نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم/ شماره سی و پنجم/ پاییز ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
10th Year/ No. 35/ December 2023

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 بلاخص 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 شده‌است. 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 ۱۰٪) شده‌است. در نهایت عملکرد ستون خاک-سیمان در بهسازی خاک نرم تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. 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 به‌ترتیب ۷۵٪ و ۵۵٪ نسبت به خاک مبنا کاهش یافته‌است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی نشان داد که به‌کارگیری 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 ۵۴/۱۳٪ و در شرایط سربار خاکریز ۷۱/۶۳٪ کاهش یافته‌است.

واژه‌های کلیدی

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

---

[۱]دانشجوی دکترای تخصصی،دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی .
[۲*]دانشیار، دانشگاه رازی، sharifipour@razi.ac.ir.
[۳]استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

مقدمه

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 بوده‌است. از این‌روی ایجاد بستر مناسب برای احداث سازه‌های مختلف به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی طراحان، مهندسین و مجریان این عرصه، مطرح بوده‌است (شریف و همکاران[۱]، ۲۰۲۳). به‌طور کلی اکثر پروژه‌های ساختمانی با بستر نرم خاک مواجه بوده‌اند، این موضوع در مناطق ساحلی و دارای خاک سست به‌عنوان اصلیترین مساله برای طراحی و اجرای اصولی سازه مبدل شده‌است (پراکاش و کریشنامورتی[۲]، ۲۰۲۲). بسترهایی با خاک نرم، موجب عدم پایداری و یا نشست‌های بیش از حد مجاز سازه می‌گردد (یی و ژانگ[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 دهه‌ی اخیر، ارائه راهکارهایی جهت تثبیت و مقاوم‌سازی زمین‌هایی با خاک نرم جهت احداث سازه‌های مختلف، بوده است (کارول[۵]، ۲۰۰۳؛ راحیل[۶]، ۲۰۰۷). تا به‌امروز تکنیک‌های مختلفی جهت بهسازی زمین توسعه داده شده و به‌صورت عملی در بسیاری از پروژه‌ها، عملکرد موفقیت‌آمیز و قابل‌قبولی داشته است (فتاح و همکاران[۷]، ۲۰۱۴؛ الکابی[۸]، ۲۰۱۸). یکی از روش‌های کارامد در بهبود خواص و رفتار خاک، به‌کارگیری 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]، ۲۰۱۵؛ ویجراتنا و لیاناپاتیرانا[۱۱]، ۲۰۱۸). دراین راستا به جهت برآورد اهداف مدنظر از پایدارسازی و بهسازی، بررسی عملکرد و ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر در روش پایدارسازی ستون‌های خاک-سیمان مورد توجه بوده‌است. به‌طور 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]، ۲۰۱۹).

در روش اختلاط عمیق خاک (DSM[۱۴]) ، خاک ناپایدار با سیمان و یا سایر مواد افزودنی با به‌کارگیری 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 (روماندو 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 متحده 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 منعکس کند (شولر و وانلاندینگهام[۱۷]، ۲۰۱۷). روشهای اختلاط عمیق خاک بسته به‌میزان رطوبت خاک مبنا، به‌دو روش: ۱- اختلاط عمیق مرطوب (WDMM[۱۸])، ۲- اختلاط عمیق خشک (DDMM[۱۹]) طبقه‌بندی می‌شود.

DMM خشک به‌طور کلی ارزان‌تر از DMM مرطوب محسوب می‌شود و همچنین، مقاومت ستون خاک چسبنده تولید شده با استفاده از DMM خشک کمتر از مقاومت به‌دست آمده برای همان نوع خاک با استفاده از DMM مرطوب بوده‌است (کیتازوم ، ۲۰۲۲). روش اختلاط عمیق

[1] Shareef et al.
[2] Prakash and Krishnamoorthy
[3] Ye and Zhang
[4] Khosravi et al.
[5] Karol
[6] Rahil
[7] Fattah et al.
[8] Al -Kabee
[9] Ngoc et al.
[10] Han
[11] Wijerathna and Liyanapathirana
[12] Yi et al.
[13] Wang et al.
[14] deep soil mixing
[15] Romanov and Rasine
[16] Kitazume
[17] Shuler and Vanlandingham
[18] wet deep mixing method
[19] dry deep mixing method

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

خاک برای بهسازی زمین سازگار با محیط زیست است و کاربرد آن در بهسازی و تقویت خاک‌های ضعیف در سراسر جهان رو به رشد بوده‌است. با به‌کارگیری روش اختلاط عمیق بهبود قابل‌توجهی 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[1]، ۲۰۰۹؛ کیتازوم ۲۰۲۱). نتایج حاصل از به‌کارگیری 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 به‌کارگیری تکنیک ستون خاک-سیمان برای بهسازی و مقاوم‌سازی خاک نرم تا به امروز مطالعات نسبتاً جامعی توسط محققین مختلف انجام شده‌است. در این راستا هورپیبولسوک و همکاران[2]، 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 بوده‌است. دهقانباناداکی و همکاران[3] 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 شده‌است. 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 بوده‌است. یی و همکاران[4] در سال ۲۰۱۳ به بررسی افزایش ظرفیت باربری زمین‌هایی با سربار خاکریز، با استفاده از دو روش تواماً ستون‌های خاک-سیمان (اختلاط عمیق DM[5]) و بکارگیری زهکش‌های قائم (PVDs[6]) 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 نشست 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 بوده‌است. علاوه براین، نتایج نشان می‌دهد که ستون‌های خاک-سیمان باعث افزایش پایداری خاکریز در خاک نرم می‌شوند، در حالی که PVDها باعث تسریع در تحکیم خاک نرم می‌شوند. یاپاگ و همکاران[7] در سال ۲۰۱۴ در پژوهشی عملکرد ستون‌های خاک-سیمان براساس بارگذاری خاکریز در یک مطالعه موردی (پروژه توسعه بزرگراه اقیانوس آرام در استرالیا) را مورد آنالیز قرار داد. در این پروژه، نشست‌های اندازه‌گیری شده زمین‌های بهسازی شده با ستون‌های خاک-سیمان در حین ساخت و بعد از ساخت خاکریز به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از نشست‌های پیش‌بینی شده بود. در این مطالعه، یک مدل المان محدود بر پایه محیط متخلل غیرخطی ایجاد و رفتار و عملکرد زمین‌های تثبیت‌شده ارزیابی گردید. در این مطالعات، پارامترهای نشست، 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 هنگام اعمال رفتار نرمشی ستون‌ها وجود دارد. نتایج حاصل از این پژوهش به‌وضوح نشان می‌دهد که کرنش ستونهای DCM[8] در آنالیز از اهمیت بالایی برخوردار است. ترنر و همکاران[9] در سال ۲۰۱۷ تحقیقاتی جامع بر روی میزان تخریب ستون‌های خاک-سیمان با استفاده از

[1] Terashi
[2] Horpibulsuk et al.
[3] Dehghanbanadaki et al.
[4] Ye et al.
[5] deep mixing
[6] prefabricated vertical drains
[7] Yapage et al.
[8] deep cement mixed
[9] Turner et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

تست‌های نفوذ تزریق، آزمایش‌های تراکم تک محوره و آنالیز گرماسنجی برای تعیین میزان تخریب ستون‌های خاک-سیمان در معرض آب دریا انجام دادند. یکی از نتایج اصلی این پژوهش، ارائه یک مدل آنالیز با استفاده از داده‌های تجربی و کالیبره شده برای پیش‌بینی تغییر در مقاومت ستون‌های خاک-سیمان به‌عنوان تابعی از زمان بوده‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که با کاهش قطر ستون، سرعت تخریب افزایش می‌یابد. مدل پیشنهادی در این پژوهش می‌تواند برای طراحی ستونهای با دوام بیشتر خاک-سیمان در محیط‌های ساحلی استفاده گردد. یی و همکاران[1] در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی به بررسی عملکرد و کارایی ستون‌های خاک-سیمان از نوع T شکل جهت بهسازی و تثبیت زمین‌هایی با خاک نرم پرداختند. ستون خاک-سیمان T شکل یک ستون با قطر متغیر است که دارای یک کلاهک ستون بزرگ شده در عمق کم می‌باشد و در نتیجه شکل ستون با حرف T مشابه است. نتایج حاصل از این مطالعات، بیانگر یک روش ساده برای تخمین ظرفیت باربری نهایی ستون‌های خاک-سیمان T شکل بوده‌است. فوتهانانون و همکاران[2] در سال ۲۰۱۸ در مطالعاتی عددی به بررسی ظرفیت باربری نهایی ستون‌های T شکل در روش اختلاط عمیق سیمان و همچنین ارزیابی الگوهای شکست در ستون خاک-سیمان پرداختند. هدف اصلی از این پژوهش، ارزیابی میزان وابستگی ظرفیت باربری نهایی و رفتار شکست ستون‌های T شکل خاک-سیمان در روش اختلاط عمیق سیمان براساس ابعاد کلاهک و مقاومت ستون بوده‌است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که شکل کلاهک و مقاومت کلاهک ستون T شکل نقش اصلی در باربری نهایی و رفتار تخریب ستون ایفا می‌کند.

