

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

در طی دهه‌های اخیر نتایج مطالعات گوناگون نشان داده است که در نظرگیری امکان حرکات غیر الاستیک گهواره‌های فونداسیون در طراحی‌ها می‌تواند باعث جلوگیری از تخریب جدی در سازه‌ها شود. هرچند یکی از نگرانی‌های بالقوه‌ای که در خصوص این رویکرد طراحی باید به آن توجه شود میزان بیشینه و نهایی نشست و دوران است. در این تحقیق با استفاده از روش عددی المان محدود به بررسی رفتار سیستم‌های گهواره‌ای با در نظرگیری رفتار غیر الاستیک در بستر خاک پرداخته شده است. جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای فونداسیون‌های گهواره‌ای روش‌های مختلف بهسازی بر اساس ضریب اطمینان فونداسیون در برابر بار قائم در نظر گرفته شده است. در خصوص فونداسیون‌هایی با ضریب اطمینان بالا احتمال واژگونی سیستم بر اثر حرکت گهواره‌ای وجود دارد. از این روی در این تحقیق استفاده از دیواره‌هایی با سختی کم به‌عنوان جداکننده‌های لرزه‌ای در نزدیکی فونداسیون‌ها پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است فاصله دیواره‌های نرم با فونداسیون بر اساس نحوه توزیع تنش در خاک زیر فونداسیون و عدم اختلال در میزان ظرفیت باربری استاتیکی انتخاب شده است. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن است که استفاده از دیواره‌های نرم با کاهش شدت زلزله‌های وارده بر سیستم گهواره‌ای باعث کاهش میزان بلندشدگی در فونداسیون می‌شود. بر این اساس می‌توان حاشیه اطمینان مناسبی را جهت جلوگیری از واژگونی سیستم‌های گهواره‌ای در برابر نیروهای لرزه‌ای شدید ایجاد نمود.

واژگان کلیدی: مدل سازی عددی، اندرکنش خاک-فونداسیون-سازه، رفتار لرزه‌ای گهواره‌ای، بهسازی خاک، دیواره‌های نرم.

بهسازی لرزه‌ای سیستم خاک-سازه با رفتار گهواره‌ای غیر ارتجاعی به کمک دیواره‌های دیافراگمی نرم

مانی سجادی

دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

میثم فدایی (نویسنده مسئول)

استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران، faadaee@srbiau.ac.ir

محمدعلی قناد

استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

حسین جهانخواه

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

۱- مقدمه

خصوص آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی متعدد جهت ارزیابی میزان تأثیر روش‌های مختلف بهسازی انجام پذیرفته است. در ادامه به مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این تحقیقات که عموماً تمرکز آنها بر روی کنترل نشست می‌باشد اشاره شده است.

آلموند و کوتر [۱۲] با انجام آزمایش سانتریفیوژ عملکرد سازه‌های تک درجه آزادی را بر روی شمع‌های غیر متصل به فونداسیون مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که چگونه اندازه، هندسه و نحوه آرایش شمع‌ها بر ظرفیت گهواره‌ای و تغییر شکل‌های پسماند فونداسیون تأثیرگذار است. نتایج به‌دست آمده بیانگر اهمیت اتصال افقی مناسب جهت جلوگیری از

در طی سالیان اخیر، رفتار غیر الاستیک فونداسیون‌های سطحی که شامل تسلیم در خاک بستر و بلندشدگی فونداسیون می‌باشد توجه جامعه مهندسين زلزله را به خود جلب کرده است. تعداد زیادی از مشاهدات و تحقیقات نشان داده‌اند که این رفتارهای غیرخطی فونداسیون دارای توان بالقوه‌ای برای حفظ سازه‌ها در برابر زلزله‌های شدید می‌باشد [۱-۷]. این در حالی است که بیشینه مقدار بلندشدگی و میزان نشست باقیمانده از اصلی‌ترین نگرانی‌ها در خصوص سیستم‌های گهواره‌ای می‌باشند [۸-۱۱]. از این روی جهت بهره‌برداری از مزایای فونداسیون‌های گهواره‌ای^۱ نیاز به در نظرگیری تمهیداتی برای کاهش این نگرانی‌ها می‌باشد. در این

سنگی از لحاظ زاویه اصطکاک و مدول برشی بر روی ظرفیت خمشی فونداسیون اثر قابل توجهی ندارند. این در حالی است که این عوامل بر روی نشست بسیار تأثیر گذار می‌باشند. همچنین مطالعات آنها نشان داده است که استفاده از ستون سنگی با عمق کم در مرکز فونداسیون عملکرد فونداسیون را بهبود می‌بخشد. اگرچه ظرفیت خمشی و توانایی بازگشت فونداسیون به حالت اولیه خود تغییر محسوسی نمی‌کند.

ژو و فتاحی [۱۶] از لایه‌های ژئوتکستایل جهت بهسازی خاک سست واقع در زیر سازه‌ای متوسط مرتبه با فونداسیونی سطحی استفاده کردند. مطالعه آنها شامل بررسی تأثیر آرایش لایه‌های ژئوتکستایل بر عملکرد لرزه‌ای سازه تحت اعمال بیشینه زلزله محتمل بوده است. در این تحقیق از نرم‌افزار فلک سه بعدی برای شبیه‌سازی و تحلیل غیرخطی دینامیکی در حوزه زمان استفاده شده است. نتایج به دست آمده از مطالعه آنها نمایانگر آن بوده است که با افزایش میزان سختی، طول و تعداد لایه‌های ژئوتکستایل نشست‌های ناشی از حرکت گهواره‌ای فونداسیون کاهش می‌یابد. اگرچه این امر باعث افزایش نیروهای برشی ایجاد شده در سازه می‌گردد که ناشی از کاهش استهلاک انرژی از طریق غیرخطی شدن خاک در زیر فونداسیون می‌باشد.

شریف‌زاده اصلی و همکاران [۱۷] از یک مدل فیزیکی تک‌درجه آزادی در شرایط 1 g برای ارزیابی رفتار غیرخطی سیستم خاک-فونداسیون بهسازی شده استفاده کردند. به منظور کاهش نگرانی‌های موجود در خصوص نشست‌های ناشی از فونداسیون‌های گهواره‌ای، تمرکز این تحقیق بر روی اثر مسلح‌سازی خاک با ژئوگرید و ژئوسل بوده است. نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج حاصل از روش تراکم سازی خاک در زیر فونداسیون نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که به کارگیری ژئوگرید و ژئوسل به همراه تراکم خاک باعث کاهش عمق مورد نیاز برای بهسازی می‌شود. لازم به ذکر است استفاده از ژئوسل در مقایسه با استفاده از ژئوگرید در کنترل نشست مؤثرتر بوده است.

سجادی و همکاران [۱۸] با استفاده از روش عددی المان محدود به بررسی اثر دیواره‌های سخت بر روی عملکرد گهواره‌ای

لغزش فونداسیون از روی شمع‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده کردند که به کارگیری شمع‌ها باعث کاهش نشست در زیر فونداسیون می‌شود. هرچند شتاب وارد بر سازه بر اثر استفاده از شمع‌ها افزایش پیدا کرده است.

کو کالی و همکاران [۱۳] با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های سانتریفیوژ عملکرد گهواره‌ای یک سیستم تک‌درجه آزادی با فونداسیون مربعی را برای خاک ماسه‌ای در سه وضعیت سست، ایده‌آل و بهسازی شده (از طریق افزایش تراکم نسبی) مورد مطالعه قرار دادند. بهسازی سطحی خاک بر حسب پاسخ دوران-نشست و دوران-خمش تحت بارگذاری سیکلیک بسیار مؤثر ارزیابی شده است حتی برای وقتی که ضخامت لایه بهسازی شده به ۲۵ درصد عرض فونداسیون محدود می‌باشد (کاهش نشست تا حدود ۵۰ درصد). لازم به ذکر است که با افزایش عمق بهسازی خاک بستر ظرفیت خمشی سیستم نیز افزایش یافته است.

لولی و همکاران [۱۴] عملکرد یک پایه پل که بر روی فونداسیونی گهواره‌ای با مجموعه‌ای از شمع‌های غیر متصل قرار دارد را ارزیابی کردند. در این تحقیق یک لایه متراکم ماسه ($D_r = 70\%$) مابین فونداسیون و شمع‌ها جهت توزیع یکنواخت فشار در زیر فونداسیون استفاده شده است. نتایج بیانگر آن است که سیستم گهواره‌ای ترکیبی استفاده شده نشست و دوران کمتری را نسبت به فونداسیون بهسازی نشده تجربه می‌کند. اگرچه، تغییر شکل‌های خمشی به مقدار قابل توجهی در پایه ستون پل افزایش می‌یابند. از این روی آنها به این نتیجه رسیدند که باید با احتیاط از این روش استفاده نمود تا تنش‌های بیش از حدی به سازه فوقانی منتقل نشود.

لیو و هاتچینسون [۱۵] تحلیل عددی بر روی پاسخ گهواره‌ای یک فونداسیون سطحی قرار گرفته بر روی خاک رسی نرم که به وسیله ستون‌های سنگی بهسازی شده است انجام دادند. آنها از روش عددی المان محدود جهت مدل‌سازی در حالت کرنش مسطح استفاده کردند. در این مطالعه آرایش‌های مختلفی از ستون‌های سنگی در زیر فونداسیون در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که جنس مصالح سنگی ستون‌های

فونداسیون-سازه مورد استفاده قرار گرفته است. رفتار غیرخطی در این شرایط شامل دو پدیده بلندشدگی فونداسیون و گسیختگی خاک در زیر فونداسیون می‌باشد. بدین منظور مجموعه‌ای از مدل‌سازی‌های عددی در فضای سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام پذیرفته است.

