

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

پل‌های قدیمی عمدتاً برای بارگذاری ثقلی و با در نظر گرفتن جزئی بارهای لرزه‌ای یا جانبی طراحی شده‌اند که در برابر اثرات لرزه‌ای آسیب‌پذیر بوده‌اند. مثال‌های متعددی از خسارات وارده به المان‌های سازه‌های بزرگ روبنایی و سازه‌های زیرزمینی پل و در بعضی موارد ریزش کامل موجود می‌باشد. اخیراً، محققان مفهوم فونداسیون گهواره‌ای را برای ستون-فونداسیون در پل‌ها پیشنهاد کرده‌اند. یک فونداسیون گهواره‌ای از گسیختگی خاک برای حفاظت از سازه در طول بارگذاری لرزه‌ای استفاده می‌کند. به این ترتیب، این فونداسیون می‌تواند به عنوان یک فیوز عمل کرده و تا حدی سیستم پل را از آسیب‌های جدی ناشی از زلزله ایزوله کند. تحقیقات پیشین عمدتاً بر روی رفتار فونداسیون‌های گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای متمرکز بوده‌اند و به صورت محدود از خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار یا خاک رس نیز استفاده شده است، در حالی که توجه چندانی به عملکرد این نوع از پی‌ها در خاک‌های ریزدانه غیر پلاستیک (سیلتی) نشده است. در این تحقیق عملکرد لرزه‌ای فونداسیون‌های گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک‌های سیلتی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک و توسط میز لرزه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، هشت آزمایش میز لرزه با تغییر پارامترهای نسبت سطح تماس بحرانی و فرکانس ورودی ارزیابی شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که نشست فونداسیون و دوران سازه، پارامترهای وابسته به نرخ بوده و با کاهش فرکانس حرکت ورودی افزایش می‌یابند. علاوه بر این، نشان داده شده است که افزایش نسبت سطح تماس بحرانی منجر به کاهش نشست‌ها و افزایش دوران سازه می‌شود.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی فیزیکی، فونداسیون گهواره‌ای، میز لرزه، خاک سیلت غیر پلاستیک.

بررسی آزمایشگاهی عملکرد فونداسیون‌های گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک سیلت توسط آزمایش میز لرزه

آرش عصمت خواه ایرانی

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

مسعود حاجی علیوی بناب (نویسنده مسئول)

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران،
hajjalilue@tabrizu.ac.ir

فریبا بهروز سرند

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

هوشنگ کاتبی

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۱- مقدمه

اخیر به طور گسترده با استفاده از مدل‌های سانتریفیوژ یا آزمایش میز لرزه مورد مطالعه قرار گرفته است. روش متداول در مهندسی زلزله که به عنوان طراحی به روش سنتی شناخته می‌شود، با هدف کاهش خسارات لرزه‌ای توسط رفتار غیر الاستیک کنترل‌شده‌ی شکل‌پذیری رو بنا انجام می‌شود. در این روش، انرژی لرزه‌ای از طریق عناصر سازه‌ای مستهلک می‌شود و در سیستم خاک-فونداسیون از هرگونه رفتار غیرخطی قابل توجهی صرف نظر می‌شود (Anastasopoulos et al., 2013; Asli et al., 2018).

در طی زمین‌لرزه‌های شیلی در سال ۱۹۶۰ میلادی، تعدادی از سازه‌های بلند و باریک در زمین لرزه سالم ماندند در حالی که سازه‌های پایدارتر به شدت آسیب دیدند. مطالعه‌ای انجام شده توسط هاوژنر (Housner, 1963)، پاسخ دینامیکی یک بلوک در معرض حرکت گهواره‌ای تحت تحریک‌های مختلف بوده و به عنوان نقطه عطفی در مطالعات مربوط به حرکت گهواره‌ای محسوب می‌شود. مزایای یک فونداسیون سطحی با عملکرد گهواره‌ای برای طراحی مقاوم در برابر زمین‌لرزه در سال‌های

پایه در نتیجه اندرکنش بین خاک-سازه^۴ و بلند شدگی پی کاهش می‌یابد. چادهری (Chaudhary, 2016) اهمیت نسبی اندرکنش بین خاک و سازه (با توجه به حرکت گهواره‌ای فونداسیون) بر روی پاسخ لرزه‌ای پل‌های ساخته شده بر روی پروفیل‌های توده سنگی را مورد مطالعه قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر روی جابه‌جایی و نیروی برشی فونداسیون پل‌های واقع شده بر روی پروفیل‌های سنگ ضعیف قابل توجه است. نقش سودمند رفتار غیرخطی خاک-فونداسیون (توسط حرکت گهواره‌ای پی) در افزایش ایمنی سازه در تعدادی از مطالعات قبلی بیان و تأیید شده است (Housner, 1963; Yashinsky & Karshenas, 2003; Mayoral et al., 2017). برای نمونه آزمایش‌های صحرایی توسط آلجی و همکاران (Algie et al., 2010)، شارما و دنگ (Sharma & Deng, 2019, 2020)، آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس بزرگ و کوچک توسط آناستاسوپولوس و همکاران (Anastasopoulos et al., 2013, 2015)، لولی و همکاران (Loli et al., 2014) و مطالعات عددی و تحلیلی توسط آناستاسوپولوس و همکاران (Anastasopoulos et al., 2011, 2014) انجام شده است. با این حال، علی‌رغم مزایای روش طراحی جداسازی گهواره‌ای^۵ دوران و نشست‌های دائمی و ماندگار منجر به بروز نگرانی‌های اصلی در کاربرد این روش می‌گردد. بنابراین، مطالعات بیشتری توسط آناستاسوپولوس و همکاران (Anastasopoulos et al., 2013) و کوکالی و همکاران (Kokkali et al., 2015) برای بهبود پاسخ گهواره‌ای خاک-فونداسیون از طریق تحکیم خاک کم‌عمق در یک سری تحلیل‌های بار افزون^۶ یکنواخت و آهسته متناوب انجام شده است. اصلی و همکاران (Asli et al., 2018) همچنین ترکیبی از بهسازی خاک کم‌عمق و عناصر تقویت‌کننده مانند ژئوگرید و ژئوسل را برای افزایش عملکرد گهواره‌ای فونداسیون از طریق محدود کردن تغییر شکل‌های نامطلوب استفاده کردند. آلموند و کاتر (Allmond & Kutter, 2014)، گوان و همکاران (Guan et al., 2018) و کو و همکاران (Ko et al., 2018) برای کنترل تغییر

مطالعات اخیر نشان داده است که چنین فلسفه‌ای در طراحی نه تنها منجر به طراحی پر هزینه بلکه در برخی موارد منجر به آسیب‌پذیری هرچه بیشتر سازه می‌گردد (Gazetas, 2015). از سوی دیگر، سیستم خاک-فونداسیون دارای پتانسیل قابل توجهی برای کاهش نیروهای اینرسی و اتلاف انرژی لرزه‌ای منتقل شده به روسازه از طریق غیرخطی بودن هندسی (توسط بلند شدگی و لغزش فونداسیون) و خاصیت غیر الاستیک مصالح (بسیج شدن ظرفیت باربری) است (Anastasopoulos et al., 2010). رفتار غیرخطی سیستم خاک-فونداسیون، از جمله بسیج شدگی ظرفیت باربری و لغزش یا بلند شدگی فونداسیون، می‌تواند مقدار قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای را قبل از رسیدن به رو بنا مستهلک کند. به عبارت دیگر رفتار غیرخطی در قالب حرکت گهواره‌ای فونداسیون و بسیج شدن ظرفیت باربری، منجر به استهلاک انرژی لرزه‌ای و کاهش نیروهای اینرسی قبل از اعمال به روسازه می‌گردد و در نتیجه باعث کاهش نیروها در اعضای اصلی سازه‌ای و افزایش ایمنی سازه می‌گردد.

مطالعات عددی متعددی برای ارزیابی پاسخ سازه‌ها تحت لرزش‌های شدید با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سیستم انجام شده است. برای مثال بولیستی و همکاران (Boliseti et al., 2018) به تفاوت‌های فاحشی بین نتایج مدل‌های خطی- که در آن اثراتی مانند شکاف سطحی^۱، لغزش^۲ و بلند شدگی پی^۳ در مجاورت مرز خاک-سازه نادیده گرفته شده بود - و مدل‌های غیرخطی اشاره کردند. یک تحلیل دینامیکی غیرخطی، توسط رحیم و هایشیکاکا (Raheem & Hayashikawa, 2013) برای پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای برج‌های پل کابلی با فونداسیون گسترده انجام شد و تحلیل دینامیکی غیرخطی با مدل خطی مقایسه گردید. نتایج آنها چنین بیان نمود که مدل غیرخطی پاسخ جابه‌جایی لرزه‌ای را تغییر می‌دهد و نیروی اعضای سازه‌ای را کاهش می‌دهد.

بهنام‌فر و همکاران (Behnamfar et al., 2017) اثرات بلند شدگی پی و اندرکنش خاک-سازه را بر پاسخ لرزه‌ای غیرخطی چندین سازه بتن مسلح و فولادی تحت حرکات ثابت زمین مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که برش

(Tohidvand et al., 2022). کاواشیما و ناگای (Kawashima & Nagai, 2006) نشان دادند که فشار برخاست (بلند شدگی) در فونداسیون در زمان وقوع زمین‌لرزه اتفاق می‌افتد که برای مثال به‌طور گسترده‌ای در زمین‌لرزه‌های آتن (۱۹۹۹)، آلاسکا (۱۹۶۴) و سان‌فرناندو (۱۹۷۱) مشاهده گردیده است. همچنین بیان کردند زمانی که فونداسیون‌های واقع شده در خاک فقط تحت بارهای ثقلی قرار می‌گیرند و در معرض زمین‌لرزه بزرگ قرار دارند حرکت گهواره‌ای فونداسیون اجتناب‌ناپذیر است. در صورت چشم‌پوشی از حرکت گهواره‌ای فونداسیون که می‌تواند در طراحی لرزه‌ای محافظه‌کارانه باشد، پیش‌بینی نیروهای لرزه‌ای بزرگ‌تر اعمال شده بر سازه‌ها، اثرات احتمالی ناشی از حرکت گهواره‌ای مثل جابه‌جایی جانبی بزرگ سازه و نشست‌های دائمی در خاک می‌توانند منجر به عواقب فاجعه‌بار شوند (Esmatkhah Irani et al., 2021).

حرکت گهواره‌ای برای عملکرد کلی سیستم ستون-فونداسیون مطلوب است. به خاطر طبیعت جنبشی و متناوب جابه‌جایی‌های لرزه‌ای، گسیختگی در خاک و یا بلند شدگی فونداسیون ناشی از بارگذاری ترکیبی گشتاور-برش-بارگذاری قائم منجر به فروپاشی سازه نمی‌شود. سازه‌های بسیار زیادی روی فونداسیون‌های کم‌عمق و در معرض رویدادهای لرزه‌ای وجود داشته است که با حرکت گهواره‌ای فونداسیون‌های کم‌عمق خود از آسیب شدید جلوگیری کرده‌اند.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط گاجان و همکاران (Gajan & Kutter, 2008)، آناستاسوپولوس و همکاران (Anastasopoulos et al., 2011) و هخامنشی (Hakhamaneshi, 2014) زمانی که یک سیستم سازه‌ای در معرض یکسری نیرو از جمله نیروی عمودی وارد شده به مرکز ثقل سازه و نیروی افقی اعمال شده در یک ارتفاع مشخصی از سازه قرار می‌گیرد، سه مؤلفه از اثرات بار خارجی، عمودی، جانبی و گشتاور در نقطه مرکزی فونداسیون عمل می‌کنند. تحت چنین بارگذاری، فشار برخاست متناوب فونداسیون، لغزش در سطح مشترک خاک-فونداسیون (سطح مشترک غیرپلاستیک) و گسیختگی باربری در

شکل‌ها و جابه‌جایی‌های دائمی سیستم خاک - فونداسیون با تعیبه شمع‌ها در سیستم خاک - فونداسیون مطالعاتی را انجام دادند. تحقیقات دیگری برای ارزیابی اثر شکل فونداسیون بر پاسخ گهواره‌ای فونداسیون‌ها انجام شده است. گازتاس و همکاران (Gazetas et al., 2013) اثرات سختی غیرخطی و استاتیکی پی‌های گهواره‌ای مربع، مستطیل، دایره‌ای و نواری را در یک مطالعه عددی بررسی کردند. هخامنشی و کاتر (Hakhamaneshi & Kutter, 2016) اثر شکل فونداسیون را (پی‌های مستطیلی و H شکل) بر روی عملکرد گهواره‌ای فونداسیون‌های سطحی در یک سری آزمایش سانتیفریوژ بررسی کردند. آنها خاطر نشان کردند که عملکرد گهواره‌ای پی‌ها از نظر فشار برخاست (بلند شدگی)، نشست باقیمانده، نسبت مرکزگرایی^۷ و استهلاک انرژی^۸ لرزه‌ای به شدت متأثر از شکل فونداسیون می‌باشد.

