# بررسی رفتار دینامیکی و نشست خاک‌های ماسه‌ای تثبیت‌شده با سیمان تحت بارگذاری قطارهای سریع‌السیر

**مقاله علمی – پژوهشی**

*حسینعلی بگی (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

علی رحیمی، استاد، دانشگاه SDU آلماتی، قزاقستان

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:hoseinbagi@yahoo.com

دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵- پذیرش: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

صفحه ۲۱۸-۱۹۹

**چکیده**

*توسعه خطوط راه‌آهن سریع‌السیر به‌عنوان یکی از ارکان اصلی حمل‌ونقل پایدار، مستلزم شناخت دقیق رفتار ژئوتکنیکی بستر در برابر بارهای دینامیکی ناشی از عبور قطار است. در مسیر پیشنهادی راه‌آهن سریع‌السیر اصفهان–تهران، بخشی از مسیر بر روی خاک‌های مسه ای ریز دانه قرار گرفته است که به دلیل تراکم‌پذیری، تغییرشکل‌پذیری و حساسیت به بارگذاری‌های تکراری، می‌توانند عملکرد و ایمنی خط را تحت تأثیر قرار دهند. ازاین رو، ارزیابی رفتار دینامیکی این خاک‌ها و بررسی راهکارهای بهسازی آن‌ها، یکی از الزامات طراحی و بهره‌برداری ایمن از این مسیر محسوب می‌شود. هدف این پژوهش، بررسی اثر سرعت قطار بر نشست و پاسخ دینامیکی خاکریز احداث‌شده بر روی خاک‌های ریزدانه مسیر اصفهان–تهران و ارزیابی کارایی بهسازی بستر با استفاده از تثبیت سیمانی است. بدین منظور همگام به مطالعات آزمایشگاهی، مدل‌سازی عددی سیستم خاکریز–بستر با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار PLAXIS 2D انجام شد. در ادامه، تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر شامل سرعت قطار، نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به سیمان و ضخامت خاکریز بر میزان نشست و ارتعاشات بستر انجام شد تا تأثیر هر یک بر عملکرد سیستم مشخص شود. نتایج تحلیل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان داد که بهسازی سیمانی خاک‌های ریزدانه موجب کاهش تغییرشکل‌های قائم و بهبود عملکرد دینامیکی بستر در مقایسه با حالت بهسازی‌نشده می‌شود. تحلیل حساسیت نیز نشان داد که نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به سیمان و ضخامت خاکریز از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر میزان نشست و پاسخ ارتعاشی بستر هستند. همچنین، بررسی اثر سرعت قطار نشان داد که در محدوده سرعت‌های مورد مطالعه، افزایش سرعت به‌تنهایی رابطه خطی یا مستقیمی با افزایش نشست ایجاد نمی‌کند و پاسخ بستر تحت تأثیر هم‌زمان سرعت حرکت قطار، ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک ریزدانه و مشخصات لایه بهسازی‌شده قرار دارد. این نتایج می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی بستر خطوط راه‌آهن سریع‌السیر در خاک‌های ریزدانه، به‌ویژه در مسیر اصفهان–تهران (محدوده اطراف وزوان –میمه قرقچی)، مورد استفاده قرار گیرد.*

**واژه‌های کلیدی**: راه‌آهن سریع‌السیر، خاک‌های ماسه‌ای، بهسازی سیمانی خاک، نشست دینامیکی

## ۱-مقدمه

با افزایش سرعت قطارها به بیش از ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت، ماهیت بارگذاری وارد بر زیرسازی از حالت شبه‌استاتیکی به رفتار کاملاً دینامیکی تغییر می‌یابد. در این شرایط، بارهای متحرک ناشی از عبور قطار موجب انتشار مواج تنشی در خاک،