۲-۱- معرفی مدل رفتاری خاک

در تمامی پژوهش‌های عددی، پیش‌بینی صحیح از رفتار خاک وابسته به تئوری‌هایی است که در قالب یک مدل رفتاری ارائه می‌گردد. در پژوهش حاضر که تمرکز مطالعات بر روی رفتار غیرخطی خاک رسی تحت انواع مختلف بارگذاری است، می‌بایست مدل رفتاری انتخاب شده نیز دارای ویژگی‌های لازم برای پیش‌بینی چنین رفتاری باشد. بر همین اساس از مدل رفتاری ارائه شده توسط آناستاسپولوس و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۱ استفاده شده است که به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی رس‌های اشباع پیشنهاد شده است.

مدل رفتاری مورد استفاده در این مطالعه بر پایه یک مدل سخت‌شونده سینماتیک با معیار گسیختگی فون میزس می‌باشد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط آرمسترانگ و فردریک [۲۰] در سال ۱۹۶۶ این مدل برای پیش‌بینی رفتار رس‌ها تحت شرایط زهکشی نشده که رفتاری مستقل از تنش نرمال می‌تواند فرض شود مناسب است. با توجه به سرعت بالای اعمال بارگذاری لرزه‌ای، در نظرگیری رفتار زهکشی نشده فرضی منطقی در تفسیر شرایط واقعی می‌تواند باشد. تغییرات مؤلفه سینماتیک تنش تسلیم توسط رابطه زیر قابل بیان است:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) \dot{\epsilon}^{pl} - \gamma \alpha \dot{\epsilon}^{pl} \quad (1)$$

که در آن C مدول سخت‌شوندگی سینماتیک اولیه، پارامتر تعیین‌کننده نرخ کاهش سخت‌شوندگی سینماتیک با افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌باشد، $\dot{\epsilon}^{pl}$ نرخ تغییرات کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. همچنین در آن σ_0 مقدار تنش در غیاب کرنش پلاستیک و α تانسور پس تنش (تانسور انتقال مرکز سطح تسلیم)

فونداسیون‌های سطحی تحت بارگذاری سیکلیک پرداختند. مطالعات آنها بر روی رفتار غیرخطی خاک رسی اشباع با استفاده از مدل رفتاری دو سطحی با سخت‌شوندگی سینماتیک^۲ انجام پذیرفته است. به‌منظور کاهش نشست‌های ماندگار ناشی از حرکات گهواره‌ای فونداسیون آنها از دیواره‌های سخت جهت افزایش محصورشدگی خاک بستر استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از تحقیق آنها نشان داد استفاده از دیواره‌های سخت در فاصله‌ای مناسب از فونداسیون می‌تواند باعث کاهش گسترش کرنش‌های پلاستیک در بستر خاک شود. در نتیجه آن نشست‌های نهایی در زیر فونداسیون به‌طور قابل توجهی کاهش یافته است و پتانسیل بازگشت سیستم به حالت تعادل اولیه افزایش پیدا کرده است. بررسی مطالعات پیشین نشان داده است که روش‌های بهسازی پیشنهادی تاکنون جهت بهبود عملکرد سازه‌هایی با ضریب اطمینان پایین قابل استفاده هستند. همچنین این روش‌ها عموماً برای سازه‌های در شرف ساخت کاربرد دارند. از این روی در این تحقیق سعی بر آن شده است پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های گهواره‌ای با استفاده از دیواره‌های دیافراگمی^۳ با مصالح نرم بررسی گردد. استفاده از دیواره‌های دیافراگمی در اطراف فونداسیون‌ها روشی است که برای بسیاری از سازه‌های موجود و در شرف ساخت می‌تواند قابل اجرا باشد. در این مطالعه به بررسی رفتار فونداسیون‌های گهواره‌ای با ضریب اطمینان بالا که امکان واژگونی آنها بر اثر میزان بیش از اندازه بلندشدگی وجود دارد پرداخته شده است. برای این چنین سازه‌هایی استفاده از دیواره‌هایی با مصالح نرم به‌عنوان یک نوع جداساز لرزه‌ای^۴ پیشنهاد شده است. در واقع این‌گونه دیواره‌ها با رفتار غیرخطی خود در حین زلزله‌های شدید می‌توانند به‌عنوان یک محافظ عمل کرده و از شدت نیروهای وارد بر سازه بکاهند.

۲- نحوه مدل‌سازی عددی

در این قسمت نحوه مدل‌سازی عددی به‌منظور بررسی و تحلیل اثر بهسازی بر روی حرکت گهواره‌ای فونداسیون‌ها و رفتار دینامیکی سازه‌ها بیان شده است. در این خصوص روش عددی المان محدود جهت در نظرگیری رفتار غیرخطی سیستم خاک-

رسی در محدوده ۱۰۰۰-۱۵۰ می‌باشد.

۲-۱-۱- کالیبراسیون مدل رفتاری

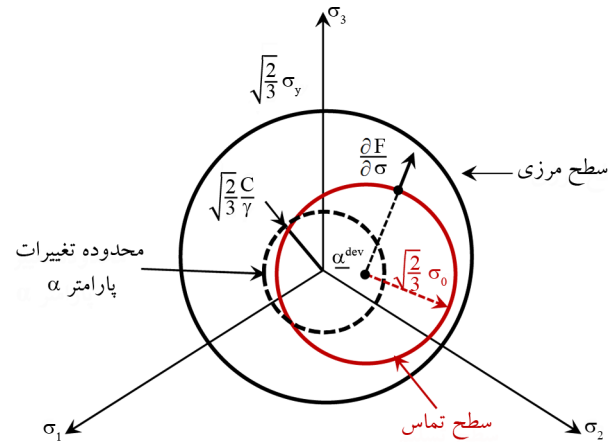
به منظور صحت‌گذاری بر عملکرد مدل رفتاری و برآورد دسته پارامترهای مناسب، کالیبراسیون مدل رفتاری طبق مشخصات خاک رسی استفاده شده در آزمایش سانتریفیوژ MAH01 انجام پذیرفته است (جدول ۱) [۲۲]. برای کالیبراسیون مدل، نیاز به دانستن اطلاعاتی در خصوص: مقاومت زهکشی نشده خاک رسی (S_u)، سختی خاک در کرنش‌های کم (G_0) و منحنی‌های $G-\gamma$ جهت کالیبراسیون پارامتر λ و نسبت a می‌باشد.

جدول (۱): مشخصات خاک رسی استفاده شده در آزمایش MAH01 [۲۲].

نوع پارامتر	نشانه	مقدار
مقاومت زهکشی نشده	S_u	۷۰ (کیلو پاسکال)
جرم مخصوص	ρ_{sat}	۱۹۰۰ (کیلوگرم بر مترمکعب)
نسبت پواسون	ν	۰/۴۵ (-)
شاخص پلاستیسیته	PI	۸ (-)

در این راستا رفتار دینامیکی خاک رس با استفاده از روابط ارائه شده توسط ایشیاشی و ژانگ [۲۳] بر اساس طیف وسیعی از اطلاعات جمع‌آوری شده از آزمایش‌های مختلف آزمایشگاهی و در محل کالیبره شده است. در این تحقیق روش انجام کالیبراسیون بر اساس شرایط موجود در آزمایش برش ساده سیکلی که یکی از آزمایش‌های متداول جهت بازسازی شرایط تنش‌ها در حین زلزله می‌باشد، انجام پذیرفته است. بدین منظور مدل‌سازی عددی برای یک تک‌المان سه‌بعدی (شش‌وجهی) بر مبنای مدل رفتاری مورد نظر انجام پذیرفته است. در مدل‌سازی عددی، کرنش برشی به صورت تاریخچه زمانی جابه‌جایی بر گره‌های فوقانی المان به نحوی اعمال می‌شود تا دامنه‌ای وسیع از کرنش‌های برشی، از مقدار کم در حدود ۵-۱۰ تا زیاد حدود ۱، در المان ایجاد شود. گره‌های تحتانی المان در تمامی جهات مقید شده‌اند. در نهایت، با تخمین پارامترهای مدل رفتاری به طور مناسب سعی بر حداقل نمودن تفاوت نتایج حاصل از پیش‌بینی عددی و روابط تجربی شده که برای حصول بهترین مطابقت از پارامترهای ارائه شده در جدول (۲) استفاده شده است [۱۸].

می‌باشد. رابطه ارائه شده بر پایه قانون سخت‌شوندگی سینماتیک زیگلر می‌باشد که در سال ۱۹۵۹ ارائه شده است که در آن عبارت $\gamma\alpha\dot{\epsilon}^{pl}$ برای بیان رفتار غیرخطی جریان پلاستیک اضافه شده است.



شکل (۱): نمایش تصویر مؤلفه‌های سخت‌شوندگی سینماتیک بر صفحه π [۱۸].