جاماساوانگا و همکاران[3] در سال ۲۰۱۹ بررسی جامعی برروی عملکرد زمین‌هایی با خاک رس نرم دریایی (در کشور تایلند، شهر بانکوک) تحت بارگذاری خاکریز که توسط ستون‌های خاک-سیمان مقاوم سازی شده‌اند، انجام دادند. این پژوهش به‌صورت عددی، در فضای ۲بعدی و ۳بعدی، در مقیاس واقعی و با به‌کارگیری روش مدل‌سازی عددی المان محدود (FEM[4]) انجام شد. در این پژوهش دو الگوی نصب و کارگذاری ستون‌های خاک-سیمان مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در مطالعات انجام شده رویه‌ای برای مدل‌سازی ۲بعدی (ارزیابی عملکرد ستون ۳بعدی در وضعیت دیوارهای ستونی کرنشی ساده ۲بعدی) کل سیستم زمین بهسازی شده مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج به دست آمده از آنالیز ۲بعدی و ۳بعدی نشان داد که تجزیه و تحلیل ۲ بعدی، نتایج نادرستی را از نظر حرکات جانبی ستون، گشتاور خمشی و بارهای محوری ناشی از ستون‌های خاک-سیمان ارائه می‌دهد. این نتیجه به‌این دلیل رخ داده است که ستون‌های خاک-سیمان در ارزیابی ۲بعدی با استفاده از دیوارهای طولانی مدل‌سازی شده اند که در اصل مانع از حرکت خاک بین دو ستون یا ردیف ستون می‌شوند. در این مطالعه عوامل تصحیح شده برای توسعه نتایج آنالیز ۲بعدی به نتایج آنالیز ۳بعدی نیز پیشنهاد شده‌است.

نیسامت سعید[5] و همکاران در سال ۲۰۱۹ در مطالعاتی تثبیت خاک نرم با استفاده از ستون‌های خاک-سیمان در یک آزمایش فیزیکی در مقیاس کوچک را مورد ارزیابی قرار دادند و تأثیر ضریب بهبود سطح[6] (A_P) و ارتفاع ستون (Hc) در زمین بهبودیافته تحت بار طراحی[7] (WD) از طریق آزمون‌های مدل‌سازی فیزیکی در مقیاس کوچک بررسی شد. در این مطالعات، دو سناریو بارگذاری بر روی خاک‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده 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 ضریب بهبود سطح (A_P) و افزایش ارتفاع ستون (Hc)، نشست نهایی زمین تثبیت‌شده کاهش می‌یابد. سعید و همکاران[8] در سال ۲۰۱۹ به بررسی مکانیزم انتقال نیرو و توزیع تنش در ستون‌های خاک-سیمان با روش مدل‌سازی آزمایشگاهی پرداختند. در این مطالعات مکانیزم‌های انتقال

[1] Yi et al.
[2] Phutthananon et al.
[3] Jamsawanga et al.
[4] finite element method
[5] Nissa Mat Said et al.
[6] area improvement ratio
[7] design load
[8] Said et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

بار بین ستون و خاک اطراف آن خصوصاً برای گروه ستون خاک-سیمان و سازوکار توزیع تنش در ستون خاک-سیمان بررسی شد. علاوه براین توسعه‌ی توزیع تنش و نسبت تمرکز تنش، تحت بارگذاری سربار بر خاک تثبیت شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نی و همکاران[1] در سال ۲۰۲۰ در مطالعاتی آزمایشگاهی و عددی به ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌های تثبیت‌شده 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 بوده‌است. فام و همکاران[2] در سال ۲۰۲۰ در پژوهشی به ارزیابی رفتار ستون‌های خاک-سیمان در تثبیت 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 به‌عنوان معیارهایی کاربردی برای ارزیابی روش اختلاط عمیق خاک با سیمان مورد استفاده قرار گیرد. کلدول و همکاران[3] در سال ۲۰۲۰ به‌ارزیابی قابلیت اطمینان ستون خاک-سیمان در تثبیت 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 شده‌است.

در راستای بررسی عملکرد روش‌های پایدارسازی خاک تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای، خسروی و همکاران[4] در سال ۲۰۲۰ در مطالعاتی آزمایشگاهی، به بررسی عملکرد ستون‌های خاک-سیمان در پایدارسازی زمین سست ماسه‌ای با سربار خاکریز تحت شرایط اعمال بارگذاری لرزه‌ای پرداختند، نتایج حاصل از این پژوهش، بیانگر معیارهایی برای بررسی رفتار لرزه‌ای ستون خاک-سیمان در تثبیت زمین‌های نرم (ماسه‌ای و شنی) تحت اعمال بار لرزه‌ای بوده‌است. نگک و همکاران[5] در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی به ارزیابی پایداری خاکریز احداث شده بر زمین نرم تثبیت شده با ستون خاک-سیمان پرداختند. در این پژوهش، مطالعات پارامتریک جامعی بر متغییرهای مؤثر بر تثبیت خاک و همچنین پایداری خاکریز پیاده‌سازی شده‌است. در محاسبه بهسازی خاکریزها بر روی خاک‌های نرم، پارامترهای هندسی ستون‌های خاک‌سیمان مانند طول L، قطر d و فاصله بین ستون‌های D، بر پایداری خاکریزها (نشست S، ضریب پایداری Fs) تأثیر می‌گذارد. در این مطالعات، با بهره‌گیری از معادله‌ی همبستگی چند متغیره که نشست کل (S) و نشست جانبی را براساس وزن واحد خاک، ارتفاع خاکریزها H، طول ستونL، قطر ستون d، فاصله بین ستون‌ها D پیش‌بینی می‌کند، مدلی برای آنالیز پایداری خاکریز بر خاک نرم تثبیت‌شده با ستون خاک-سیمان ارائه شده‌است. نی و همکاران[6] در سال ۲۰۲۱ به ارزیابی عملکرد ستون‌های T شکل خاک-سیمان در بهبود خواص (افزایش ظرفیت باربری) خاک نرم تحت بار سربار پرداختند. در این مطالعات، تأثیر اندازه‌ی کلاهک ستون T شکل، بر بهبود ظرفیت باربری خاک مورد بررسی قرار گرفت و معیارهایی برای بهره‌گیری از این نوع ستون در راستای افزایش ظرفیت باربری خاک نرم ارائه شد.

کومار و همکاران[7] در سال ۲۰۲۱ مطالعاتی بر افزایش ظرفیت باربری زمین‌های رسی با ستون‌های خاک-سیمان انجام دادند. نتایج حاصل از این مطالعات که به روش آزمایشگاهی صورت گرفت، نشان داد که ظرفیت باربری بسترهای رسی با بهره‌گیری از ستون خاک سیمان افزایش

[1] Said et al.
[2] Pham et al.
[3] Coldwell et al.
[4] Khosravi et al.
[5] Ngoc et al.
[6] Ni et al.
[7] Kumar et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

می‌یابد، به‌گونه‌ای که با افزایش تراکم اولیه رس از ۰.۱ به ۰.۵ ظرفیت باربری زمین ۳.۵ برابر افزایش می‌یابد. یو و همکاران[1] 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[2]) 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 همکارن[3] 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 ضریب میرایی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج، بیانگر ارائه‌ی نمودار تجربی وابستگی سختی-کرنش برشی خاک تثبیت شده با ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری لرزه‌ای بوده‌است.

در مطالعات پاراکاش و همکاران[4] در سال ۲۰۲۲ بررسی اثربخشی ستون‌های خاک – سیمان (SC) به‌صورت جداگانه و در ترکیب با ستون‌های آهکی برروی پایداری خاکریز ساخته‌شده بر خاک نرم مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش پایداری خاکریز از نظر نشست و ضریب ایمنی در فواصل زمانی مختلف در طول تحکیم ارزیابی شد. همچنین کارایی ستون‌ها با استفاده از روش المان محدود کرنش صفحه دوبعدی به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش، نشان داد که ستون‌های خاک-سیمان در بهبود نشست و ضریب ایمنی خاکریز در سراسر تحکیم خاک و ترکیب ستون‌های SC با ستون‌های آهکی نیز در بهبود پایداری خاکریز مؤثر بود. علاوه براین نتایج نشان داد که پایداری خاکریز تحت تأثیر آرایش ستون‌ها در سیستم کامپوزیت آهکی و SC بوده‌است.

