

ارزیابی آزمایشگاهی و عددی عملکرد ستون خاک-سیمان در تثبیت خاک نرم تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای

امیرپرویز نیما^۱

محمد شریفی پور^{۲*}

حسن نگهدار^۳

چکیده

ستون خاک-سیمان یکی از روش‌های کارآمد جهت بهسازی و افزایش ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک نرم محسوب می‌گردد. تعیین مؤلفه‌ها و طراحی کارآمد ستون‌های خاک-سیمان در راستای بهسازی و افزایش ظرفیت باربری خاک نرم بالاخص در مناطق لرزه‌خیز، نیازمند شناخت عمیق از کلیه پارامترهای مؤثر بر عملکرد زمین‌های تثبیت شده تحت شرایط مختلف سربار می‌باشد. در این پژوهش، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر متغیرهای مؤثر بر بهسازی زمین توسط ستون خاک-سیمان تحت شرایط مختلف سربار و بارگذاری لرزه‌ای انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد ستون خاک-سیمان در مقاوم‌سازی زمین نرم تحت دو شرایط سربار صلب و خاکریز معطوف بوده که براساس نتایج حاصل، مدل عددی در بستر نرم‌افزار المان محدود ABAQUS برپاسازی و اعتبارسنجی (خطای مدل‌سازی عددی تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی کمتر از ۱٪) شده است. در نهایت عملکرد ستون خاک-سیمان در بهسازی خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مطالعات آزمایشگاهی نشان داد که تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان تحت سربار انعطاف‌پذیر باعث تثبیت بیشتر خاک نسبت به شرایط سربار پی صلب گردیده و میزان نشست بهترتبی ۷۵٪ / ۵۵٪ نسبت به خاک مبتدا کاهش یافته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که به کارگیری ستون خاک-سیمان موجب بهبود رفتار لرزه‌ای زمین‌هایی با خاک نرم گردیده است، به‌گونه‌ای که میانگین میزان نشست تحت بارگذاری ۵ زمین‌لرزه بزرگ در شرایط سربار صلب ۱۳٪ / ۵۴٪ و در شرایط سربار خاکریز ۶۳٪ / ۷۱٪ کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی

تثبیت خاک، ستون خاک-سیمان، بارگذاری لرزه‌ای، مدل‌سازی عددی، خاک نرم

^۱دانشجوی دکترای تخصصی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

^۲دانشیار، دانشگاه رازی، sharifipour@razi.ac.ir

^۳استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

مقدمه

۲۰۱۵؛ ویجراتنا و لیاناپاتیرانا^{۱۱}، ۲۰۱۸). در این راستا به

جهت برآورده اهداف مدنظر از پایدارسازی و بهسازی، بررسی عملکرد و ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر در روش پایدارسازی ستون‌های خاک-سیمان مورد توجه بوده است. به طور کلی ستون‌های خاک-سیمان به دو روش اصلی: ۱- اختلاط عمیق، ۲- تزریق دوغاب انجام می‌شود (یی و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۹؛ ونگ و همکاران^{۱۳}، ۲۰۲۳).

در روش اختلاط عمیق خاک (DSM^{۱۴})، خاک ناپایدار با سیمان و یا سایر مواد افزودنی با به کارگیری تجهیزات خاص، مخلوط می‌شود تا یک ستون چسباننده خاک برای بهبود استحکام و کاهش تراکم‌پذیری خاک ضعیف تشکیل شود. این روش عمدتاً موجب افزایش سختی خاک مبنا با افزودن ماده تقویتی مانند سیمان، آهک، گچ و خاکستر می‌گردد (رومандو و راسین^{۱۵}، ۲۰۱۸). ساختار ایجاد شده با استفاده از تکنیک‌های DSM برای تکیه‌گاه و بستر سازه‌ها و خاکریزها، در کشورهایی مانند ژاپن، اسکاندیناوی و ایالات متعدد و به طور کلی در مناطقی که دارای خاک نرم بوده، استفاده شده است (کیتازوم^{۱۶}، ۲۰۲۲). خصوصیات بهبود یافته‌ی خاک، ممکن است ویژگیهای خاک مبنا، روش اختلاط و خصوصیات ستون خاک-سیمان را معنکس کند (شولر و وانلاندینگهام^{۱۷}، ۲۰۱۷). روش‌های اختلاط عمیق خاک بسته به میزان رطوبت خاک مبنا، به دو روش: ۱- اختلاط عمیق مرطوب (WDMM^{۱۸})، ۲- اختلاط عمیق خشک (DDMM^{۱۹}) طبقه‌بندی می‌شود.

DMM خشک به طور کلی ارزان‌تر از DMM مرطوب محسوب می‌شود و همچنین، مقاومت ستون خاک چسبنده تولید شده با استفاده از DMM خشک کمتر از مقاومت بدست آمده برای همان نوع خاک با استفاده از DMM مرطوب بوده است (کیتازوم^{۲۰}، ۲۰۲۲). روش اختلاط عمیق

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و گسترش ساخت‌وساز در مناطق مختلف دنیا، همواره نیاز به فضای بیشتر (زمین‌ها و اراضی) جهت پیاده‌سازی سازه‌های مختلف رو به افزایش بوده است. از این‌روی ایجاد بستر مناسب برای احداث سازه‌های مختلف به عنوان یکی از چالش‌های اصلی طراحان، مهندسین و مجریان این عرصه، مطرح بوده است (شریف و همکاران^۱، ۲۰۲۳). به طور کلی اکثر پروژه‌های ساختمنی با بستر نرم خاک مواجه بوده‌اند، این موضوع در مناطق ساحلی و دارای خاک سست به عنوان اصلی‌ترین مساله برای طراحی و اجرای اصولی سازه مبدل شده است (پراکاش و کریشنامورتی^۲، ۲۰۲۲). بسترها ای با خاک نرم، موجب عدم پایداری و یا نشستهای بیش از حد مجاز سازه می‌گردد (یی و زانگ^۳، ۲۰۱۷)، این مهم در مناطق لرزه خیز به علت اعمال بارهای لرزه‌ای بیش از پیش مورد توجه بوده است (خسروی و همکاران^۴، ۲۰۲۰). بنابراین یکی از مسائل اصلی پیش‌روی محققین و طراحان در طول چند دهه اخیر، ارائه راهکارهایی جهت تثبیت و مقاومت‌سازی زمین‌هایی با خاک نرم جهت احداث سازه‌های مختلف، بوده است (کارول^۵، ۲۰۰۳؛ راحیل^۶، ۲۰۰۷). تا به امروز تکنیک‌های مختلفی جهت بهسازی زمین توسعه داده شده و به صورت عملی در بسیاری از پروژه‌ها، عملکرد موفقیت‌آمیز و قابل قبولی داشته است (فتح و همکاران^۷، ۲۰۱۴؛ الکابی^۸، ۲۰۱۸). یکی از روش‌های کارآمد در بهبود خواص و رفتار خاک، به کارگیری ستون‌های خاک-سیمان بوده است (نگک و همکاران^۹، ۲۰۲۱). روش ستون‌های خاک-سیمان برای افزایش باربری زمین و همچنین تحمل بارهای مختلف اعم از پی صلب، سربارهای انعطاف‌پذیر (خاکریز) و ... به ویژه برای بهسازی خاک‌های نرم ساحلی می‌تواند بسیار کارآمد باشد (هن^{۱۰}،

¹¹ Wijerathna and Liyanapathirana

¹ Shareef et al.

¹² Yi et al.

² Prakash and Krishnamoorthy

¹³ Wang et al.

³ Ye and Zhang

¹⁴ deep soil mixing

⁴ Khosravi et al.

¹⁵ Romanov and Rasine

⁵ Karol

¹⁶ Kitazume

⁶ Rahil

¹⁷ Shuler and Vanlandingham

⁷ Fattah et al.

¹⁸ wet deep mixing method

⁸ Al -Kabee

¹⁹ dry deep mixing method

⁹ Ngoc et al.

¹⁰ Han

زمین‌هایی با سربار خاکریز، با استفاده از دو روش توأمً ستون‌های خاک-سیمان (اختلاط عمیق^۶) و بکارگیری زهکش‌های قائم (PVDs^۷) پرداختند. در این مطالعات، مدل‌سازی عددی با بهره‌گیری از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و در فضای دو بعدی و سه بعدی انجام شد و پارامترهایی همچون: میزان نشت خاک، تغییرات فشار آب منفذی، مکانیزم انتقال بار از خاک اطراف به ستون‌ها و جابجایی جانبی ستون خاک-سیمان ارزیابی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های میدانی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این مطالعات نشان داد که توافق خوبی بین داده‌های محاسبه شده و اندازه‌گیری شده برقرار بوده است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که ستون‌های خاک-سیمان باعث افزایش پایداری خاکریز در خاک نرم می‌شوند، در حالی که PVD ها باعث تسریع در تحکیم خاک نرم می‌شوند. یاپاگ و همکاران^۸ در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی عملکرد ستون‌های خاک-سیمان براساس بارگذاری خاکریز در یک مطالعه موردي (پژوهه توسعه بزرگراه اقیانوس آرام در استرالیا) را مورد آنالیز قرار داد. در این پژوهه، نشت‌های اندازه‌گیری شده زمین‌های بهسازی شده با ستون‌های خاک-سیمان در حین ساخت و بعد از ساخت خاکریز به طور قابل توجهی بیشتر از نشت‌های پیش‌بینی شده بود. در این مطالعه، یک مدل المان محدود بر پایه محیط متخلل غیرخطی ایجاد و رفتار و عملکرد زمین‌های تثبتی شده ارزیابی گردید. در این مطالعات، پارامترهای نشت، فشار آب منفذی و تغییر شکل جانبی با اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه شد. نتایج نشان داد که توافق خوبی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده است. همچنین نتایج حاصل از این مطالعات، بیانگر حاصل از این پژوهش به وجود دارد. نتایج حاصل از کرنش سستونهای DCM^۹ در آنالیز از اهمیت بالایی برخوردار است. تزنر و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۱۷ تحقیقاتی جامع بر روی میزان تخریب ستون‌های خاک-سیمان با استفاده از خاک برای بهسازی زمین سازگار با محیط زیست است و کاربرد آن در بهسازی و تقویت خاک‌های ضعیف در سراسر جهان رو به رشد بوده است. با به کارگیری روش اختلاط عمیق بهبود قابل توجهی در خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های نرم از طریق مخلوط کردن این خاک با سیمان، آهک، خاکستر و... برای تولید ستون چسبنده خاک حاصل شده است (تراشی^۱، ۲۰۰۹؛ کیتازوم ۲۰۲۱). نتایج حاصل از به کارگیری ستون‌های خاک-سیمان، بیانگر این موضوع بوده است که ماده خاکی حاصل از مقاومت بالاتر، تراکم پذیری کمتر و هدایت هیدرولیکی پایین‌تر برخوردار بوده است (کیتازوم ۲۰۲۱). در راستای به کارگیری تکنیک ستون خاک-سیمان برای بهسازی و مقاوم‌سازی خاک نرم تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی توسط محققین مختلف انجام شده است. در این راستا هورپیبولسک و همکاران^۲، ۲۰۱۲ در مطالعات آزمایشگاهی و عددی به بررسی و ارزیابی تثبیت زمین با خاک رس نرم کامپوزیت، با استفاده از ستون خاک-سیمان پرداختند. در این پژوهش، مدل‌سازی عددی در بستر نرم افزار PLAXIS انجام شد، نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر معیارهایی برای بهسازی و تثبیت زمین‌هایی با خاک رس نرم کامپوزیت بوده است. دهقان‌باناداکی و همکاران^۳ در سال ۲۰۱۳ به بررسی کاربردی روش‌های تثبیت و مقاوم‌سازی زمین‌هایی با خاک نرم پرداخت. در این مطالعه، پارامترهای مؤثر و روش‌های مختلف تثبیت خاک با تمرکز بر روش پیاده‌سازی اختلاط عمیق مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که تکنیک‌های اختلاط عمیق خاک موجب بهبود خصوصیات خاک نرم از نظر محل استقرار، ظرفیت باربری و ویژگی‌های مقاومت برشی خاک شده است. همچنین نتایج حاصل از این مطالعات، بیانگر ارزیابی تأثیر پارامترهایی همچون: ماده تثبیت کننده، موقعیت قراگیری ستون و ظرفیت باربری خاک کامپوزیت در تثبیت خاک به روش اختلاط عمیق بوده است. بی و همکاران^۴ در سال ۲۰۱۳ به بررسی افزایش ظرفیت باربری

⁶ prefabricated vertical drains⁷ Yapage et al.⁸ deep cement mixed⁹ Turner et al.¹ Terashi² Horpibulsuk et al.³ Dehghanbanadaki et al.⁴ Ye et al.⁵ deep mixing

در مقیاس واقعی و با به کار گیری روش مدل سازی عددی المان محدود (FEM^۴) انجام شد. در این پژوهش دو الگوی نصب و کار گذاری ستون های خاک-سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در مطالعات انجام شده رویه ای برای مدل سازی ۲ بعدی (ارزیابی عملکرد ستون ۳ بعدی در وضعیت دیواره ای ستونی کرنشی ساده ۲ بعدی) کل سیستم زمین به سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از آنالیز ۲ بعدی و ۳ بعدی نشان داد که تجزیه و تحلیل ۲ بعدی، نتایج نادرستی را از نظر حرکات جانبی ستون، گشتاور خمی و بارهای محوری ناشی از ستون های خاک-سیمان ارائه می دهد. این نتیجه به این دلیل رخ داده است که ستون های خاک-سیمان در ارزیابی ۲ بعدی با استفاده از دیواره ای طولانی مدل سازی شده اند که در اصل مانع از حرکت خاک بین دو ستون یا ردیف ستون می شوند. در این مطالعه عوامل تصحیح شده برای توسعه نتایج آنالیز ۲ بعدی به نتایج آنالیز ۳ بعدی نیز پیشنهاد شده است.