در خصوص رس‌ها که مقاومت زهکشی نشده آنها مستقل از فشار هیدرواستاتیک است، حداکثر تنش تسلیم همانند رابطه زیر قابل تعیین است:

$$\sigma_y = \sqrt{3}S_u \quad (2)$$

با توجه به آنکه $\sigma_y = \sigma_0 + \frac{C}{\gamma}$ است، لذا پارامتر γ به صورت زیر قابل بیان است [۲۱]:

$$\gamma = \frac{C}{\sqrt{3}S_u - \sigma_0} \quad (3)$$

پارامتر σ_0 که شروع رفتار پلاستیک را کنترل می‌کند به صورت کسری از تنش تسلیم مانند رابطه (۴) تعریف می‌شود که معمولاً در محدوده ۰/۳-۰/۱ قرار دارد.

$$\sigma_0 = \lambda\sigma_y \quad (4)$$

پارامتر C مدول یانگ در کرنش‌های خیلی کم است که بیانگر سختی الاستیک اولیه می‌باشد. این پارامتر می‌تواند مستقیماً بر اساس سرعت موج برشی یا از روابط همبستگی تجربی تخمین زده شود. همچنین به صورت تابعی از σ_y نیز مانند زیر قابل بیان است:

$$C = a\sigma_y \quad (5)$$

بر اساس روابط تجربی موجود، نسبت a عموماً برای خاک‌های

ضریب اصطکاک نسبتاً بالایی ($\mu = 0.7$) در نظر گرفته شده است. همچنین برای ایجاد امکان مناسب بلندشدگی بین خاک و فونداسیون با توجه به بار وارده، در راستای قائم از یک رابطه نمایی فشار-فرو نشست استفاده شده است.

۲-۲-۲-۲- مش بندی

یکی از نکات حائز اهمیت در خصوص مدل‌سازی مسائل دینامیکی، شبیه‌سازی در خصوص انتشار امواج می‌باشد. بدین منظور جهت انتقال صحیح موجی با فرکانسی مشخص، لازم است تحریک ورودی بر اساس حداقل طول موج خود از ۱۰ گره عبور نماید [۲۴]. در نظرگیری کمتر از این تعداد گره ممکن است باعث نادیده گرفته شدن مقادیری از بیشینه دامنه موج انتقالی شود. با توجه به نکته بیان شده در مطالعه حال حاضر، فواصل حداکثر گره‌ها بر حسب کوچک‌ترین طول موج تحریک ورودی طبق رابطه (۶) محاسبه شده است. در این رابطه λ_{\min} معرف کوتاه‌ترین طول موج تحریک ورودی و V_s بیانگر سرعت موج برشی نرم‌ترین لایه خاک است که در این تحقیق برابر با ۹۵ متر بر ثانیه می‌باشد.

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} = \frac{V_s}{10f_{\max}} \quad (6)$$

مطابق با این رابطه، با فرض بیشینه فرکانس (f_{\max}) ۱۰ هرتز [۲۴] برای موج ورودی در خاکی رسی با مقاومت زهکشی نشده ۷۰ کیلو پاسکال، حداکثر اندازه مش حدود ۱ متر به دست می‌آید. به منظور بالا بردن دقت مدل‌سازی در باز تولید مکانیسم گسیختگی در خاک به دلیل ظرفیت باربری، از مش‌هایی با ابعاد کمتر ($\Delta h = 0.6 \text{ m}$) در اطراف فونداسیون استفاده شده است.

۲-۲-۳- شرایط مرزی

یکی از مشکلات مهم در مدل‌سازی مسائل پاسخ زمین، محدودیت یا عدم توانایی نرم‌افزارها در شبیه‌سازی مرزهای نامتناهی برای عبور امواج و عدم بازگشت آنها به داخل محیط می‌باشد. بدین منظور باید شرایط خاصی در مرزها برای جلوگیری از انعکاس امواج در نظر گرفته شود. مطالعات پیشین نشان داده است که مرزهای موازی با راستای انتشار امواج عموماً تأثیر ناچیزی بر پاسخ

جدول (۲): پارامترهای پیشنهادی برای مدل رفتاری.

نوع پارامتر	نشانه	مقدار
سختی اولیه	C	۴۲ (مگاپاسکال)
تنش تسلیم اولیه	σ_0	۲۴ (کیلو پاسکال)
نرخ کاهش سخت‌شوندگی	γ	۴۲۳ (-)

۲-۲-۲-۲- مدل‌سازی عددی خاک-فونداسیون-سازه

جهت مدل‌سازی فونداسیون‌های سطحی با مود غالب حرکت گهواره‌ای، از مدلی سه‌بعدی به روش المان محدود غیر خطی جهت در نظرگیری رفتار غیرخطی مصالح و هندسه مسئله استفاده شده است. در تمامی مدل‌سازی‌های انجام شده، جهت انتگرال‌گیری عددی از معادلات حرکت در مرحله تحلیل دینامیکی، از الگوریتم گام‌به‌گام زمانی هیلبر-هیوز-تیلور (HHT) استفاده شده است. همچنین به منظور کاهش زمان مورد نیاز جهت تحلیل سیستم خاک-فونداسیون-سازه از روش نیوتن-رافسون اصلاح شده استفاده شده است. در این تحقیق محیط خاکی و فونداسیون به وسیله المان‌های پیوسته هشت گره‌ای شش سطحی (C3D8) شبیه‌سازی شده است. المان خطی دو گره‌ای (B31) برای مدل‌سازی سازه استفاده شده است. به منظور امکان صحت‌سنجی مدل، مدل‌سازی بر اساس آزمایش سائتریفیوژ دینامیکی MAH01 انجام شده است.

۲-۲-۱-۱- سطح تماس بین خاک-فونداسیون

برای شبیه‌سازی بلندشدگی و لغزش در سطح تماس بین فونداسیون و خاک در این تحقیق از فرمولاسیون تماسی سطح به سطح استفاده شده است. این نوع سطح تماس قابلیت محاسبه صحیح تنش‌های تماسی را با کاهش امکان نفوذ قابل ملاحظه دو سطح در یکدیگر به صورت محلی دارد. نوع المان استفاده شده در فصل مشترک فونداسیون و خاک از نوع Gap می‌باشد. استفاده از این نوع المان در زمانی که فونداسیون به کشتش می‌افتد اجازه بلندشدگی را از خاک بستر می‌دهد. مشخصات این المان تماسی به وسیله معرفی سختی در دو راستای مماسی و قائم قابل تعیین است. در این خصوص در راستای مماسی، از معیار گسیختگی موهر-کولمب استفاده می‌شود. جهت جلوگیری از لغزش قابل توجه در سطح تماس خاک-فونداسیون

المان‌های تحت پوشش هر گره در مرز مدل می‌باشند. شکل (۲) مدل عددی استفاده شده برای تحلیل دینامیکی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

۲-۳- صحت‌سنجی مدل عددی

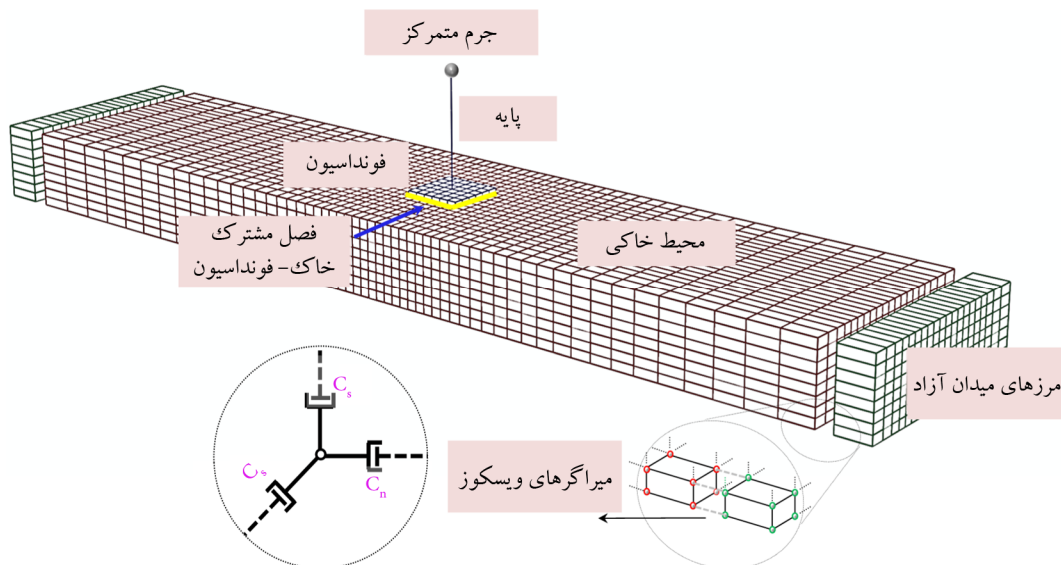
همان‌طور که پیش از این نیز بیان شد، در این تحقیق از نتایج آزمایش سانتریفیوژ بزرگ‌مقیاس انجام شده در بخش ژئوتکنیک دانشگاه دیویس توسط هخامنشی و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۲ جهت صحت‌سنجی استفاده شده است. نتایج آزمایش دینامیکی انجام شده توسط هخامنشی و همکاران قابل بررسی در دو بخش کلی می‌باشد: (۱) انتشار امواج لرزه‌ای و (۲) پاسخ سازه‌ای یک درجه آزادی، شامل لنگر- دوران و نشست دوران که قابلیت حرکت گهواره‌ای بر روی خاک رسی را داراست.

سازه استفاده شده در آزمایش دینامیکی، سازه‌ای بسیار سخت از جنس آلومینیوم است که متشکل از یک ستون که بر روی فونداسیون سطحی مربع شکل قرار گرفته است می‌باشد. در بالای ستون به عنوان جرمی متمرکز از مجموعه‌ای از وزنه‌ها استفاده شده است. وزن سازه با مود غالب گهواره‌ای به نحوی در نظر گرفته شده است تا در شتابی برابر با $30g$ ، دارای ظرفیت باربری قائم $FSv = 5$ باشد. مشخصات سازه تک‌درجه آزادی به‌طور خلاصه در جدول (۳) ارائه شده است.

