیر مطابق دررفت سازه‌ها که منجر به تشکیل پدیده تشدید می‌شود، در شکل ۱۶ مطرح شده است. دوره تناوب خاک نوع ۴ با استفاده از نرم افزار NERA^۵ برابر با ۱/۰۸ ثانیه شده است که سازه‌ی ۳ طبقه نزدیک‌ترین دوره تناوب را به آن دارد. مطابق شکل ۱۶ و سایر نتایج، مقادیر عددی دررفت سازه‌ی ۳ طبقه در مجاورت سازه‌های ۶، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱/۷۵، ۱/۷۱ و ۱/۵۹ برابر میانگین دررفت سایر سازه‌ها به جز سازه‌ی ۲ طبقه شده است. بنابراین تکیه‌گاه نرم باعث تشدید پاسخ سازه‌های کوتاه می‌شود و با افزایش دوره تناوب سازه مجاور، نرخ افزایش پاسخ سازه تشدید شده کاهش می‌یابد، به طوری که امکان از بین رفتن اثر تشدید در اثر مجاورت سازه‌های بلند با سازه‌های کوتاه وجود دارد؛ این امر منتج به غالب شدن پاسخ سازه کوتاه در مجاورت سازه بلند نسبت به پاسخ تشدید سازه کوتاه می‌شود. به طور کلی برای سازه‌های قرار گرفته بر هر دو نوع خاک، تشدید در محدوده ۰/۷ تا ۱/۵ برابر دوره تناوب خاک رخ می‌دهد که بیشترین آثار تشدید در حالتی است که دوره تناوب سازه اصلی (T_1) و خاک برابر باشند و برای سازه‌های با دوره تناوب کمتر از ۰/۷ دوره تناوب خاک (سازه‌ی ۲ طبقه)، کمترین میزان دررفت مشاهده شده است.

یکی دیگر از پاسخ‌های سازه، جابه‌جایی جانبی طبقات است که بیشینه جابه‌جایی جانبی طبقات (بام) در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. در محدوده مورد بررسی پژوهش حاضر، به جز چند مورد، جابه‌جایی بام تحت تأثیر تکیه‌گاه نرم قرار نگرفته است. در شکل ۱۷، فقط در مجاورت سازه‌ی ۱۵ طبقه، بیشینه جابه‌جایی جانبی سازه‌ها از مقادیر متناظر حالت تکیه‌گاه ثابت بیشتر شده است، ولی در سایر حالت‌ها، پاسخ تکیه‌گاه ثابت غالب است.



شکل ۲۱. نسبت دورهی تناوب مرزی $(T_2/T_1)_b$ برای خاک نوع ۴.

فاصله‌ی سازه‌ها یکسان نیست. برای مقادیر $T_2/T_1 > 0.88$ ، سازه‌های مجاور با فاصله‌ی دورتر که در اینجا ۲۵ متر است، بیشترین پاسخ را دارند و با افزایش مقدار T_2/T_1 ، پاسخ‌های سازه در هر ۳ فاصله به هم نزدیک شده‌اند. اما برای مقادیر $T_2/T_1 < 0.88$ ، بیشترین پاسخ مربوط به کمترین فاصله است. با میانگین گرفتن از این دو نقطه‌ی T_2/T_1 ، یک رابطه‌ی جدید در سامانه‌ی سازه - خاک - سازه به نام نسبت دورهی تناوب مرزی $(T_2/T_1)_b$ تعریف می‌شود. براساس نتایج مشاهده شده در سایر سازه‌ها، دو پارامتر نوع خاک و دورهی تناوب سازه‌ی اصلی (T_1) ، در تعیین رابطه‌ی $(T_2/T_1)_b$ مؤثر هستند؛ از این رو با استفاده از تحلیل رگرسیون، مقادیر $(T_2/T_1)_b$ برای هر دو نوع خاک E و D به صورت رابطه‌ی ۹ محاسبه شده است:

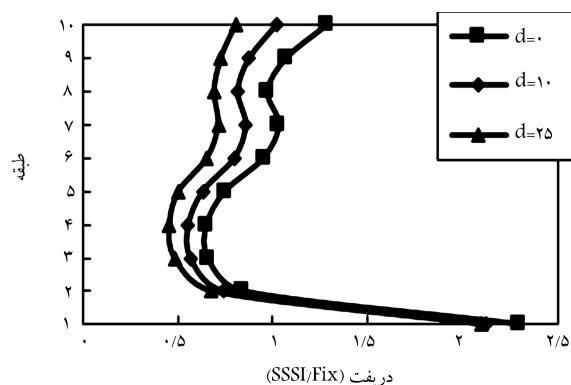
$$\begin{aligned} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_b &= \frac{1.64}{T_1 - 0.104} (E) \\ \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_b &= \frac{2.06}{T_1 + 0.193} (D) \end{aligned} \quad (9)$$

شکل ۲۱، مقادیر اصلی و پیش‌بینی شده برای دورهی تناوب مرزی $(T_2/T_1)_b$ را براساس رابطه‌ی ۹ نشان می‌دهد که مطابق آن در سازه‌های با دورهی تناوب بیشتر از ۳ ثانیه، همواره با افزایش فاصله‌ی سازه‌ها، آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه کاهش یافته و در سازه‌های با دورهی تناوب کمتر از ۰.۵ ثانیه، همواره افزایش فاصله‌ی سازه‌ها موجب افزایش پاسخ شده است. از طرفی در محدوده‌ی دورهی تناوب ۱/۳۵ تا ۲/۵ ثانیه (سازه‌های نیمه بلند)، مقدار $(T_2/T_1)_b$ نزدیک به ۱ است؛ بنابراین می‌توان گفت در محدوده‌ی ذکر شده، در صورتی که سازه‌ی مجاور، دورهی تناوبی بزرگ‌تر از سازه‌ی اصلی داشته باشد، افزایش فاصله‌ی سازه‌ها باعث کاهش پاسخ می‌شود و در صورتی که دورهی تناوب سازه‌ی مجاور کمتر از سازه‌ی اصلی باشد، کمترین آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه هنگامی است که فاصله‌ی دو سازه در کمترین مقدار ممکن باشد. لازم به ذکر است که این پدیده نیاز به بررسی‌های بیشتری دارد.

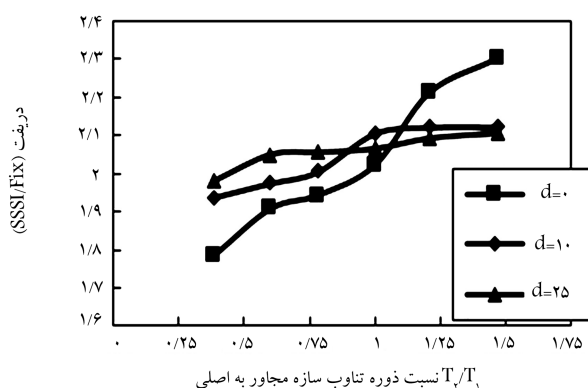
از طرفی با توجه به شکل ۲۰، پاسخ‌های سازه‌ی ۱۰ طبقه در مجاورت سایر سازه‌ها برای دو فاصله‌ی ۱۰ و ۲۵ متری به هم نزدیک هستند که این امر نشان‌دهنده‌ی خنثی شدن آثار پارامتر فاصله‌ی سازه‌هاست. بنابراین در فواصل بیش از ۰.۶۷ بعد پی (فاصله‌ی ۱۰ متر)، تأثیر فاصله‌ی سازه‌ها یکسان است.

۷. تحلیل رگرسیون برای پیش‌بینی دریافت طبقات

مطابق رابطه‌ی ۲ در استاندارد ۲۸۰۰، پیش‌بینی جابه‌جایی طبقات در ترازهای



شکل ۱۹. دریافت سازه‌ی ۱۰ طبقه در مجاورت سازه‌ی ۱۵ طبقه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت برای خاک E در ۳ فاصله‌ی (d) صفر، ۱۰ و ۲۵ متری.