نیز سیاست سعید^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعاتی تثبیت خاک نرم با استفاده از ستون های خاک-سیمان در یک آزمایش فیزیکی در مقیاس کوچک را مورد ارزیابی قرار دادند و تأثیر ضربی بهبود سطح^۶ (Ap) و ارتفاع ستون (Hc) در زمین بهبود یافته تحت بار طراحی^۷ (WD) از طریق آزمون های مدل سازی فیزیکی در مقیاس کوچک بررسی شد. در این مطالعات، دو سناریو بار گذاری بر روی خاک های تثبیت شده و تثبیت نشده اعمال گردید. اولین سری آزمایشات برای شناسایی مکانیسم گسیختگی انجام شد. سری دوم تحت بار طراحی برای ارزیابی توزیع تنش و الگوی شکست انجام شد. نتایج حاصل از پژوهش نشان داد که با افزایش ضربی بهبود سطح (Ap) و افزایش ارتفاع ستون بر روی عملکرد زمین هایی با خاک رس نرم دریابی (در کشور تایلند، شهر بانکوک) تحت بار گذاری خاکریز که توسط ستون های خاک-سیمان مقاوم سازی شده اند، انجام دادند. این پژوهش به صورت عددی، در فضای ۲ بعدی و ۳ بعدی،

^۱ Yi et al.^۲ Phutthananon et al.^۳ Jamsawanga et al.^۴ finite element method^۵ Nissa Mat Said et al.^۶ area improvement ratio^۷ design load^۸ Said et al.

بار بین ستون و خاک اطراف آن خصوصاً برای گروه ستون خاک-سیمان و سازوکار توزیع تنش در ستون خاک-سیمان بررسی شد. علاوه بر این توسعه‌ی توزیع تنش و نسبت تمرکز تنش، تحت بارگذاری سربار بر خاک تشییت شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نی و همکاران^۱ در سال ۲۰۲۰ در مطالعاتی آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی ظرفیت بارگذاری زمین‌های تشییت شده با ستون‌های خاک-سیمان تحت بارگذاری در شرایط استاتیکی (بار سربار (پی صلب و خاکریز)) پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که حالت گسیختگی زمین‌های کامپوزیتی برای انواع مختلف بارگذاری بر زمین متفاوت است، به‌گونه‌ای که گسیختگی خاک قبل از گسیختگی ستون در زیر خاک رس نرم رخ می‌دهد. در حالی که گسیختگی ستون حالت خرابی اولیه برای مناطق کامپوزیت در زیر خاکریز بوده است. فام و همکاران^۲ در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به ارزیابی رفتار ستون‌های خاک-سیمان در تشییت زمین‌هایی با خاک نرم در کشور ویتنام پرداختند. در این پژوهش، بهبود رفتار پایدارسازی زمین با بهره‌گیری از روش اختلاط عمیق خاک با سیمان به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. براین اساس، چندین آزمایش نفوذپذیری و برش مستقیم برای درک رفتار روش اختلاط عمیق خاک با سیمان پیاده‌سازی شد. همچنین مدل‌سازی عددی بر بستر نرم افزار PLAXIS صورت گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به عنوان معیارهایی کاربردی برای ارزیابی روش اختلاط عمیق خاک با سیمان مورد استفاده قرار گیرد. کلدول و همکاران^۳ در سال ۲۰۲۰ به ارزیابی قابلیت اطمینان ستون خاک-سیمان در تشییت خاک با سربار خاکریز پرداختند. در این مطالعه از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای حصول شرایط عدم قطعیت استفاده شد، همچنین مدل عددی در بستر نرم افزار FLAC پیاده‌سازی شده است. در راستای بررسی عملکرد روش‌های پایدارسازی خاک تحت شرایط بارگذاری لزهای، خرسوی و همکاران^۴ در سال

^۵ Ngoc et al.^۶ Ni et al.^۷ Kumar et al.^۱ Said et al.^۲ Pham et al.^۳ Coldwell et al.^۴ Khosravi et al.

تحکیم خاک و ترکیب ستون‌های SC با ستون‌های آهکی نیز در بهبود پایداری خاکریز مؤثر بود. علاوه بر این نتایج نشان داد که پایداری خاکریز تحت تأثیر آرایش ستون‌ها در سیستم کامپوزیت آهکی و SC بوده است.

در سال ۲۰۲۳ کارکی و همکاران^۶، مطالعاتی در راستای ارزیابی مقاومت برشی زهکشی نشده در ستون‌های خاک-سیمان ساخته شده با روش اختلاط خشک برای خاک رس نرم بانکوک انجام دادند. در این پژوهش روابط بین مقاومت برشی زهکشی نشده و پارامترهای طراحی، از جمله خصوصیات سیمان، نسبت کل آب به سیمان، زمان عمل‌آوری و رطوبت طبیعی با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین (ML) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش، منجر به ارائه یک معادله خطی با استفاده از مدل رگرسیونی برای پیش‌بینی مقاومت برشی زهکشی نشده ستون خاک-سیمان براساس خصوصیات سیمان، رطوبت طبیعی و زمان عمل‌آوری به عنوان پارامترهای ورودی مدل گردید.

ارزیابی تأثیر شرایط عمل‌آوری و خصوصیات متریال تشکیل‌دهنده ستون خاک-سیمان بر مقاومت فشاری نهایی آن، در سال ۲۰۲۳ توسط نگویان و همکاران^۷ مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعات، خصوصیات آبشهری و همچنین درصد به کارگیری افزودنی دوده سیلیس^۸ در ساخت و عمل‌آوری ستون‌های خاک-سیمان و تأثیر آن بر مقاومت فشاری نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت.

شریف و همکاران^۹ در سال ۲۰۲۳ به بررسی پژوهش‌های انجام شده در راستای به کارگیری روش‌های مختلف ثبتیت خاک براساس تزریق مواد ثبتیت‌کننده (چسبنده) پرداختند. در این مطالعه با ارزیابی پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی، ویژگی‌های این روش ثبتیت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از بهبود عملکرد خاک بعد از تزریق مواد ثبتیت‌کننده بوده است. براساس نتایج حاصل از این مطالعه موری مشخص می‌گردد که عوامل متعددی همچون: هدف از می‌یابد، به گونه‌ای که با افزایش تراکم اولیه رس از ۰.۱ به ۰.۵ ظرفیت باربری زمین ۳.۵ برابر افزایش می‌یابد. یو و همکاران^{۱۰} در سال ۲۰۲۲ فناوری نصب ستون اختلاط خاک-سیمان و کنترل کیفیت با بهبود اتوماسیون و توانایی هوشمند تجهیزات نصب مبتنی بر فناوری اینترنت اشیا (IoT^{۱۱}) را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعات، یک سیستم اختلاط هوشمند و مکانیزه‌ی خاک با سیمان برای نصب و کارگذاری ستون‌های خاک-سیمان ارائه شد. نتایج آزمایش میدانی نشان داد که سیستم اختلاط خاک و سیمان هوشمند ظرفیت و کیفیت نصب را بهبود بخشیده، هزینه را کاهش داده و مدیریت ساخت‌ساز را ساده می‌نماید.

در سال ۲۰۲۲ ترمارتیروسیان و همکاران^{۱۲} به بررسی خواص مکانیکی نمونه‌های خاک-سیمان از کرنش برشی بسیار کوچک تا بزرگ تحت بارگذاری دینامیکی پرداختند. رفتار غیرخطی ستون خاک-سیمان در معرض بارگذاری دینامیکی در طیف وسیعی از کرنش‌های برشی متغیر براساس دو مدل مکانیکی مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش وضعیت تنش-کرنش برای ستون‌های خاک-سیمان در معرض بارگذاری دینامیکی، تقریب سختی خاک و ضربی میرایی مورد تعزیز و تحلیل قرار گرفت. نتایج، بیانگر ارائه‌ی نمودار تجربی وابستگی سختی-کرنش برشی خاک ثبتیت شده با ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری لرزاکی بوده است.

در مطالعات پاراکاش و همکاران^{۱۳} در سال ۲۰۲۲ بررسی اثربخشی ستون‌های خاک-سیمان (SC) به صورت جداگانه و در ترکیب با ستون‌های آهکی بر روی پایداری خاکریز ساخته شده بر خاک نرم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش پایداری خاکریز از نظر نشت و ضربی ایمنی در فواصل زمانی مختلف در طول تحکیم ارزیابی شد. همچنین کارایی ستون‌ها با استفاده از روش المان محدود کرنش صفحه دو بعدی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج حاصل از پژوهش، نشان داد که ستون‌های خاک-سیمان در بهبود نشت و ضربی ایمنی خاکریز در سراسر

⁶ Nguyen et al.⁷ Silica fume admixture⁸ Shareef et al.¹ Yu et al.² Internet of Things³ Ter-Martirosyan et al.⁴ Prakash et al.⁵ Karki et al.

سست تحت دو شرایط خاک مبنا و خاک تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان انجام شده است. هدف اصلی از تعریف مدل‌های آزمایشگاهی، کالیبراسیون و صحبت‌سنگی مدل‌سازی عددی بوده که در بستر نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌های عددی بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی برپاسازی گردیده و کالیبراسیون- صحبت‌سنگی مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در گام بعد به جهت ارزیابی عملکرد زمین‌های سست تثبیت شده با ستون خاک-سیمان، مدل‌های دو بعدی عددی برپاسازی و نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی و مدل‌های عددی سه بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. با انجام صحبت‌سنگی مدل‌سازی عددی، با بهره‌گیری از شتاب نگاشتهای ۵ زمین لرزه بزرگ، عملکرد خاک سست تحت بارگذاری پی صلب و خاکریز و بر اساس اعمال بارگذاری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

مشخصات مدل آزمایشگاهی

مدل‌های آزمایشگاهی شامل ۴ مدل اصلی خاک سست بدون تثبیت و تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان تحت دو شرایط بارگذاری پی صلب و خاکریز بوده است. به جهت پیاده‌سازی نمونه‌های مدل فیزیکی، از یک لوله‌ی پلاستیکی پولیکا با قطر داخلی ۳۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر استفاده شده است. در ۱۰ سانتی‌متر اول هر استوانه، ماسه‌ی الک شده برای اجرای لایه‌ی فیلتر با هدف زهکشی به کار رفته است. در شکل (۱) شماتیک مدل آزمایشگاهی و مدل نمونه‌ی آزمایشگاهی نمایش داده شده است. در فرایند آزمایش‌های بارگذاری توسط جک پانوماتیک با ظرفیت ۵۰۰ کیلوگرم که به صفحه‌ی فلزی دایره‌ای شکل به شعاع ۸ سانتی‌متر متصل بوده بر خاک سست اعمال شده است. جهت اعمال بارگذاری بر نمونه‌ها، با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری افزاینده در یک بازه‌ی زمانی منظم، پروسه‌ی افزایش بار توسط جک به صفحه‌ی فلزی و به نمونه‌ها اعمال شده است. مسیر اعمال بارگذاری بر اساس میزان افزایش تنش اعمال شده بر صفحه بارگذاری در آزمایشها در نمودار شکل (۲) نمایش داده شده است.

بهسازی خاک، مقاومت خاک مورد نظر، متريال و اجزای تشکيل دهنده خاک نرم و رئولوژی خاک به عنوان اصولي‌ترین پارامترها در مقاومت‌سازی خاک براساس روش تزریق مواد تثبیت‌کننده بوده است.