سطح زمین دارند [۲۵]. لازم به ذکر است در خصوص سازه‌هایی که مود حرکتی غالب آنها گهواره‌ای می‌باشد به دلیل امواج غیر هم‌فاز مرتعش شده از دو لبه فونداسیون، میزان امواج تابشی از فونداسیون به داخل محیط خاکی کاهش می‌یابد. همچنین تسلیم خاک در زیر فونداسیون و ایجاد نرم‌شدگی در بستر خاکی باعث برگشت مقداری از موج تاییده شده از سمت فونداسیون می‌شود. این نکات بیانگر آن است که میزان کل امواج تاییده شونده به سمت مرزهای انتهایی و نگرانی از بازتاب آنها به داخل مدل با در نظرگیری مرزها در یک فاصله معقول از سازه قابل رفع می‌باشد. در این تحقیق با انجام آنالیز حساسیت این فاصله برابر با $5B$ در نظر گرفته شده است. در تحقیق حال حاضر، از مرزهای جاذب لایزر در دو راستای عمود و مماس بر مرزهای انتهایی استفاده شده است. این مرزهای جاذب با بهره‌گیری از دو رویکرد؛ استفاده از میراگر ویسکوز جهت جذب موج برخوردی و همچنین دیواره‌های میدان آزاد^۵ جهت انتقال صحیح امواج در مرزها، شبیه‌سازی شده‌اند [۲۶]. ضرایب میرایی میراگرها در راستای قائم و مماسی جهت اطمینان از جذب امواج برگشتی مطابق با رابطه زیر قابل محاسبه است.

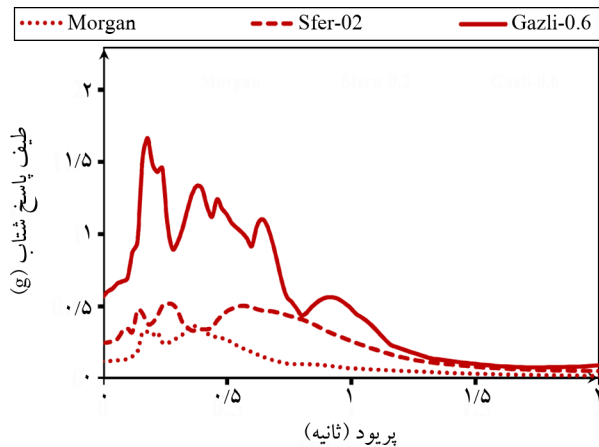
$$\begin{cases} C_n = \rho A V_p \\ C_s = \rho A V_s \end{cases} \quad (7)$$

که در آن ρ جرم مخصوص خاک، V_p و V_s به ترتیب سرعت موج فشاری و برشی خاک می‌باشند. پارامتر A ، مساحت مجموع

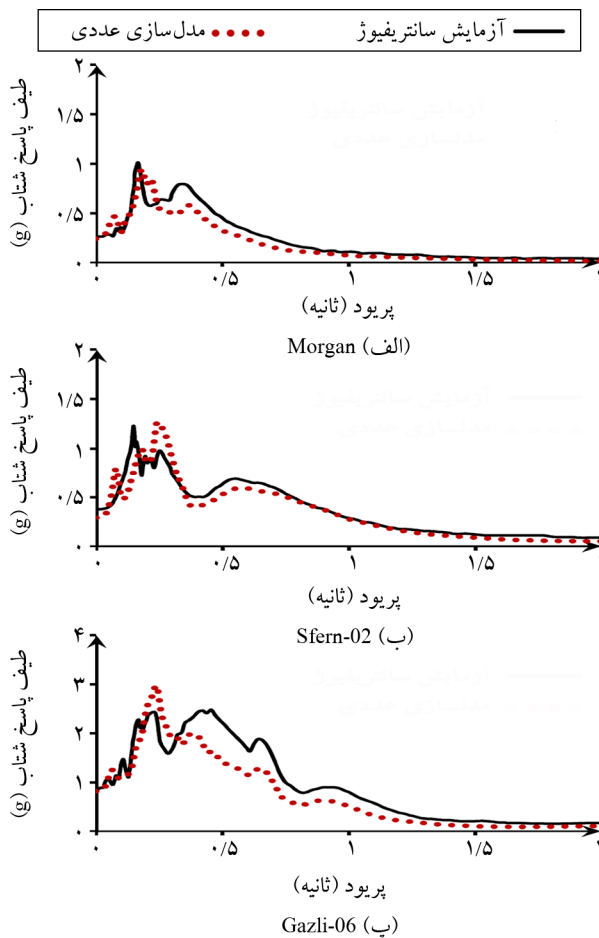


شکل (۲): نمایش شماتیک مدل عددی المان محدود سه‌بعدی جهت تحلیل دینامیکی.

GAH6 در آزمایش، ثبت شده و برای مقایسه با نتایج آزمایشگاهی طیف پاسخ الاستیک آنها محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی وجود دارد.



شکل (۳): نمایش طیف پاسخ لرزه‌ای رکوردهای ورودی انتخاب شده.



شکل (۴): صحت‌سنجی نحوه انتشار امواج در مدل عددی در مقایسه با مدل آزمایشگاهی سانتریفیوژ.

جدول (۳): مشخصات سازه‌های سیستم تک‌درجه آزادی (در مقیاس مدل).

پارامتر	مقادیر
جرم کل سازه	۲/۸۷ (کیلوگرم)
ارتفاع مرکز جرم از کف فونداسیون	۱۷۱ (میلی‌متر)
پریود سازه	۰/۰۱۳ (ثانیه)
ممان اینرسی ستون	۲۷۹۷۰۰ (میلی‌متر ^۴)
طول فونداسیون	۱۱۱ (میلی‌متر)
عرض فونداسیون	۱۱۱ (میلی‌متر)
ضخامت فونداسیون	۹/۵۲۵ (میلی‌متر)

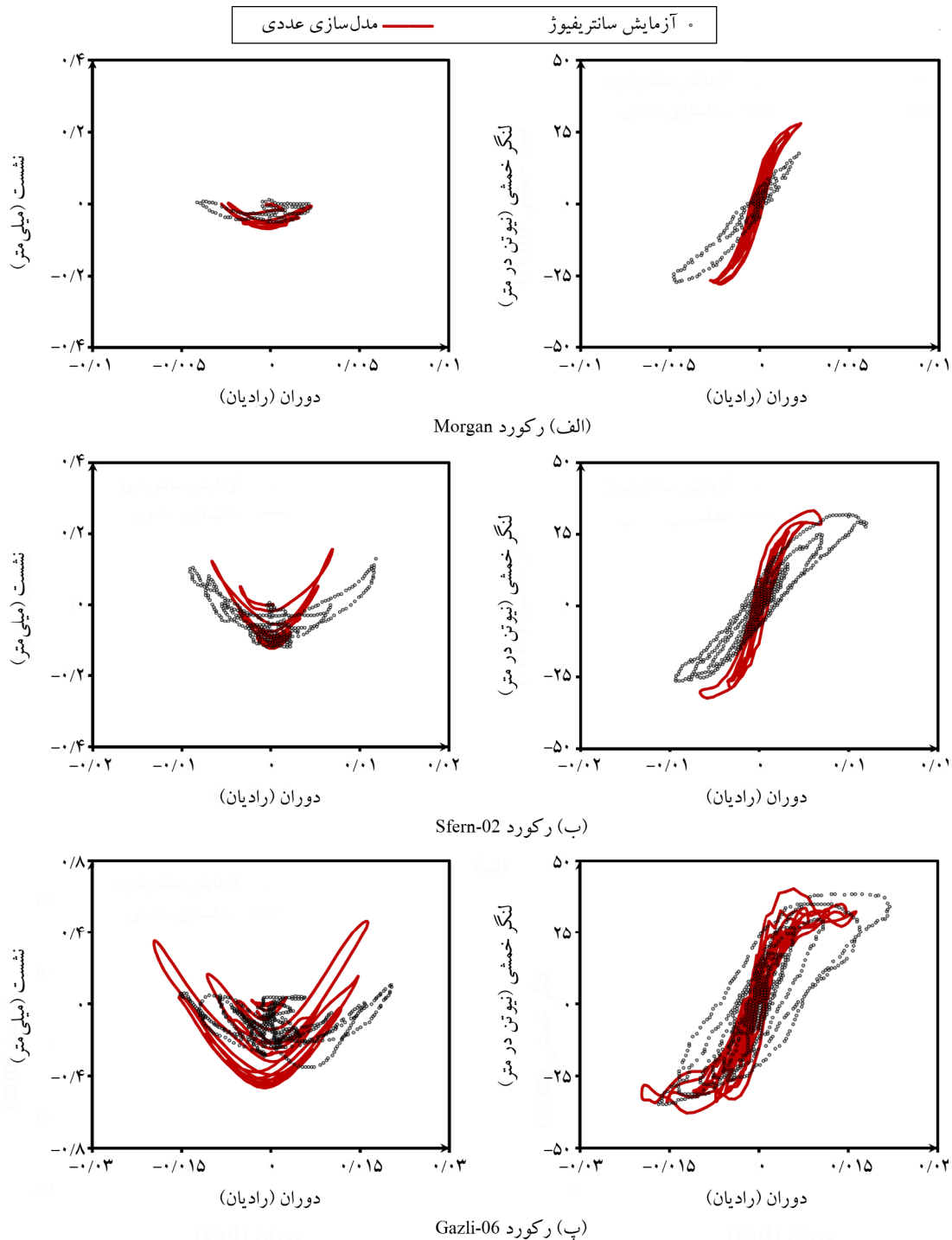
مدل‌های آزمایش سانتریفیوژ بر روی خاکی رسی به ضخامت ۱۴۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. در زیر لایه رسی، در انتهای جعبه آزمایش، لایه‌ای از ماسه‌ای متراکم به ضخامت ۲۰ میلی‌متر ($D_r \sim 85\%$) جهت زهکشی استفاده شده است. همچنین روی لایه رسی از یک لایه ماسه‌ای به ضخامت ۱۰ میلی‌متر جهت کاهش امکان تبخیر رطوبت پوشیده شده است. تمام اندازه‌ها در مقیاس مدل آزمایشگاهی بیان شده است. این نکته قابل ذکر است که در مدل‌سازی عددی، اثر وزن لایه ماسه‌ای در بالای لایه رسی جهت شبیه‌سازی صحیح تنش اولیه در محیط به صورت سربار در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به تراکم بالای لایه ماسه‌ای در قسمت تحتانی جعبه از تأثیر احتمالی آن بر نحوه انتشار امواج صرف‌نظر شده است. لازم به ذکر است در مدل‌سازی عددی از مقیاس واقعی جهت شبیه‌سازی آزمایش سانتریفیوژ استفاده شده است [۲۷].