در سال ۲۰۲۳ کارکی و همکاران[5]، مطالعاتی در راستای ارزیابی مقاومت برشی زهکشی نشده در ستون های خاک-سیمان ساخته‌شده با روش اختلاط خشک برای خاک رس نرم بانکوک انجام دادند. در این پژوهش روابط بین مقاومت برشی زهکشی‌نشده و پارامترهای طراحی، ازجمله 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 زهکشی‌نشده ستون خاک-سیمان براساس خصوصیات سیمان، رطوبت طبیعی و زمان عمل‌آوری به عنوان پارامترهای ورودی مدل گردید.

ارزیابی تأثیر شرایط عمل‌آوری و خصوصیات متریال تشکیل‌دهنده‌ی ستون خاک-سیمان بر مقاومت فشاری نهایی آن، در سال ۲۰۲۳ توسط نگویان و همکاران[6] مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعات، خصوصیات آب‌شهری و همچنین درصد به‌کارگیری افزودنی دوده سیلیس[7] در ساخت و عمل‌آوری ستون‌های خاک-سیمان و تأثیر آن بر مقاومت فشاری نمونه مورد ارزیابی قرار گرفت.

شریف و همکاران[8] در سال ۲۰۲۳ به بررسی پژوهش‌های انجام شده در راستای به‌کارگیری روشهای مختلف تثبیت خاک براساس تزریق مواد تثبیت‌کننده (چسبنده) پرداختند. در این مطالعه با ارزیابی پژوهش‌های میدانی و آزمایشگاهی، ویژگی‌های این روش تثبیت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاکی از بهبود عملکرد خاک بعد از تزریق مواد تثبیت‌کننده بوده‌است. براساس نتایج حاصل از این مطالعه‌ی مروری مشخص می‌گردد که عوامل متعددی همچون: هدف از

[1] Yu et al.
[2] Internet of Things
[3] Ter-Martirosyan et al.
[4] Prakash et al.
[5] Karki et al.
[6] Nguyen et al.
[7] Silica fume admixture
[8] Shareef et al.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

بهسازی خاک، مقاومت خاک مورد نظر، متریال و اجزای تشکیل دهنده خاک نرم و رئولوژی خاک به‌عنوان اصلیترین پارامترها در مقاوم‌سازی خاک براساس روش تزریق مواد تثبیت‌کننده بوده است.

با ارزیابی مطالعات انجام شده، مشخص می‌گردد که به‌کارگیری ستون‌های خاک-سیمان به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد جهت بهسازی و افزایش ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک نرم بوده که پارامترهای مختلفی در تعیین خصوصیات و ویژگی‌های این ستون‌ها تأثیرگذار می‌باشد. به‌علاوه تعیین مؤلفه‌ها و طراحی کارآمد ستون‌های خاک-سیمان به ویژه برای شرایط اعمال بارگذاری‌های لرزه‌ای، نیازمند شناخت عمیق از کلیه‌ی پارامترهای مؤثر به‌همراه میزان تأثیر آنها بر عملکرد زمین‌های مقاوم سازی شده با ستونهای خاک-سیمان تحت شرایط بارگذاری (استاتیکی، دینامیکی) بوده‌است. 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 شده‌است. مطالعات آزمایشگاهی به ارزیابی عملکرد ستون خاک-سیمان در مقاوم‌سازی زمین نرم تحت دو شرایط سربار صلب و خاکریز معطوف بوده‌است. براساس نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، مدل عددی در بستر نرم‌افزار المان محدود ABAQUS تعریف و عملکرد مدل عددی اعتبارسنجی (صحت سنجی) شده‌است. در نهایت با اعمال شتاب نگاشت زمین‌لرزه‌های 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 مأثر در مقاوم‌سازی خاک نرم با ستون خاک-سیمان مورد نقد و بررسی قرار گرفته‌است.

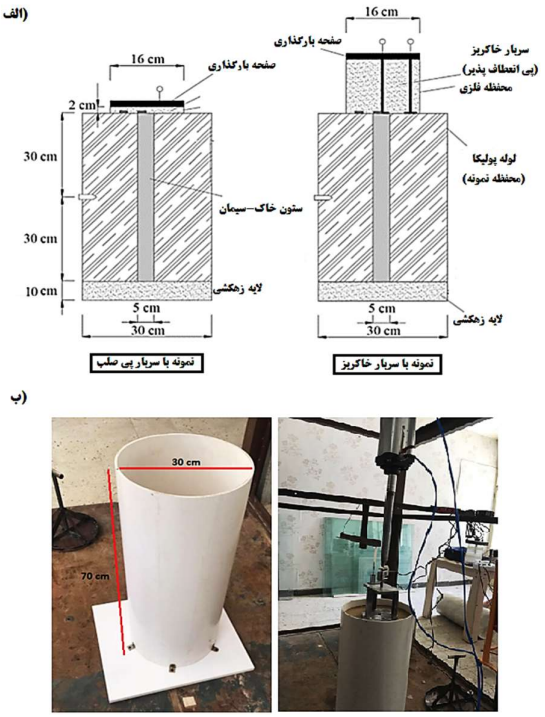
مواد و روش‌ها

در این پژوهش با هدف ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌های سست تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان مطالعات آزمایشگاهی و عددی تعریف و پیاده‌سازی شده‌است. در گام نخست مدل‌سازی آزمایشگاهی بر اساس بارگذاری پی سطحی صلب و خاکریز (بارگذاری پی انعطاف پذیر) بر خاک سست تحت دو شرایط خاک مبنا و خاک تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان انجام شده‌است. هدف اصلی از تعریف مدل‌های آزمایشگاهی، کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی بوده که در بستر نرم‌افزار آباکوس انجام شده‌است. پس از انجام مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌های عددی بر اساس مدل‌های آزمایشگاهی برپاسازی گردیده و کالیبراسیون- صحت سنجی مدل عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. 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 گرفته‌است. با انجام صحت‌سنجی 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 گرفته‌است.

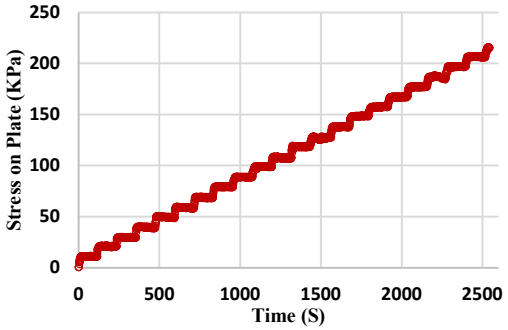
مشخصات مدل آزمایشگاهی

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



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



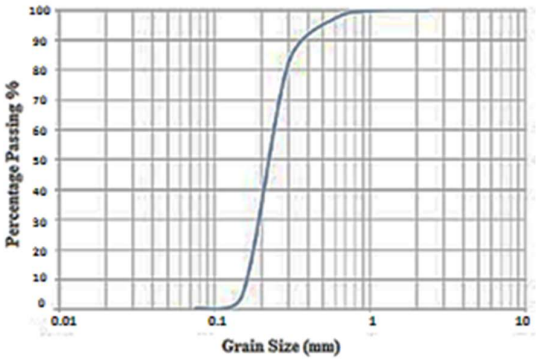
شکل (۲): میزان افزایش تنش اعمال شده بر صفحه بارگذاری در آزمایشات

در آزمایشهای انجام شده برای مدل‌سازی و ارزیابی ظرفیت خاک سست، از ماسه۱۶۱ فیروزکوه (ماسه‌ی شکسته سیلیسی) استفاده شده‌است. در جدول (۱) مشخصات فیزیکی- خصوصیات مکانیکی و در شکل (۳) منحنی دانه‌بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه ارائه شده‌است. در مدل‌سازی آزمایشگاهی برای اجرای ستون خاک-سیمان، درمحور نمونه توسط لوله‌ی فلزی به قطر ۵ سانتیمتر که از قبل با یک شابلون به‌همین منظور تهیه شده سوراخی حفر شده (خاک داخل لوله تخلیه می‌شود) و سپس دوغابی با ماسه‌ی تخلیه شده و سیمان با عیار ۱۵۰ کیلوگرم در هرمترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰.۶ پر شده و نمونه کاملاً برای حفظ رطوبت پوشانده شده‌است.