با ارزیابی مطالعات انجام شده، مشخص می‌گردد که به کارگیری ستون‌های خاک-سیمان به عنوان یکی از روش‌های کارآمد جهت بهسازی و افزایش ظرفیت بارگذاری زمین‌های با خاک نرم بوده که پارامترهای مختلفی در تعیین خصوصیات و ویژگی‌های این ستون‌ها تأثیرگذار می‌باشد. به علاوه تعیین مؤلفه‌ها و طراحی کارآمد ستون‌های خاک-سیمان به ویژه برای شرایط اعمال بارگذاری‌های لرزه‌ای، نیازمند شناخت عمیق از کلیه‌ی پارامترهای مؤثر به همراه میزان تأثیر آنها بر عملکرد زمین‌های مقاوم سازی شده با ستونهای خاک-سیمان تحت شرایط بارگذاری (استاتیکی، دینامیکی) بوده است. در این پژوهش، مطالعات پارامتریک جامعی در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی بر متغیرهای مؤثر بر بهسازی زمین با ستون خاک-سیمان و بررسی عملکرد زمین بهسازی شده، تحت شرایط مختلف بارگذاری انجام شده است. مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد ستون خاک-سیمان در مقاومت‌سازی زمین نرم تحت دو شرایط سربار صلب و خاکریز معطوف بوده است. براساس نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، مدل عددی در بستر نرم‌افزار المان محدود ABAQUS تعریف و عملکرد مدل عددی اعتبارستجو (صحبت‌سنگی) شده است. در نهایت با اعمال شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مختلف، عملکرد ستون خاک-سیمان در بهسازی خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج در قالب مقایسه و ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر در مقاومت‌سازی خاک نرم با ستون خاک-سیمان مورد نقد و بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

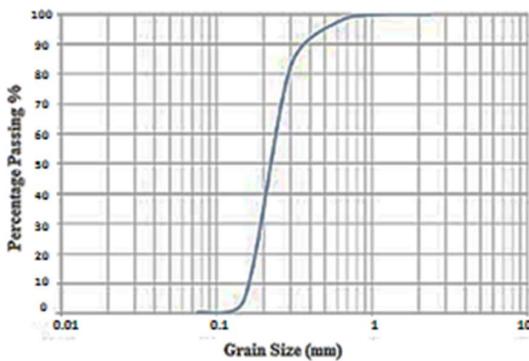
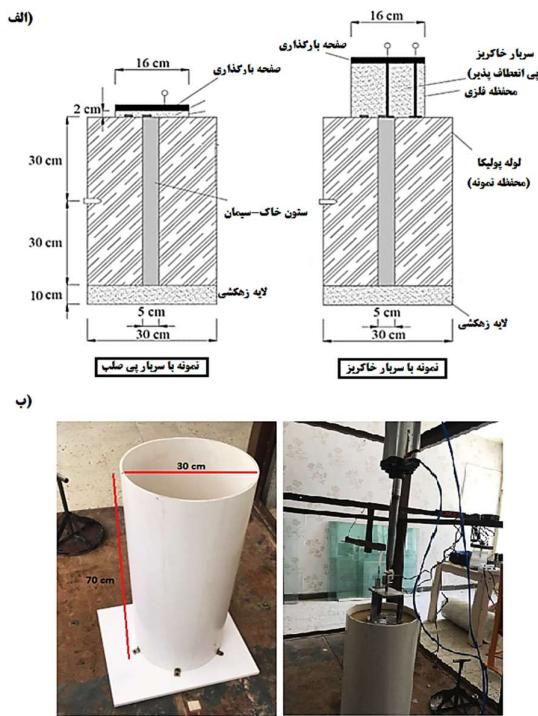
در این پژوهش با هدف ارزیابی ظرفیت بارگذاری زمین‌های سست تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان مطالعات آزمایشگاهی و عددی تعریف و پیاده‌سازی شده است. در گام نخست مدل‌سازی آزمایشگاهی بر اساس بارگذاری پی سطحی صلب و خاکریز (بارگذاری پی انعطاف‌پذیر) بر خاک

شده و سیمان با عیار ۱۵۰ کیلوگرم در هرمتر مکعب و نسبت آب به سیمان ۶.۰ پر شده و نمونه کاملاً برای حفظ رطوبت پوشانده شده است.

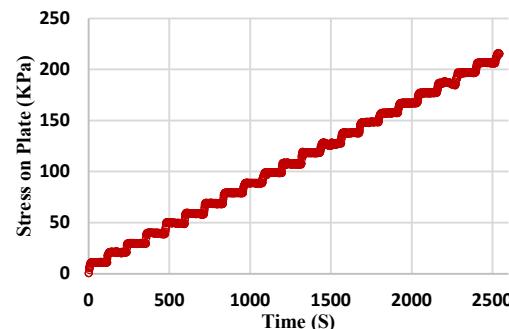
جدول (۱): خصوصیات مکانیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

خصوصیات	پارامتر - واحد	مقدار
چگالی خاک	G _s	2.658
زاویه اصطکاک داخلی	φ	36
زاویه اتساع	Ψ	6
ضریب چسبندگی	C (KPa)	1.5
مدول الاستیسیته	E _s (MPa)	26
ضریب پواسون	ν	0.32

برای مشخص شدن خصوصیات ستون خاک-سیمان ساخته شده، از مصالح دوغاب استفاده شده به عنوان ستون، دو نمونه استوانه‌ای به قطر ۵ و ارتفاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شده که پس از یک هفته نگهداری در استخر آزمایشگاه تحت آزمایش فشاری تک محوره قرار گرفته که مقاومت فشاری آنها ۲۷.۳ و ۳۴.۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بدست آمده است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا اطراف لوله آزمایش در حدود ۱۰ سانتیمتر از ابتداء به‌هدف انجام زهکشی چند سوراخ تعییه شده و سپس لایه‌ی فیلتر تهیه شده ریخته و کوبیده شده است. پس از آن نمونه‌ی اصلی خاک سست (ماسه ۱۶۱ فیروزکوه) به ارتفاع ۶۰ سانتیمتر در ۶ لایه‌ی ۱۰ سانتیمتری با درصد رطوبت ۱۰٪ و با وزن مخصوص ۱.۳۵ (مشابه خاکهای ماسه‌ای سست ساحلی) اجرا شده و با استفاده از صفحه بارگذاری در یک بازه منظم بارگذاری شده است. در نهایت، میزان نشست خاک و ستون خاک-سیمان با استفاده از سنسورهای LVDT^۱ و دیتالاگر^۲ کاناله برای هریک از آزمایش‌ها ثبت شده است.

² Data Logger

شکل (۱): وسایل آزمایشگاهی و ابعاد مدل، (الف) شماتیک مدل‌های آزمایشگاهی، (ب) نمونه‌ی مدل آزمایشگاهی



شکل (۲): میزان افزایش تنش اعمال شده بر صفحه بارگذاری در آزمایشات

در آزمایش‌های انجام شده برای مدل‌سازی و ارزیابی ظرفیت خاک سست، از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه (ماسه‌ی شکسته سیلیسی) استفاده شده است. در جدول (۱) مشخصات فیزیکی- خصوصیات مکانیکی و در شکل (۳) منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ارائه شده است. در مدل‌سازی آزمایشگاهی برای اجرای ستون خاک-سیمان، در محور نمونه توسط لوله فلزی به قطر ۵ سانتیمتر که از قبل با یک شابلون به همین منظور تهیه شده سوراخی حفر شده (خاک داخل لوله تخلیه می‌شود) و سپس دوغایی با ماسه‌ی تخلیه

¹ Linear variable differential transformer

اندازه‌گیری نماید. در شکل (۴) نمایی از دو نوع مدل آزمایشگاهی (۱- سربار پی صلب، ۲- سربار خاکریز) نمایش داده شده است. مدل سازی آزمایشگاهی برای ارزیابی میزان ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان تحت دو شرایط بارگذاری پی صلب و خاکریز تعریف شده است. بر این اساس، آزمایشها شامل ۴ تست مجزا براساس سناریوهای جدول (۲) پیاده‌سازی شده‌است.

مدل سازی عددی

در این پژوهش، مدل سازی عددی شامل سه بخش اصلی بوده است. در بخش اول، ۴ مدل عددی در فضای سه بعدی برای کالیبراسیون و ارزیابی عملکرد مدل عددی بر اساس شرایط و خصوصیات ۴ مدل آزمایشگاهی (مدل‌های F1 تا F4) ایجاد شده است. در بخش دوم به جهت برپاسازی مدل‌های عددی برای ارزیابی عملکرد لزهای خاک سست، مدل‌های دو بعدی توسعه داده شده است. با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی و تقارن محوری باکس نمونه (استوانه)، برای کاهش هزینه محاسبات در مدل‌های دو بعدی از تکنیک مدل سازی یک صفحه (پوسته) از استوانه مدل اصلی، فرایند مدل سازی پیاده‌سازی شده است. تکنیک مذکور به عنوان روشی کاربردی برای مدل سازی محیط خاک بوده است که در مدل‌های عددی المان محدود مورد استفاده قرار می‌گیرد، به ویژه در شرایطی که میزان تغییرات نشست یا تحکیم در راستای قائم از اهداف بنیادین مدل سازی عددی باشد. هدف از برپاسازی مدل‌های دو بعدی، کاهش هزینه محاسبات و ارزیابی ظرفیت باربری خاک سست تحت شرایط بارگذاری مختلف بوده است. با توجه به نمونه‌های آزمایش که شامل محیط خاک و ستون‌های خاک-سیمان بوده و غالباً تأثیر متغیرهایی همچون تنش، تغییرشکل پلاستیک و نشست در راستای قائم مدنظر می‌باشد، بهره‌گیری از تکنیک فوق منجر به مدل سازی عددی قابل قبولی برای ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌های سست بوده است. بخش سوم مدل سازی عددی، برپاسازی مدل‌های دو بعدی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط اعمال بارگذاری لزهای (اعمال شتاب نگاشت ۵ زمین لزه بزرگ S1 تا S5) بوده است. با توجه به توضیحات ارائه شده،

شکل (۳): منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه

جدول (۲): سناریوهای مطالعات آزمایشگاهی

توضیحات	شرایط ثبیت بارگذاری			شرایط ثبیت خاک	کد آزمایش
	خاک ریز	پی صلب	خاک تثبیت شده		
آزمایش بارگذاری خاک سست با صفحه صلب	✓			✓	F1
بارگذاری خاک تثبیت شده با صفحه صلب		✓	✓		F2
بارگذاری خاک سست تحت سربار انعطاف پذیر (خاکریز)	✓			✓	F3
بارگذاری خاک تثبیت شده تحت سربار انعطاف پذیر (خاکریز)	✓			✓	F4

(الف)



(ب)



شکل (۴): مدل سازی آزمایشگاهی، (الف) سربار پی صلب، (ب) سربار خاکریز

برای مدل کردن سربار انعطاف پذیر بر روی نمونه اصلی، از یک لوله فلزی به قطر ۲۰ سانتیمتر که به ارتفاع ۱۰ سانتیمتر ماسه درون آن ریخته شده و بار جک توسط صفحه بر روی آن فشار وارد شده، استفاده گردیده است. در این شرایط با هدف اندازه‌گیری نشست نمونه، سنسور سنجش نشست طوری از درون یک لوله عبور داده شده که بتواند مستقیماً نشست نمونه اصلی یعنی خاک سست را

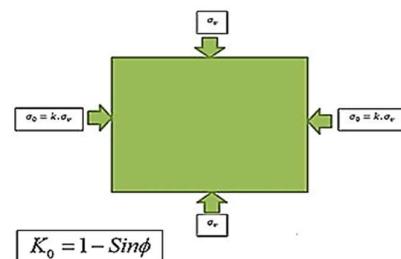
مدل سه بعدی M3 و M4 (مدل دو بعدی M7, M8) علاوه بر تماس بین صفحه بارگذاری/خاکریز با سطح خاک سست، بین ستون خاک-سیمان و خاک سست هم تماس تعریف شده است. بر این اساس دو نوع تماس: ۱- تماس بین سطح بارگذاری و خاک سست: این تماس از نوع تماس سطحی و با خصوصیت Hard Contact^۴ و از نوع با خصوصیت رفتار نرمال^۵ است، ۲- تماس بین خاک سست و ستون خاک-سیمان: این تماس از نوع تماس بین سطوح جانبی خاک و ستون خاک-سیمان با خصوصیت رفتار تانژانتی^۶ و با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک معادل با $\tan \varphi$ که (φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک) بوده، تعریف شده است. از اصلیترین بخش‌های پیاده‌سازی مدل سازی عددی، تعریف شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل بوده است. شرایط اولیه مدل سازی عددی شامل: ۱- اعمال نیروی ثقل بر اساس شتاب g ، ۲- بارگذاری: در ستون خاک-سیمان، صفحه صلب بارگذاری و خاکریز شنی می‌باشد که با توجه به ابعاد و اندازه‌های نمونه آزمایشگاهی، مدل عددی هریک از پارت‌ها در آباکوس تعریف شده است. با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی و خصوصیات خاک سست (جدول ۱ و نتایج تست سه محوری) و همچنین خصوصیات ستون خاک-سیمان (مشخصات مواد و تست فشاری تک محوری) خصوصیات مواد در مدل‌های عددی تعریف شده است. پارامترهای اصلی برای تعریف خصوصیات خاک شامل: ۱- چگالی^۱، ۲- خصوصیات الاستیک^۲ (شامل مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν)، ۳- خصوصیات پلاستیک - برای تعریف خصوصیات پلاستیسیته با توجه به نوع متربال که خاک بوده از مدل پلاستیک موهر کولمب^۳ استفاده شده است که شامل تعریف زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و اعمال مقاومت توده‌ی خاک بر اساس آزمون سه محوری بوده است. با توجه به کلیت مدل‌های عددی تعریف شده، یکی از اصلیترین بخش‌های مدل سازی، تعریف تماس بین سطوح مختلف در مدل‌ها بوده است. در دو مدل سه بعدی M1 و M2 و در مدل‌های دو بعدی M5 و M6 تماس بین صفحه بارگذاری/خاکریز با سطح نمونه و در دو

مدل سازی عددی، شامل ۲۸ سناریوی مختلف بوده که به همراه جزئیات هر مدل در جدول (۲) ارائه شده است.