شکل ۲۰. دریافت سازه‌ی ۱۰ طبقه در مجاورت سایر سازه‌ها نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در سه فاصله‌ی صفر، ۱۰ و ۲۵ متری برای خاک نوع ۴.

سازه‌های تا دورهی تناوب ۲/۴ ثانیه در مجاورت سازه‌ی ۶ طبقه و برای سازه‌های تا دورهی تناوب ۲/۳ ثانیه در مجاورت سازه‌های ۱۰، ۱۲ و ۱۵ طبقه، دریافت مربوط به خاک نوع ۳ بیشتر از خاک نوع ۴ است، در حالی که برای دوره‌های تناوب بیشتر از آن‌ها، پاسخ‌های مربوط به خاک نوع ۴ بیشتر شده است. از این رو برای سازه‌های با دورهی تناوب بیشتر از ۲/۳ ثانیه، خاک نوع ۴ (خاک نرم‌تر) موجب افزایش پاسخ‌ها شده و برای سازه‌های با دورهی تناوب کمتر از ۲/۳ ثانیه، خاک نوع ۳ (سخت‌تر) منجر به افزایش پاسخ‌ها شده است. از طرفی با توجه به دورهی تناوب خاک و آثار تشدید پاسخ سازه‌ها، در سازه‌هایی که دورهی تناوب آن‌ها کمتر از ۰.۷ دورهی تناوب خاک باشد، مدل‌سازی خاک تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در پاسخ سازه ندارد؛ اما برای سازه‌هایی که دورهی تناوب آن‌ها بیشتر از ۱/۵ برابر دورهی تناوب خاک باشد، آثار مدل‌سازی خاک اثر به‌مراتب بیشتری در پاسخ سازه‌ها دارد، ولی کماکان آثار تشدید (دورهی تناوب سازه در محدوده‌ی ۰.۷ تا ۱/۵ برابر دورهی تناوب خاک باشد) بیشترین پاسخ‌ها را به سازه اعمال کرده است.

۳.۳.۶. فاصله‌ی سازه‌ها

پارامتر فاصله‌ی سازه‌ها، یکی دیگر از مهم‌ترین شاخصه‌های تأثیرگذار در سامانه‌ی سازه - خاک - سازه است. مطابق شکل ۱۹، انتظار می‌رود با افزایش فاصله‌ی سازه‌ها، آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه کاهش یابد، ولی با بررسی‌های نوشتار حاضر، همواره این اتفاق رخ نمی‌دهد.

مطابق شکل ۲۰ که دریافت سازه‌ی ۱۰ طبقه در مجاورت سازه‌ی ۱۵ طبقه را نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت در ۳ فاصله‌ی معین نشان می‌دهد، رفتار پارامتر

در روابط ۱۳ یا ۱۴، به ازاء T_1 برابر T_s است. مقدار $RMSE$ برای روابط خاک ۴ برابر با ۰/۳۹۸ است.

۸. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک مطالعه‌ی عددی جامع در مورد سامانه‌های سازه - خاک - سازه با در نظر گرفتن سه پارامتر دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی (T_1) و مجاور (T_2)، نوع خاک و فاصله‌ی سازه‌ها که شاخص‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در اندرکنش سازه - خاک - سازه هستند، انجام شده است. ۶ سازه با دوره تناوب‌های ۰/۶۶۱ تا ۲/۵۴۱ ثانیه تحت اثر ۸ رکورد زلزله تحلیل تاریخی‌چهی زمانی شده‌اند. برای مدل‌سازی سامانه‌ها از روش مستقیم استفاده و رفتار غیرخطی تمام المان‌های سازه و خاک در مدل اعمال شده است. براساس نتایج پژوهش حاضر می‌توان گفت:

۱. تکیه‌گاه نرم باعث افزایش شدید دررفت طبقه‌ی اول می‌شود، به طوری که بیشینه‌ی دررفت سازه مربوط به طبقه‌ی اول است. کمینه‌ی دررفت سامانه‌ی سازه - خاک - سازه نسبت به حالت تکیه‌گاه ثابت برای طبقه‌ی اول، ۱/۱ و بیشینه‌ی آن ۳/۶۱ است.