در این تحقیق جهت صحت‌سنجی مدل عددی در خصوص بارگذاری لرزه‌ای، از سه رکورد استفاده شده با شدت متوسط (Morgan)، نسبتاً شدید (Sfern-0.2) و بسیار قوی (Gazli-0.6) انتخاب شده است. این نحوه انتخاب این امکان را ایجاد می‌کند تا دقت مدل عددی را برای شرایط مختلف رفتار غیرخطی مورد بررسی قرار دهیم. شکل (۳) طیف پاسخ لرزه‌ای را برای رکوردهای ورودی انتخاب شده نشان می‌دهد.

در حین آزمایش دینامیکی، برای تعیین پاسخ میدان آزاد سیستم، از شتاب‌سنج‌هایی در نزدیک سطح لایه خاک رسی با فاصله از سازه‌ها استفاده شده است. به همین منظور در تحلیل‌های عددی نیز مقدار شتاب در سطح خاک رسی، در محل شتاب‌سنج

مورد قبول مدل عددی المان محدود را در پیش‌بینی مقادیر بیشینه پارامترهای عملکردی سیستم تحت تحریکات لرزه‌ای مختلف را نشان می‌دهد. در تمامی نتایج، مدل عددی سختی دورانی بیشتری را نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه از خود نشان می‌دهد.

پاسخ دینامیکی سازه تک‌درجه آزادی در مدل عددی نیز به صورت اجمالی مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه لازم به ذکر است، ماهیت نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی تحریکات لرزه‌ای مقایسه دقیق نحوه تغییرات در پاسخ سازه‌ای را بخصوص در زلزله‌های شدید با دشواری مواجه می‌کند. شکل (۵) قابلیت



شکل (۵): مقایسه پاسخ دینامیکی سازه در مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی.

در واقع حضور این دیواره‌ها با امکان تسلیم خاک در آنها می‌تواند باعث کاهش شدت نیروهای وارده بر سازه فوقانی بر اثر تحریکات لرزه‌ای شده (همانند یک سیستم جدا کننده لرزه‌ای). به‌موجب این پدیده احتمال واژگونی و دوران بیش از اندازه سیستم کاهش می‌یابد (شکل ۶-ب).

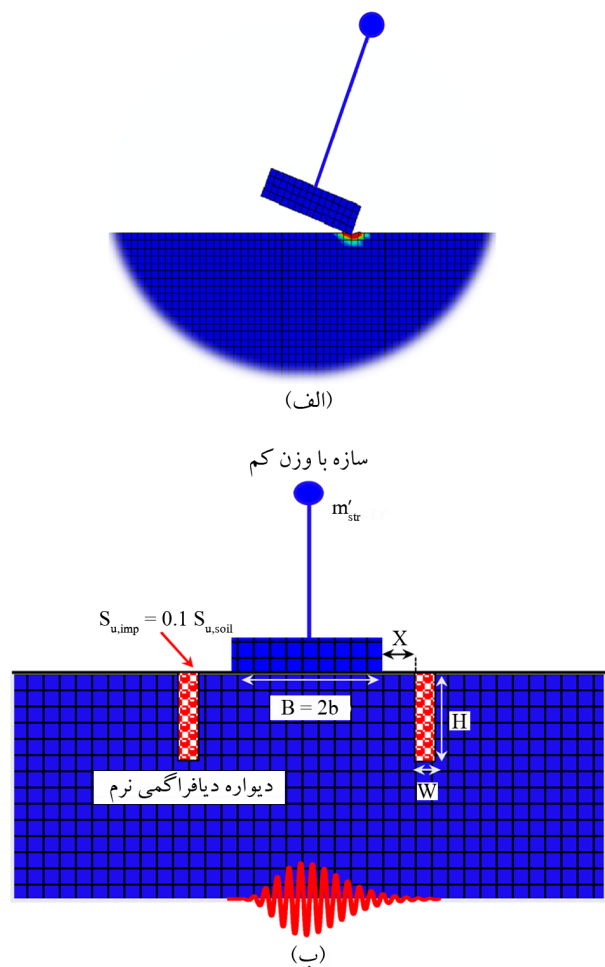
۴- روش انجام تحلیل‌های عددی

تحلیل‌ها در سه مرحله: (۱) ایجاد تنش‌های برجا، (۲) محاسبه تنش‌های ناشی از حضور سازه و (۳) اعمال تحریک لرزه‌ای انجام می‌شود. در مرحله تحلیل دینامیکی از یک سناریوی لرزه‌ای^۶ که شامل سه زلزله با شدت‌های مختلف می‌باشد استفاده شده است. در این سناریو ترتیب اعمال زلزله‌ها به کف مدل عددی به نحوی تنظیم شده است که ابتدا با زلزله‌هایی با شدت ضعیف و متوسط شروع شده است که می‌تواند معرف پیش‌لرزه‌هایی اولیه باشند و در انتها منتهی به یک تحریک بسیار شدید می‌شود (شکل ۷-الف). شکل (۷-ب) طیف پاسخ شتاب را برای سه تحریک لرزه‌ای نشان می‌دهد. رکورد L'Aquila-AM043 ناشی از زلزله لا کوئیا در سال ۲۰۰۹ در ایتالیا با بزرگای ۶/۳ و شدتی تقریباً متوسط اتفاق افتاده است. تحریک لرزه‌ای دیگر Lefkada ناشی از زلزله آژیون با بزرگای ۶/۴ می‌باشد که در سال ۲۰۰۳ در یونان رخ داده است. این زلزله دارای تعداد سیکل‌های قابل توجهی بوده است که در مدت‌زمان طولانی اتفاق افتاده است. این تحریک ورودی در محدوده زلزله‌های نسبتاً قوی قرار می‌گیرد. در انتها رکورد Rinaldi(228) از زلزله نورث ریج که در سال ۱۹۹۴ در آمریکا با بزرگای ۶/۸ ثبت شده است معرفی می‌شود که زلزله‌ای به شدت قوی شامل خصوصیت جهت‌پذیری پیش‌رونده زلزله‌های حوزه نزدیک می‌باشد.

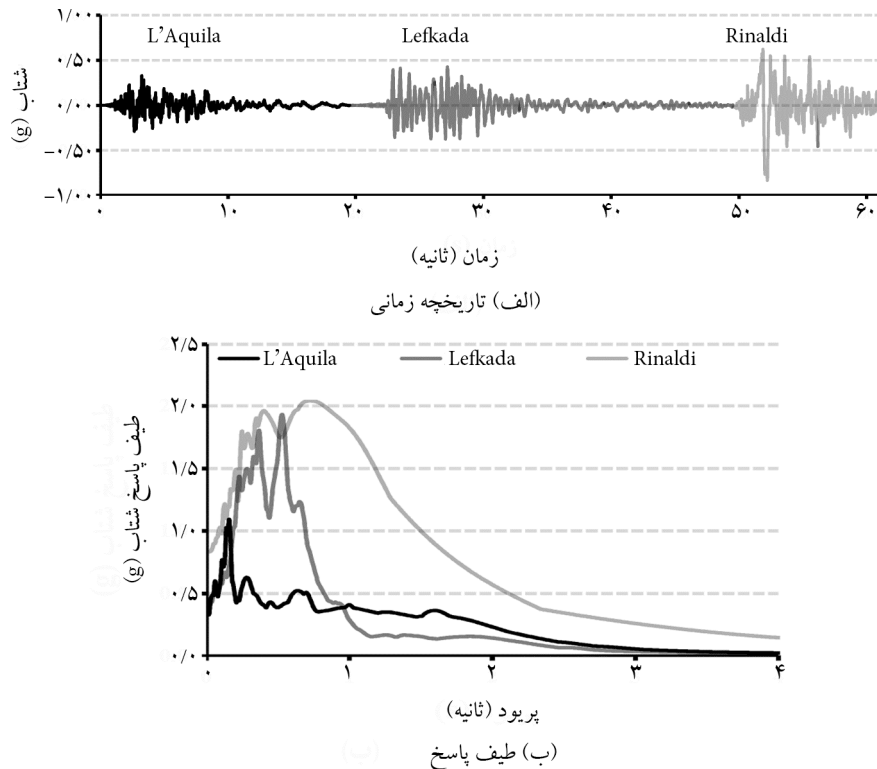
لازم به ذکر است در تمامی تحلیل‌ها پارامترهای مرتبط با مشخصات هندسی و موقعیت قرارگیری دیواره‌ها با استفاده از مقدار عرض فونداسیون جهت انجام آنالیز پارامتریک بی‌بعد شده‌اند [۱۸]. اثر عمق دیواره‌های نرم بر روی پاسخ فونداسیون‌های گهواره‌ای با مقادیر $H = 2b/3, b$ مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳- معرفی روش‌های بهبود عملکرد سیستم‌های گهواره‌ای

در سیستم‌هایی با ضرایب اطمینان نسبتاً بالا (به این معنی که سازه سبک و یا خاک سخت باشد)، بر اثر حرکات گهواره‌ای، فونداسیون دچار بلندشدگی از روی بستر خود شده و مقدار ناچیزی رفتار غیرخطی در خاک بستر مورد انتظار خواهد بود. در این شرایط تحت زلزله‌های شدید، بلندشدگی بیش از اندازه سیستم گهواره‌ای می‌تواند موجب واژگونی کلی سیستم شود (شکل ۶-الف). برای کاهش این خطر بالقوه برای سیستم‌هایی با ضرایب اطمینان بالا نیاز به به‌کارگیری تمهیداتی می‌باشد. در این تحقیق از دیواره‌های جداساز لرزه‌ای با مصالح نرم برای سیستم گهواره‌ای با ضرایب اطمینان نسبتاً بالای ۷/۵ استفاده شده است.