جدول (۱): خصوصیات مکانیکی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

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

برای مشخص شدن خصوصیات ستون خاک-سیمان ساخته شده، از مصالح دوغاب استفاده شده به‌عنوان ستون، دو نمونه استوانه‌ای به قطر ۵ وارتفاع ۱۰ سانتیمتر ساخته شده که پس از یک هفته نگهداری در استخر آزمایشگاه تحت آزمایش فشاری تک محوره قرارگرفته که مقاومت فشاری آنها ۲۷.۳ و ۳۴.۲ کیلوگرم بر سانتیمترمربع بدست آمده‌است. برای انجام آزمایش‌ها، ابتدا اطراف لوله‌ی آزمایش درحدود ۱۰ سانتیمتر از ابتدا به‌هدف انجام زهکشی چند سوراخ تعبیه شده و سپس لایه‌ی فیلتر تهیه شده ریخته و کوبیده شده‌است. 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 خشک ۱.۳۵ (مشابه خاکهای ماسه‌ای سست ساحلی) اجرا شده و با استفاده از صفحه بارگذاری در یک بازه منظم بارگذاری شده‌است. در نهایت، میزان نشست خاک و ستون خاک-سیمان با استفاده از سنسورهای LVDT[1] و دیتالاگر[2] ۸ کاناله برای هریک از آزمایش‌ها ثبت شده‌است.



[1] Linear variable differential transformer

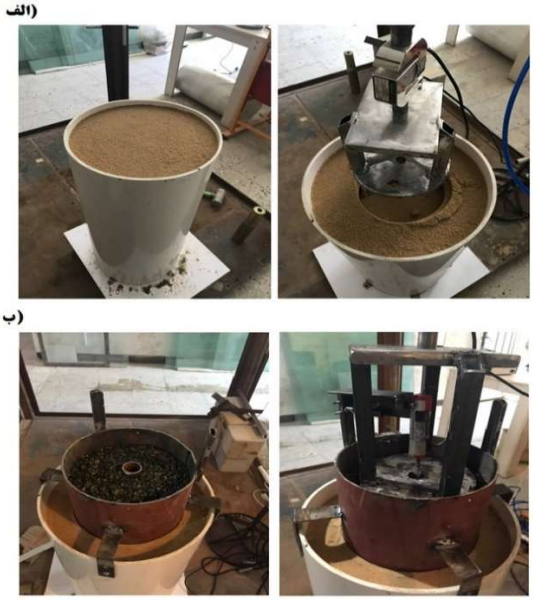
[2] Data Logger

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

شکل (۳): منحنی دانه‌بندی ماسه فیروزکوه

جدول (۲): سناریوهای مطالعات آزمایشگاهی

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



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

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

مدل‌سازی عددی

در این پژوهش، مدل‌سازی 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 لرزه‌ای خاک سست، مدل‌های دو بعدی توسعه داده شده است. با توجه به نمونه‌های آزمایشگاهی و تقارن محوری باکس نمونه (استوانه)، برای کاهش هزینه‌ی محاسبات در مدل‌های دوبعدی از تکنیک مدل‌سازی یک صفحه (پوسته) از استوانه مدل اصلی، فرایند مدل‌سازی پیاده‌سازی شده‌است. تکنیک مذکور به عنوان روشی کاربردی برای مدل‌سازی 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 مدل‌سازی عددی باشد. هدف از برپاسازی مدل‌های دوبعدی، کاهش هزینه‌ی محاسبات و ارزیابی ظرفیت باربری خاک سست تحت شرایط بارگذاری مختلف بوده‌است. 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 مدل‌سازی عددی قابل‌قبولی برای ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌های سست بوده است. بخش سوم مدل‌سازی عددی، برپاسازی مدل‌های دوبعدی نمونه‌های آزمایشگاهی تحت شرایط اعمال بارگذاری لرزه‌ای (اعمال شتاب نگاشت ۵ زمین‌لرزه بزرگ S1 تا S5) بوده است. با توجه به توضیحات ارائه شده،

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

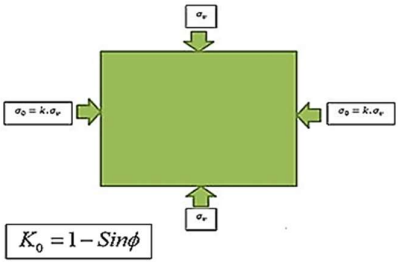
مدل‌سازی عددی، شامل ۲۸ سناریوی مختلف بوده که به همراه جزییات هر مدل در جدول (۲) ارائه شده است.

مدل‌سازی عددی بر اساس سناریوهای مدل‌سازی (جدول ۲) تعریف و در بستر نرم‌افزار المان محدود آباکوس پیاده‌سازی شده است. اولین گام در فرایند مدل‌سازی 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 هزینه‌ی مدل‌سازی عددی (کاهش زمان شبیه‌سازی حل مدل) به‌جای ایجاد یک استوانه‌ی کامل، ربع استوانه مدل‌سازی 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 شامل: ۱- چگالی[1]، ۲- خصوصیات الاستیک[2] (شامل مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν)، ۳- خصوصیات پلاستیک - برای تعریف خصوصیات پلاستیسیته با توجه به نوع متریال که خاک بوده از مدل پلاستیک موهر کولمب[3] استفاده شده‌است 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 مدل‌سازی، تعریف تماس بین سطوح مختلف در مدل‌ها بوده است. در دو مدل سه بعدی M1 و M2 و در مدل‌های دوبعدی M5 و M6 تماس بین صفحه بارگذاری/ خاکریز با سطح نمونه و در دو مدل سه بعدی M3 و M4 (مدل دوبعدی 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 رفتار نرمال[4] و از نوع Hard Contact بوده 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[5] و با در نظر گرفتن ضریب اصطکاک معادل با $\tan\varphi$ که (φ : زاویه اصطکاک داخلی خاک) بوده، تعریف شده‌است. از اصلیترین بخش‌های پیاده‌سازی مدل‌سازی عددی، تعریف شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل بوده‌است. شرایط اولیه مدل‌سازی عددی شامل: ۱- اعمال نیروی ثقل بر اساس شتاب g، ۲- بارگذاری : در نمونه‌های آزمایشگاهی بارگذاری بر اساس دستورالعمل بارگذاری ارائه شده در شکل ۲ بوده است، بنابراین در مدل‌سازی عددی بارگذاری مطابق با مدل آزمایشگاهی به صورت اعمال نیرو بر اساس پروتکل بارگذاری پیاده‌سازی شده است، ۳- تعریف نسبت تخلخل خاک e : به‌جهت تعریف نسبت تخلخل خاک مقدار Void Ratio برای پارت خاک معادل با نسبت تخلخل میانگین خاک که بر اساس خصوصیات متریال خاک تعیین می‌گردد در مدل عددی اعمال شده است، ۴- تعریف تنش ژئواستاتیک[6]: در مدل‌سازی وزن خاک به‌صورت یکنواخت به محیط اطراف نمونه وارد نشده، بلکه به‌صورت تنش میدان ژئواستاتیک تعریف می‌گردد تا نتایج مدل‌سازی به واقعیت نزدیکتر باشد. هنگامی که میدان تنش ژئواستاتیک برای یک ناحیه تعریف می‌شود، میزان تنش در جهت قائم به‌صورت خطی تعریف می‌گردد و ضریب تغییرات برای جهت دوم بر اساس ضریب k0 تعیین می‌شود (شکل ۵).