تحقیقات قبلی عمدتاً بر روی عملکرد پی‌های گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای و رسی انجام شده است با این حال تاکنون هیچ تحقیقی در مورد رفتار لرزه‌ای پی‌های گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک‌های سیلتی غیر پلاستیک صورت نگرفته است.

تحقیق پیش رو به بررسی رفتار فونداسیون گهواره‌ای واقع شده بر روی خاک سیلت غیر پلاستیک توسط آزمایش‌های میز لرزه می‌پردازد. سیستم گهواره‌ای مدل شامل یک ستون فلزی، فونداسیون و عرشه فولادی برای شبیه‌سازی سیستم تک‌درجه آزادی^۹ ستون-فونداسیون می‌باشد. بارگذاری لرزه‌ای جهت شبیه‌سازی الگوهای بار زلزله به سیستم میز لرزه اعمال شده است. بررسی رفتار فونداسیون با تغییر مقادیر سطح تماس بحرانی که متناسب با ضریب اطمینان ظرفیت باربری فونداسیون (FSV) می‌باشد و همچنین تغییر در فرکانس ورودی شبیه‌سازی شده است.

۲- معرفی مکانیسم حرکت گهواره‌ای

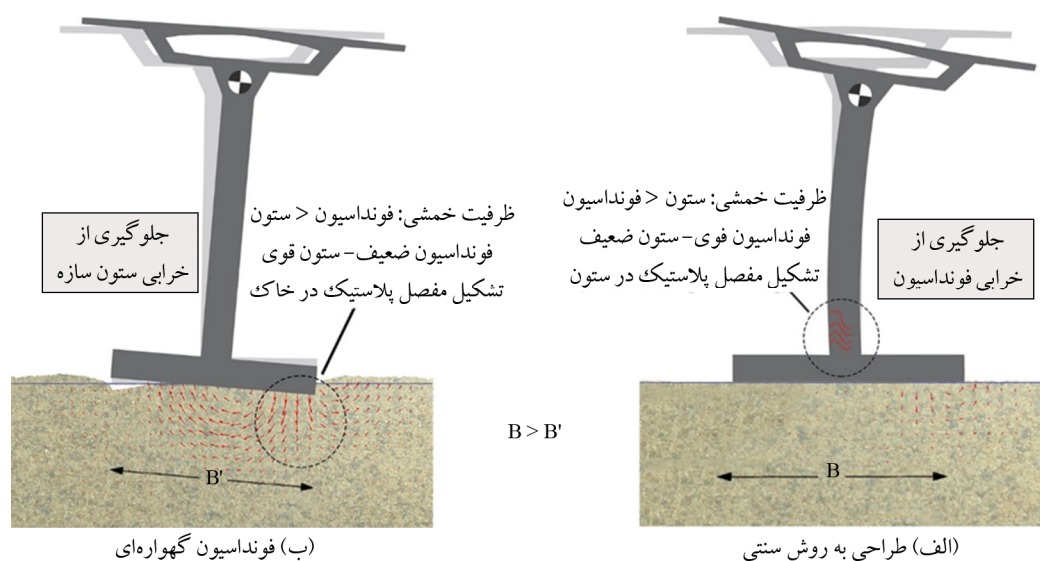
حرکات شدید زمین در زمان وقوع زمین‌لرزه منجر به گسیختگی خاک و تغییر شکل‌های دائمی می‌شود

پی طراحی شده به روش معمول و سنتی را نشان می‌دهد (Allmond & Kutter, 2014; Khezri et al., 2022).

۳- سطح تماس بحرانی

فونداسیون‌های گهواره‌ای باید ظرفیت‌های خمشی پایینی را از خود نشان دهند که با کاهش ابعاد فونداسیون می‌توان به این مهم نائل گردید. طبق تعریف سطح تماس بحرانی حداقل مقدار سطح تماس بین پی و خاک است، به طوری که لنگر واژگونی ایجاد شده بیشینه مقدار قابل تحمل برای سیستم سازه‌ای مفروض باشد. ظرفیت خمشی فونداسیون با کاهش عرض فونداسیون کاهش می‌یابد. اگر یک عرض مناسب برای فونداسیون در نظر گرفته شود، مقدار این ظرفیت خمشی می‌تواند کوچک‌تر از ظرفیت خمشی ستون باشد و حالت گهواره‌ای اتفاق می‌افتد؛ بنابراین همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، سیستم‌های گهواره‌ای یک سیستم فونداسیون ضعیف و ستون قوی نامیده می‌شوند که در آنها از شکل‌گیری مفصل‌های پلاستیک در ستون جلوگیری می‌شود (Allmond & Kutter, 2014). در ستون‌های با مفصل پلاستیک سنتی (پیشین)، ظرفیت گشتاور فونداسیون بزرگ‌تر از ظرفیت گشتاور ستون است که منجر به بسیج جابه‌جایی‌های رو سازه در اطراف مفصل ستون و متعاقباً ایجاد یک سیستم فونداسیون قوی ستون ضعیف می‌گردد.

خاک نگهدارنده (خاصیت پلاستیک خاک) در لبه‌های فونداسیون، آشکار می‌شود. مطالعات اولیه در سازه‌های با حرکت گهواره‌ای، نقش مفید فشار برخاست فونداسیون و متعاقب آن تسلیم پلاستیک خاک - فونداسیون را در بهبود عملکرد سیستم‌های سازه‌ای نشان داده‌اند. توسط سیستم گهواره‌ای، قابلیت شکل‌پذیری لرزه‌ای ستون‌های سیستم کاهش می‌یابد و مقدار قابل توجهی از انرژی لرزه‌ای در تراز فونداسیون نسبت به مفصل پلاستیک در ستون مستهلک می‌شود (Gajan & Kutter, 2008; Allmond & Kutter, 2014). مکانیسم گهواره‌ای باعث بهبود اثرات مرکزگرایی با توجه به تأثیرات پی - دلتا^۱ می‌شود. در مکانیسم ستون‌های مفصلی سنتی، تأثیرات پی - دلتا ایجاد کننده اثر زیان‌بار سختی منفی در مفصل پلاستیک ستون بوده و منجر به تغییر شکل ماندگار در سازه می‌گردد. در اثر حرکت گهواره‌ای اجازه بسیج شدن ظرفیت سیستم در سطح خاک - فونداسیون داده می‌شود و باعث توسعه مفصل پلاستیک در خاک می‌گردد. نوسان و جابه‌جایی نقطه مفصل از یک گوشه فونداسیون به گوشه دیگر منجر به اثرات مرکزگرایی گشتاور شده و باعث می‌شود سازه به حالت عمودی قبلی بازگردد. اگر ظرفیت خمشی فونداسیون کوچک‌تر از ظرفیت خمشی ستون باشد، به جای ایجاد مفصل پلاستیک در ستون، دوران پی رخ خواهد داد. شکل (۱) مقایسه‌ای از نحوه رفتار پایه‌ی پل‌ها با پی گهواره‌ای و



شکل (۱): مقایسه مکانیسم ستون - فونداسیون.

رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

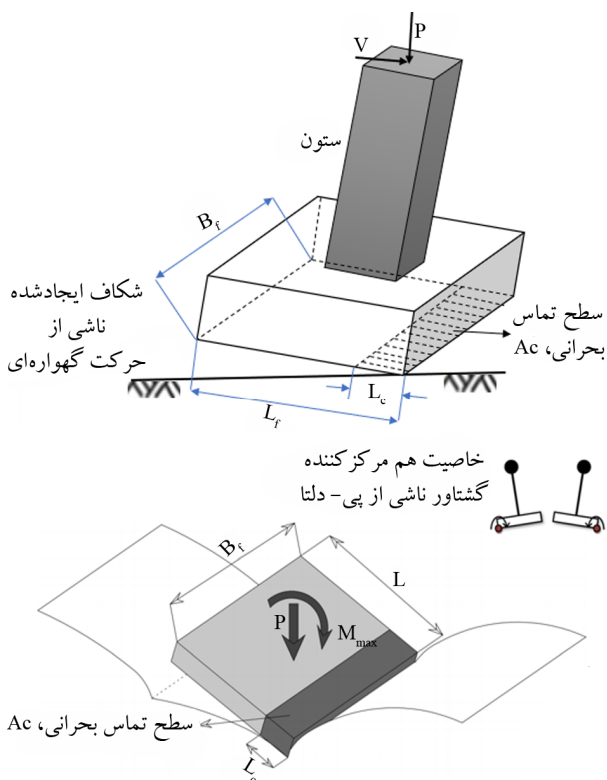
$$q_b = (s_c d_c) c' N_c + (s_q d_q) q'_0 N_q + 0.5 (s_\gamma d_\gamma) \gamma B N_\gamma \quad (2)$$

که در آن B کوچک‌ترین بعد پی، q'_0 سربار خاک γ وزن مخصوص خاک N_c ، N_q و N_γ بیانگر ضرایب ظرفیت باربری خاک d_c ، d_q و d_γ ضرایب عمق و s_c ، s_q و s_γ ضرایب شکل می‌باشند. برای یک فونداسیون گهواره‌ای، بسته به ابعاد پی و خصوصیات مکانیکی خاک، L_c ممکن است کوچک‌تر از عرض پی باشد. با در نظر گرفتن نسبت طول بحرانی به عرض پی، رابطه (۲) به صورت روابط (۳) و (۴) نوشته می‌شود:

$$q_{b-L_c} = (s_c d_c) c' N_c + (s_q d_q) q'_0 N_q + 0.5 (s_\gamma d_\gamma) \gamma L_c N_\gamma \quad L_c < B \quad (3)$$

$$q_{b-L_c} = (s_c d_c) c' N_c + (s_q d_q) q'_0 N_q + 0.5 (s_\gamma d_\gamma) \gamma B N_\gamma \quad L_c > B \quad (4)$$

شکل (۲) نمای شماتیک از سطح تماس بحرانی را در فونداسیون گهواره‌ای نشان می‌دهد.



شکل (۲): تصویر شماتیک از فونداسیون گهواره‌ای و سطح تماس بحرانی.