شکل (۶): نمایش شماتیک (الف) پاسخ سیستم گهواره‌ای با ضریب اطمینان بالا بر اساس میزان کرنش پلاستیک و (ب) سیستم بهسازی پیشنهاد شده با دیواره‌های نرم.



شکل (۲): مشخصات زلزله‌های ورودی در سناریوی لرزه‌ای استفاده شده.

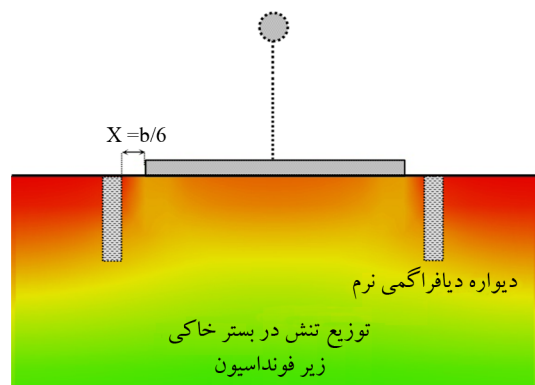
زهکشی نشده خاک در دیواره‌های نرم $0/1$ برابر مقادیر اولیه خاک بستر باشد (مانند استفاده از مصالح بنتونیتی) [۲۹].

۵- ارائه و تفسیر نتایج

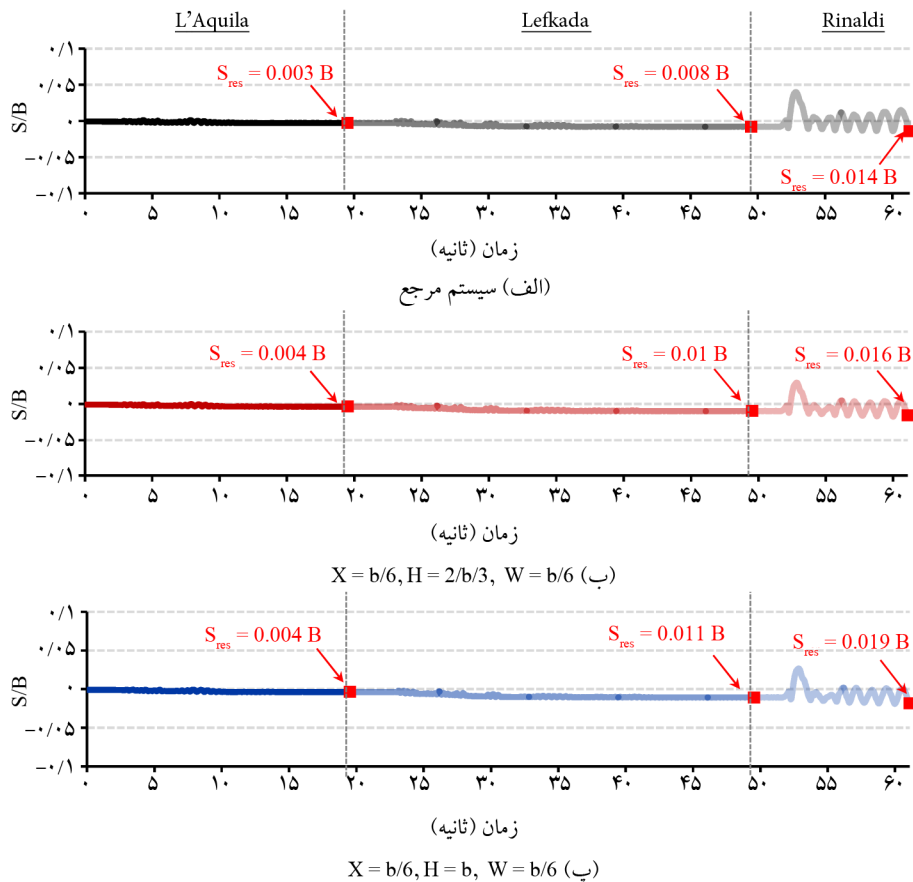
۵-۱- بررسی تاریخچه زمانی نشست سیستم گهواره‌ای

مود حرکتی غالب در سازه‌های گهواره‌ای با ضریب اطمینان بالا شامل بلندشدگی فونداسیون از خاک بستر خود می‌باشد. از این روی وقوع نشست‌های ناچیزی را در حین وقوع زلزله می‌توان انتظار داشت که این امر از لحاظ عملکرد سازه‌ها امری مطلوب می‌باشد. از این روی دیواره‌های نرم باید با فاصله از فونداسیون‌های گهواره‌ای قرار داده شوند تا از لحاظ میزان نشست در عملکرد سازه‌ها خللی به وجود نیاید. در ادامه تأثیر استفاده از دیواره‌هایی با مصالح نرم در اطراف فونداسیون را به‌عنوان جدا کننده لرزه‌ای بر روی میزان نشست مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. در شکل (۹) نتایج مربوط به مقادیر نشست در شرایط مختلف سازه گهواره‌ای بهسازی شده نسبت به سیستم مرجع بر اساس پارامتری بعد نشست به عرض فونداسیون (S/B) ارائه شده است.

همچنین ضخامت ثابتی برابر با $W = b/6$ برای دیواره‌ها فرض شده است. فاصله‌ای برابر با $X = b/6$ مابین دیواره‌های دیافراگمی تالبه فونداسیون در تمامی تحلیل‌ها در نظر گرفته شده است. این فاصله بر اساس نحوه توزیع تنش در خاک زیر فونداسیون همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است و عدم اختلال در میزان ظرفیت باربری استاتیکی ارائه شده است. در تعیین مقادیر انتخابی برای فاصله و مشخصات هندسی دیواره‌ها قابلیت اجرایی آنها نیز مد نظر قرار گرفته است. در این تحقیق فرض بر آن است که مقاومت



شکل (۸): شکل شماتیکی از نحوه قرارگیری دیواره‌های نرم دیافراگمی در اطراف فونداسیون بر اساس توزیع تنش در خاک.



شکل (۹): نمودار تاریخچه زمانی نشست سیستم گهواره‌ای در حضور دیواره‌های نرم.

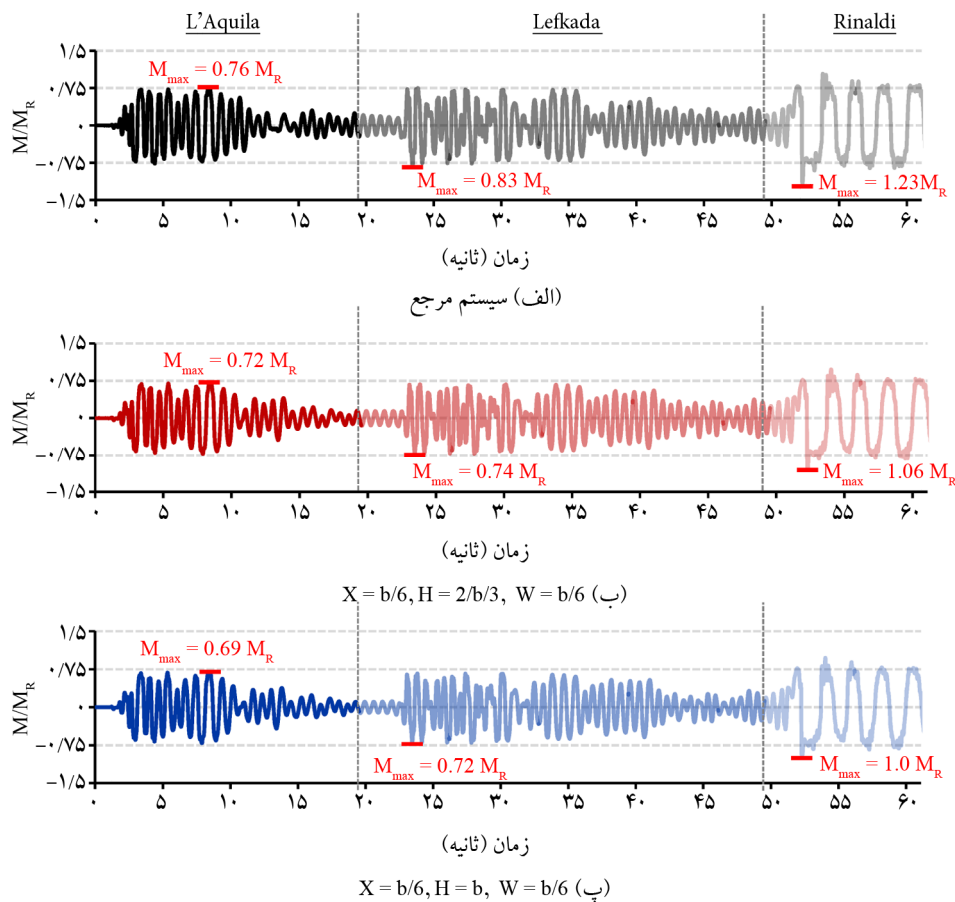
همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، استفاده از دیواره‌های نرم می‌تواند مقدار کمی نشست‌های پسماند فونداسیون را افزایش دهد. لازم به ذکر است این میزان افزایش نشست در حین زلزله‌هایی با شدت متوسط و نسبتاً شدید بسیار ناچیز می‌باشد. در تحریک بسیار شدید Rinaldi با افزایش ارتفاع دیواره افزایش بیشتر ولی قابل‌تحملی در نشست دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده آن است که استفاده از دیواره‌های نرم باعث انعطاف‌پذیری بیشتر خاک بستر شده و فرصت گسترش کرنش‌های پلاستیک را که موجب افزایش نشست سیستم گهواره‌ای می‌شود تا حدودی افزایش دهد.