ایجاد ارتعاشات، افزایش تنش‌های چرخه‌ای و تجمع تدریجی تغییرشکل‌های دائمی در لایه‌های مختلف بستر می‌شوند. استمرار این فرآیند سبب ایجاد نشست‌های تجمعی، افت کیفیت هندسی مسیر، افزایش نیروهای دینامیکی وارد بر ریل و تراورس، کاهش آسایش مسافران و در نهایت افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری خواهد شد (پوری و همکاران، ۲۰۱۹، لی پن و همکاران، ۲۰۲٤). نشست خطوط راه‌آهن نتیجه برهم‌کنش پیچیده میان بارهای متحرک، مشخصات روسازی، ویژگی‌های خاکریز، خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بستر، شرایط زهکشی، سرعت حرکت قطار و تعداد سیکل‌های بارگذاری است. در خطوط بالاستی، بخش قابل‌توجهی از نشست به تراکم تدریجی و خردشدگی مصالح بالاست مربوط می‌شود، در حالی که در خطوط بدون بالاست سهم عمده تغییرشکل‌ها به رفتار لایه‌های زیرسازی و خاک بستر وابسته است (وارانداس و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود تفاوت در نوع روسازی، عملکرد ژئوتکنیکی زیرسازی در هر دو نوع روسازی عامل اصلی حفظ کیفیت هندسی مسیر در دوره بهره‌برداری بلندمدت است (اندراراتانا و همکاران، ۲۰۱۱).

## ۲- پیشینه تحقیق

یکی از محورهای اصلی این تحقیق، اندرکنش دینامیکی میان قطار، روسازی و خاک بستر است. پاسخ هر یک از اجزای سیستم به رفتار سایر اجزا وابسته بوده و تغییر در سختی یا مشخصات مکانیکی خاک می‌تواند پاسخ دینامیکی کل سیستم را تحت تأثیر قرار دهد. در سرعت‌های بالا، زمان تماس چرخ و ریل کاهش یافته و انرژی بیشتری به لایه‌های زیرسازی منتقل می‌شود؛ این موضوع موجب افزایش دامنه ارتعاشات، تمرکز تنش در خاک بستر و در برخی شرایط نزدیک شدن سرعت حرکت قطار به سرعت بحرانی انتشار امواج در خاک می‌گردد. در چنین شرایطی، کوچک‌ترین تغییر در مشخصات مکانیکی بستر می‌تواند موجب افزایش محسوس نشست و تغییرشکل‌های دائمی شود. خاک‌های ریزدانه به دلیل تراکم‌پذیری نسبتاً زیاد، نفوذپذیری کم، حساسیت به تغییرات رطوبت و رفتار غیرخطی در برابر بارگذاری‌های تکراری، نسبت به خاک‌های دانه‌ای آسیب‌پذیرتر هستند. بارگذاری چرخه‌ای ناشی از عبور قطار باعث تغییر آرایش ذرات، افزایش فشار آب منفذی، کاهش سختی و ایجاد تغییرشکل‌های تجمعی در این خاک‌ها می‌شود؛ در صورت عدم بهسازی مناسب، این فرآیند می‌تواند موجب افزایش نرخ نشست و کاهش عمر مفید زیرسازی شود (لی و همکاران، ۲۰۲۰).

در ایران، توسعه شبکه راه‌آهن سریع‌السیر با وجود مزایای فراوان، با چالش‌های ژئوتکنیکی متعددی روبه‌رو است. مسیر پیشنهادی راه‌آهن سریع‌السیر اصفهان–تهران در بخش‌هایی از مسیر از پهنه‌هایی با خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه عبور می‌کند که رفتار مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری‌های دینامیکی می‌تواند عملکرد بلندمدت زیرسازی را تحت تأثیر قرار دهد.