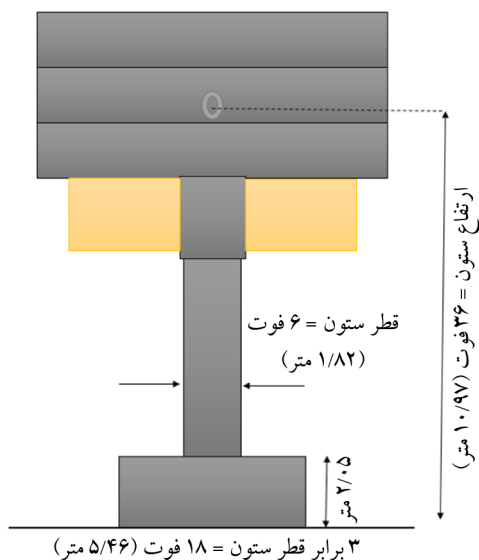
پاسخ یک فونداسیون گهواره‌ای که در معرض بارگذاری تناوبی سیکی قرار گرفته است، شامل تماس متناوب بین فونداسیون با زمین و بلند شدگی و شکاف سطحی زیر بخش باربرداری شده فونداسیون است. این مسئله منجر به تشکیل یک سطح منحنی در سطح خاک-فونداسیون می‌گردد (Gajan et al., 2005). با افزایش مقدار و بزرگی حرکت گهواره‌ای، سطح تماس بین فونداسیون و خاک زیرین کوچک‌تر می‌شود و به علت گشتاور واژگون شدگی به سمت لبه فونداسیون حرکت می‌کند. با کاهش سطح تماس، فشار باربری در امتداد سطح تماس برای ایجاد تعادل عمودی افزایش می‌یابد. تحت حرکت گهواره‌ای به اندازه کافی فونداسیون، فشار در امتداد سطح تماس موجود برابر با مقاومت نهایی شده و هیچ کاهش بیشتری در ناحیه تماس امکان‌پذیر نیست.

این حداقل ناحیه تماس برابر با سطح تماس بحرانی تعریف شده در پاراگراف قبلی یعنی (A_c) است. برای فونداسیون‌های مستطیلی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، با بارگذاری در جهت بزرگ‌تر (L)، نسبت A_c/A را می‌توان برابر با نسبت طول، L_c/L دانست که در آن L_c به عنوان طول تماس بحرانی است و مستقیماً با سطح تماس بحرانی متناسب است $L_c = A_c/B$. وقتی سازه باربرداری می‌شود، بسته به بزرگی بار محوری و حرکت گهواره‌ای ناشی از ارتعاش سازه، جاذبه می‌تواند باعث بسته شدن شکاف سطحی شود و در نتیجه مکانیسم مرکزگرایی^{۱۱} را ایجاد نماید. نتیجه حرکت گهواره‌ای یک سطح منحنی خاک-فونداسیون با گسیختگی باربری موضعی در نزدیکی لبه فونداسیون می‌باشد (Allmond & Kutter, 2014; Hakhmaneshi, 2014; Sharma & Deng, 2019). طول بحرانی یک فونداسیون گهواره‌ای را می‌توان بر اساس ملاحظات مربوط به ظرفیت باربری فونداسیون، تحت بارگذاری عمودی بر اساس رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$L_c = \frac{P}{Bq_b} \quad (1)$$

q_b بیانگر ظرفیت باربری فونداسیون سطحی بوده و با استفاده از

شبستر آذربایجان شرقی است. هندسه مدل بر اساس یک پایه پل ثابت در مقیاس کامل و بر اساس قوانین مقیاس لرزه‌ای g ۱ تعیین شده است. این ستون پروتوتیپ دارای مقطع عرضی دایره‌ای با قطر ۶ فوت (۱/۸۳ متر) است. ابعاد هندسی مدل مورد استفاده در آزمایش‌ها مطابق با تحقیقات قبلی انجام شده انتخاب شده است (Hachem et al., 2003; Sakai et al., 2006; Jeong et al., 2008). شکل (۳) ابعاد ستون و فونداسیون پروتوتیپ را نشان می‌دهد.



شکل (۳): تصویر شماتیک از ستون و فونداسیون پروتوتیپ.

از آنجایی که تفاوت‌های قابل توجهی بین سختی سازه و خاک زیرین وجود دارد، سازه به اندازه کافی صلب طراحی و ساخته شده است تا از تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه اجتناب شود. در تحقیقات صورت گرفته توسط بیشتر محققین نیز سازه ستون-فونداسیون به صورت صلب در نظر گرفته شده است (به‌عنوان مثال تحقیقات انجام شده توسط عرب‌پناهان و همکاران (Arabpanahan et al., 2021)، خضری و همکاران (Khezri et al., 2022) و گاجان و همکاران (Gajan et al., 2021) (...)). به‌منظور ایجاد تشابه فیزیکی با پروتوتیپ و همچنین محدودیت‌های جعبه میز لرزه، ضریب مقیاس هندسی، λ برابر با ۲۵ انتخاب شده است. در این راستا، از بین روش‌های مختلف، روش پیشنهادی یائی (Iai, 1989) در مطالعه حاضر جهت انجام

نسبت مساحت فونداسیون به مساحت تماسی مورد نیاز جهت تحمل بارهای عمودی A/A_c متناسب با ضریب اطمینان برای بارگذاری قائم و وابسته به ظرفیت خمشی، انرژی استهلاک و نشست دائمی محاسبه شده در آزمایش سانتریفیوژ و مدل g ۱ آزمایش‌ها می‌باشد (Gajan & Kutter, 2008). نیروهای برشی موجود در زیر فونداسیون که ناشی از اصطکاک مابین خاک و فونداسیون می‌باشد، باعث استهلاک انرژی می‌شوند و به دلیل فشار برخاست ناشی از حرکت گهواره‌ای، فونداسیون‌های کم‌عمق خصوصیات مرکز‌گرایی قابل توجهی دارند. مقادیر (F_{s_p}) ضریب اطمینان ظرفیت باربری) با توجه به خصوصیات فونداسیون و سازه و با به کار بردن معادلات ظرفیت باربری به دست می‌آید. ظرفیت گشتاور، استهلاک انرژی، فشار برخاست و نشست متناسب با این نسبت سطح تماس بحرانی A/A_c است. در صورتی که ظرفیت باربری نهایی مستقل از شکل و اندازه سطح بار باشد، مقدار عبارت A/A_c برابر با F_{s_p} (ضریب اطمینان در برابر بارگذاری قائم) است. با توجه به ضریب شکل ظرفیت باربری، ضریب عمق و $(1/2)\gamma B N_p$ در رابطه ظرفیت باربری نسبت A/A_c متفاوت از F_{s_p} می‌باشد زیرا که هندسه تماس در طول حرکت گهواره‌ای فونداسیون تغییر می‌کند.

۴- روش انجام آزمایش‌ها و آماده‌سازی مدل

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق شامل یک سیستم با یک درجه آزادی (SDOF) است، بنابراین فقط می‌تواند به صورت افقی جابه‌جا شود، که معادل چرخش پی است. برای تضمین چنین رفتار محدودی، تمام اجزای آن، از جمله فونداسیون، ستون و جرم متمرکز در بالای ستون و همچنین اتصالات آنها صلب در نظر گرفته شده و انعطاف‌پذیری سازه ستون-فونداسیون در مدل مورد استفاده در این تحقیق، در نظر گرفته نشده است. همان‌طور که در بخش قبلی بیان شد، هشت آزمون میز لرزه در شرایط مختلف، از جمله تغییر در فرکانس‌های ورودی و مقادیر مختلف A/A_c انجام شده است. خاک مورد استفاده در این آزمایش سیلت غیر پلاستیک منطقه

۲-۴- ابعاد فونداسیون مدل

ابعاد فونداسیون در سازه اصلی ۳ برابر قطر ستون در نظر گرفته شده است که برابر با ۵/۴۸۴ متر است. با در نظر گرفتن ضریب مقیاس ۲۵ = λ ابعاد فونداسیون مدل عبارت است از:

$$L_m = L_p / \lambda = \frac{5.484 \text{ m}}{25} = 0.23 \text{ m} \quad (\text{طول})$$

$$B_m = B_p / \lambda = \frac{5.484 \text{ m}}{25} = 0.23 \text{ m} \quad (\text{عرض})$$

$$t_m = t_p / \lambda = \frac{2.05 \text{ m}}{25} = 0.082 \text{ m} \quad (\text{ضخامت})$$

۳-۴- ارتفاع ستون مدل

ارتفاع ستون مدل نیز با همان نسبت ۲۵ = λ محاسبه شده است که برابر است با:

$$H_m = H_p / \lambda = \frac{10.97 \text{ m}}{25} = 0.438 \text{ m}$$

شکل (۴) نمای شماتیک مدل طراحی شده (شامل ابعاد هندسی ستون و فونداسیون مدل) را نشان می‌دهد.

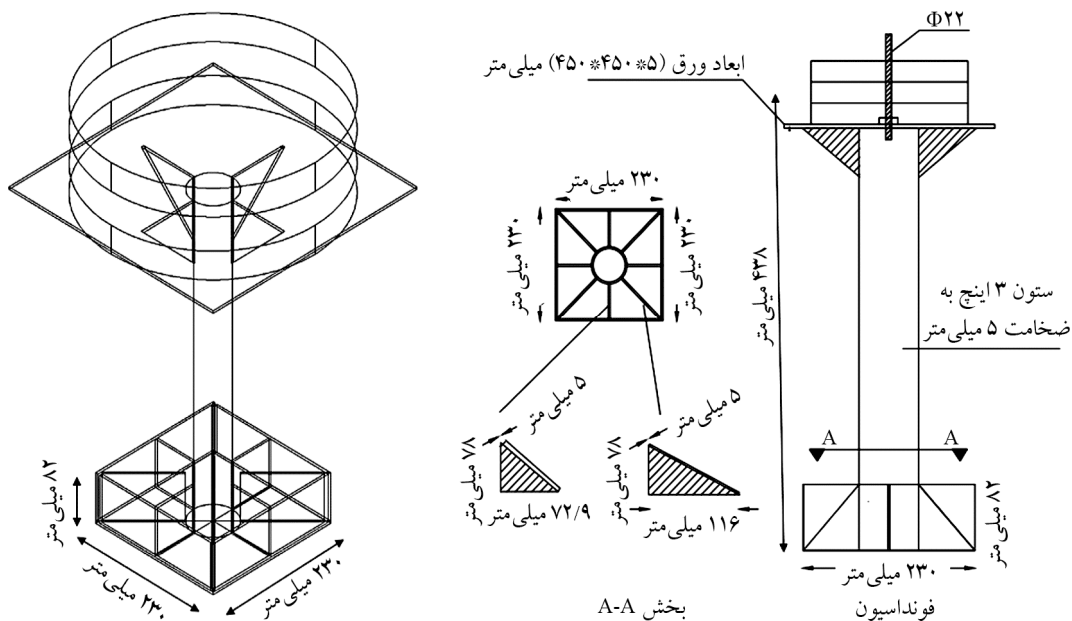
در این تحقیق برای ارزیابی اثرات A/A_c از چهار مقدار انتخابی مختلف برابر با (۱/۸۱، ۲/۳۷، ۲/۵۲، ۲/۶۹) استفاده شده است. این مقادیر مختلف توسط جرم‌های متمرکز اعمال شده در امتداد مرکز ثقل سازه و بر روی ورق اتصال یافته به بالای ستون به دست می‌آیند.

تشابه فیزیکی استفاده شده است. با توجه به اینکه فرض اولیه طراحی و استفاده از پی‌های گهواره‌ای، صلیبیت کافی روسازه و انتقال آسیب‌های محتمل زلزله به خاک می‌باشد. مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش تنها با در نظرگیری مقیاس‌بندی هندسی بوده و مقیاس‌بندی مشخصات مکانیکی روسازه و فونداسیون رعایت نشده است (به‌ویژه در آزمایش‌های میز لرزه، با توجه به اینکه شرایط تنش با شرایط واقعی متفاوت است، امکان برقراری هم‌زمان مقیاس‌بندی هندسی و مکانیکی مقدور نخواهد بود). بنابراین جنس مصالح به کار رفته در روسازه صرفاً بر اساس تأمین صلیب کافی در برابر حرکات لرزه‌ای و رفتار گهواره‌ای پی انتخاب و مورد استفاده قرار گرفته است. محاسبات انجام شده جهت به دست آوردن ابعاد هندسی مدل آزمایش به شرح زیر می‌باشد:

۱-۴- قطر ستون مدل

قطر ستون نمونه اصلی برابر ۶ فوت (۱/۸۲۸ متر) می‌باشد. با توجه به ضریب مقیاس ۲۵ = λ مقدار قطر در نظر گرفته شده مدل برابر است با:

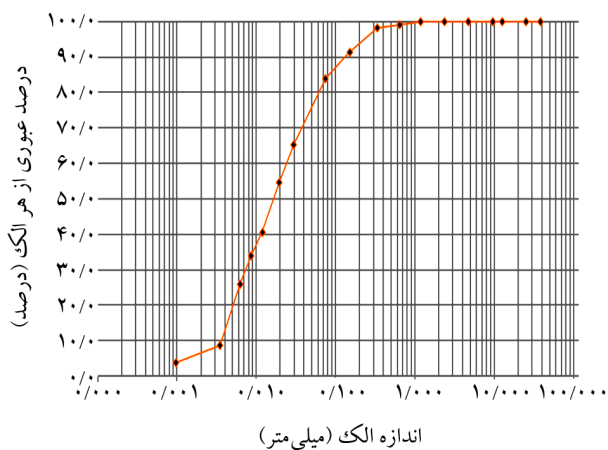
$$D_m = \frac{D_p}{\lambda} = \frac{1.828 \text{ m}}{25} = 0.073 \text{ m} \approx \text{Tube 3 inch}$$



شکل (۴): تصویر شماتیک از مدل ستون-فونداسیون برای انجام آزمایش‌ها.