[1] Density
[2] Elastic
[3] Mohr Coulomb Plasticity
[4] Normal Behavior
[5] Tangential Behavior
[6] Geostatic Stress

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

شکل (۵): رویه اعمال تنش ژئواستاتیک در محیط خاک

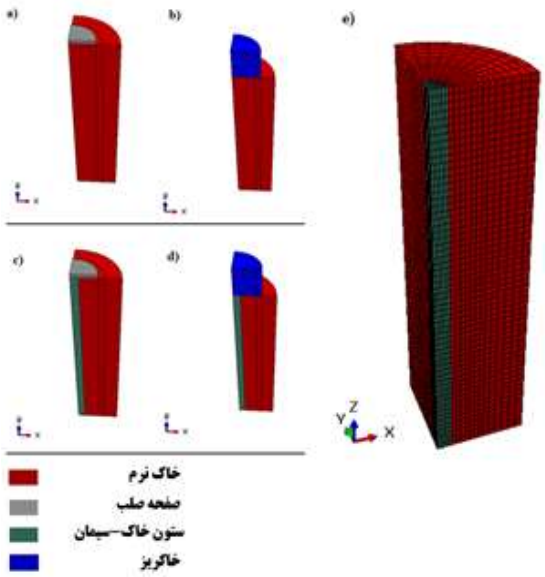


جدول (۳): سناریوهای مدل‌سازی عددی

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

ردیف	کد مدل	شرایط تثبیت خاک		شرایط بارگذاری		توضیحات
		عدم تثبیت (خاک مبنا)	تثبیت با ستون خاک-سیمان	پی صلب	پی انعطاف‌پذیر (خاکریز)	
26	M26		✓	✓		S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979
27	M27	✓			✓	S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979
28	M28		✓		✓	S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979



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

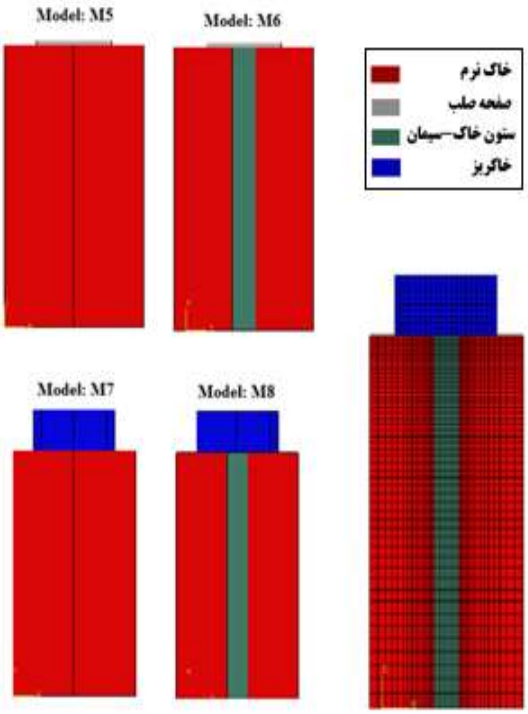
شرایط مرزی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی بیانگر قیدهای محدود کننده حرکت برای بخش مختلف مدل بوده است که شامل: ۱- قید عدم حرکت در راستای قائم برای کف نمونه، ۲- قید عدم حرکت در راستای افقی (X,Y) برای پیرامون نمونه، ۳- قید تقارن در راستای محورهای افقی (X,Y) برای صفحات تقارن نمونه (در مدلهای سه بعدی با 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 مشخصی به نام المان که بیانگر فضای حل معادلات بوده است تقسیم گردد. همچنین در این مرحله، باید نوع المان که بیانگر خصوصیات و رویه حل مدل‌سازی عددی بوده تعیین شود. بر این اساس با ارزیابی اندازه‌های مختلف برای سایز مش‌بندی، بهترین مقدار برای تعیین اندازه‌ی مش 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 دوبعدی 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[1] دوبعدی به جای المان سه بعدی بوده است همچنین نوع المان ۴ گره کرنش صفحه‌ای[2] 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 دوبعدی به همراه مش‌بندی نمایش داده شده‌است.

[1] Shell

[2] Plane Strain

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



شکل (۷): برپاسازی مدل‌های عددی ۲ بعدی به‌همراه مش‌بندی مدل

تجزیه‌ی تحلیل داده‌های لرزه‌ای

در این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای زمین‌هایی با خاک سست تثبیت شده با ستون‌های خاک-سیمان از مشخصات (شتاب نگاشت) ۵ زمین لرزه بزرگ جهت بارگذاری لرزه‌ای مدل‌های عددی استفاده شده است. مشخصات زمین لرزه به‌همراه جزییات هریک از آنها در جدول (۴) ارائه شده‌است.

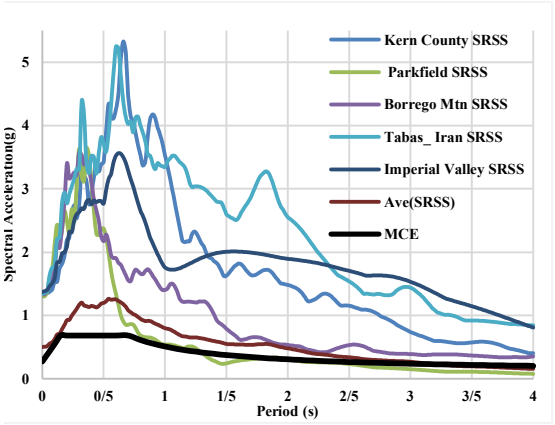
جدول (۴): مشخصات زمین لرزه‌های به‌کارگیری شده جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل‌های عددی

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

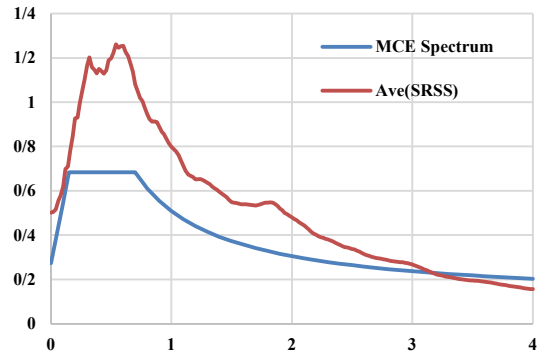
داده‌های شتاب نگاشت زمین لرزه‌های مذکور از سایت PEER که مرجع اصلی تامین داده‌های لرزه‌ای بوده اخذ گردیده است. داده‌های اخذ شده اطلاعات شتاب نگاشت خام هر یک از زمین لرزه‌ها بوده که برای به‌کارگیری و پیاده‌سازی در مدل‌های عددی، نیازمند پردازش و تحلیل که شامل همپایه‌سازی/هم مقیاس‌سازی بر اساس شرایط خاک 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 زمین‌لرزه در دو مؤلفه افقی وارد نرم‌افزار سایزموسیگنال شده و محتوای طیفی آن با در نظر گرفتن دمپینگ ۵٪ استخراج شده است. در گام دوم مقادیر دو مؤلفه استخراج شده برای هر زمین‌لرزه بر اساس مقدار بیشینه شتاب همان زمین‌لرزه هم‌مقیاس 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 به‌روش SRSS برای هر زمین‌لرزه با طیف آیین‌نامه تواماً ترسیم گردیده است. در گام آخر ضریبی برای نزدیک کردن طیف‌های ترکیب شده هر زلزله با طیف آیین نامه استخراج شده است، در این مرحله کمتر نبودن طیف SRSS هر زلزله از طیف آیین نامه در بازه 0.2T - 1.5T به‌عنوان شرط اصلی مدنظر قرار گرفته است. در نهایت بر اساس آنالیز انجام شده ضریب مقیاس برای هر شتاب نگاشت استخراج و به مقادیر 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. ضریب مقیاس نهایی بدست آمده ۰.۳۸ برای هریک از شتاب نگاشت‌ها بوده است که بر اساس ضریب هم مقیاسی دو زوج شتاب‌نگاشت در داده‌های اولیه اعمال گردیده است. با پیاده‌سازی تجزیه و تحلیل طیفی بر داده‌های خام لرزه‌ای اخذ شده، شتاب نگاشت نهایی هریک از زمین‌لرزه‌ها استخراج و جهت اعمال بر نمونه‌های خاک سست (مدل‌های عددی) آماده‌سازی شده است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



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

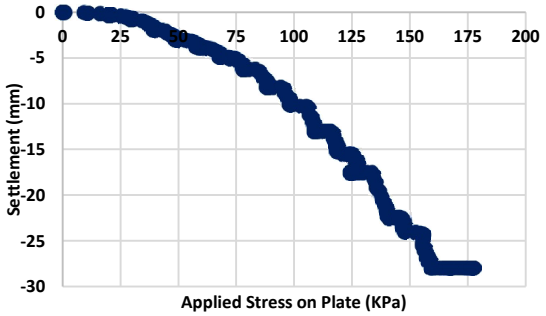


شکل (۹): همپایه‌سازی طیفی، طیف میانگین SRSS و طیف آیین نامه

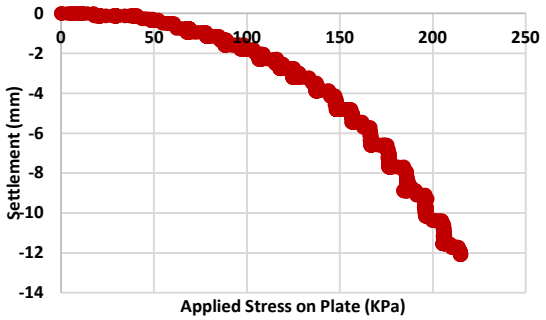
نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی

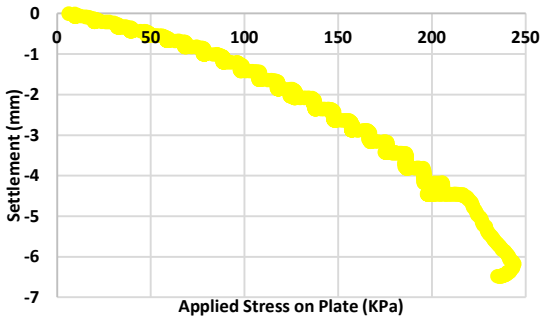
براساس سناریوهای مدل‌سازی آزمایشگاهی (جدول ۲)، چهار مدل آزمایشگاهی (F1 تا F4) برپاسازی شده و تحت شرایط بارگذاری سربار صلب و خاکریز قرار گرفته است. نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی بیانگر میزان نشست خاک براساس افزایش تنش اعمالی توسط صفحه بارگذاری بر نمونه‌های مختلف بوده است. در اشکال ۱۰ تا ۱۳ نمودار تنش-نشست برای مدل‌های F1 تا F4 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 صفحه‌ی بارگذاری بوده که بر این اساس، نشست در نمونه حدوداً ۳۰ 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 صفحه‌ی 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 به‌کارگیری ستون خاک-سیمان جهت تثبیت خاک سست در مدل F2 متغییر می‌باشد.



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

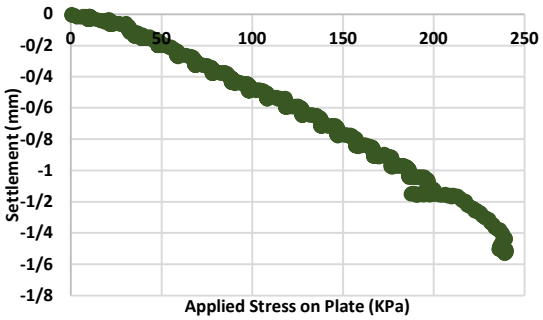


شکل (۱۱): نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی F2، نمودار تنش-نشست



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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



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

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 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 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 نشست کمتری را نسبت به شرایط عدم تثبیت (مدل F1) تجربه نموده‌است، به‌گونه‌ای که به‌کارگیری ستون خاک-سیمان باعث کاهش بیش از ۵۵٪ در نشست 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 نشست کمتری را نسبت به شرایط عدم تثبیت (مدل F3) تجربه نموده است، به‌گونه‌ای که به‌کارگیری ستون خاک-سیمان باعث کاهش بیش از ۷۵٪ در نشست نمونه شده‌است.

با ارزیابی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری سربار انعطاف پذیر (مدل F3) دارای نشست کمتری نسبت به بارگذاری پی صلب (مدل F1) بوده است، به‌گونه‌ای که میزان نشست در شرایط بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر کمتر از ۷۳٪ میزان نشست همان نمونه تحت شرایط بارگذاری با پی صلب بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل از تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان (مقایسه بین دو مدل F2 و F4) مشخص می‌گردد که به‌کارگیری ستون خاک سیمان در شرایط بارگذاری سربار انعطاف پذیر باعث تثبیت بیشتر خاک سست نسبت به شرایط بارگذاری پی صلب گردیده است، به‌گونه‌ای که با به‌کارگیری ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری پی صلب میزان نشست ۵۵٪ و تحت بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر میزان نشست ۷۵٪ کاهش یافته‌است.

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 لرزه‌ای (M9 تا M28) انجام شده‌است. 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: ۸، ۴ و ۲ میلیمتر برای اندازه مش، ۴ مدل آزمایشگاهی مدل‌سازی عددی شده است و میزان نشست 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

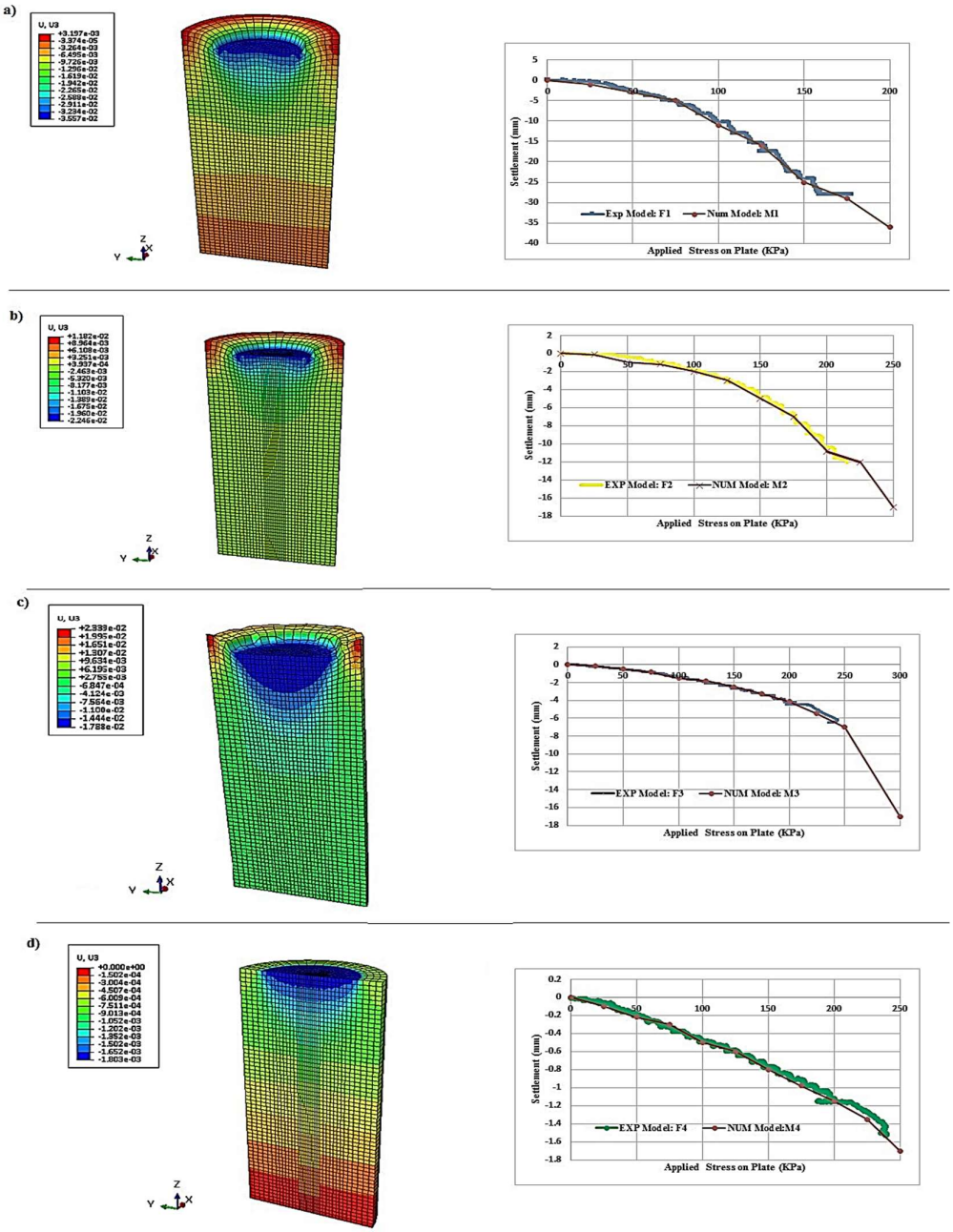
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

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 عملاً 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 به‌ذکر است که مدل‌های عددی براساس موقعیت‌های تمرکز تنش در مدل (محور کارگذاری ستون خاک-سیمان، موقعیت تماس سربار با نمونه) دارای مش‌بندی با اندازه نامنظم بوده و مقادیر ارائه شده در فرایند کالیبراسیون مدل عددی بیانگر بیشینه اندازه مش در مدل بوده‌است.

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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



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

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 به‌جهت 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.

جدول (۶): ارزیابی خطای مدل‌سازی عددی (مقایسه مدل عددی M1 تا M4 با مدل آزمایشگاهی F1 تا F4)

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

با ارزیابی نتایج (جدول ۶) حاصل از مدل‌سازی عددی ۴ مدل آزمایشگاهی (F1 تا F4) مشخص گردید که در هر ۴ مدل ایجاد شده میزان خطای مدل‌سازی عددی کمتر از ٪۱۰ بوده است، به‌گونه‌ای 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 دقت قابل‌قبول 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 بوده‌است.