مدل سازی عددی بر اساس سناریوهای مدل سازی (جدول ۳) تعریف و در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس پیاده‌سازی شده است. اولین گام در فرایند مدل سازی عددی، ایجاد مدل هندسی بخش‌های مختلف نمونه بوده است. در این بخش، بر اساس ابعاد و اندازه‌های مدل‌های آزمایشگاهی، مدل هندسی نمونه‌های عددی در فضای سه بعدی ایجاد شده است. در مدل‌های عددی سه بعدی، با توجه به تقارن محوری مدل آزمایشگاهی نسبت به صفحات افقی و بهجهت کاهش هزینه مدل سازی عددی (کاهش زمان شبیه‌سازی حل مدل) بهجای ایجاد یک استوانه‌ی كامل، ربع استوانه مدل سازی شده است. علاوه بر این مدل‌های آزمایشگاهی، شامل پارت‌های دیگری همچون: ستون خاک-سیمان، صفحه صلب بارگذاری و خاکریز شنی می‌باشد که با توجه به ابعاد و اندازه‌های نمونه آزمایشگاهی، مدل عددی هریک از پارت‌ها در آباکوس تعریف شده است. با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی و خصوصیات خاک سست (جدول ۱ و نتایج تست سه محوری) و همچنین خصوصیات ستون خاک-سیمان (مشخصات مواد و تست فشاری تک محوری) خصوصیات مواد در مدل‌های عددی تعریف شده است. پارامترهای اصلی برای تعریف خصوصیات خاک هستند: ۱- چگالی^۱، ۲- خصوصیات الاستیک^۲ (شامل مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν)، ۳- خصوصیات پلاستیک - برای تعریف خصوصیات پلاستیسیته با توجه به نوع متربال که خاک بوده از مدل پلاستیک موهر کولمب^۳ استفاده شده است که شامل تعریف زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و اعمال مقاومت توده‌ی خاک بر اساس آزمون سه محوری بوده است. با توجه به کلیت مدل‌های عددی تعریف شده، یکی از اصلیترین بخش‌های مدل سازی، تعریف تماس بین سطوح مختلف در مدل‌ها بوده است. در دو مدل سه بعدی M1 و M2 و در مدل‌های دو بعدی M5 و M6 تماس بین صفحه بارگذاری/خاکریز با سطح نمونه و در دو

⁴ Normal Behavior⁵ Tangential Behavior⁶ Geostatic Stress¹ Density² Elastic³ Mohr Coulomb Plasticity

شکل (۵): روش اعمال تنش ژئوستاتیک در محیط خاک

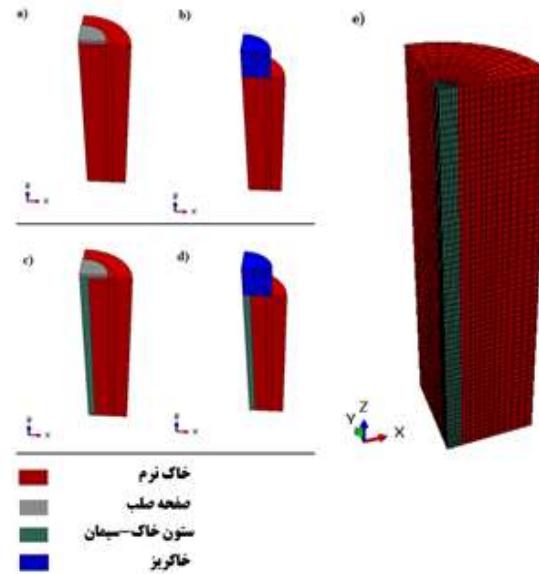


جدول (۳): سناریوهای مدل‌سازی عددی

توضیحات	شرایط تثبیت خاک		عدم تثبیت با ستون خاک-سیمان (خاک مبنا)	نرخ نرخ
	پی انعطاف‌پذیر (خاک‌برز)	پی صلب		
F1 مدل عددی ۳ بعدی مطابق با آزمایش		✓		✓ M1 1
F2 مدل عددی ۳ بعدی مطابق با آزمایش		✓	✓	M2 2
F3 مدل عددی ۳ بعدی مطابق با آزمایش	✓			✓ M3 3
F4 مدل عددی ۳ بعدی مطابق با آزمایش	✓		✓	M4 4
F1 مدل عددی ۲ بعدی مطابق با آزمایش		✓		✓ M5 5
F2 مدل عددی ۲ بعدی مطابق با آزمایش		✓	✓	M6 6
F3 مدل عددی ۲ بعدی مطابق با آزمایش	✓			✓ M7 7
F4 مدل عددی ۲ بعدی مطابق با آزمایش	✓		✓	M8 8
S1: Kern County-1952: بارگذاری لرزه‌ای		✓		✓ M9 9
S1: Kern County-1952: بارگذاری لرزه‌ای		✓	✓	M10 10
S1: Kern County-1952: بارگذاری لرزه‌ای	✓			✓ M11 11
S1: Kern County-1952: بارگذاری لرزه‌ای	✓		✓	M12 12
S2 : Parkfield-1966: بارگذاری لرزه‌ای		✓		✓ M13 13
S2 : Parkfield-1966: بارگذاری لرزه‌ای		✓	✓	M14 14
S2 : Parkfield-1966: بارگذاری لرزه‌ای	✓			✓ M15 15
S2 : Parkfield-1966: بارگذاری لرزه‌ای	✓		✓	M16 16
S3 : Borrego Mountain -1968: بارگذاری لرزه‌ای		✓		✓ M17 17
S3 : Borrego Mountain -1968: بارگذاری لرزه‌ای		✓	✓	M18 18
S3 : Borrego Mountain -1968: بارگذاری لرزه‌ای	✓			✓ M19 19
S3 : Borrego Mountain -1968: بارگذاری لرزه‌ای	✓		✓	M20 20
S4 : Tabas, Iran-1978: بارگذاری لرزه‌ای		✓		✓ M21 21
S4 : Tabas, Iran-1978: بارگذاری لرزه‌ای		✓	✓	M22 22
S4 : Tabas, Iran-1978: بارگذاری لرزه‌ای	✓			✓ M23 23
S4 : Tabas, Iran-1978: بارگذاری لرزه‌ای	✓		✓	M24 24
S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979		✓		✓ M25 25

توضیحات	شرایط بارگذاری		شرایط تثبیت خاک		۱۳ ج	۲۷ ج.
	پی انعطاف‌پذیر (خاکریز)	پی صلب	تشبیت با سنتون خاک-سیمان	عدم تثبیت (خاک مینا)		
S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979		✓	✓		M26	26
S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979	✓			✓	M27	27
S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979	✓		✓		M28	28

مشخصی به نام المان که بیانگر فضای حل معادلات بوده است تقسیم گردد. همچنین در این مرحله، باید نوع المان که بیانگر خصوصیات و روبه حل مدل‌سازی عددی بوده تعیین شود. بر این اساس با ارزیابی اندازه‌های مختلف برای سایز مشبندی، بهترین مقدار برای تعیین اندازه‌ی مشخص گردید. همچنین برای تعیین نوع المان در مدل‌های سه بعدی، با توجه به فضای سه بعدی مدل‌سازی از المان‌های ۸ گره (C3D8R) استفاده شده‌است. در مدل‌های دو بعدی کلیه‌ی شرایط مدل‌سازی عددی جهت برپاسازی مدل منطبق بر مدل‌های عددی سه بعدی M1 تا M4 بوده است. تفاوت اصلی در مدل‌های عددی دو بعدی بهره‌گیری از المان پوسته^۱ دو بعدی به جای المان سه بعدی بوده است همچنین نوع المان ۴ گره کرنش صفحه‌ای^۲ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ نمایی از برپاسازی مدل‌های عددی سه بعدی به همراه مشبندی مدل و در شکل (۷) برپاسازی مدل‌های عددی دو بعدی به همراه مشبندی نمایش داده شده است.



شکل (۶): نمایی از مدل‌های عددی سه بعدی (a) مدل M1، (b) مدل M2، (c) مدل M3، (d) مدل M4، (e) مشبندی مدل ۳ بعدی

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی بیانگر قیدهای محدود کننده حرکت برای بخش مختلف مدل بوده است که شامل: ۱- قید عدم حرکت در راستای قائم برای کف نمونه، ۲- قید عدم حرکت در راستای افقی (X,Y) برای پیرامون نمونه، ۳- قید تقارن در راستای محورهای افقی (X,Y) برای صفحات تقارن نمونه (در مدل‌های سه بعدی با توجه به مدل‌سازی ربع استوانه در صفحات تقارن شرط مرزی تقارن محوری اعمال می‌گردد)، ۴- قید عدم حرکت صفحه بارگذاری در راستای محورهای افقی (X,Y)، صفحه صلب بارگذاری فقط در راستای قائم (محور Z) قادر به حرکت بوده است.

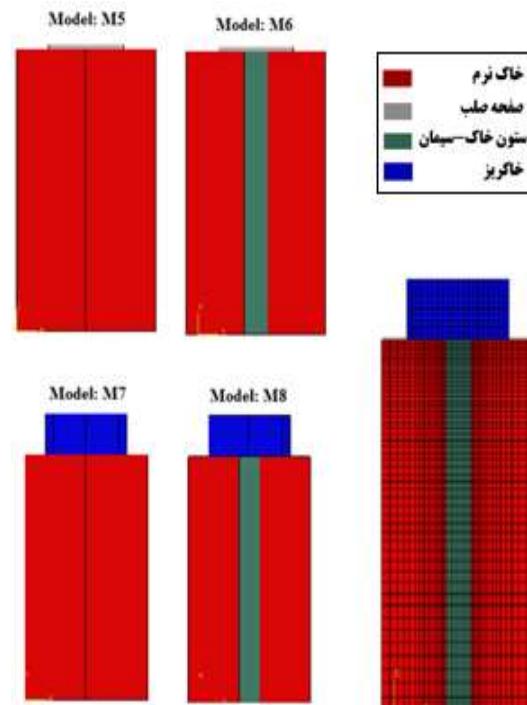
در مدل‌های المان محدود، جهت حل معادلات حاکم بر مدل و شبیه‌سازی، نیاز است تا فضای حل به محدوده‌های

² Plane Strain

¹ Shell

گردیده است. داده‌های اخذ شده اطلاعات شتاب نگاشت خام هر یک از زمین لرزه‌ها بوده که برای به کارگیری و پیاده‌سازی در مدل‌های عددی، نیازمند پردازش و تحلیل که شامل همپایه‌سازی/هم مقیاس‌سازی بر اساس شرایط خاک منطقه می‌باشد، بوده است.

بر این اساس با بهره‌گیری از نرم‌افزار سایزموسیگنال، فرایند تحلیل زوج شتاب نگاشتها انجام شده است. در گام نخست شتاب نگاشت هر زمین لرزه در دو مؤلفه افقی وارد نرم‌افزار سایزموسیگنال شده و محتواه طیفی آن با در نظر گرفتن دمپینگ ۰.۵٪ استخراج شده است. در گام دوم مقدار دو مؤلفه استخراج شده برای هر زمین لرزه بر اساس مقدار بیشینه شتاب همان زمین لرزه هم مقیاس شده‌اند. در گام سوم با استفاده از روش SRSS دو مؤلفه مقیاس شده با هم ترکیب شده‌اند. در گام چهارم بر اساس طیف آیین‌نامه (برای شرایط MCE) و بر اساس مشخصات منطقه ترسیم شده است. در گام پنجم طیف‌های ترکیب شده به روش SRSS برای هر زمین لرزه با طیف آیین‌نامه توامًا ترسیم گردیده است. در گام آخر ضربی برای ترکیب کردن طیف‌های ترکیب شده هر زلزله با طیف آیین‌نامه استخراج شده است، در این مرحله کمتر نبودن طیف SRSS هر زلزله از طیف آیین‌نامه در بازه $1.5T - 0.2T$ به عنوان شرط اصلی مدنظر قرار گرفته است. در نهایت بر اساس آتالیز انجام شده ضربی مقیاس برای هر شتاب نگاشت استخراج و به مقدار خام اولیه اعمال شده است. در ادامه نتایج حاصل از تجزیه، تحلیل و پردازش داده‌های خام زمین لرزه‌های اخذ شده، در اشکال (۸ و ۹) ارائه شده است. ضربی مقیاس نهایی بدست آمده ۰.۳۸ برای هریک از شتاب نگاشتها بوده است که بر اساس ضربی هم مقیاسی دو زوج شتاب نگاشت در داده‌های اولیه اعمال گردیده است. با پیاده‌سازی تجزیه و تحلیل طیفی بر داده‌های خام لرزه‌ای اخذ شده، شتاب نگاشت نهایی هریک از زمین لرزه‌ها استخراج و جهت اعمال بر نمونه‌های خاک سست (مدل‌های عددی) آماده‌سازی شده است.