در اکثریت متون فنی به تأثیر تراکم بالای خاک در عملکرد بهینه فونداسیون‌های گهواره‌ای اشاره شده و از اصطلاح خاک مناسب^{۱۲} برای دستیابی به بهترین عملکرد سیستم استفاده شده است.

علاوه بر این در متون فنی زیادی به منظور بالا بردن کارایی سیستم، عملیات تراکم، تسلیح و بهسازی خاک جهت بهبود عملکرد سیستم صورت گرفته است. در انتها توسط آزمایش دانسیته در محل همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است تراکم خاک اندازه‌گیری شده است.



شکل (۵): منحنی دانه‌بندی خاک سیلت مورد استفاده در آزمایش‌ها.

جدول (۱): خلاصه مشخصات فیزیکی سیلت غیر پلاستیک شیبتر.

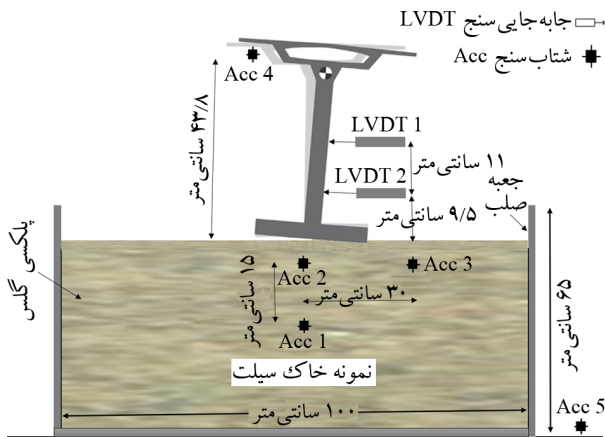
Dr	ϕ	C	G _s	e_{min}	e_{max}	خصوصیات فیزیکی
٪۷۵	۳۳/۶	۰	۲/۶۷	۰/۶۷	۱/۱۱	

جرم‌های مورد نیاز برای به دست آوردن نسبت‌های در نظر گرفته شده A/A_c معادل (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۶۰) کیلوگرم توسط فرمول‌های ظرفیت باربری محاسبه شده است. ورق متصل شده به انتهای ستون به ضخامت ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده تا از هرگونه تغییر شکل در برابر بارهای لرزه‌ای و استاتیکی اعمال شده جلوگیری نماید. در این تحقیق نسبت عمق مدفون‌شدگی (D/B) برابر با صفر در نظر گرفته شد و رو بنا مستقیماً بر روی سطح بستر خاک قرار داده شده است. یک جعبه صلب با ابعاد $۶۵ \times ۱۰۰ \times ۶۰$ سانتی‌متر (به ترتیب، عرض، طول و عمق) به عنوان جعبه نگهدارنده خاک مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، در آزمایش‌های انجام شده از یک نوع خاک استفاده شده است. خاک سیلت غیر پلاستیکی مورد استفاده از حاشیه رودخانه شبستر در استان آذربایجان شرقی تهیه شده است. شکل (۵) نشان‌دهنده نمودار دانه‌بندی خاک سیلت و همچنین جدول (۱)، ویژگی‌های اصلی خاک مورد استفاده برای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به ارتفاع جعبه، تراکم نمونه خاک با رطوبت بهینه ۵ درصد و توسط چکش و ویراتور مکانیکی تا رسیدن به تراکم ۷۵ درصد صورت گرفته است. در عمل، استفاده از خاک با تراکم بالا منجر به کاهش نشست‌ها و دوران در سازه و متعاقباً منجر به کاهش خرابی و انهدام در سازه می‌گردد. اصولاً برای بهبود عملکرد لرزه‌ای در سیستم‌های گهواره‌ای بایستی از خاک با درصد تراکم بالا استفاده گردد.

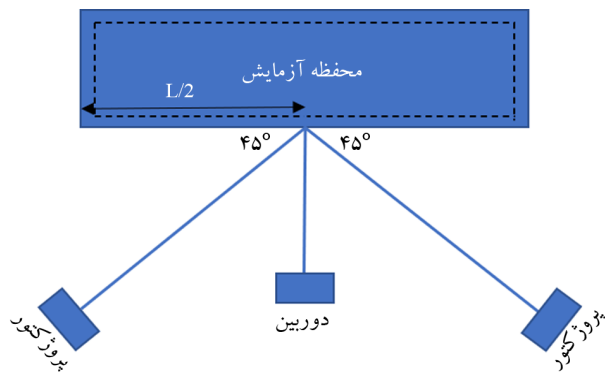


شکل (۶): آزمایش دانسیته در محل برای اندازه‌گیری درصد تراکم خاک.

زاویه ۴۵ درجه در ارتفاعی بالاتر نسبت به محور نوری دوربین مطابق شکل (۸) مستقر شده است.

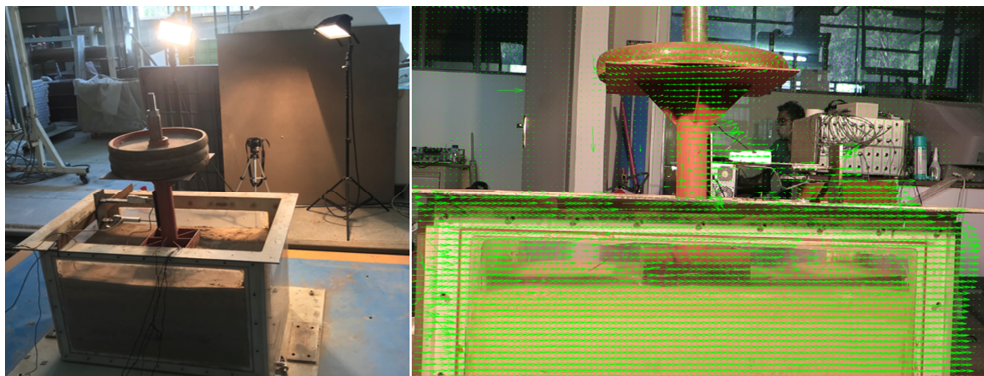


شکل (۷): جعبه آزمایش و محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها و LVDT های افقی.



شکل (۸): تصویر شماتیک نحوه قرارگیری دوربین و پروژکتور نسبت به محفظه آزمایش.

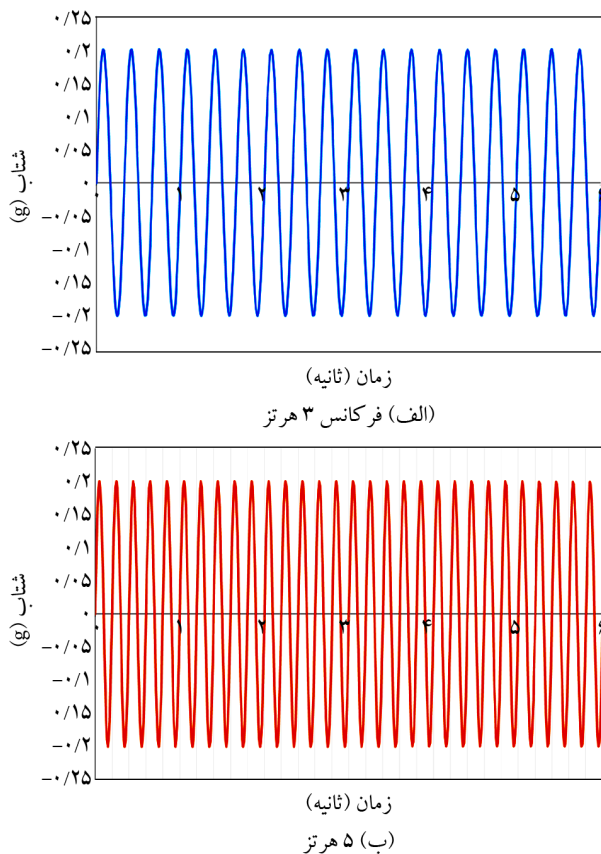
شکل (۹) نشان‌دهنده دوربین و پروژکتورها و همچنین نمونه‌ای از پردازش‌های تصویری صورت گرفته توسط مجموعه کد PIV Lab (نوشته شده در محیط نرم‌افزار متلب) است.



شکل (۹): تصویر شماتیک نحوه قرارگیری دوربین و پروژکتور نسبت به محفظه آزمایش و آنالیز PIV Lab.

به منظور ثبت داده‌های شتاب و جابه‌جایی برای آزمایش‌های انجام شده، از ابزارهای اندازه‌گیری متشکل از شتاب‌سنج‌ها^{۱۳} و میدل تفاضلی متغیر خطی^{۱۴} (LVDT) در مکان‌های مختلف استفاده شده است. محل شتاب‌سنج‌ها و LVDT های افقی در شکل (۷) نشان داده شده است و به ترتیب با برجسب‌های ACC و LVDT در این شکل مشخص شده‌اند. در این راستا، ACC5 که روی عرشه میز لرزه نصب شده است، جهت کنترل موج لرزای اعمال شده توسط سیستم و موج ثبت شده بر روی میز لرزه مورد استفاده قرار گرفته است. شتاب‌سنج شماره ۱ (ACC1) در قسمت پایینی نقطه میانی فونداسیون و در فاصله عمودی ۱۵۰ میلی‌متری آن نصب شده است، شتاب‌سنج شماره ۲ (ACC2) در بالای شتاب‌سنج شماره ۱ و با فاصله عمودی ۱۰۰ میلی‌متر از آن و ۵۰ میلی‌متر از پایین فونداسیون قرار دارد. شتاب‌سنج شماره ۳ (ACC3) در سمت راست و هم‌تراز با شتاب‌سنج شماره ۲ و در فاصله افقی ۳۰۰ میلی‌متری آن واقع شده است. شتاب‌سنج شماره ۴ روی مرکز جرم روبنا قرار گرفته است. علاوه بر این، LVDT1 و LVDT2 در روبروی ستون قرار گرفتند تا جابه‌جایی افقی سازه و دوران را در آن موقعیت ثبت کنند. فاصله بین دو LVDT، ۱۱۰ میلی‌متر است.

برای اندازه‌گیری نشست مدل، از روش سرعت سنجی تصویر ذرات^{۱۵} استفاده شده است. برای عکس و فیلم‌برداری جهت انجام آزمایش‌ها، دوربین دیجیتال با وضوح تصویر ۱۴ مگاپیکسل بر روی سه پایه قرار گرفته و نسبت به سطح افق تراز گردیده است. همچنین برای تأمین نور محیط از دو عدد پروژکتور ۱۰۰۰ وات مخصوص نورپردازی استفاده شده که با



شکل (۱۰): تاریخچه زمانی شتاب استفاده شده با فرکانس‌های مختلف.

جدول (۲): جزئیات برنامه آزمایش‌ها.