۲. برای هر دو پاسخ دررفت و جابه‌جایی جانبی، مقادیر مربوط به اندرکنش سازه - خاک - سازه از اندرکنش خاک - سازه بیشتر شده است. با مقایسه‌ی نسبت دررفت سامانه‌ی اندرکنش سازه - خاک - سازه به اندرکنش خاک - سازه، بیشترین مقدار آن در بام ایجاد شده است که با کاهش T_2 و افزایش فاصله‌ی سازه‌ها، تمرکز نسبت دررفت به طبقه‌ی اول منتقل می‌شد.

۳. برای سازه‌هایی با T_1 در محدوده‌ی ۰/۷ تا ۱/۵ برابر دوره‌ی تناوب خاک، پاسخ دررفت دچار تشدید شده است. از طرفی دیگر، برای مقادیر T_1 کمتر از ۰/۷ دوره‌ی تناوب خاک، کمترین دررفت‌های ممکن ایجاد شده است.

۴. در حالت کلی، تأثیر T_1 در پاسخ دررفت سازه، دست‌کم ۲ برابر T_2 است؛ به طوری که برای سازه‌ی ۶ طبقه در صورت تغییر سازه‌ی مجاور از ۳ به ۱۵ طبقه، نسبت دررفت ۳۲٪ افزایش یافته است، اما برای سازه‌ی ۱۲ طبقه با همان تغییر سازه‌ی مجاور، نسبت دررفت ۹۰٪ افزایش یافته است. البته تأثیر دو پارامتر مذکور، در خاک نوع ۴ ملموس‌تر است.

۵. تأثیرات پارامتر فاصله‌ی سازه‌ها متفاوت از آنچه انتظار می‌رفت، بوده است. برای سازه‌هایی با T_1 کمتر از ۰/۵ ثانیه، افزایش فاصله باعث افزایش پاسخ و برای سازه‌هایی با T_1 بیشتر از ۳ ثانیه، افزایش فاصله منجر به کاهش پاسخ شده است. همچنین در سازه‌های نیمه‌بلند ($T_1 < ۱/۳۵$) (۲/۵)، در صورتی که T_2 از T_1 بزرگ‌تر باشد، افزایش فاصله باعث کاهش پاسخ و اگر T_2 از T_1 کوچک‌تر باشد، افزایش فاصله باعث افزایش پاسخ می‌شود.

۶. به طور کلی برای محاسبه‌ی تغییر شکل‌های سازه، علاوه بر در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه، لازم است آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه در مقادیر مربوط منظور شود؛ زیرا اندرکنش اینرسی سازه‌های مجاور باعث تشدید پاسخ سازه‌ی اصلی می‌شود.

۷. در استاندارد ۲۸۰۰، رابطه‌ی برای منظور کردن آثار اندرکنش خاک - سازه بیان شده است، که با استفاده از روابط ارائه شده در نوشتار حاضر می‌توان آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه را هم در رفتار سازه‌ها اعمال کرد.

مختلف ساختمان تحت اثر اندرکنش خاک - سازه قابل محاسبه است. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر، پارامترهای کلیدی اندرکنش سازه - خاک - سازه بررسی شده‌اند، با استفاده از روابط تحلیلی - تجربی، مقادیر بیشینه‌ی دررفت سازه در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه نسبت به حالت اندرکنش خاک - سازه پیش‌بینی شده است. برای این منظور، با بهره‌گیری از تحلیل رگرسیون غیرخطی، روابط ذکر شده برای هر دو نوع خاک ارائه شده است.^[۲۸] که با ضرب کردن آن‌ها در رابطه‌ی ۲، آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه در رفتار سازه‌ها منظور می‌شود.