شکل (۷): برپاسازی مدل‌های عددی به همراه مشبندی مدل

تجزیه‌ی تحلیل داده‌های لرزه‌ای

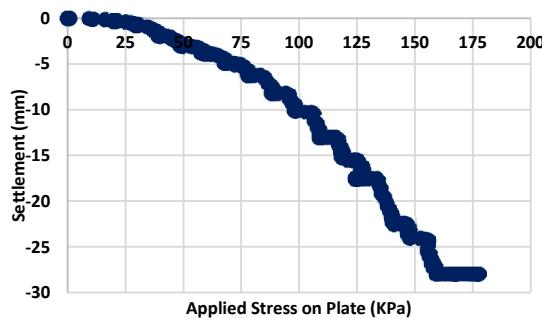
در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای زمین‌های با خاک سست ثبت شده با ستون‌های خاک-سیمان از مشخصات (شتاب نگاشت) ۵ زمین لرزه بزرگ جهت بارگذاری لرزه‌ای مدل‌های عددی استفاده شده است. مشخصات زمین لرزه به همراه جزئیات هریک از آنها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۴): مشخصات زمین لرزه‌های به کارگیری شده جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های عددی

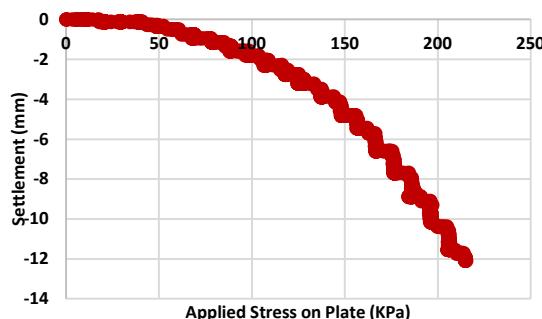
Code	Event	Year	Magnitude (MW)	PGA (g)	Vs (m/s)
S1	Kern County	1952	7.4	0.06	415
S2	Parkfield	1966	6.2	0.44	299
S3	Borrego Mountain	1968	6.6	0.05	443
S4	Tabas, Iran	1978	7.3	0.04	280
S5	Imperial Valley (El Centro)	1979	6.5	0.38	265

داده‌های شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مذکور از سایت PEER که مرجع اصلی تامین داده‌های لرزه‌ای بوده اخذ

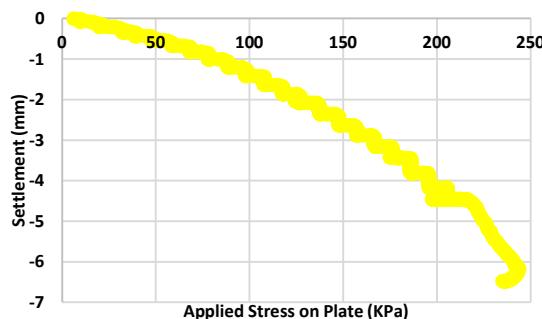
میلیمتر مشاهده شده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F2 مشخص می‌گردد که میزان نشست در نمونه با افزایش بارگذاری (تنش اعمالی بر صفحه بارگذاری) افزایش یافته است. مقادیر بیشینه نشست در نمونه با اعمال نیروی ۴۲۰ کیلوگرم (اعمال تنش ۲۱۰ کیلوپاسکال) حدوداً ۱۳ میلیمتر بوده است. در آزمایش‌های F1 و F2 تمام شرایط مدل‌سازی کاملاً یکسان بوده و تنها به کارگیری ستون خاک-سیمان جهت ثابت خاک سست در مدل F2 متغیر می‌باشد.



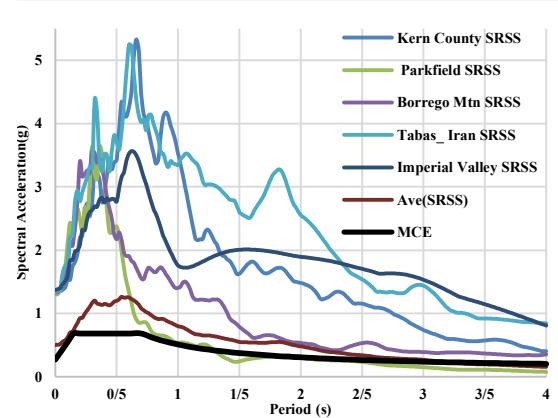
شکل (۱۰): نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F1، نمودار تنش-نشست



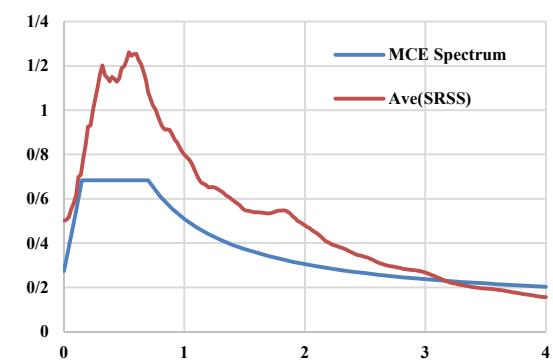
شکل (۱۱): نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F2، نمودار تنش-نشست



شکل (۱۲): نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F3، نمودار تنش-نشست



شکل (۸): طیف لرزه‌ای ۵ زمین لرزه به همراه طیف آینین نامه



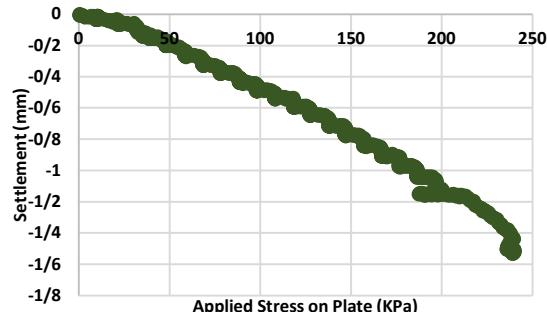
شکل (۹): همپایه‌سازی طیفی، طیف میانگین SRSS و طیف آینین نامه

نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی

براساس سناریوهای مدل‌سازی آزمایشگاهی (جدول ۲)، چهار مدل آزمایشگاهی (F4 تا F1) برپا‌سازی شده و تحت شرایط بارگذاری سربار صلب و خاکریز قرار گرفته است. نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی بیانگر میزان نشست خاک براساس افزایش تنش اعمالی توسط صفحه بارگذاری بر نمونه‌های مختلف بوده است. در اشکال ۱۰ تا ۱۳ نمودار تنش-نشست برای مدل‌های F4 تا F1 به ترتیب ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله (شکل ۱۰) مشخص می‌گردد که با افزایش میزان نیرو (افزایش میزان تنش اعمالی بر صفحه بارگذاری) شاهد افزایش نشست در خاک سست بوده‌ایم. در آزمایش F1 میزان نیروی بیشینه حدوداً ۳۷۰ کیلوگرم معدل با ۱۷۰ کیلوپاسکال تنش اعمالی بر صفحه بارگذاری بوده که بر این اساس، نشست در نمونه حدوداً ۳۰

است. با ارزیابی نتایج حاصل از تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان (مقایسه بین دو مدل F2 و F4) مشخص می‌گردد که به کارگیری ستون خاک سیمان در شرایط بارگذاری سربار انعطاف پذیر باعث تثبیت بیشتر خاک سست نسبت به شرایط بارگذاری پی صلب گردیده است، به گونه‌ای که با به کارگیری ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری پی صلب میزان نشت ۰.۵۵٪ و تحت بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر میزان نشت ۰.۷۵٪ کاهش یافته است.



شکل (۱۳): نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F4، نمودار تنش-نشست

نتایج مدل‌سازی عددی

با توجه به سناریوهای مدل‌سازی عددی (جدول ۳) مشخص گردید که مدل‌سازی عددی در سه بخش اصلی: ۱- مدل‌های سه بعدی (M1 تا M4)، ۲- مدل‌های دوبعدی (M5 تا M8)، ۳- مدل‌های دوبعدی آنالیز لرزمای (M9 تا M28) انجام شده است. در این بخش نتایج مدل‌سازی عددی به تفکیک هر بخش ارائه و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. کالیبراسیون مدل عددی با ارزیابی پارامترهای مؤثر در مدل و بهره‌گیری از مقادیر و نتایج تست آزمایشگاهی انجام شده است. همچنین حساسیت‌سنجی نسبت به اندازه‌ی مشبندی جهت برپاسازی مدل‌های عددی صورت گرفته است. براین اساس با در نظر گرفتن ۳ مقدار: ۴، ۸ و ۲ میلیمتر برای اندازه مش، ۴ مدل آزمایشگاهی مدل‌سازی عددی شده است و میزان نشت در مدل عددی با نتایج تست‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در جدول (۵) نتایج حاصل از حساسیت‌سنجی عملکرد مدل عددی نسبت به اندازه مش ارائه شده است.

جدول (۵): کالیبراسیون مدل عددی نسبت به اندازه مشبندی

Model	Error %		
	Mesh 8mm	Mesh 4mm	Mesh 2mm
مدل عددی تست F1	9.15	5.78	5.05
مدل عددی تست F2	14.52	9.63	8.88
مدل عددی تست F3	8.98	5.66	4.99
مدل عددی تست F4	10.14	6.63	5.89

بر اساس نتایج حاصل از ۴ مدل آزمایشگاهی (اشکال ۱۰ تا ۱۳) و بررسی منحنی‌های تنش-نشست در هریک از مدل‌های F1 تا F4 مشخص می‌گردد که میزان نشت خاک سست در شرایط عدم تثبیت با ستون خاک-سیمان و شرایط تثبیت با ستون خاک سیمان تحت بارگذاری با پی صلب بیشتر از بارگذاری تحت شرایط سربار انعطاف پذیر بوده است. با مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو مدل آزمایشگاهی F1 و F2 مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری پی صلب در شرایط تثبیت با ستون خاک-سیمان (مدل F2) میزان نشت کمتری را نسبت به شرایط عدم تثبیت (مدل F1) تجربه نموده است، به گونه‌ای که به کارگیری ستون خاک-سیمان باعث کاهش بیش از ۰.۵۵٪ در نشت نمونه شده است.

با مقایسه‌ی نتایج حاصل از دو مدل آزمایشگاهی F3 و F4 مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری سربار انعطاف پذیر در شرایط تثبیت با ستون خاک-سیمان (مدل F4) میزان نشت کمتری را نسبت به شرایط عدم تثبیت (مدل F3) تجربه نموده است، به گونه‌ای که به کارگیری ستون خاک-سیمان باعث کاهش بیش از ۰.۷۵٪ در نشت نمونه شده است.

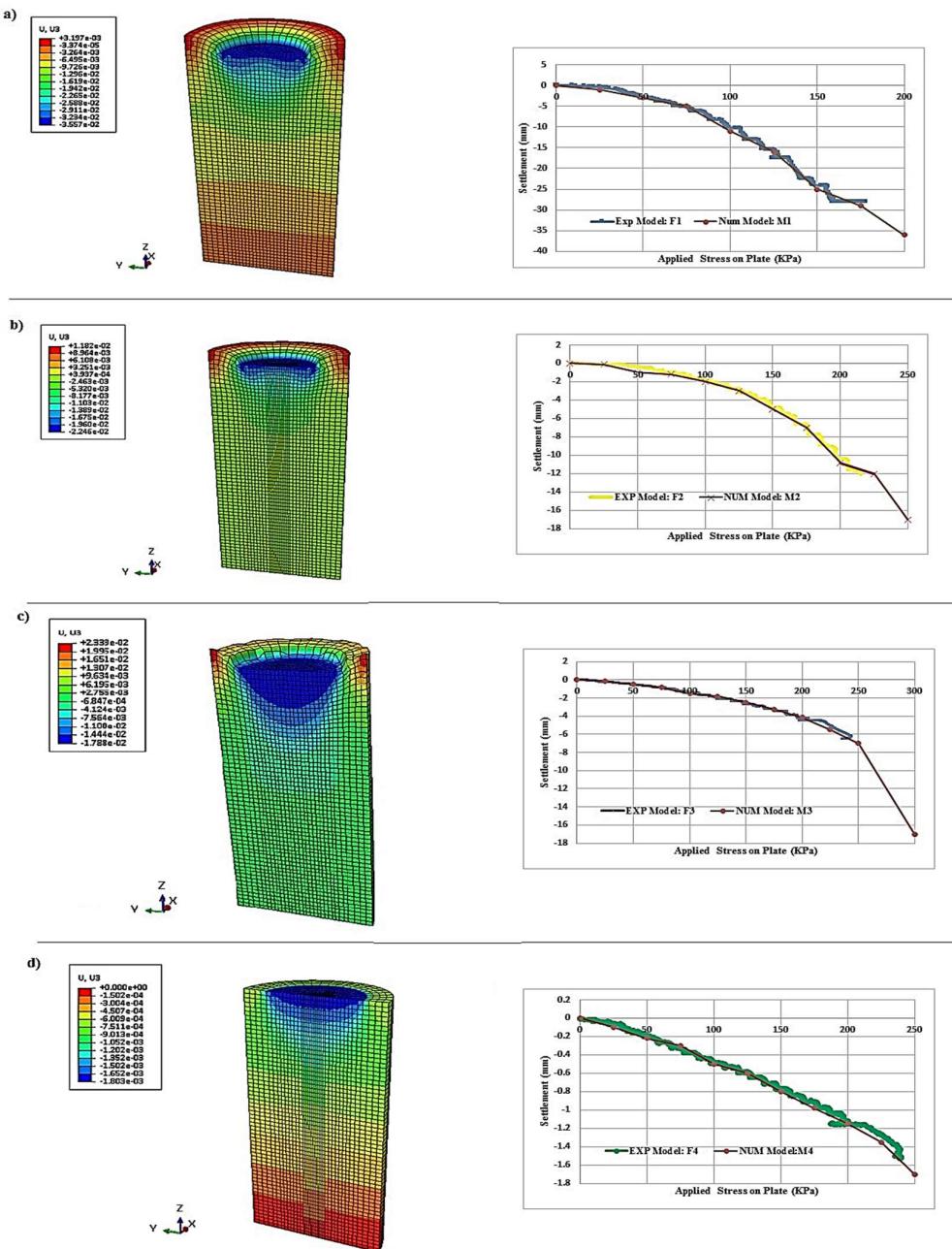
با ارزیابی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری سربار انعطاف پذیر (مدل F3) دارای نشت کمتری نسبت به بارگذاری پی صلب (مدل F1) بوده است، به گونه‌ای که میزان نشت در شرایط بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر کمتر از ۰.۷۳٪ میزان نشت همان نمونه تحت شرایط بارگذاری با پی صلب بوده

اندازه نامنظم بوده و مقادیر ارائه شده در فرایند کالیبراسیون مدل عددی بیانگر بیشینه اندازه مش در مدل بوده است.