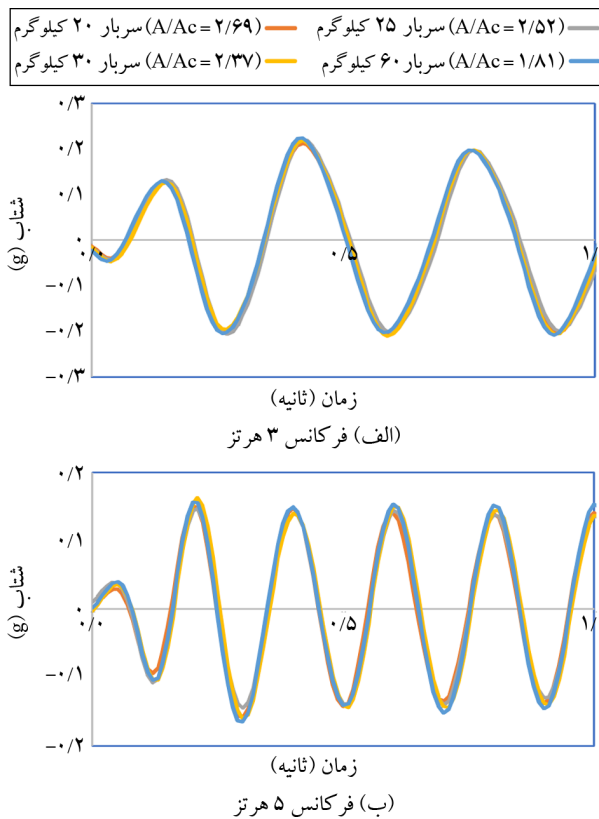
نام آزمایش	نوع خاک	فرکانس ورودی (هرتز)	جرم متمرکز روباره (کیلوگرم)	A/A_c
آزمایش ۱	سیلت	۳	۲۰	۲/۶۹
آزمایش ۲	سیلت	۳	۲۵	۲/۵۲
آزمایش ۳	سیلت	۳	۳۰	۲/۳۷
آزمایش ۴	سیلت	۳	۶۰	۱/۸۱
آزمایش ۵	سیلت	۵	۲۰	۲/۶۹
آزمایش ۶	سیلت	۵	۲۵	۲/۵۲
آزمایش ۷	سیلت	۵	۳۰	۲/۳۷
آزمایش ۸	سیلت	۵	۶۰	۱/۸۱

۵- تحلیل مشاهدات و نتایج آزمایشگاهی

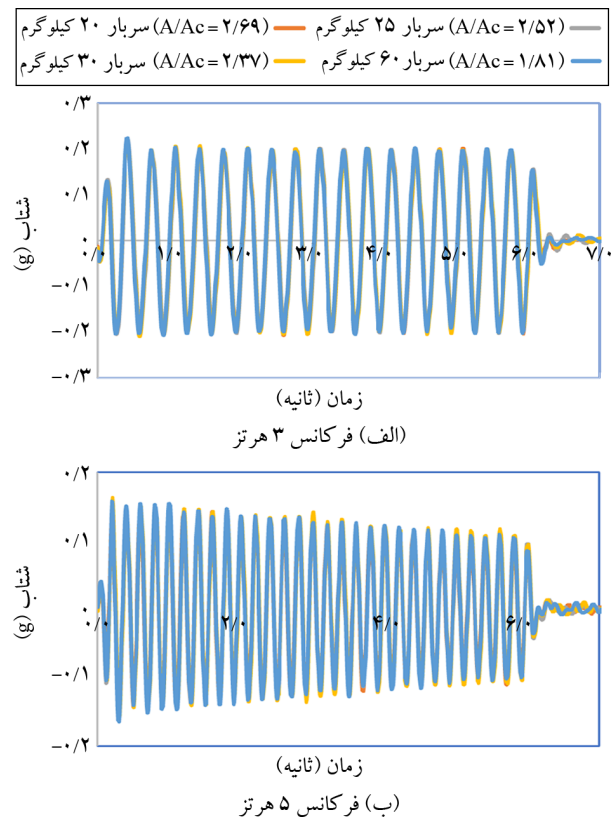
در این بخش، نتایج به‌دست آمده، ارائه و مورد بحث قرار گرفته است. برای حرکت لرزه‌ای با فرکانس ۳ هرتز، تاریخچه‌های زمانی شتاب ثبت شده در یکی از شتاب‌سنج‌ها، برای نمونه شتاب‌سنج شماره ۲ (ACC2) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

دو حرکت ورودی با فرکانس‌های مختلف برای بررسی اثرات تحریک لرزه‌ای ورودی بر نتایج استفاده شده است. اگرچه بارهای لرزه‌ای سینوسی یکنواخت نمی‌توانند تمام جزئیات یک موج لرزه‌ای را منعکس کنند، برای سادگی و قضاوت اولیه، معمولاً به جای تاریخچه‌های زمانی پیچیده، از امواج سینوسی معادل استفاده می‌شود. علاوه بر این به دلیل ماهیت پیچیده زمین‌لرزه‌ها و پارامترهای مختلفی که در اندرکنش لرزه‌ای خاک و سازه گنجانده شده است، برای ارزیابی اثرات فرکانس حرکت ورودی، موج سینوسی با دو فرکانس مختلف در نظر گرفته شده است. با استفاده از چنین حرکت ورودی ساده می‌توان نتایج به‌دست آمده را به فرکانس حرکت مرتبط کرد (برای یک موج یکنواخت با دامنه و پریود معین، می‌توان از فرکانس‌های مختلف استفاده کرده و نتایج را به‌عنوان تأثیر فرکانس تفسیر کرد) به‌عنوان مثال، گاجان و کاتر (Gajan & Kutter, 2008)، عرب‌پناهان و همکاران (Arabpanahan et al., 2021) و سایر محققان از حرکات ورودی هارمونیک در مطالعات خود استفاده کرده‌اند. حرکات ورودی اتخاذ شده در شکل (۱۰) نشان داده شده است و همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حرکات با فرکانس‌های ۳ و ۵ هرتز بر روی مدل‌ها اعمال گردیده است. بر اساس آئین‌نامه ۲۸۰۰ و با در نظر گرفتن طیف طراحی نرمال سازه‌ها در خاک‌های متراکم، حداکثر نیروهای برشی در بازه دوره تناوبی ۰/۱۵ تا ۰/۴۵ ثانیه است که این بازه برای فرکانس در محدوده (۶/۶۶ هرتز و ۲/۲۲ هرتز) ایجاد می‌شود. بنابراین، فرکانس‌های ورودی به کار رفته (۳ هرتز و ۵ هرتز) در بحرانی‌ترین محدوده فرکانس‌های حرکت ورودی آئین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای قرار گرفته و از آنها برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای در آزمایش‌ها استفاده شده است.

همچنین در ادبیات فنی، محدوده مشابهی از فرکانس‌ها برای حرکات ورودی توسط برخی محققین دیگر از جمله عرب‌پناهان و همکاران (Arabpanahan et al., 2021) و کو و همکاران (Ko et al., 2021) و استفاده شده است (جدول ۲).



شکل (۱۲): مقایسه نتایج شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج شماره ۲ (ACC2) برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c برای بازه زمانی صفر تا ۱ ثانیه.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج شتاب ثبت شده توسط شتاب‌سنج شماره ۲ (ACC2) برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c .

روند تغییرات بدین صورت است که با افزایش پارامتر A/A_c ، شتاب‌های پیک رخ داده کاهش می‌یابند. حداکثر شتاب ثبت شده در خاک برای آزمایش انجام شده با حداکثر وزن روباره A/A_c برابر با $1/81$ و حداقل مقدار برای حداقل وزن روباره A/A_c برابر با $2/69$ رخ داده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پارامتر A/A_c منجر به کاهش جزئی در شتاب حداکثر ثبت شده در خاک می‌گردد که این مورد می‌تواند مرتبط با جرم سیستم و کاهش نیروی اینرسی ناشی از کاهش وزن در مجاورت حسگر ثبت کننده شتاب باشد. علاوه بر این برای حسگرهای واقع شده در داخل توده خاک، نزدیکی مقادیر شتاب‌ها نشان‌دهنده شرایط مدل‌سازی و اعمال شتاب یکسان در تمامی آزمایش‌ها بوده و مرتبط با صحت مدل‌سازی و اعمال بار لرزه‌ای مشابه در همه تست‌ها می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزایش پارامتر A/A_c که معادل افزایش ضریب اطمینان ظرفیت باربری پی است تأثیر قابل

همان‌طور که در تصویر نمایش داده شده است تفاوت معنی‌داری در مقادیر شتاب ثبت شده در شتاب‌سنج‌های قرار داده شده درون پروفیل خاک مشاهده نمی‌شود و بیانگر این موضوع است که تغییر پارامتر A/A_c نمی‌تواند بر شتاب‌های ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌های واقع شده در داخل پروفیل خاک تأثیرات معنی‌داری را ایجاد کند.

نمودارهای رسم شده در شکل (۱۱) در بازه زمانی بین صفر تا ۱ ثانیه دوباره ترسیم شده‌اند تا تغییرات در مقادیر ثبت شده شتاب‌سنج با وضوح بیشتری مشاهده شود. شکل (۱۲) تفاوت ناشی از تغییر پارامتر A/A_c در فرکانس‌های ۳ و ۵ هرتز برای شتاب‌های ثبت شده در شتاب‌سنج شماره ۲ (ACC2) و در بازه زمانی ذکر شده را نشان می‌دهد.

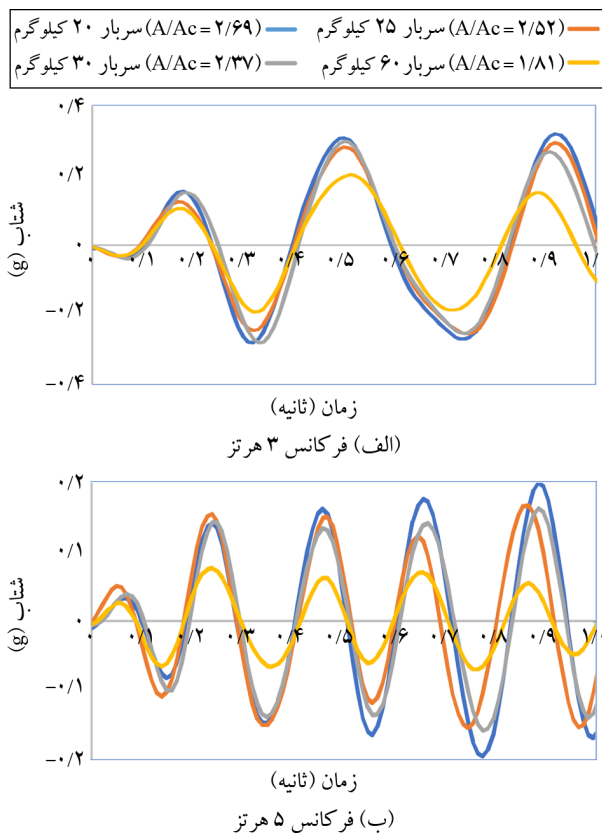
همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، تغییرات در پارامتر A/A_c منجر به یک تفاوت جزئی و ناچیز مابین شتاب‌های ثبت شده برای شتاب‌سنج مستقر در داخل توده خاک می‌شود.

نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر A/A_c ، میزان شتاب ثابت شده بر روی شتاب‌سنج واقع شده بر روی مرکز جرم سازه افزایش می‌یابد. این مشاهدات برعکس نتایج به‌دست آمده برای شتاب‌سنج‌های شماره ۱ تا ۳ واقع شده در داخل پروفیل خاک می‌باشد (که در آن با افزایش پارامتر A/A_c میزان شتاب ثابت شده کاهش می‌یابد و این کاهش بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر کردن است) در حالی که بر روی سازه این تغییرات قابل توجه می‌باشند. برای شتاب‌سنج‌های واقع شده بر روی مرکز جرم سازه فلسفه اصلی کاهش پاسخ در حرکت گهواره‌ای نسبت به پی بدون درجه آزادی دو مورد است: اول فاصله گرفتن پیوند طبیعی سازه از پیوند موج ورودی (با فعال شدن بلند شدگی پی از روی خاک و افزایش پیوند طبیعی سازه) و دوم، بروز رفتار غیرخطی و غیر الاستیک در خاک زیر پی و در نتیجه افزایش میرایی سیستم خاک-پی. در بررسی نتایج شتاب مرکز جرم سازه همان‌طور که مشاهده می‌شود پاسخ سازه سنگین‌تر (A/A_c پایین‌تر)، کمتر از سازه سبک‌تر می‌باشد.

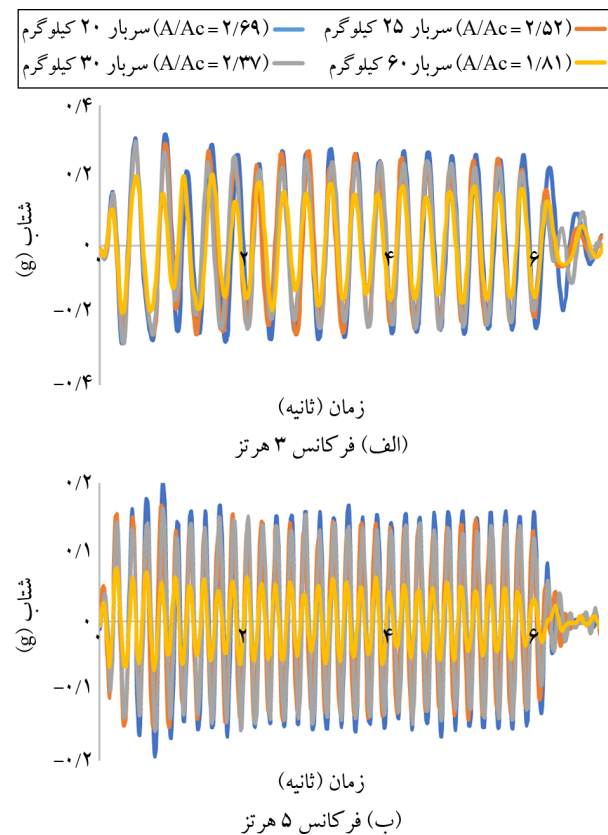
توجهی در شتاب‌های ثابت شده در شتاب‌سنج‌های واقع شده در داخل توده خاک ندارد. در قسمت بعدی نتایج شتاب‌های ثابت شده بر روی شتاب‌سنج نصب شده بر روی مرکز جرم سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۳) نشان‌دهنده نتایج شتاب‌های ثابت شده در حین آزمایش بر روی شتاب‌سنج شماره ۴ ($ACC4$) همراه با تغییر در پارامتر A/A_c است.

مشابه آزمایش قبلی، نمودارهای ترسیم شده در شکل (۱۳) در بازه زمانی ۰ تا ۱ ثانیه دوباره ترسیم شده‌اند تا تغییرات در مقادیر ثابت شده با وضوح بیشتری قابل مشاهده باشند. شکل (۱۴) نمودار شتاب‌های ثابت شده در شتاب‌سنج شماره ۴ ($ACC4$) را در بازه زمانی ذکر شده نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، تغییرات معنی‌داری در نمودارهای شتاب ثابت شده در شتاب‌سنج شماره ۴ واقع شده بر روی مرکز جرم سازه مشاهده می‌شود و مقدار شتاب ثابت شده با تغییر در مقادیر پارامتر A/A_c تغییر می‌کند. شکل (۱۴)



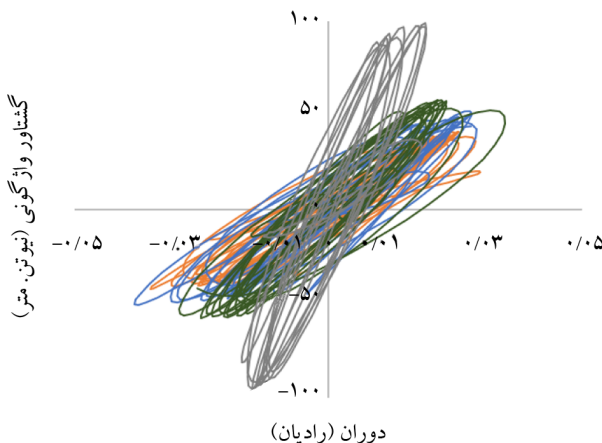
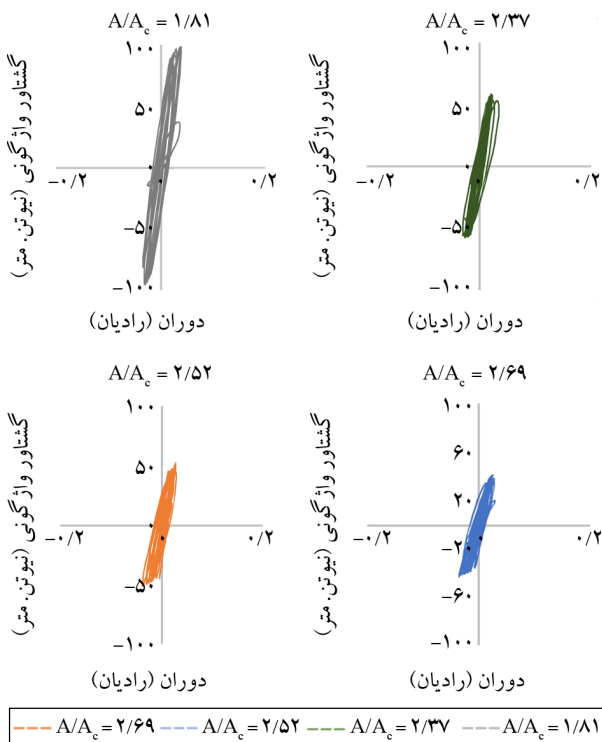
شکل (۱۴): مقایسه نتایج شتاب ثابت شده توسط شتاب‌سنج شماره ۴ ($ACC4$) برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c در بازه زمانی صفر تا ۱ ثانیه.



شکل (۱۳): مقایسه نتایج شتاب ثابت شده توسط شتاب‌سنج شماره ۴ ($ACC4$) برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c .

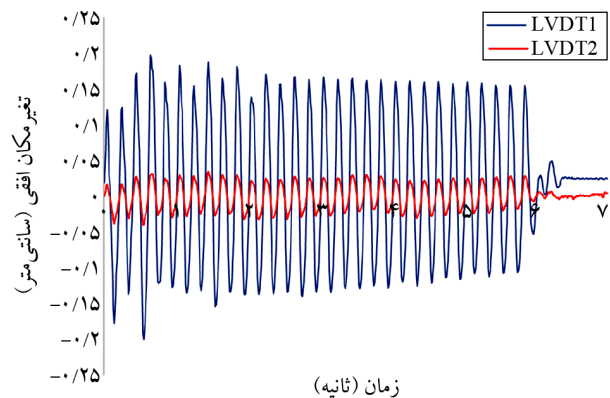
LVDT میزان دوران سازه در طول انجام آزمایش قابل اندازه‌گیری می‌باشد.

همان‌طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده است، با افزایش جرم متمرکز (مرتبط با کاهش پارامتر A/A_c) حداکثر چرخش و دوران سازه ناشی از حرکت گهواره‌ای کاهش می‌یابد. علاوه بر این، شکل (۱۷) نشان می‌دهد که دوران‌ها و گشتاور واژگونی در سازه با افزایش فرکانس حرکت ورودی کاهش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس ورودی تأثیر قابل توجهی بر گشتاورهای واژگونی و دوران سازه دارد.



شکل (۱۶): نمودار دوران-گشتاور واژگونی با تغییر در پارامتر A/A_c برای فرکانس ورودی ۳ هرتز.

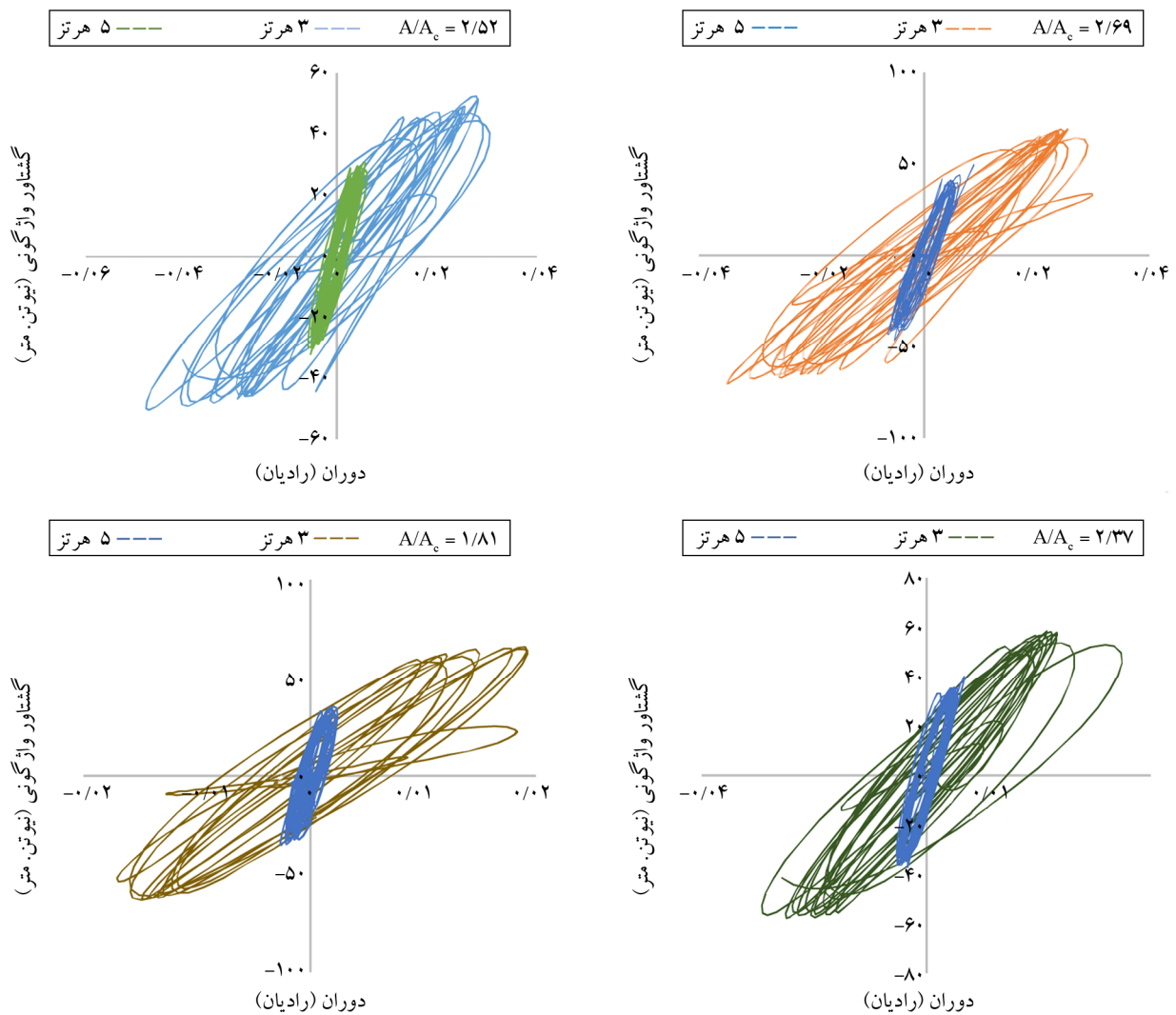
با توجه به فلسفه مکانیسم گهواره‌ای می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که با افزایش جرم سازه، پریود طبیعی سازه افزایش می‌یابد و باعث می‌شود که با شروع نوسانات پی، پریود طبیعی سازه فاصله بیشتری از پریود موج ورودی (یک‌سوم یا یک‌پنجم ثانیه) بگیرد و پاسخ سازه کاهش بیشتری پیدا کند. به علاوه با توجه به ضریب اطمینان باربری کمتر خاک در سازه سنگین‌تر، رفتار غیرخطی و جذب انرژی توده خاک زیر پی در سازه سنگین، بیشتر از سازه سبک بوده و در نتیجه آن، پاسخ سازه کاهش یافته است. بنابراین، افزایش پارامتر A/A_c منجر به افزایش شتاب‌های القایی روسازه برای هر دو تحریک با فرکانس ورودی ۳ و ۵ هرتز گردیده است. همچنین با دقت در این نمودارها مشاهده می‌شود که با کاهش فرکانس ورودی، حداکثر شتاب‌های ثبت شده افزایش می‌یابد.