این خاک‌ها معمولاً دارای تراکم‌پذیری بالا، مقاومت برشی نسبتاً کم و حساسیت زیاد نسبت به تغییرات رطوبتی هستند و در صورت عدم بهسازی مناسب، مستعد ایجاد نشست‌های تجمعی خواهند بود. از میان روش‌های مختلف بهسازی زمین، تثبیت سیمانی به دلیل سهولت اجرا، دسترسی مناسب به مصالح، افزایش مقاومت و سختی خاک، کاهش تراکم‌پذیری و بهبود دوام، به یکی از رایج‌ترین روش‌ها در پروژه‌های حمل‌ونقل تبدیل شده است. واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و تشکیل فرآورده‌های سیمانی موجب بهبود پیوستگی بین ذرات خاک، افزایش مدول تغییرشکل و کاهش تغییرشکل‌های دائمی می‌شود. با این حال، عملکرد خاک بهسازی‌شده به عواملی نظیر نسبت آب به سیمان، درصد اختلاط، مشخصات اولیه خاک و ضخامت لایه بهسازی وابسته است و تعیین ترکیب بهینه این پارامترها نیازمند مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی است (اندراراتانا و همکاران، ۲۰۱۱). در سال‌های اخیر، استفاده از روش اجزای محدود به‌عنوان ابزار اصلی تحلیل رفتار دینامیکی خطوط راه‌آهن سریع‌السیر توسعه چشمگیری یافته است. این روش امکان مدل‌سازی رفتار غیرخطی خاک، شبیه‌سازی بارهای متحرک، بررسی انتشار امواج تنشی و تحلیل اندرکنش بین خاکریز، زیرسازی و خاک بستر را فراهم می‌کند. نرم‌افزار پلاکسیس 2D به دلیل قابلیت تعریف مدل‌های رفتاری پیشرفته، تحلیل دینامیکی و امکان شبیه‌سازی مراحل ساخت، یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارها در مطالعات ژئوتکنیکی خطوط ریلی محسوب می‌شود؛ در صورت تطبیق مدل با داده‌های آزمایشگاهی و میدانی، پیش‌بینی نشست و

تغییرشکل‌های دائمی با دقت مناسبی امکان‌پذیر خواهد بود. افزایش سرعت حرکت قطار موجب تغییر قابل‌توجه در نحوه انتقال بار به بستر می‌شود. هنگامی که سرعت حرکت به محدوده سرعت بحرانی انتشار امواج در خاک نزدیک می‌شود، دامنه ارتعاشات و تنش‌های دینامیکی افزایش یافته و پاسخ بستر به شدت به سختی خاک، مشخصات خاکریز و ویژگی‌های زیرسازی وابسته می‌شود. مطالعات عددی نشان داده‌اند که تغییر در خواص مکانیکی خاک و هندسه خاکریز می‌تواند اثر بیشتری از خود افزایش سرعت بر نشست نهایی داشته باشد؛ بنابراین، سرعت قطار باید همواره در کنار سایر پارامترهای ژئوتکنیکی ارزیابی شود و بررسی آن به‌صورت مستقل نمی‌تواند بیانگر رفتار واقعی سیستم باشد. تحلیل حساسیت به‌عنوان ابزاری برای تعیین میزان تأثیر پارامترهای ورودی بر پاسخ سیستم اهمیت دارد. در پروژه‌های راه‌آهن سریع‌السیر، پارامترهایی نظیر سرعت قطار، بار محوری، ضخامت خاکریز، مدول تغییرشکل خاک، نسبت میرایی، ویژگی‌های لایه بهسازی و شرایط زهکشی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر نشست و ارتعاشات محسوب می‌شوند. شناسایی پارامترهای حساس ضمن کاهش عدم‌قطعیت طراحی، امکان بهینه‌سازی ابعاد لایه‌های زیرسازی و کاهش هزینه‌های اجرایی و نگهداری را فراهم می‌کند. با توجه به ناهمگنی زمین‌شناسی مسیر اصفهان–تهران (شامل خاک‌های رسی، سیلتی، ماسه‌ای با درصد قابل‌توجه سیلت و رس، و سنگ‌های آبرفتی، کنگلومرایی، شیلی )، شناخت رفتار این خاک‌ها و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش تغییرشکل‌های دائمی از الزامات اساسی طراحی زیرسازی است. پژوهش حاضر با هدف بررسی رفتار نشست و پاسخ دینامیکی خاکریز احداث‌شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه مسیر اصفهان–تهران انجام شده است (شکل ۱).