نتایج مدل‌های عددی دو بعدی

در این بخش نتایج حاصل از مدل‌سازی دوبعدی مدل‌های M5 تا M8 ارائه شده‌است. 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 گرفته‌است. در جدول (۷) میانگین خطای مدل‌های عددی دوبعدی (مدل‌های M5 تا M8) نسبته به مدل‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی سه بعدی (مدل‌های M1 تا M4) ارائه شده‌است.

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 قابل‌قبولی بوده‌است، به‌گونه‌ای که خطای مدل‌سازی دوبعدی در هر ۴ مدل (M5 تا M8) نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از ٪۷.۲ و نسبت به مدل‌های عددی سه بعدی کمتر از ٪۳.۱ 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 به‌جهت ارزیابی ظرفیت باربری خاک سست تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای از مدل‌های عددی دوبعدی توسعه یافته استفاده شده‌است.

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

ارزیابی عملکرد نمونه‌ها تحت بارگذاری لرزه ای

در این پژوهش، به جهت صحت‌سنجی مدل‌عددی 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 (پااولوجی و همکاران[1]، 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 پااولوجی 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

[1] Paolucci et al.

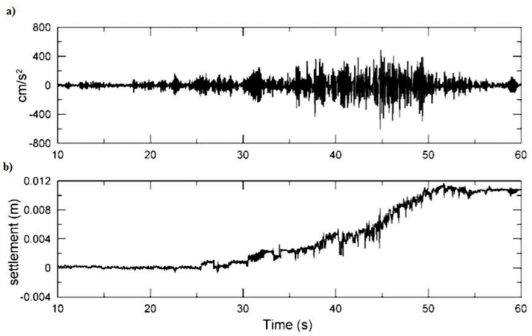
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

جهت اعمال بار قرار گرفته استفاده شده است. خاک نرم به‌کارگیری شده ماسه تویورا خشک[1] 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 5.227 KN بوده است.

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

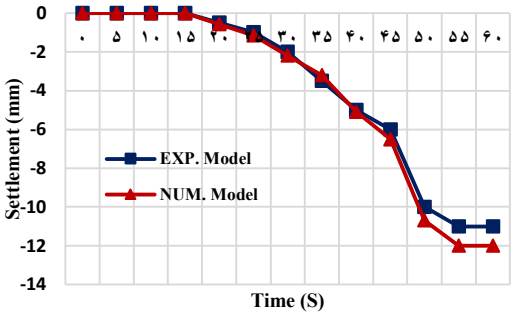
Properties	Value
Relative density (D_r)	80%
mass density (ρ)	1.6e3 Kg/m^3
angle of internal friction (φ)	42.1°

در این مطالعات آزمایشگاهی، سناریوهای مختلفی جهت ارزیابی رفتار دینامیکی خاک نرم تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف انجام شده‌است. 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 (پااولوجی و همکاران، ۲۰۰۸) نمایش داده شده است.



شکل (۱۵): نتایج آزمایش (پااولوجی و همکاران، ۲۰۰۸)، a) بارگذاری لرزه‌ای، b) میزان نشست خاک نرم

با توجه به توضیحات ارائه شده، مدل آزمایشگاهی (پااولوجی 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 شده‌است. در نمودارهای شکل (۱۶) نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (میزان نشست خاک نرم) به همراه نتایج تست آزمایشگاهی ارائه شده‌است.



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

به جهت ارزیابی کمّی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و انجام مقایسات، در جدول (۹) مقادیر دو آزمونه آماری MSE, RMSE و درصد خطای مدل‌سازی عددی ارائه شده‌است. 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 قابل‌قبول 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 مدل های عددی (M9 تا M28) در بستر نرم‌افزار آباکوس ایجاد و نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته‌است.

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

[1] Dry Toyoura sand

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

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 لرزه‌ای قرار گرفته است. براین اساس عملکرد ۴ نمونه مبنا (مدل‌های آزمایشگاهی F1 تا F4) تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای ۵ شتاب نگاشت به‌شرح ذیل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای S1: Kern County-1952 (مدل‌های عددی M9 تا M12)

۲. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای S2 : Parkfield-1966 (مدل‌های عددی M13 تا M16)

۳. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای S3 : Borrego Mountain -1968 (مدل‌های عددی M17 تا M20)

۴. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای S4 : Tabas, Iran-1978 (مدل‌های عددی M21 تا M24)

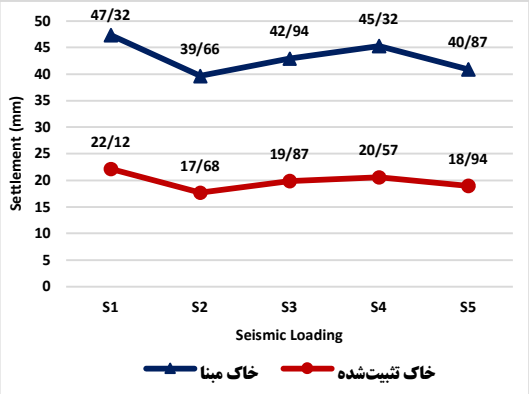
۵. ارزیابی ظرفیت خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای S5 : Imperial Valley (El Centro) -1979 (مدل‌های عددی M25 تا M28)

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

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

کد مدل	شرایط تثبیت خاک		بارگذاری لرزه‌ای	میزان نشست Settlement (mm)
	خاک مبنا	خاک تثبیت‌شده		
M9	✓		S1	47.32

کد مدل	شرایط تثبیت خاک		بارگذاری لرزه‌ای	میزان نشست Settlement (mm)
	خاک مبنا	خاک تثبیت‌شده		
M10		✓	S1	22.12
M13	✓		S2	39.66
M14		✓	S2	17.68
M17	✓		S3	42.94
M18		✓	S3	19.87
M21	✓		S4	45.32
M22		✓	S4	20.57
M25	✓		S5	40.87
M26		✓	S5	18.94



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

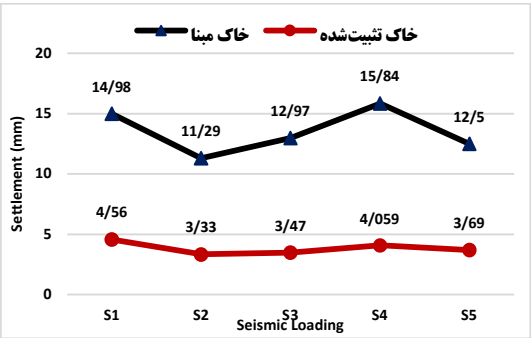
با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی رفتار دینامیکی خاک نرم تحت سربار صلب (شکل ۱۷) مشخص می‌گردد که تحت هر پنج بارگذاری لرزه‌ای، خاک نرم در هردو شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان نشست داشته است، نتایج نشان می‌دهد که میزان نشست در شرایط عدم تثبیت تحت هر پنج بارگذاری لرزه‌ای دارای مقادیر بیشتری نسبت 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 لرزه‌ای S1 و کمترین میزان نشست تحت بارگذاری S2 رخ داده است، علت این موضوع را در خصوصیات دینامیکی بارلرزه‌ای و ماهیت فرکانسی بارگذاری میتوان تفسیر نمود (بزرگای زمین لرزه S1 معادل با ۷/۴و بزرگای زمین لرزه S2 معادل با ۶/۲ ریشتر بوده است). در جدول (۱۱) و نمودارهای شکل

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

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

جدول (۱۱): نتایج حاصل از بارگذاری لرزه‌ای خاک نرم با سربار خاکریز

مدل	شرایط تثبیت خاک		بارگذاری لرزه‌ای	میزان نشست Settlement (mm)
	خاک مبنا	خاک تثبیت‌شده		
M11	✓		S1	14.98
M12		✓	S1	4.56
M15	✓		S2	11.29
M16		✓	S2	3.33
M19	✓		S3	12.97
M20		✓	S3	3.47
M23	✓		S4	15.84
M24		✓	S4	4.059
M27	✓		S5	12.5
M28		✓	S5	3.69



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 تثبیت با ستون خاک-سیمان نسبت به خاک مبنا (شرایط عدم تثبیت خاک) دارای مقادیر کمتری بوده است، علاوه براین نتایج حاصل نشان می‌دهد که خاک نرم با سربار خاکریز تحت هر پنج بارگذاری لرزه‌ای نشست داشته‌است. با توجه به نتایج حاصل روند تغییرات میزان نشست تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای مختلف عبارت است از: S2<S5<S3<S1<S4. 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 بزرگای 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 دوبعدی تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای، ستون سوم بیانگر میزان تاثیر ستون خاک- سیمان در کاهش نشست خاک سست بوده که در نمونه‌های مشابه در شرایط مدل‌سازی و دارای اختلاف در شرایط تثبیت با ستون خاک-سیمان مورد بررسی قرار گرفته‌است.