خمش قابل تحمل توسط بلوک صلب واقع بر بستری صلب خمشی $(MR = mgb)$ بیان شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، با به‌کارگیری دیواره‌های نرم در اطراف فونداسیون مقدار لنگر خمشی وارد بر سیستم کاهش یافته است. این کاهش ناشی از آن است که بر اثر اعمال تحریکات لرزه‌ای دیواره‌های نرم نسبت به خاک اطراف خود به دلیل داشتن مقاومت کمتر وارد فاز پلاستیک شده و مانند جداکننده‌های لرزه‌ای عمل کرده‌اند. در واقع با افزایش مقدار رفتار پلاستیک^۷ خاک دیواره‌ها مقدار کمتری نیروی لرزه‌ای به سیستم گهواره‌ای وارد شده است و لنگرهای کمتری را فونداسیون متحمل شده است. بر این اساس مقدار کاهش لنگر خمشی بر اثر اعمال زلزله‌های شدیدتر بیشتر از زلزله‌های ضعیف‌تر می‌باشد.

نتایج همچنین بیانگر آن است که افزایش عمق دیواره‌های نرم سبب کاهش لنگر خمشی وارد بر سیستم گهواره‌ای می‌گردد. به‌عنوان مثال استفاده از دیواره‌های نرم برای شرایطی که $W = b/6$

۵-۲- بررسی تاریخچه زمانی لنگر خمشی وارده بر سیستم گهواره‌ای

در این قسمت به مطالعه میزان لنگر خمشی وارده بر سیستم گهواره‌ای در حین اعمال سناریوی لرزه‌ای می‌پردازیم. لازم به ذکر است مقدار لنگر خمشی به‌صورت بی‌بعد بر اساس بیشینه لنگر



شکل (۱۰): نمودار تاریخچه زمانی ظرفیت خمشی سیستم گهواره‌ای در حضور دیواره‌های نرم.

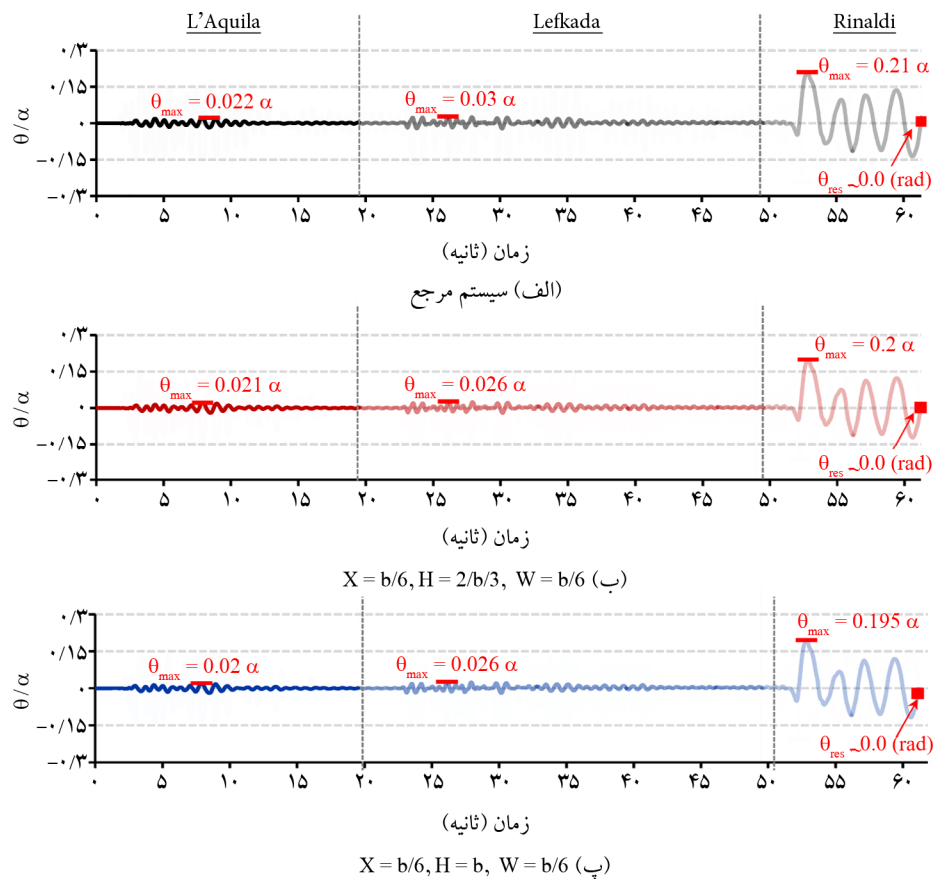
صورتی است که بیشینه دوران سیستم گهواره‌ای بر اثر اعمال زلزله شدید تا ۱۵ درصد می‌تواند کاهش یابد. این نتیجه بیانگر آن است که تأثیر جداسازی لرزه‌ای سیستم در زلزله‌های شدیدی که انتظار اعمال انرژی بیشتری به سازه می‌رود و همچنین تغییر شکل‌های بزرگ‌تری را در خاک بستر می‌تواند در پی داشته باشد قابل توجه است. این موضوع از میزان توانایی تحریک ورودی در ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک در دیواره‌های نرم ناشی می‌شود. میزان دوران‌های ماندگار فونداسیون نیز همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود برای حالات مختلف حدود صفر است.

لازم به ذکر است نتایج ارائه شده در این تحقیق بر اساس سناریوی لرزه‌ای معرفی شده به‌عنوان تحریک ورودی می‌باشد. لذا جهت ارائه جمع‌بندی‌های جامع‌تری در این زمینه نیاز به تحلیل عملکرد سیستم‌های بهسازی شده تحت رکوردهای لرزه‌ای بیشتری با خصوصیات متفاوت می‌باشد.

و $H = b$ می‌باشد تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت خمشی سیستم گهواره‌ای در حین اعمال بارگذاری لرزه‌ای دارد. برای این شرایط، میزان نیروی خمشی وارد بر فونداسیون در حین زلزله شدید Rinaldi تا ۱۹ درصد می‌تواند کاهش یابد. این کاهش در خصوص ماکزیمم لنگر خمشی در زمان اعمال تحریکاتی با شدت متوسط تا نسبتاً شدید به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد است.

۳-۵- بررسی تاریخچه زمانی دوران سیستم گهواره‌ای

در شکل (۱۱) میزان دوران فونداسیون برای شرایط مختلف دیواره‌های جداساز لرزه‌ای در حین اعمال سناریوی زلزله نشان داده شده است. دوران فونداسیون بر حسب نسبت لاغری سیستم ($\alpha = \tan(b/H)$) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حین زلزله‌هایی با شدت متوسط تأثیر دیواره‌های جداساز لرزه‌ای بر روی مقدار دوران فونداسیون ناچیز است. این در



شکل (۱۱): نمودار تاریخچه زمانی دوران فونداسیون سیستم گهواره‌ای در حضور دیواره‌های نرم.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- استفاده از دیواره‌های نرم می‌تواند مقدار کمی نشست‌های ماندگار فونداسیون را افزایش دهد. لازم به ذکر است، این میزان افزایش نشست در حین زلزله‌هایی با شدت متوسط و نسبتاً شدید بسیار ناچیز می‌باشد.
- با استفاده از دیواره‌های نرم انعطاف‌پذیری سیستم افزایش یافته است و به‌موجب آن ظرفیت خمشی فونداسیون کاهش پیدا کرده است. در واقع با افزایش مقدار رفتار پلاستیک خاک بستر سیستم گهواره‌ای لنگرهای کمتری را می‌تواند تحمل کند.
- در حین زلزله‌هایی با شدت متوسط تأثیر دیواره‌های جداساز لرزه‌ای بر روی مقدار دوران فونداسیون ناچیز است. این در صورتی است که بیشینه دوران سیستم گهواره‌ای بر اثر اعمال زلزله شدید تا ۱۵ درصد می‌تواند کاهش یابد.

مراجع

1. Gazetas, G. and Apostolou, M. (2004) Non-linear soil-structure interaction: foundation uplifting and

با توجه به مطالعات انجام شده، عملکرد فونداسیون‌های گهواره‌ای با توجه به مقدار ضرایب اطمینان آنها در برابر بار قائم در معرض دو مخاطره جدی قرار دارند. در مورد سیستم‌های با ضرایب اطمینان کم نشست بیش از اندازه و برای سیستم‌هایی با ضرایب اطمینان بالا خطر واژگونی محتمل است. از این روی ارائه راهکاری در خصوص انجام طراحی متعادل مابین این دو حد خرابی نیاز می‌باشد. در این تحقیق به بررسی اثرات استفاده از بهسازی خاک بستر در اطراف فونداسیون بر روی رفتار سیستم‌های گهواره‌ای با ضرایب اطمینان بالا پرداخته شده است. در این خصوص از دیواره‌های دیافراگمی نرم به‌عنوان جداکننده‌های لرزه‌ای استفاده شده است. به‌صورت کلی نتایج اصلی حاصل از این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

- نتایج نشان می‌دهد، استفاده از دیواره‌های سخت می‌تواند باعث کاهش نشست‌های ماندگار فونداسیون شود.