نتایج مدل‌های عددی سه بعدی

مدل‌های عددی سه بعدی در راستای کالیبراسیون و اعتبارسنجی عملکرد مدل‌های عددی نسبت به مدل آزمایشگاهی تعریف و پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی سه بعدی که بیانگر میزان نشست خاک و منحنی تنش-نشست برای مدل‌های M1 تا M4 در شکل (۱۴) نمایش و همچنین مقایسه‌ای بین منحنی تنش-نشست در مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

براساس نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل عددی نسبت به اندازه مش‌بندی (جدول ۵) مشخص می‌گردد که میزان خطای مدل عددی با اندازه مش ۸ میلی‌متر نسبت به مش‌بندی ۴ و ۲ میلی‌متر دارای مقادیر بیشینه بوده است، از طرفی میزان خطای مدل‌های عددی با مش ۲ میلی‌متر نسبت به مش ۴ میلی‌متر دارای اختلاف جزئی بوده و عملأ در فرایند کاهش اندازه مش‌بندی از ۴ به ۲ میلی‌متر تغییراتی چشم‌گیری در راستای افزایش دقت مشاهده نشده است، براین اساس، در این پژوهش مدل‌سازی عددی با اندازه مش ۴ میلی‌متر پیاده‌سازی شده است. لازم به ذکر است که مدل‌های عددی براساس موقعیت‌های مرکز تنش در مدل (محور کارگذاری ستون خاک-سیمان، موقعیت تماس سربار با نمونه) دارای مش‌بندی با



شکل (۱۴): نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی سه بعدی، کانتور میزان نشست و منحنی تنش-نشست در نمونه‌های M1 تا M4

جدول (۶): ارزیابی خطای مدل‌سازی عددی (مقایسه مدل

عددی M1 تا M4 با مدل آزمایشگاهی F1 تا F4

به جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های عددی M1 تا M4

مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی و نتایج مدل‌های

آزمایشگاهی F1 تا F4 انجام شده است. همچنین به جهت

ارزیابی دقیق دقت مدل عددی، نتایج حاصل بر اساس دو

آزمون آماری MSE و RMSE و میانگین درصد خطای

مدل‌سازی در جدول (۶) ارائه شده است.

Model	MSE	RMSE	Error %
F1 v.s M1	0.45	0.67	5.78
F2 v.s M2	0.0319	0.1788	9.63
F3 v.s M3	0.03222	0.179499	5.66
F4 v.s M4	0.0065	0.080693	6.63

تا M8) نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از ۷۲٪ و نسبت به مدل‌های عددی سه بعدی کمتر از ۳۱٪ بوده است. نتایج حاصل بیانگر توانایی مدل‌های عددی دوبعدی توسعه داده شده برای مدل‌سازی ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون‌های خاک-سیمان تحت سربار صلب و سربار انعطاف پذیر بوده است. بر این اساس در این پژوهش به جهت ارزیابی ظرفیت باربری خاک سست تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای از مدل‌های عددی دوبعدی توسعه یافته استفاده شده است.

جدول (۷): مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های عددی دو بعدی (میزان نشست) با نتایج تست آزمایشگاهی و مدل عددی سه بعدی

Model	Err %		توضیحات
	3D Num Model	Exp. Model	
Model M5	2.8 %	5.98 %	مقایسه با مدل آزمایشگاهی F1 و مدل عددی M1
Model M6	3.1 %	6.89 %	مقایسه با مدل آزمایشگاهی F2 و مدل عددی M2
Model M7	1.5 %	7.1 %	مقایسه با مدل آزمایشگاهی F3 و مدل عددی M3
Model M8	2.6 %	6.12 %	مقایسه با مدل آزمایشگاهی F4 و مدل عددی M4

از ریابی عملکرد نمونه‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای در این پژوهش، به جهت صحتسنجی مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای (مدل‌های M9 تا M28)، ابتدا ارزیابی بر عملکرد فرایند مدل‌سازی عددی در بستر نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. براین اساس مدل آزمایشگاهی (پالولوژی و همکاران^۱، ۲۰۰۸) که به ارزیابی رفتار لرزه‌ای پی سطحی مستقر بر خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای معطوف بوده، در بستر نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی عددی شده و نتایج حاصل از مدل عددی با نتایج تست آزمایشگاهی مورد مقایسه و صحتسنجی قرار گرفته است. در مطالعات پالولوژی و همکاران که در سال ۲۰۰۸ انجام شد، با بهره‌گیری از میز لرزه‌ای میزان نشست خاک نرم با سربار پی سطحی و تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. در این آزمایش از یک باکس نمونه با ابعاد ۴*۴ متر و ارتفاع ۲.۱ متر که بر میز لرزه‌ای

با ارزیابی نتایج (جدول ۶) حاصل از مدل‌سازی عددی ۴ مدل آزمایشگاهی (F4 تا F1) مشخص گردید که در هر ۴ مدل ایجاد شده میزان خطای مدل‌سازی عددی کمتر از ۱۰٪ بوده است، به گونه‌ای که میزان خطای مدل‌سازی عددی برای مدل خاک سست تثبیت نشده با سربار صلب (M1) کمتر از ۶٪، مدل خاک سست تثبیت شده با ستون (M2) معادل با ۹.۶۳٪، مدل خاک سست تثبیت نشده با سربار خاکریز (M3) معادل با ۵.۶۶٪ و مدل خاک سست تثبیت شده با ستون خاک-سیمان تحت با سربار (M4) معادل با ۶.۶۳٪ بوده است. نتایج حاصل بیانگر دقت قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار و ظرفیت باربری زمین‌های سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان تحت دو شرایط سربار صلب و انعطاف پذیر بوده است.

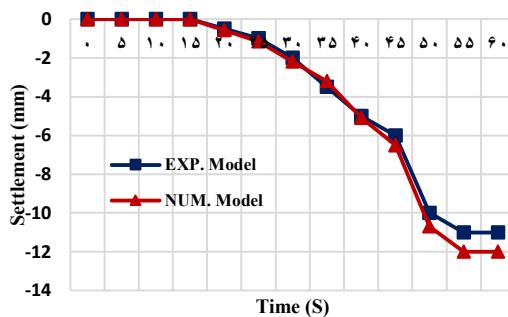
نتایج مدل‌های عددی دو بعدی

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی مدل‌های M5 تا M8 ارائه شده است. با توجه به موارد مذکور در بخش قبل مشخص گردید که هدف اصلی از مدل‌سازی‌های دوبعدی ارزیابی عملکرد مدل عددی در شرایط مدل‌سازی دوبعدی نسبت به نتایج تست‌های آزمایشگاهی و مدل عددی سه بعدی بوده است. براین اساس در این بخش مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی دوبعدی و نتایج مدل‌های آزمایشگاهی (F1 تا F4) و مدل‌های عددی سه بعدی (M1 تا M4) صورت گرفته و میانگین خطای مدل‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۷) میانگین خطای مدل‌های عددی دوبعدی (M5) تا M8 نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی سه بعدی (M1 تا M4) ارائه شده است.

با توجه به ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های عددی دوبعدی (جدول ۷) مشخص می‌گردد که مدل عددی دوبعدی ایجاد شده برای شبیه‌سازی ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان تحت شرایط سربار پی صلب و خاکریز دارای عملکرد قابل قبولی بوده است، به گونه‌ای که خطای مدل‌سازی دوبعدی در هر ۴ مدل (M5)

^۱ Paolucci et al.

حاصل از مدل‌سازی عددی (میزان نشست خاک نرم) به همراه نتایج تست آزمایشگاهی ارائه شده است.



شکل (۱۶): مقایسه نتایج حاصل از مدل عددی پژوهش و مدل آزمایشگاهی (پاولوجی و همکاران، ۲۰۰۸)

به جهت ارزیابی کمی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و انجام مقایسات، در جدول (۹) مقادیر دو آزمونه آماری MSE، RMSE و درصد خطای مدل‌سازی عددی ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی خاک نرم با سربار و تحت بارگذاری لرزه‌ای دارای خطای مدل‌سازی ۹.۴۴٪ بوده که بیانگر دقت قابل قبول فرایند مدل‌سازی در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی خاک نرم بوده است.

جدول (۹): مقایسه نتایج مدل عددی رفتار دینامیکی خاک نرم با تست آزمایشگاهی

Model	MSE	RMSE	Error %
EXP v.s NUM	0.2227	0.4719	9.44 %

با ارزیابی عملکرد و صحت‌سنجی مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای خاک نرم مدل‌های عددی (M28 تا M9) در بستر نرم‌افزار آباکوس ایجاد و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است.

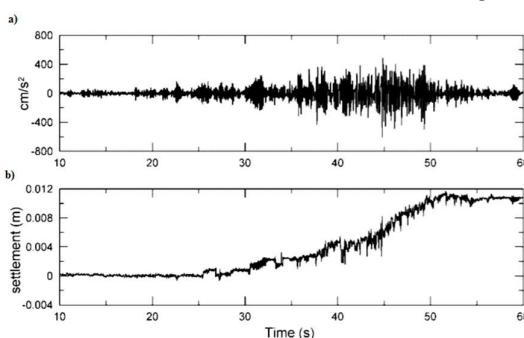
در این مطالعات بخش سوم از مدل‌سازی عددی به ارزیابی عملکرد خاک سست در شرایط عدم ثبیت و ثبیت با ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری لرزه‌ای معطوف بوده است. بهجهت ارزیابی عملکرد زمین‌هایی با خاک سست تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای، از مدل‌های عددی دو بعدی که مورد بررسی قرار گرفت و عملکرد آنها اعتبارسنجی گردید، استفاده شده است. شرایط مدل‌سازی دقیقاً منطبق بر

جهت اعمال بار قرار گرفته استفاده شده است. خاک نرم به کارگیری شده ماسه تویورا خشک^۱ با مشخصات ارائه شده در جدول (۸) بوده که به صورت لایه‌های همگن داخل باکس ریخته شده است. همچنین سربار خاک شامل یک پی سطحی مربعی با طول ضلع ۰.۵ متر و وزن سرباری معادل با ۵.۲۲۷ KN بوده است.

جدول (۸): مشخصات خاک نرم در آزمایشات (پاولوجی و همکاران، ۲۰۰۸)

Properties	Value
Relative density (D_r)	80%
mass density (ρ)	1.6e3 Kg/m ³
angle of internal friction (φ)	42.1°

در این مطالعات آزمایشگاهی، سناریوهای مختلفی جهت ارزیابی رفتار دینامیکی خاک نرم تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف انجام شده است. در راستای صحت‌سنجی مدل عددی یکی از سناریوهای آزمایشات که تحت بارگذاری زمین لرزه (Hokkaido Nansei Oki-1993) در بستر نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی عددی شده است. در شکل (۱۵) شتاب نگاشت لرزه‌ای و میزان نشست نمونه خاک نرم براساس مدل آزمایشگاهی (پاولوجی و همکاران، ۲۰۰۸) نمایش داده شده است.

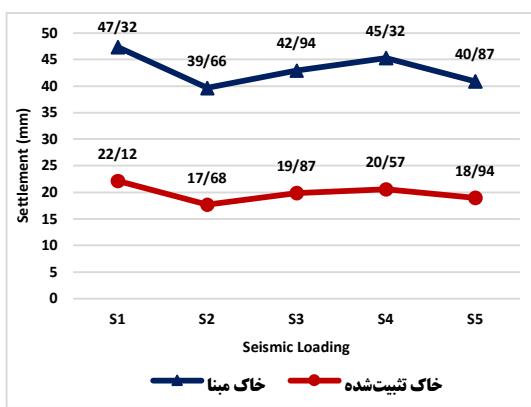


شکل (۱۵): نتایج آزمایش (پاولوجی و همکاران، ۲۰۰۸)، (a) میزان نشست خاک نرم با بارگذاری لرزه‌ای، (b) شتاب نگاشت لرزه‌ای

با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل آزمایشگاهی (پاولوجی و همکاران، ۲۰۰۸) براساس تمام شرایط آزمایش در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی عددی شده و نتایج حاصل که بیانگر میزان نشست خاک نرم تحت بار سربار و تحریک لرزه‌ای بوده استخراج شده است. در نمودارهای شکل (۱۶) نتایج

^۱ Dry Toyoura sand

میزان نشست Settlement (mm)	بارگذاری لزهای	شرایط تثبیت خاک		$\frac{\text{چ}}{\text{ف}}$
		خاک تثبیت شده	خاک مینا	
22.12	S1	✓		M10
39.66	S2		✓	M13
17.68	S2	✓		M14
42.94	S3		✓	M17
19.87	S3	✓		M18
45.32	S4		✓	M21
20.57	S4	✓		M22
40.87	S5		✓	M25
18.94	S5	✓		M26