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

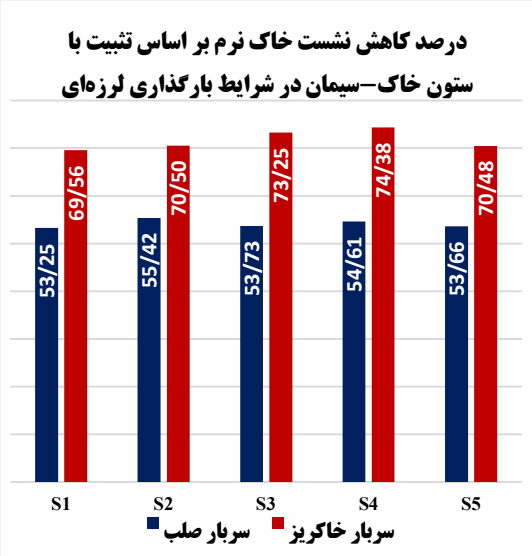
Model	میزان نشست Settlement (mm)	درصد تغییرات %
M9	47.32	**53.25**
M10	22.12	
M11	14.98	**69.56**
M12	4.56	
M13	39.66	**55.42**
M14	17.68	
M15	11.29	**70.51**
M16	3.33	
M17	42.94	**53.73**
M18	19.87	
M19	12.97	**73.25**
M20	3.47	
M21	45.32	**54.61**
M22	20.57	
M23	15.84	**74.38**
M24	4.059	
M25	40.87	**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 سست بدون تثبیت با سربار صلب تحت بارگذاری لرزه‌ای S1

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

(مدل M9) معادل با ۴۷.۳۲ میلیمتر بوده که با تثبیت خاک تحت شرایط مدل‌سازی یکسان (مدل M10) میزان نشست به ۲۲.۱۲ میلیمتر معادل با ۵۳.۲۵٪ کاهش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که خاک سست بدون تثبیت با سربار خاکریز تحت بارگذاری لرزه‌ای S1 (مدل M11) نشستی معادل با ۱۴.۹۸ میلیمتر را تجربه نموده که با تثبیت خاک با ستون خاک-سیمان (مدل M12) میزان نشست به ۴.۵۶ میلیمتر معادل با ۶۹.۵۶٪ کاهش یافته‌است.

به جهت ارزیابی تاثیر تثبیت خاک با ستون خاک-سیمان بر عملکرد لرزه‌ای خاک سست تحت شرایط مختلف سربار و برای هریک از بارگذاری‌های لرزه‌ای S1 تا S5 نتایج به تفکیک نوع سربار و شرایط بارگذاری لرزه‌ای در نمودارهای میله‌ای شکل (۱۹) ارائه شده‌است.



شکل (۱۹): درصد تغییرات کاهش نشست بر اساس تثبیت خاک تحت بارگذاری لرزه‌ای S1 تا S5

در شکل (۱۹) نتایج حاصل از تأثیر تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای S1 تا S5 براساس نوع سربار خاک (پی صلب و خاکریز) ارائه شده است. براساس نتایج حاصل مشخص می‌گردد که تثبیت خاک سست با ستون خاک-سیمان موجب کاهش چشم‌گیر میزان نشست خاک تحت هردو شرایط سربار صلب و خاکریز در شرایط اعمال هر ۵ بارگذاری لرزه‌ای (S1 تا S5) گردیده‌است. در جدول (۱۳) میانگین کاهش نشست خاک سست تثبیت شده با ستون خاک-سیمان برای شرایط سربار صلب و خاکریز تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای ارائه شده است.

جدول (۱۳): ارزیابی تأثیر ستون خاک-سیمان در رفتار لرزه‌ای زمین نرم

سربار خاکریز	سربار صلب	میانگین درصد کاهش نشست خاک سست تثبیت شده
71.63 %	54.13 %	

براساس نتایج حاصل (جدول ۱۳) مشخص می‌گردد که به‌کارگیری ستون خاک-سیمان برای تثبیت خاک نرم موجب بهبود رفتار لرزه‌ای زمین‌هایی با خاک نرم تحت شرایط سربار پی صلب و خاکریز گردیده است، به‌گونه‌ای 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.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با هدف ارزیابی ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک نرم در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون‌های خاک-سیمان مطالعات جامعی در قالب مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی تعریف 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 تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان معطوف بوده تعریف و در محیط آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است. با در دست داشتن نتایج آزمایشات، مدل‌های عددی در بستر نرم افزار آباکوس برپاسازی شده و صحت سنجی عملکرد مدل عددی بر اساس نتایج مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با اعتبارسنجی عملکرد مدل عددی در شبیه‌سازی ظرفیت باربری زمین‌هایی با خاک سست در شرایط عدم تثبیت و تثبیت با ستون خاک-سیمان، سناریوهای ارزیابی عملکرد خاک سست تحت شرایط بارگذاری لرزه‌ای تعریف و مطالعات به‌هدف بررسی عملکرد زمین‌هایی با خاک سست تحت بارگذاری لرزه‌ای و در شرایط اعمال سربار صلب و خاکریز پیاده‌سازی شده است.

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

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

تحت دو شرایط بارگذاری پی صلب و خاکریز تعریف 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 انعطاف پذیر بوده است. با ارزیابی نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی مشخص می‌گردد که خاک سست تحت بارگذاری سربار انعطاف پذیر (مدل F3) دارای نشست کمتری نسبت به بارگذاری پی صلب (مدل F1) بوده‌است، به‌گونه‌ای که میزان نشست در شرایط بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر 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 به‌کارگیری ستون خاک سیمان در شرایط بارگذاری سربار انعطاف پذیر باعث تثبیت بیشتر خاک سست نسبت به شرایط بارگذاری پی صلب گردیده است، به‌گونه‌ای که با به‌کارگیری ستون خاک-سیمان تحت بارگذاری پی صلب میزان نشست ۵۵٪ و تحت بارگذاری خاکریز انعطاف پذیر میزان نشست ۷۵٪ کاهش یافته است.

با ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ۴ مدل آزمایشگاهی (F1 تا F4) مشخص گردید که در هر ۴ مدل ایجاد شده میزان خطای مدل‌سازی عددی کمتر از ۱۰٪ بوده‌است، به‌گونه‌ای 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 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 نوع بارگذاری صلب و انعطاف پذیر بوده‌است. با توجه به ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های عددی دوبعدی 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 بارگذاری پی صلب و خاکریز دارای عملکرد قابل‌قبولی بوده است، به گونه‌ای که خطای مدل‌سازی دوبعدی در هر ۴ مدل (M5 تا M8) نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی کمتر از ۷٪ و نسبت به مدل‌های عددی سه بعدی کمتر از ۳.۱٪ 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 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٪ و ۵۳.۶۶٪ ظرفیت باربری و تحت سربار خاکریز موجب افزایش ۶۹.۵۶٪، ۷۰.۵۱٪، ۷۳.۲۵٪، ۷۴.۳۸٪ و ۷.۰۴۸٪ ظرفیت باربری خاک به‌ترتیب تحت شرایط بارگذاری S1 تا S5 گردیده است.

براساس نتایج حاصل از پژوهش مشخص می‌گردد که به‌کارگیری ستون خاک-سیمان برای تثبیت خاک نرم موجب بهبود رفتار لرزه‌ای زمین‌هایی با خاک نرم تحت شرایط سربار پی صلب و خاکریز گردیده است، به‌گونه‌ای 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

1. Al -Kabee, H.N., (2018), "Improvement of Soft Clay by Hearing Technique." M.Sc. Thesis, University of Technology, Iraq.
2. 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.
3. Dehghanbanadaki, A., Ahmad, K., Ali, N., Khari, M., Alimohammadi, P., & Latifi, N. (2013). Stabilization of soft soils with deep mixed soil columns–General

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

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), 04018183.
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 mproving 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,*

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

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.
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.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم/ شماره سی و پنجم/ پاییز ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Power Plant
10th Year/ No. 35/ December 2023

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

Amirparviz Nima[1]
Mohammad Sharifipour*[2]
Hassan Negahdar[3]

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.

Received: 2023/07/04 Accepted: 2023/11/11

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]