- seismic failure thresholds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **68**, 23-39.
11. Hakhmaneshi, M., Kutter, B.L., Moore, M., and Champion C. (2016) Validation of ASCE 41-13 modeling parameters and acceptance criteria for rocking shallow foundations. *Earthquake Spectra*, **32**(2), 1121-40.
 12. Allmond, J.D. and Kutter, B.L. (2014) Design considerations for rocking foundations on unattached piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **140**(10), 4014058.
 13. Kokkali, P., Abdoun, T., and Anastopoulos, I. (2015) Centrifuge modeling of rocking foundations on improved soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **141**(10), 4015041.
 14. Loli, M., Knappett, J.A., Brown, M.J., Anastopoulos, I., and Gazetas, G. (2015) Centrifuge testing of a bridge pier on a rocking isolated foundation supported on unconnected piles. In *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Christchurch, New Zealand.
 15. Liu, W. and Hutchinson, T.C. (2018) Numerical investigation of stone columns as a method for improving the performance of rocking foundation systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **106**, 60-69.
 16. Xu, R. and Fattahi, B. (2018) Influence of geotextile arrangement on seismic performance of mid-rise buildings subjected to MCE shaking. *Geotextiles and Geomembranes*, <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.004>.
 17. Sharifzadeh Asli, M., Mir Mohammad Hosseini, S.M., and Jahanirad A. (2018) Effect of soil reinforcement on rocking isolation potential of high-rise bridge foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.035>.
 18. Sadjadi, M., Fadaee, M., Ghannad, M.A., and Jahankhah, H. (2019) Numerical study of stiff diaphragm walls used to improve the performance of rocking foundation systems. *Journal of*
 - soil yielding. In *3rd Joint U.S. - Japan Workshop on Soil-Structure Interaction*, 60-66, Menlo Park, CA.
 2. Gajan, S., Kutter, B.L., Phalen, J.D., Hutchinson, T.C., and Martin, G.R. (2005) Centrifuge modeling of load-deformation behavior of rocking shallow foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(7-10), 773-83.
 3. Paolucci, R., Shirato, M., and Yilmaz, M.T. (2008) Seismic behaviour of shallow foundations: shaking table experiments vs numerical modelling. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **37**(4), 577-95.
 4. Gajan, S. and Kutter, B.L. (2009) Contact Interface Model for Shallow Foundations Subjected to Combined Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(3), 407-19.
 5. Raychowdhury, P. and Hutchinson, T.C. (2009) Performance evaluation of a nonlinear winkler-based shallow foundation model using centrifuge test results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **38**(5), 679-98.
 6. Anastopoulos, I., Gazetas, G., Loli, M., Apostolou, M., and Gerolymos, N. (2010) Soil failure can be used for seismic protection of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**(2), 309-26.
 7. Gelagoti, F., Kourkoulis, R., Anastopoulos, I., and Gazetas G. (2012) Rocking-isolated frame structures: margins of safety against toppling collapse and simplified design approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **32**(1), 87-102.
 8. Deng, L. and Kutter, B.L. (2012) Characterization of rocking shallow foundations using centrifuge model tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **41**(5), 1043-60.
 9. Anastopoulos, I., Loli, M., Georgarakos, T., and Drosos, V. (2013) Shaking table testing of rocking-isolated bridge pier on sand. *Journal of Earthquake Engineering*, **17**(1), 1-32.
 10. Gazetas, G. (2015) 4th ishihara lecture: soil-foundation-structure systems beyond conventional

International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

28. Kirtas, E. and Pitilakis, K. (2012) Subsoil interventions effect on structural seismic response. part II: parametric investigation. *Journal of Earthquake Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/13632460802347471>.
29. Fadaee, M., Ezzatyazdi, P., Anastasopoulos, I., and Gazetas, G. (2016) Mitigation of reverse faulting deformation using a soil bentonite wall: dimensional analysis, parametric study, design implications. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.007>.
30. *Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1631233>.
19. Anastasopoulos, I., Gelagoti, F., Kourkoulis, R., and 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), 1154-68.
20. Armstrong, P.J. and Frederick, C.O. (1966) A mathematical representation of the multiaxial bauschinger effect. CEGB Rep. No. RD/B/N 731.
21. Gerolymos, N., Gazetas, G., and Tazoh, T. (2005) Seismic response of yielding pile in non-linear soil. *Proc. 1st Greece-Japan Workshop, Seismic Design, Observation, and Retrofit of Foundations*, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 25-36.
22. Hakhmaneshi, M., Kutter, B.L., Deng, L., Hutchinson, T.C., and Liu, W. (2012) New findings from centrifuge modeling of rocking shallow foundations in clayey ground. *In GeoCongress 2012*, 195-204.
23. Ishibashi, I. and Zhang, X. (1993) Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils Found*, **33**, 182-191. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.33.182>.
24. Jeremić, B., Jie, G., Preisig, M., and Tafazzoli, N. (2009) Time domain simulation of soil-foundation-structure interaction in non-uniform soils. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, <https://doi.org/10.1002/eqe.896>.
25. Luzhen, J., Jun, Ch., and Jie, L. (2010) Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, <https://doi.org/10.1007/s11803-010-0037-x>.
26. Zienkiewicz, O.C., Bicanic, N., and Shen, F.Q. (1989) Earthquake input definition and the transmitting boundary conditions. *Advances in Computational Nonlinear Mechanics*, Error! Hyperlink reference not valid..
27. Kutter, B.L. (1995) Recent advances in centrifuge modeling of seismic shaking. *Proc. of the Third*

واژه‌نامه

Rocking Foundation	۱- فونداسیون گهواره‌ای
Kinematic Hardening	۲- سخت‌شوندگی سینماتیک
Diaphragm Wall	۳- دیواره دیافراگمی
Seismic Isolation	۴- جداسازی لرزه‌ای
Free-Field Columns	۵- دیواره‌های میدان آزاد
Seismic Scenario	۶- سناریوی لرزه‌ای
Plastic Behavior	۷- رفتار پلاستیک

Improving the Seismic Performance of Nonlinear Rocking Soil-Structure Systems using Soft Diaphragm Walls

Mani Sadjadi¹, Meysam Fadaee^{2*}, Mohammad Ali Ghannad³ and Hossein Jahankhah⁴

1. Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: Fadaee@srbiau.ac.ir
3. Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
4. Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

A growing body of evidence suggests that the possibility of nonlinear rocking oscillations can protect the structure from serious damage. One of the potential concerns about this design approach is the magnitude of residual settlement and maximum rotation. Several improvement techniques have been proposed to ameliorate the nonlinear behavior of rocking foundations based on the vertical factor of safety. Rocking systems with a large factor of safety against vertical load are more prone to toppling collapse under severe ground motions. This research explored the effectiveness of using soft walls next to a rocking foundation for mitigating seismic risk. The vital advantage of this improvement technique is that it is a feasible strategy for both new construction and existing structures.

The soil-foundation-structure system has been analyzed using the numerical finite element (FE) method that takes the material and geometric nonlinearities into account. In this case, the nonlinear response mainly involves the interaction between footing uplift and soil failure, which may induce additional (gravitational) aggravating moment (P- Δ effect).

In the first step, a three-dimensional (3D) numerical model has been constructed for the rocking foundation-soil system experiment. In order to verify the accuracy of the simulation, the numerical modeling and the experimental test results have been compared. The results of the centrifuge physical testing conducted were used to validate the numerical simulation. All FE analyses were performed in Abaqus software. This software has been utilized by a number of researchers to study complex soil-foundation-structure interaction phenomena.

Because the initial conditions play an important role in simulating geotechnical problems, a staged analysis procedure has been adopted. In the dynamic analysis stage, an incremental-iterative procedure was used to integrate the equations of motion. The Hilber-Hughes-Taylor algorithm was used to conduct the transient analysis phase. The modified Newton-Raphson method was employed to decrease the calculation cost needed for the great number of degrees of freedom of the model.

Finely refined 3D FE mesh was used to precisely reproduce the mechanism of bearing capacity failure and the rocking behavior. The soil medium and foundation were discretized into eight-node hexahedral continuum elements (C3D8 element type). Two-node linear beam elements were used to model the superstructure (B31 element type). A special surface-to-surface contact formulation between the foundation and soil was used for the realistic simulation of possible uplift and sliding of the foundation. Surface-to-surface contact can calculate contact stresses accurately by reducing the possibility of large-localized penetration of the two surfaces. The properties of the contact element were defined by the interface stiffness in the normal and the tangential directions.

Nonlinear soil behavior was modeled using a kinematic hardening model with the Von Mises failure criterion and associated plastic flow rule. This simplified constitutive model is applicable for the prediction of the undrained behavior of clay as normal pressure independent. In contrast to soil, the behavior of the structure-foundation model is assumed to be linear elastic. A parametric study was carried out to explore the sensitivity of the geometric design variables of the diaphragm wall, such as height and thickness on the behavior of the isolated foundation-soil system.

It should be mentioned that the values of model parameters were determined based on their practical feasibility. The distance of walls has been determined far from the edge of the foundation to avoid static bearing capacity failure.

The results showed that the placement of vertical soft walls next to the foundation could limit the transmitted forces onto the superstructure. This could be lessened the maximum motion of the structure and the following overturning moment of the foundation. Hence, adequate safety margins against toppling collapse could be easily achieved under strong motions.

Keywords: Numerical Modeling, Soil-Foundation-Structure Interaction, Seismic Rocking Behavior, Soil Intervention, Soft Diaphragm Walls.