شکل (۱۷): میزان تغییرات نشست خاک نرم با سربار صلب تحت شرایط مختلف بارگذاری لزهای

با توجه به نتایج حاصل از مدلسازی رفتار دینامیکی خاک نرم تحت سربار صلب (شکل ۱۷) مشخص می‌گردد که تحت هر پنج بارگذاری لزهای، خاک نرم در هردو شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان نشست داشته است، نتایج نشان می‌دهد که میزان نشست در شرایط عدم تثبیت تحت هر پنج بارگذاری لزهای دارای مقادیر بیشتری نسبت به شرایط تثبیت خاک با ستون خاک-سیمان بوده است. براساس نتایج حاصل بیشترین میزان نشست در خاک نرم در هردو شرایط عدم تثبیت و تثبیت تحت بارگذاری لزهای S1 و کمترین میزان نشست تحت بارگذاری S2 رخ داده است، علت این موضوع را در خصوصیات دینامیکی بارلزهای و ماهیت فرکانسی بارگذاری میتوان تفسیر نمود (بزرگای زمین لزه S1 معادل با $\frac{1}{4}$ و بزرگای زمین لزه S2 معادل با $\frac{1}{2}$ ریشرتر بوده است). در جدول (۱۱) و نمودارهای شکل

شرایط پیاده‌سازی شده در مدل‌های M5 تا M8 بوده است و تنها تفاوت اعمال شتاب نگاشتهای پردازش شده به انتهای نمونه‌های عددی بوده است. با توجه به سناریوهای مدل‌سازی عددی (جدول ۳) مدل‌های عددی برپاسازی شده و تحت شرایط بارگذاری لزهای قرار گرفته است. براین اساس عملکرد ۴ نمونه مینا (مدل‌های آزمایشگاهی F1 تا F4) تحت شرایط بارگذاری لزهای ۵ شتاب نگاشت به شرح ذیل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لزهای M1: Kern County-1952 (M12)
۲. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لزهای M16: Parkfield-1966 (M13)
۳. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لزهای M17: Borrego Mountain -1968 (M20)

۴. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لزهای M24: Tabas, Iran-1978 (M21)
۵. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لزهای M25: Imperial Valley (El Centro) -1979 (M28)

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی بیانگر رفتار خاک سست در شرایط مختلف سربار و تحت هریک از بارگذاری‌های لزهای (S1 تا S5) بوده است. مقادیر نشست حاصل از بارگذاری لزهای به تکیک نوع سربار، برای سربار صلب در جدول (۱۰) و سربار انعطاف‌پذیر در جدول (۱۱) تحت هر دو شرایط عدم تثبیت خاک (خاک مینا) و تثبیت خاک نرم با ستون خاک-سیمان ارائه شده است. همچنین میزان تغییرات نشست خاک نرم براساس شرایط مختلف بارگذاری لزهای در نمودارهای (۱۷) و (۱۸) به ترتیب برای سربار صلب و خاکریز به ترتیب ارائه شده است.

جدول (۱۰): نتایج حاصل از بارگذاری لزهای خاک نرم با سربار صلب

میزان نشست Settlement (mm)	بارگذاری لزهای	شرایط تثبیت خاک		$\frac{\text{چ}}{\text{ف}}$
		خاک تثبیت شده	خاک مینا	
47.32	S1		✓	M9

لرزه‌ای مختلف عبارت است از: S4 < S5 < S3 < S1 < S2. با توجه به خصوصیات و ماهیت بارهای دینامیکی اعمال شده بر خاک نرم روند تغییرات میزان نشست قابل تفسیر و توجیح بوده است (با توجه به خصوصیات بارگذاری‌های لرزه‌ای جدول ۴) مقادیر بزرگ‌تری زمین لرزه های S1 تا S5.

به جهت ارزیابی کمی نتایج و انجام مقایسات، در جدول (۱۲) نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (مدل‌های M9 تا M28) ارائه شده‌است. در این جدول ستون دوم بیانگر میزان نشست هریک از مدل‌های عددی دو بعدی تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای، ستون سوم بیانگر میزان تاثیر ستون خاک-سیمان در کاهش نشست خاک سبست بوده که در نمونه‌های مشابه در شرایط مدل‌سازی و دارای اختلاف در شرایط ثبیت با ستون خاک-سیمان مورد بررسی قرار گرفته است.

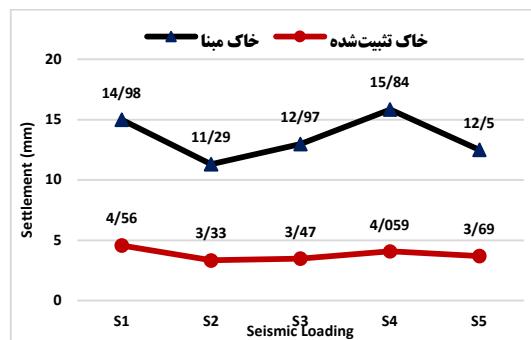
جدول (۱۲): ارزیابی ظرفیت باربری زمین سبست تحت بارگذاری لرزه‌ای

Model	میزان نشست Settlement (mm)	درصد تغییرات %
M9	47.32	53.25
M10	22.12	
M11	14.98	69.56
M12	4.56	
M13	39.66	55.42
M14	17.68	
M15	11.29	70.51
M16	3.33	
M17	42.94	53.73
M18	19.87	
M19	12.97	73.25
M20	3.47	
M21	45.32	54.61
M22	20.57	
M23	15.84	74.38
M24	4.059	
M25	40.87	53.66
M26	18.94	
M27	12.5	70.48
M28	3.69	

نتایج حاصل از مدل‌سازی ۴ مدل مبنا تحت بارگذاری لرزه‌ای (S1 تا S5) در جدول (۱۲) ارائه شده‌است. با توجه به نتایج حاصله مشخص می‌گردد که میزان نشست در خاک سبست بدون ثبیت با سربار صلب تحت بارگذاری لرزه‌ای S1

(۱۸) نتایج حاصل از رفتار دینامیکی خاک نرم با سربار خاکریز تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف ارائه شده است. جدول (۱۱): نتایج حاصل از بارگذاری لرزه‌ای خاک نرم با سربار خاکریز

میزان نشست Settlement (mm)	بارگذاری لرزه‌ای	شرایط ثبیت خاک		نمره
		خاک ثبت شده	خاک مبنا	
14.98	S1		✓	M1 1
4.56	S1	✓		M1 2
11.29	S2		✓	M1 5
3.33	S2	✓		M1 6
12.97	S3		✓	M1 9
3.47	S3	✓		M2 0
15.84	S4		✓	M2 3
4.059	S4	✓		M2 4
12.5	S5		✓	M2 7
3.69	S5	✓		M2 8



شکل (۱۸): میزان تغییرات نشست خاک نرم با سربار خاکریز تحت بارگذاری لرزه‌ای

با ارزیابی نتایج حاصل از میزان نشست خاک نرم با سربار خاکریز تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف (شکل ۱۸) مشخص می‌گردد که نشست خاک نرم در شرایط ثبیت با ستون خاک-سیمان نسبت به خاک مبنا (شرایط عدم ثبیت خاک) دارای مقادیر کمتری بوده است، علاوه بر این نتایج حاصل نشان می‌دهد که خاک نرم با سربار خاکریز تحت هر پنج بارگذاری لرزه‌ای نشست داشته است. با توجه به نتایج حاصل روند تغییرات میزان نشست تحت بارگذاری‌های

صلب و خاکریز تحت شرایط بارگذاری لرزاها رائمه شده است.

جدول (۱۳): ارزیابی تأثیر ستون خاک-سیمان در رفتار لرزاها

زمین نرم

میانگین درصد کاهش نشست خاک سست	سریار خاکریز	سریار صلب
ثبت شده	54.13 %	71.63 %

براساس نتایج حاصل (جدول ۱۳) مشخص می‌گردد که به کارگیری ستون خاک-سیمان برای ثبیت خاک نرم موجب بهبود رفتار لرزاها زمین‌هایی با خاک نرم تحت شرایط سربار بی‌صلب و خاکریز گردیده است، به‌گونه‌ای که با ثبیت خاک نرم با ستون خاک سیمان میزان نشت در شرایط سربار صلب ۵۴.۱۳٪ و در شرایط سربار خاکریز ۷۱.۶۳٪ کاهش یافته است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک نرم در شرایط عدم ثبیت و ثبیت با ستون‌های خاک-سیمان مطالعات جامعی در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی تعريف و پیاده‌سازی شده است. در راستای انجام مطالعات پارامتریک ابتدا ۴ مدل آزمایشگاهی که به بررسی و ارزیابی ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم ثبیت و ثبیت با ستون خاک-سیمان معطوف بوده تعريف و در محیط آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است. با در دست داشتن نتایج آزمایشات، مدل‌های عددی در بست نرم افزار آباکوس برپاگردید و صحت سنجی عملکرد مدل عددی براساس نتایج مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی در شبیه‌سازی ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک سست در شرایط عدم ثبیت و ثبیت با ستون خاک-سیمان، سناریوهای ارزیابی عملکرد خاک سست تحت شرایط بارگذاری لرزاها تعريف و مطالعات به‌هدف بررسی عملکرد زمین‌هایی با خاک سست تحت بارگذاری لرزاها و در شرایط اعمال سربار صلب و خاکریز پیاده‌سازی شده است.

مدل‌سازی آزمایشگاهی برای ارزیابی میزان ظرفیت خاک سست در شرایط عدم ثبیت و ثبیت با ستون خاک-سیمان

(مدل M9) معادل با ۴۷.۳۲ میلیمتر بوده که با ثبیت خاک

تحت شرایط مدل‌سازی یکسان (مدل M10) میزان نشت

به ۲۲.۱۲ میلیمتر معادل با ۵۳.۲۵٪ کاهش یافته است.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که خاک سست بدون ثبیت

با سربار خاکریز تحت بارگذاری لرزاها S1 (مدل M11)

نشستی معادل با ۱۴.۹۸ میلیمتر را تجربه نموده که با ثبیت

خاک با ستون خاک-سیمان (مدل M12) میزان نشت به

۴.۵۶ میلیمتر معادل با ۶۹.۵۶٪ کاهش یافته است.

به جهت ارزیابی تأثیر ثبیت خاک با ستون خاک-سیمان بر

عملکرد لرزاها خاک سست تحت شرایط مختلف سربار و

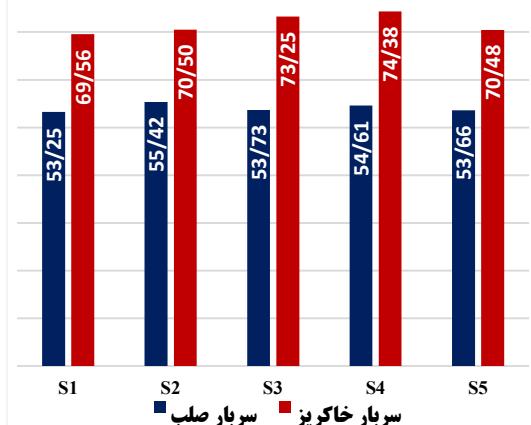
برای هریک از بارگذاری‌های لرزاها S1 تا S5 نتایج به

تفکیک نوع سربار و شرایط بارگذاری لرزاها در نمودارهای

میله‌ای شکل (۱۹) رائمه شده است.

درصد کاهش نشت خاک نرم بر اساس ثبیت با

ستون خاک-سیمان در شرایط بارگذاری لرزاها



شکل (۱۹): درصد تغییرات کاهش نشت بر اساس ثبیت خاک تحت بارگذاری لرزاها S1 تا S5

در شکل (۱۹) نتایج حاصل از تأثیر ثبیت خاک سست با

ستون خاک-سیمان تحت شرایط بارگذاری لرزاها S1 تا S5

براساس نوع سربار خاک (پی‌صلب و خاکریز) رائمه شده

است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که ثبیت

خاک سست با ستون خاک-سیمان موجب کاهش چشم‌گیر

میزان نشت خاک تحت هردو شرایط سربار صلب و خاکریز

در شرایط اعمال هر ۵ بارگذاری لرزاها (S1 تا S5)

گردیده است. در جدول (۱۳) میانگین کاهش نشت خاک

سست ثبیت شده با ستون خاک-سیمان برای شرایط سربار

ایجاد شده برای شبیه‌سازی ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان تحت شرایط بارگذاری پی صلب و خاکریز تعريف شده قابل قبولی بوده است، به گونه‌ای که خطای مدل‌سازی دو بعدی در هر ۴ مدل (M8 تا M5) نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از ۷٪ و نسبت به مدل‌های عددی سه بعدی کمتر از ۳۱٪ بوده است. نتایج حاصل بیانگر توانایی مدل‌های عددی دو بعدی توسعه داده شده برای مدل‌سازی ظرفیت باربری خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون‌های خاک-سیمان تحت سربار صلب و سربار انعطاف‌پذیر بوده است.

نتایج حاصل از مدل‌سازی خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای نشان داد که تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان تحت سربار صلب موجب افزایش ۵۳.۲۵٪، ۵۵.۴۱٪، ۵۳.۷۳٪، ۵۴.۶۱٪، ۵۳.۶۶٪ و ۵۴.۶۱٪ خاکریز موجب افزایش ۶۹.۵۶٪، ۷۰.۵۱٪، ۷۳.۲۵٪، ۷۰.۴۸٪ و ۷۴.۳۸٪ ظرفیت باربری خاک بهترین تحت شرایط بارگذاری S1 تا S5 گردیده است.