۱.۷. خاک نوع ۳

ضریب $C_{SSSI,3}$ بیانگر نسبت بیشینه‌ی دررفت در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه به اندرکنش خاک - سازه برای خاک نوع ۳ است. برای مقادیر $(T_2/T_1)_b < (T_2/T_1)$ ، رابطه‌ی ۱۰ ارائه شده است:

$$C_{SSSI,3} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.26} - (T_1)^{0.46} + 0.778 \left(\frac{d}{B}\right)^{2.00} + 1.73 \quad (10)$$

و برای مقادیر $(T_2/T_1)_b > (T_2/T_1)$ ، رابطه‌ی ۱۱ ارائه شده است:

$$C_{SSSI,3} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.22} - (T_1)^{0.91} - 0.56 \left(\frac{d}{B}\right)^{2.00} + 2.3 \quad (11)$$

که در آن‌ها، T_1 ، T_2 ، d و B به ترتیب دوره‌ی تناوب سازه‌ی اصلی، دوره‌ی تناوب سازه‌ی مجاور، فاصله‌ی سازه‌ها و بُعد پی هستند. این لازم به ذکر است که روابط ۱۰ و ۱۱ برای مقادیر $T_1 > T_s$ (دوره‌ی تناوب خاک است) قابل استفاده هستند. همچنین برای مقادیر $T_1 < T_s$ ، رابطه‌ی ۱۲ ارائه شده است:

$$C_{SSSI,3} = 1 \quad T_1 \leq 0.7T_s$$

$$C_{SSSI,3} = \frac{C_{SSSI,T_s}-1}{0.7T_s} (T_1 - T_s) + C_{SSSI,T_s} \quad 0.7T_s < T_1 < T_s \quad (12)$$

که در آن، $C_{SSSI,T}$ همان مقدار $C_{SSSI,3}$ در روابط ۱۰ یا ۱۱ به ازاء T_1 برابر T_s است. مقدار $RMSE^6$ برای روابط خاک ۳ برابر با ۰/۱۰۵ است.

۲.۷. خاک نوع ۴

$C_{SSSI,4}$ نسبت بیشینه‌ی دررفت سازه در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه به اندرکنش خاک سازه را برای خاک نوع ۴ بیان می‌کند. برای مقادیر $(T_2/T_1)_b < (T_2/T_1)$ ، رابطه‌ی ۱۳ ارائه شده است:

$$C_{SSSI,4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.07} - (T_1)^{0.22} + 0.043 \left(\frac{d}{B}\right)^{2.72} + 1.53 \quad (13)$$

و برای مقادیر $(T_2/T_1)_b > (T_2/T_1)$ ، رابطه‌ی ۱۴ ارائه شده است:

$$C_{SSSI,4} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.126} - (T_1)^{0.244} - \left(\frac{d}{B}\right)^{0.025} + 0.48 \quad (14)$$

لازم به ذکر است که روابط ۱۳ و ۱۴ برای مقادیر $T_1 > T_s$ (دوره‌ی تناوب خاک است)، قابل استفاده هستند. همچنین برای مقادیر $T_1 < T_s$ ، رابطه‌ی ۱۲ قابل استفاده است، با این تفاوت که در آن C_{SSSI,T_s} همان مقدار $C_{SSSI,4}$ ،

پانوشتها

1. structure-soil-structure interaction (SSSI)
2. A system for analysis of soil-structure interaction
3. soil-structure interaction (SSI)
4. open system for earthquake engineering simulation
5. nonlinear earthquake site response analyses (NERA)
6. root mean squared error

منابع (References)