شکل (۱۵): نتایج LVDT‌های یکی از آزمایش‌های انجام شده برای محاسبه دوران و جابه‌جایی افقی سازه.

در ادامه به بررسی نمودار دوران در برابر لنگر واژگونی پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است برای اندازه‌گیری دوران سازه از دو مبدل تفاضلی متغیر خطی (LVDT) استفاده شده است (محل LVDT‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است)، که برای نمونه نتایج حاصل از یکی از آزمایش‌ها برای LVDT‌های شماره ۱ و ۲ مطابق شکل (۱۵) است.

با توجه به اینکه فاصله قائم مابین دو LVDT برابر با ۱۱ سانتی‌متر است با کمک گرفتن از جابه‌جایی افقی و فاصله قائم میان دو



شکل (۱۷): اثر فرکانس بر نمودار گشتاور واژگونی در برابر دوران برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c .

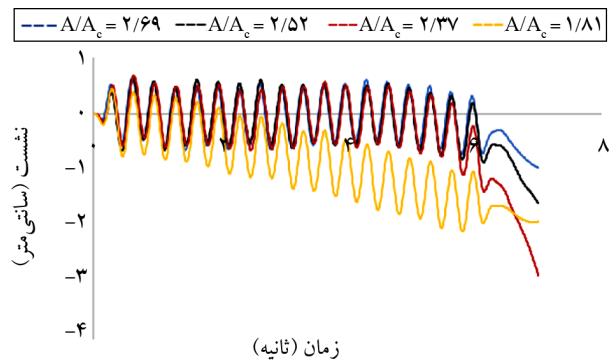
آسیب‌های جدی به سازه شود (Esmatkhah Irani et al., 2022). در سیستم فونداسیون‌های گهواره‌ای بررسی نشست فونداسیون از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا دوران و نشست ماندگار بیش از حد مجاز می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی در عناصر سازه‌ای شود. شکل (۱۸) نتایج نشست‌های ثبت شده را با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویر ذرات همان‌طور که در قسمت قبلی توضیح داده شده است، نشان می‌دهد. با دقت در این نمودارها مشهود است که افزایش پارامتر A/A_c منجر به کاهش نشست‌های ثبت شده برای هر دو فرکانس ورودی ۳ و ۵ هرتز می‌گردد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که حداقل نشست‌ها برای آزمایش‌های با مقدار $A/A_c = 2/69$ رخ داده است،

با کاهش A/A_c سیستم، تغییر شکل از حلقه‌های پسماند گشتاور-دوران نازک به حلقه‌های ضخیم و چاق و بیضی شکل در شکل تبدیل می‌شوند. پیکربندی حلقه‌های پسماند گشتاور-دوران توسط ناحیه تماس بین فونداسیون و خاک زیرین در حین حرکت گهواره‌ای کنترل می‌شود. سیستمی با A/A_c بالاتر که معادل ضریب اطمینان بالاتر است می‌تواند بار عمودی را تحمل کند که بخش کوچک‌تری از ناحیه فونداسیون خود را درگیر می‌کند، در حالی که سیستم با A/A_c کوچک‌تر که معادل ضریب اطمینان کمتر می‌باشد برای تحمل بار عمودی نیاز به درگیری ناحیه بزرگ‌تر فونداسیون در حین حرکت گهواره‌ای دارد. نشست‌های بیش از حد مجاز می‌تواند منجر به خرابی و

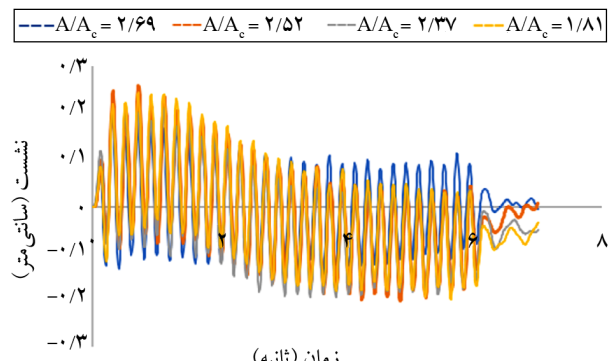
علاوه بر این، سیستم‌های گهواره‌ای یک سیستم فونداسیون ضعیف و ستون قوی می‌باشند که در آنها از شکل‌گیری مفصل‌های پلاستیک در ستون جلوگیری می‌شود. در ستون‌های با مفصل پلاستیک سنتی (پیشین)، ظرفیت گشتاور فونداسیون بزرگ‌تر از ظرفیت گشتاور ستون بوده و این امر منجر به بسیج جابه‌جایی‌های رو سازه در اطراف مفصل ستون و متعاقباً ایجاد یک سیستم فونداسیون قوی ستون ضعیف می‌گردد. در طراحی پل‌های واقعی میزان تغییر شکل‌ها و نشست‌های ناشی از حرکت گهواره‌ای به‌طور کامل بررسی می‌گردند. طبیعت جنبشی و متناوب جابه‌جایی‌های لرزه‌ای، گسیختگی در خاک و یا فشار برخاست فونداسیون ناشی از بارگذاری ترکیبی گشتاور-برش-بارگذاری قائم منجر به فروپاشی سازه در سیستم‌های گهواره‌ای نمی‌شود. سازه‌های بسیار زیادی روی فونداسیون‌های کم‌عمق و در معرض رویدادهای لرزه‌ای وجود داشته است که با حرکت گهواره‌ای فونداسیون‌های کم‌عمق خود از آسیب شدید جلوگیری کرده‌اند. از آنجایی که مکانیسم گهواره‌ای به‌عنوان یک سیستم ایزولاسیون لرزه‌ای منجر به تشکیل مفصل پلاستیک در خاک می‌گردد، استفاده از این مکانیسم نسبت به طراحی سنتی که در آن اعضای اصلی و سازه‌ای دارای آسیب جدی شده و قابلیت بهره‌برداری سازه منتفی می‌شود دارای مزایای بیشتری می‌باشد. در سیستم‌های گهواره‌ای گسیختگی خاک و انتقال مفصل پلاستیک از ستون به خاک تا حد زیادی انرژی لرزه‌ای را مستهلک کرده و از آسیب‌های جدی سازه‌ای جلوگیری می‌گردد.

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها دارای تراکم نسبی نسبتاً بالای ۷۵ درصد می‌باشد، شایان ذکر است که پاسخ گهواره‌ای فونداسیون به شدت به تراکم خاک نیز بستگی دارد و فونداسیونی که بر روی بستر سست قرار می‌گیرد، بیشتر نشست می‌کند، انرژی بیشتری را مستهلک می‌کند، از سختی چرخشی کمتری برخوردار است، و در مقایسه با فونداسیونی که بر روی بستر متراکم قرار دارد، قابلیت مرکز‌گرایی کمتری ایجاد می‌کند. بنابراین تراکم بالای بستر خاک از شرایط اساسی برای عملکرد مناسب فونداسیون‌های گهواره‌ای می‌باشد.

درحالی‌که برای $A/A_c = 1/81$ حداکثر مقادیر ثبت شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که فرکانس ورودی و پارامتر A/A_c تأثیر معنی‌داری بر نشست‌های رخ داده در خاک سیلتی دارد و نشست‌های بزرگ‌تری در آزمون‌های با فرکانس پایین‌تر اتفاق می‌افتد.



(الف) نمودار نشست- زمان (فرکانس ۳ هرتز)



(ب) نمودار نشست- زمان (فرکانس ۵ هرتز)

 شکل (۱۸): اثر فرکانس بر نمودار نشست در برابر زمان برای مقادیر مختلف پارامتر A/A_c .

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۱۸)، با بررسی نمودار نشست در برابر زمان مشاهده می‌شود که نشست‌ها در انتهای بارگذاری لرزه‌ای صفر نشده و مقداری نشست ماندگار در سیستم باقی مانده است که نشان‌دهنده تغییر شکل‌های ماندگار در خاک است. فلسفه مکانیسم گهواره‌ای برای زلزله‌های سطح بالا (شتاب بیشتر از زلزله طرح) می‌باشد که در طراحی‌های معمولی، ممکن است سازه تحت تأثیر آن شتاب‌ها خراب شود ولی با فعال شدن مکانیسم حرکت گهواره‌ای، شتاب ورودی به سازه، محدودشده و سازه سالم می‌ماند.

۶- خلاصه و نتیجه گیری

در این تحقیق به بررسی رفتار پی‌های گهواره‌ای ساخته شده بر روی خاک‌های سیلتی برای ارزیابی اثرات مقادیر مختلف پارامتر A/A_c و فرکانس‌های مختلف حرکات ورودی پرداخته شده است. برای این منظور، هشت آزمایش میز لرزه انجام شد و از یک سازه با یک درجه آزادی^۹ متشکل از ستون و فونداسیون استفاده گردید. از آنجایی که تفاوت‌های قابل توجهی بین سختی سازه و خاک زیرین وجود داشت، سازه به اندازه کافی صلب طراحی و ساخته شد تا از تشکیل مفاصل پلاستیک در محل ستون اجتناب گردد. بر اساس نتایج به دست آمده چنین نتیجه‌گیری گردید که پارامتر A/A_c و فرکانس ورودی به طور قابل توجهی بر رفتار پی‌های گهواره‌ای تأثیرگذار بوده است. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- تغییر پارامتر A/A_c منجر به تغییراتی در شتاب‌های ثبت شده در فرکانس‌های ۳ و ۵ هرتز در شتاب‌سنج‌های قرار گرفته در بستر خاک گردید که مقادیر این تغییرات بسیار جزئی و قابل صرف نظر کردن بود.

۲- برای شتاب‌سنج نصب شده بر روی مرکز جرم سازه، میزان شتاب ثبت شده در مقایسه با حس‌گرهای واقع شده در داخل پروفیل خاک (حس‌گرهای ۱ تا ۳) رفتار متفاوتی را نشان داد؛ به نحوی که با افزایش پارامتر A/A_c ، میزان شتاب ثبت شده افزایش یافته و این مشاهدات برعکس نتایج به دست آمده برای شتاب‌سنج‌های شماره ۱ تا ۳ واقع شده در داخل پروفیل خاک بود.

۳- شتاب‌های اوج بزرگ‌تر برای فرکانس‌های کوچک‌تر حرکات ورودی تجربه گردید. علاوه بر این، نشان داده شد که حداکثر شتاب با کاهش فرکانس حرکت ورودی افزایش یافته است.

۴- چرخش‌های رخ داده با افزایش فرکانس حرکت ورودی کاهش یافتند. چنین نتیجه‌گیری گردید که فرکانس ورودی تأثیر بسزایی در دوران سازه داشته است.

۵- نتایج به دست آمده برای آزمون‌های با $A/A_c = 1/81$ ،

نشست‌های بزرگ‌تری نسبت به آزمون‌های با $A/A_c = 2/69$ نشان داد به عبارت دیگر مقادیر بیشتر A/A_c منجر به نشست‌های کوچک‌تر گردید. علاوه بر این، نتایج به دست آمده نشان داد که نشست پی‌های گهواره‌ای را می‌توان یک پارامتر وابسته به نرخ در نظر گرفت که در آن فرکانس‌های بزرگ‌تر منجر به نشست‌های کوچک‌تر گردیده است.