براساس نتایج حاصل از پژوهش مشخص می‌گردد که به کارگیری ستون خاک-سیمان برای تثبیت خاک نرم موجب بهبود رفتار لرزه‌ای زمین‌هایی با خاک نرم تحت شرایط سربار پی صلب و خاکریز گردیده است، به گونه‌ای که با تثبیت خاک نرم با ستون خاک سیمان میزان نشست در شرایط سربار صلب ۵۴.۱۳٪ و در شرایط سربار خاکریز ۷۱.۶۳٪ کاهش یافته است.

مراجع

- Al -Kabee, H.N., (2018), "Improvement of Soft Clay by Hearing Technique." M.Sc. Thesis, University of Technology, Iraq.
- Coldwell, E., Khosravi, M., Zaregarizi, S., Perkins, S., & Montgomery, J. (2020, February). Stability analysis of an embankment supported by spatially variable soil-cement columns. In *Geo-Congress 2020: Foundations, Soil Improvement, and Erosion* (pp. 507-515). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Dehghanbanadaki, A., Ahmad, K., Ali, N., Khari, M., Alimohammadi, P., & Latifi, N. (2013). Stabilization of soft soils with deep mixed soil columns-General

تحت دو شرایط بارگذاری پی صلب و خاکریز تعريف شده است. بر اساس نتایج حاصل از ۴ مدل آزمایشگاهی و بررسی منحنی‌های تنش-نشست در هریک از مدل‌های F1 تا F4 مشخص می‌گردد که میزان نشست خاک سست در شرایط عدم تثبیت با ستون خاک-سیمان و شرایط تثبیت با ستون خاک سیمان تحت بارگذاری با پی صلب بیشتر از بارگذاری تحت شرایط سربار انعطاف‌پذیر بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری سربار انعطاف‌پذیر (مدل F3) دارای نشست کمتری نسبت به بارگذاری پی صلب (مدل F1) بوده است، به گونه‌ای که میزان نشست در شرایط بارگذاری خاکریز انعطاف‌پذیر کمتر از ۷۳٪ میزان نشست همان نمونه تحت شرایط بارگذاری با پی صلب بوده است. با ارزیابی نتایج مدل‌های آزمایشگاهی حاصل از تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان (مقایسه بین دو مدل F2 و F4) مشخص می‌گردد که به کارگیری ستون خاک سیمان در شرایط بارگذاری سربار انعطاف‌پذیر باعث تثبیت بیشتر خاک سست نسبت به شرایط بارگذاری پی صلب گردیده است، به گونه‌ای که با به کارگیری ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری پی صلب میزان نشست ۵۵٪ و تحت بارگذاری خاکریز انعطاف‌پذیر میزان نشست ۷۵٪ کاهش یافته است.

با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ۴ مدل آزمایشگاهی (F4 تا F1) مشخص گردید که در هر ۴ مدل ایجاد شده میزان خطای مدل‌سازی عددی کمتر از ۱۰٪ بوده است، به گونه‌ای که میزان خطای مدل‌سازی عددی برای مدل خاک سست تثبیت نشده با سربار صلب (M1) کمتر از ۶٪، مدل خاک سست تثبیت شده با ستون خاک-سیمان با سربار صلب (M2) معادل با ۹.۶۳٪، مدل خاک سست تثبیت نشده با سربار خاکریز (M3) معادل با ۵.۶۶٪ و مدل خاک سست تثبیت شده با ستون خاک-سیمان تحت با سربار خاکریز (M4) معادل با ۶.۶۳٪ بوده است. نتایج حاصل بیانگر دقیق قابل قبول مدل عددی در شبیه‌سازی رفتار و ظرفیت باربری زمین‌های سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان تحت دو نوع بارگذاری صلب و انعطاف‌پذیر بوده است. با توجه به ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های عددی دو بعدی مشخص می‌گردد که مدل عددی دو بعدی

- Technology & Applied Science Research, 13(2), 10352-10356.
16. Ni, P., Yi, Y., & Liu, S. (2019). Bearing capacity of composite ground with soil-cement columns under earth fills: Physical and numerical modeling. *Soils and Foundations*, 59(6), 2206-2219.
 17. Ni, P., Yi, Y., & Liu, S. (2021). Bearing capacity optimization of T-shaped soil-cement column-improved soft ground under soft fill. *Soils and Foundations*, 61(2), 416-428.
 18. Nissa Mat Said, K., Safuan A Rashid, A., Osouli, A., Latifi, N., Zurairahetty Mohd Yunus, N., & Adekunle Ganiyu, A. (2019). Settlement evaluation of soft soil improved by floating soil cement column. *International Journal of Geomechanics*, 19(1), 0401813.
 19. Paolucci, R., Shirato, M., & Yilmaz, M. T. (2008). Seismic behaviour of shallow foundations: Shaking table experiments vs numerical modelling. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(4), 577-595.
 20. Pham, Q. V., Phu, N. T., Le, B. V., & Vo, D. U. (2020, July). Experimental Studies on the Improvement of Soft Soils by Cement in Vinh Long City. In *ICSCEA 2019: Proceedings of the International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture* (pp. 709-716). Singapore: Springer Singapore.
 21. Phutthananon, C., Jongpradist, P., Yensri, P., & Jamsawang, P. (2018). Dependence of ultimate bearing capacity and failure behavior of T-shaped deep cement mixing piles on enlarged cap shape and pile strength. *Computers and Geotechnics*, 97, 27-41.
 22. Prakash, K. G., & Krishnamoorthy, A. (2022). Stability of Embankment Constructed on Soft Soil Treated with Soil-Cement Columns. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 1-21.
 23. Rahil, F. H. (2007). *Improvement of soft clay underneath a railway track model using stone columns technique* (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis, University of Technology, Iraq).
 24. Romanov, N. V., & Rasine, Z. (2018). Review of modern methods for strengthening and stabilizing weak bases. *Bull. MSCU*, 4(115), 499-513.
 25. Said, K. N. M., Rashid, A. S. A., Shien, N. K., & Yunus, N. Z. M. (2019). Load Transfer Mechanism of Group of Floating Soil-Cement Column In improving Soft Ground. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 220, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
 26. Shareef, A. H., Al-Neami, M. A., & Rahil, F. H. (2023). Some of The Field and Laboratory perspective. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 295-306.
 4. Fattah, M. Y., Al-Ani, M. M., & Al-Lamy, M. T. (2014). Studying collapse potential of gypseous soil treated by grouting. *Soils and Foundations*, 54(3), 396-404.
 5. Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons.
 6. Horpibulsuk, S., Chinkulkijniwat, A., Cholphatsorn, A., Suebsuk, J., & Liu, M. D. (2012). Consolidation behavior of soil-cement column improved ground. *Computers and Geotechnics*, 43, 37-50.
 7. Jamsawang, P., Phongphinittana, E., Voottipruex, P., Bergado, D. T., & Jongpradist, P. (2019). Comparative performances of two- and three-dimensional analyses of soil-cement mixing columns under an embankment load. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(7), 852-869.
 8. Karki, B. S., Chao, K. C., Manandhar, S., & Wong, R. K. (2023). Prediction of undrained shear strength in soil-cement columns constructed with dry mixing method for Bangkok soft clay. In *Smart Geotechnics for Smart Societies* (pp. 696-701). CRC Press.
 9. Karol, R. H. (2003). *Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded* (Vol. 12). CRC Press.
 10. Khosravi, M., Pourakbar, M., Soroush, A., Zaregarizi, S., Hung, W. Y., & Nabizadeh, A. (2020). Dynamic centrifuge test of an embankment underlain a liquefiable soil and isolated soil-cement columns. In *Proc., 17th World Conf. on Earthquake Engineering*.
 11. Khosravi, M., Pourakbar, M., Soroush, A., Zaregarizi, S., Hung, W. Y., & Nabizadeh, A. (2020). Dynamic centrifuge test of an embankment underlain a liquefiable soil and isolated soil-cement columns. In *Proc., 17th World Conf. on Earthquake Engineering*.
 12. Kitazume, M. (2021). Recent Development and Future Perspectives of Quality Control and Assurance for the Deep Mixing Method. *Applied Sciences*, 11(19), 9155.
 13. Kitazume, M. (2022). *Quality Control and Assurance of the Deep Mixing Method*. CRC Press.
 14. Ngoc, Y. N. T., Trung, V. T., & Hoang, G. N. (2021). Establishment the program and mathematical diagrams of embankment stability analysis on soft soil reinforced by soil cement columns. *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 72(1), 107-116.
 15. Nguyen, P. H. V., Tran, T. D., & Nguyen, P. C. (2023). Effect Factors on Unconfined Compressive Strength of Soil-Cement Columns: The Case Study of Ba Ria, Vung Tau, Vietnam. *Engineering*,

36. Esfandiari, J. (2022). Numerical and Experimental study of the interaction between strip contact surfaces with new geometry and sandy soils and investigation by GEP method. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 52(108), 161-174.
37. Esfandiari, J., & Selamat, M. R. (2012). Laboratory investigation on the effect of transverse member on pull out capacity of metal strip reinforcement in sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 35, 41-49.
38. Ye, G., Cai, Y., & Zhang, Z. (2017). Numerical study on load transfer effect of Stiffened Deep Mixed column-supported embankment over soft soil. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, 703-714.
39. Yi, Y., Liu, S., Puppala, A. J., & Jing, F. (2019). Variable-diameter deep mixing column for multi-layered soft ground improvement: Laboratory modeling and field application. *Soils and Foundations*, 59(3), 633-643.
40. Yi, Y., Liu, S., Puppala, A. J., & Xi, P. (2017). Vertical bearing capacity behaviour of single T-shaped soil-cement column in soft ground: laboratory modelling, field test, and calculation. *Acta Geotechnica*, 12, 1077-1088.
41. Yu, W., Zhiduo, Z., Xiaoyu, X., & Lei, S. (2022). An intelligent soil-cement mixing column driver. *Automation in Construction*, 142, 104474.
- Studies on Grouting Properties for Weak Soils: A Review. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(5s), 131-141.
27. Shuler, L., & Vanlandingham, D. (2017). *Turner-Fairbank Highway Research Center R&D Communication Reference Guide* (No. FHWA-HRT-15-058). United States. Federal Highway Administration. Office of Research, Development, and Technology.
28. Sumanth Kumar, G., Ramana Murty, V., Mahesh, L., & Rakesh Pillai, J. (2021). Influence of Soil-Cement Columns on Load-Deformation Behavior of Soft Clay. In *Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns: Proceedings of IGC 2018* (pp. 711-721). Springer Singapore.
29. Terashi, M. (2009). Current Practice and Future Perspective of Quality Assurance and Quality Control for Deep-Mixed Ground. In *Okinawa Deep Mixing Symposium*.
30. Ter-Martirosyan, A., Sidorov, V., & Sobolev, E. (2022). Dynamic Properties of Soil Cements for Numerical Modelling of the Foundation's Basis Transformed under the Technology of Deep Soil Mixing: A Determination Method. *Buildings*, 12(7), 1028.
31. Turner, B., Huang, J., & Kelly, R. (2017). Long-term strength of soil-cement columns in coastal areas. *Soils and foundations*, 57(4), 645-654.
32. Wang, Z. F., Shen, S. L., & Modoni, G. (2019). Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: theoretical model and application. *Computers and Geotechnics*, 111, 222-228.
33. Wijerathna, M., & Liyanapathirana, D. S. (2018). Reliability-based performance of embankments improved with deep mixing considering spatial variability of material properties. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 4(4), 04018035.
34. Yapage, N. N. S., Liyanapathirana, D. S., Kelly, R. B., Poulos, H. G., & Leo, C. J. (2014). Numerical modeling of an embankment over soft ground improved with deep cement mixed columns: case history. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(11), 04014062.
35. Ye, G. B., Zhang, Z., Han, J., Xing, H. F., Huang, M. S., & Xiang, P. L. (2013). Performance evaluation of an embankment on soft soil improved by deep mixed columns and prefabricated vertical drains. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(5), 614-623.

Experimental And Numerical Evaluation Of Soil-Cement Column Performance In Stabilizing Soft Soil Under Seismic Loading Conditions

Amirparviz Nima¹
Mohammad Sharifipour*²
Hassan Negahdar³

Abstract

Determining the components and efficient design of soil-cement columns to improve and increase the bearing capacity of soft soil, especially under seismic loading conditions, requires a deep knowledge of all effective parameters and their impact on the performance of stabilized soils. In this research, comprehensive studies have been carried out by laboratory and numerical modeling methods on the variables affecting soil improvement with soil-cement columns under different conditions of overhead and seismic loading. experimental studies are aimed at evaluating the performance of soil-cement columns in soft ground stabilization under two conditions of rigid footing and embankment fill, and based on the results, the numerical modeling was defined and validated (numerical modeling error less than 8%). The results of experimental studies showed that the stabilization by using soil-cement column under embankment fill condition caused more stabilization of soft soil compared to the condition of rigid footing and the amount of settlement decreased by 75% and 55% respectively. The results of numerical modeling showed that the use of soil-cement column has improved the seismic behavior of soft soil and the average of settlement under the loading of 5 major earthquakes has decreased by 54.13% under rigid footing conditions and 71.63% under embankment fill.

Keywords

Soil stabilization, soil-cement column, seismic loading, numerical modeling, Soft soil

¹ Phd Student. Islamic Azad University Central Tehran Branch.

^{2*} Associate Professor,Razi University. sharifipour@razi.ac.ir

³ Assistant Professor. Islamic Azad University Central Tehran Branch.