1. Lou, M., Wang, H., Chen, X. and et al. "Structure-soil-structure interaction: Literature review", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(12), pp. 1724-1731 (2011).
2. Celebi, M. "Seismic responses of two adjacent buildings. II: interaction", *Journal of Structural Engineering*, **119**(8), pp. 2477-2492 (1993).
3. Celebi, M. "Seismic responses of two adjacent buildings. I: data and analyses", *Journal of Structural Engineering*, **119**(8), pp. 2461-2476 (1993).
4. Mulliken, J.S. and Karabalis, D.L. "Discrete model for dynamic through-the-soil coupling of 3-D foundations and structures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **27**(7), pp. 687-710 (1998).
5. Lysmer, J., Tabatabaie-Raissi, M., Tajirian, F. and et al. "SASSI: A system for analysis of soil-structure interaction", University of California: Berkeley (1981).
6. Alexander, N.A., Ibraim, E. and Aldaikh, H. "A simple discrete model for interaction of adjacent buildings during earthquakes", *Computers & Structures*, **124**, pp. 1-10 (2013).
7. Lin, H.T., Roesset, J. and Tassoulas, J. "Dynamic interaction between adjacent foundations", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **15**(3), pp. 323-343 (1987).
8. Qian, J. and Beskos, D.E. "Dynamic interaction between 3-D rigid surface foundations and comparison with the ATC-3 provisions", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **24**(3), pp. 419-437 (1995).
9. Qian, J. and Beskos, D.E. "Harmonic wave response of two 3-D rigid surface foundations", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **15**(2), pp. 95-110 (1996).
10. Yue, D., Ghiocel, D.M., Fuyama, H. and et al. "Structure-soil-structure interaction effects for two heavy NPP buildings with large-size embedded foundations", *SMiRT22 Proceedings*, pp. 18-23 (2013).
11. Santana, A., Aznarez, J.J., Padron, L.A. and et al. BEM-FEM model for the dynamic analysis of building structures founded on viscoelastic or poroelastic soils", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **14**(1), pp. 115-138 (2016).
12. Ghandil, M. and Behnamfar, F. "The near-field method for dynamic analysis of structures on soft soils including inelastic soil-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **75**, pp. 1-17 (2015).
13. Ghandil, M., Behnamfar, F. and Vafaeian, M. "Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **80**, pp. 149-162 (2016).
14. ASCE7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures", (2010).
15. NIST-GCR-12-917-21, "Soil-structure interaction for building structures", NEHRP Consultants Joint Venture (A Partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering), (2012).
16. ASCE41, "Seismic evaluation and retrofit of existing buildings", American Society of Civil Engineers, Reston, VA (2013).
17. Trombetta, N.W., Mason, H.B., Hutchinson, T.C. and et al. "Nonlinear soil-foundation-structure and structure-soil-structure interaction: Centrifuge test observations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**(5), pp. 04013057-1 - 04013051-11 (2014).
18. Trombetta, N.W., Mason, H.B., Hutchinson, T.C. and et al. "Nonlinear soil-foundation-structure and structure-soil-structure interaction: Engineering demands", *Journal of Structural Engineering*, **141**(7), pp. 04014177-1 - 04014177-12 (2015).
19. OpenSees, "Open system for earthquake engineering simulation", Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center.
20. Standard 2800, "Design of structures against earthquake", Building and House Research Center (BHRC)", (2014).
21. ASCE7-16, "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structure", American Society of Civil Engineers (2016).
22. AISC360, "Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10)", (2010).
23. Ibarra, L.F. and Krawinkler, H. "Global collapse of frame structures under seismic excitations", Pacific Earthquake Engineering Research Center (2005).
24. Lignos, D.G., Krawinkler, H. and Whittaker, A.S. "Prediction and validation of sidesway collapse of two scale models of a 4-story steel moment frame", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(7), pp. 807-825 (2011).
25. Jeremic, B., Jie, G., Preisig, M. and et al. "Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **38**(5), pp. 699-718 (2009).
26. Yang, Z., Lu, J. and Elgamal, A. "OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements", User's Manual, Ver, 1 (2008).
27. PEER Ground Motion Database, Available: <http://ngawest2.berkeley.edu>.
28. Esmailzadeh Shahri, R. "Numerical study of structure-soil-structure interaction", M.Sc. Thesis, Ferdowsi University of Mashhad (FUM) (2017).