۶- با ادامه چرخه‌های بارگذاری، افزایش ظرفیت گشتاور همراه با ایجاد چرخش باقیمانده، خود را نشان داد. این رفتار عمدتاً به دلیل گسیختگی خاک در لحظه‌ای بود که سطح تماس خاک و پی برای تحمل بار عمودی (منطقه تماس بحرانی) به حداقل خود می‌رسید. در آن لحظه، ظرفیت باربری به طور لحظه‌ای بسیج گردید، خاک زیرین دچار گسیختگی جزئی شد و نشست متوسط و در عین حال ناگهانی رخ داد، در نتیجه سطح تماس برای تحمل بار عمودی افزایش یافت. این گسیختگی با چرخش سیستم و جابه‌جایی جزئی خاک زیرین در خلاف جهت بارگذاری همراه بود.

۷- نشست پی با گذشت زمان و نزدیک شدن به مراحل پایانی بارگذاری دارای روند کاهشی گردید این امر عمدتاً در نتیجه افزایش چگالی بستر در سیکل‌های بارگذاری متوالی اتفاق افتاد. مدفون‌شدگی فونداسیون و افزایش ظرفیت باربری سیستم نیز به کاهش نشست کمک کرد.

۸- برای اهداف طراحی، شالوده بر روی خاک سیلت با درصد تراکم پائین، حتی با ضریب اطمینان ظرفیت باربری نسبتاً بالا (جرم سازه‌ای کوچک)، رفتارهای نامطلوب عمیقی مانند نشست قابل توجه و چرخش باقیمانده را از خود نشان داد.

مراجع

- Algie, T.B., Pender, M.J., Orense, R.P., & Wotherspoon, L.M. (2010). Dynamic field testing of shallow foundations subject to rocking. *Earthquake Prone Building: How Ready Are We*, 26-28.
- Allmond, J.D., & Kutter, B.L. (2014). Design considerations for rocking foundations on unattached piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*

Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 107, 218-233.

Chaudhary, M.T.A. (2016). Effect of soil-foundation-structure interaction and pier column non-linearity on seismic response of bridges supported on shallow foundations. *Australian Journal of Structural Engineering*, 17(1), 67-86.

Esmatkah Irani, A., Azadi, A., Nikbakht, M., Azarafza, M., Hajjalilue Bonab, M., & Behrooz Sarand, F. (2022). GIS-based settlement risk assessment and its effect on surface structures: a case study for the Tabriz Metro—line 1. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(10), 5081-5102.

Esmatkah Irani, A., Hajjalilue-Bonab, M., Behrooz Sarand, F., & Katebi, H. (2021). Behavioral evaluation of soil-based rocking foundations against seismic loading: A review study. *Geotechnical Geology*, 17(1), 455-463.

Gajan, S., & Kutter, B.L. (2008). Capacity, settlement, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(8), 1129-1141.

Gajan, S., Kutter, B.L., Phalen, J.D., Hutchinson, T.C., & Martin, G.R. (2005). Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7-10), 773-783.

Gajan, S., Soundararajan, S., Yang, M., & Akchurin, D. (2021). Effects of rocking coefficient and critical contact area ratio on the performance of rocking foundations from centrifuge and shake table experimental results. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106502.

Gazetas, G. (2015). 4th Ishihara lecture: soil–foundation–structure systems beyond conventional seismic failure thresholds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 68, 23-39.

Gazetas, G., Anastasopoulos, I., Adamidis, O., & Kontoroupi, T. (2013). Nonlinear rocking stiffness of foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 47, 83-91.

Guan, Z., Chen, X., & Li, J. (2018). Experimental investigation of the seismic performance of bridge models with conventional and rocking pile group foundations. *Engineering Structures*, 168, 889-902.

Engineering, 140(10), 04014058.

Anastasopoulos, I., Drosos, V., & Antonaki, N. (2015). Three-storey building retrofit: rocking isolation versus conventional design. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(8), 1235-1254.

Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M., & Gerolymos, N. (2010). Soil failure can be used for seismic protection of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(2), 309-326.

Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., & Gazetas, G. (2011). Simplified constitutive model for simulation of cyclic response of shallow foundations: validation against laboratory tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(12), 1154-1168.

Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Spyridaki, A., Sideri, J., & Gazetas, G. (2014). Seismic rocking isolation of an asymmetric frame on spread footings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(1), 133-151.

Anastasopoulos, I., Loli, M., Georgarakos, T., & Drosos, V. (2013). Shaking table testing of rocking—isolated bridge pier on sand. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(1), 1-32.

Anastasopoulos, I., Loli, M., Georgarakos, T., & Drosos, V. (2013). Shaking table testing of rocking—isolated bridge pier on sand. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(1), 1-32.

Arabpanahan, M., Mirghaderi, S.R., Hosseini, A., & Ghalandarzadeh, A. (2021). Dynamic rocking response of “SDOF-embedded foundation systems using shake table experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 140, 106431.

Asli, M.S., Hosseini, S.M.M.M., & Jahanirad, A. (2018). Effect of soil reinforcement on rocking isolation potential of high-rise bridge foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, 142-155.

Behnamfar, F., Mirhosseini, S.M., & Alibabaei, H. (2017). Seismic behavior of structures considering uplift and soil–structure interaction. *Advances in Structural Engineering*, 20(11), 1712-1726.

Bolisetti, C., Whittaker, A.S., & Coleman, J.L. (2018). Linear and nonlinear soil-structure interaction analysis of buildings and safety-related nuclear structures.

- I., & Gazetas, G. (2014). Centrifuge modeling of rocking-isolated inelastic RC bridge piers. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 43(15), 2341-2359.
- Mayoral, J.M., Hutchinson, T.C., & Franke, K.W. (2017). Geotechnical engineering reconnaissance of the 19 September 2017 Mw 7.1 Puebla-Mexico City earthquake. *Geotechnical Extreme Events Reconnaissance Association, Report no. GEER-055A (16 February 2017)*.
- Raheem, S.E.A., & Hayashikawa, T. (2013). Soil-structure interaction modeling effects on seismic response of cable-stayed bridge tower. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1), 1-17.
- Sakai, J., Mahin, A.S., & Espinoza, A. (2006). *Earthquake Simulation Tests on Reducing Residual Displacements of Reinforced Concrete Bridge Columns, PEER Report*. University of California, Berkeley.
- Sharma, K., & Deng, L. (2019). Characterization of rocking shallow foundations on cohesive soil using field snap-back tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(9), 04019058.
- Sharma, K., & Deng, L. (2020). Field testing of rocking foundations in cohesive soil: cyclic performance and footing mechanical response. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(6), 828-839.
- Tohidvand, H.R., Hajjalilue-Bonab, M., Katebi, H., Nikvand, V., & Ebrahimi-Asl, M. (2022) Monotonic and post cyclic behavior of sands under different strain paths in direct simple shear tests, *Engineering Geology*, 302, p. 106639.
- Yashinsky, M., & Karshenas, M.J. (2003). *Fundamentals of Seismic Protection for Bridges*. National Information Centre of Earthquake Engineering.
- Hachem, M.M., Moehle, J.P., & Mahin, S.A. (2003). *Performance of Circular Reinforced Concrete Bridge Columns under Bidirectional Earthquake Loading*. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- Hakhamaneshi, M. (2014). *Rocking Foundations for Building Systems-Effect of Footing Shape, Soil Environment, Embedment and Normalized Moment-to-Shear Ratio*. University of California, Davis.
- Hakhamaneshi, M., & Kutter, B.L. (2016). Effect of footing shape and embedment on the settlement, recentering, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 04016070.
- Housner, G.W. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(2), 403-417.
- Iai, S. (1989). Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field. *Soils and Foundations*, 29(1), 105-118.
- Jeong, H., Sakai, J., Mahin, S.A. (2008). Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns, *Technical Report PEER 2008/06*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA.
- Kawashima, K., & Nagai, T. (2006, October). Effectiveness of rocking seismic isolation on bridges. In *4th International Conference on Earthquake Engineering*, 86, 12-13. National Center for Research on Earthquake Engineering of Taiwan.
- Khezri, A., Mir Mohammad Hosseini, S.M., Moradi, M., Maleki, M., & Rahmani, F. (2022). An experimental study on the rocking behavior of circular and square footings under slow-cyclic loading. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(3), 1-18.
- Ko, K.W., Ha, J.G., Park, H.J., & Kim, D.S. (2019). Centrifuge modeling of improved design for rocking foundation using short piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(8), 04019031.
- Kokkali, P., Abdoun, T., & Anastasopoulos, I. (2015). Centrifuge modeling of rocking foundations on improved soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(10), 04015041.
- Loli, M., Knappett, J.A., Brown, M.J., Anastasopoulos,

واژه‌نامه

- Gapping ۱- شکاف سطحی
- Sliding ۲- لغزش
- Uplift ۳- بلند شدگی (فشار برخاست)
- Soil Structure Interaction (SSI) ۴- اندرکنش بین خاک- سازه

Rocking Isolation	۵- جداسازی گهواره‌ای
Pushover Analyses	۶- آنالیز بار افزون
Self-Centering Ratio	۷- نسبت مرکزگرایی
Energy Dissipation	۸- استهلاک انرژی
Single Degree of Freedom (SODF)	۹- سیستم تک‌درجه آزادی
P-Delta effects	۱۰- تأثیرات پی-دلتا
Self-Centering	۱۱- مرکزگرایی
Competent Soil	۱۲- خاک مناسب
Accelerometer	۱۳- شتاب‌سنج‌ها
Transformer Linear Variable Differential (LVDT)	۱۴- مبدل تفاضلی متغیر خطی
Particle Image Velocimetry (PIV)	۱۵- سرعت‌سنجی تصویر ذرات

An Experimental Study on the Performance of Rocking Foundations Constructed on Non-Plastic Silts Using 1g Shaking Table Tests

Arash Esmatkhah Irani¹, Masoud Hajjalilue Bonab^{2*}, Fariba Behrooz Sarand³
and Hooshang Katebi⁴

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2. Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
*Corresponding Author, email: hajjalilue@tabrizu.ac.ir, mhbonab@gmail.com
3. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
4. Professor, Department of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

The old bridges were mainly designed for gravity loading with partial consideration of seismic or lateral loads, which were vulnerable to seismic effects. There are many examples of damage to the elements of superstructures and underground structures of bridges and in some cases complete collapse. Recently, researchers have proposed the concept of a rocking foundation for column-foundation in bridges. A rocking foundation uses soil failure to protect the structure during seismic loading. In this way, this foundation can act as a fuse and partially isolate the bridge system from serious earthquake damage. Previous research has mainly focused on the behavior of rocking foundations located on sandy soils, and in a few cases, sandy clay soils or clay soils, while not much attention has been paid to the performance of foundations constructed in fine-grained non-plastic silty soils. In this research, the seismic performance of rocking foundations that constructed on silty soils has been investigated using physical modeling on a small scale and by shaking table tests. The experimental tests in this research consist of an "SDOF superstructure-foundation" system that is used to model the behavior of a bridge pier. To this aim, eight series of shaking table tests were carried out in different conditions, including different frequencies of input motions and different A/A_c values. Four different values (1.81, 2.37, 2.52 and 2.69) were employed to investigate the effects of the A/A_c parameter. To this aim, the concentrated masses of 60, 30, 25 and 20 kg are used in the model. In addition, to achieve rigidity against static and seismic loads and avoid any deformation, the thickness of the used steel plates was selected at about 4 mm, which ensures sufficient rigidity of the pier with respect to induced loads. The embedment depth ratios (D/B) were considered equal to zero, and the superstructure was constructed directly on the surface of the soil media. The results of the experiments show that the foundation settlement and the rotation of the structure are rate-dependent parameters and increase with the decrease in the frequency of the input motion. In addition, it has been shown that increasing the ratio of the critical contact area leads to a decrease in settlements and an increase in the rotation of the structure.

Keywords: Physical Modeling, Rocking Foundation, Shaking Table, Non-Plastic Silt.