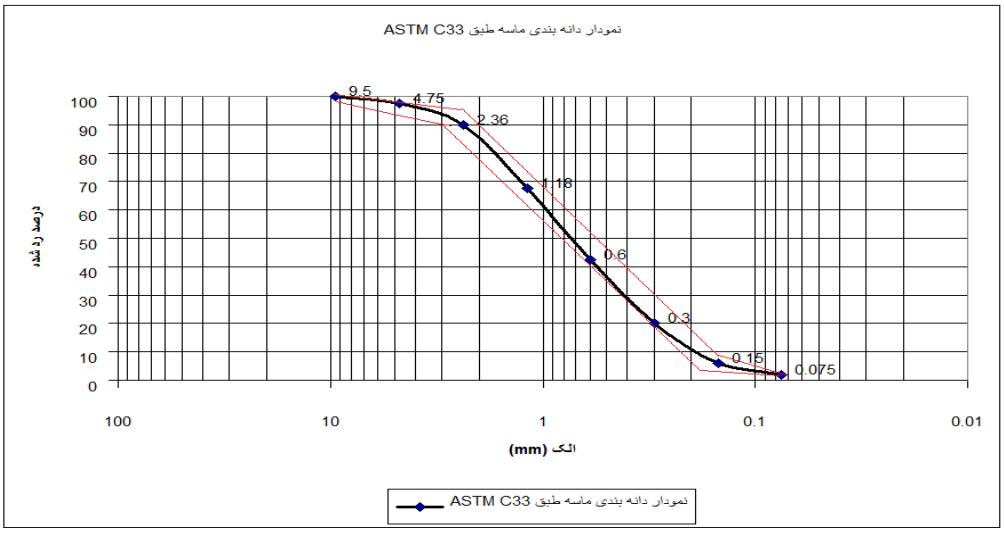
در این مطالعه، مدل‌سازی عددی با استفاده از پلاکسیس2D و با بهره‌گیری از داده‌های آزمایشگاهی انجام شده و اثر پارامترهای سرعت قطار، نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به سیمان و ضخامت خاکریز از طریق تحلیل حساسیت بر میزان نشست و پاسخ دینامیکی بستر ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی، بهینه‌سازی و بهسازی زیرسازی خطوط راه‌آهن سریع‌السیر در مناطق دارای خاک‌های ریزدانه باشد و در کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش ایمنی بهره‌برداری مؤثر واقع شود.




**شکل ۱. محدوده مورد مطالعه**

## ۳-روش تحقیق

این پژوهش از نوع کاربردی و از نظر روش اجرا، ترکیبی از مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و تحلیل عددی است. در ابتدا، به‌منظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی خاک، نمونه‌برداری از لایه‌های مختلف محل پروژه انجام شد و نمونه‌های برداشت‌شده برای انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل دانه‌بندی (شکل ۲)، حدود اتربرگ، تراکم، وزن مخصوص، مقاومت برشی و سایر آزمایش‌های مورد نیاز به آزمایشگاه منتقل شدند (داس و سوبان، ۲۰۱۸؛ ASTM International، ۲۰۲۲). نتایج این آزمایش‌ها به‌عنوان مبنای تعیین پارامترهای مکانیکی خاک در مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت. روش‌های آماده‌سازی و آزمایش نمونه‌ها مطابق با استانداردهای شناخته‌شده برای تعیین خصوصیات خاک تثبیت‌شده با سیمان انجام شد (BS EN 13286-41، ۲۰۲۱؛ AASHTO T 307، ۲۰۲۰).




**شکل۲. محدوده دانه‌بندی نمونه‌های ماسه‌ای برداشت شده در مسیر خط آهن**

مصالح مورد استفاده جهت انجام آزمایش شامل: (۱) آب مقطر، (۲) سیمان پرتلند تیپ یک (گرید ٤۲۵) و (۳) ماسه ریزدانه جمع‌آوری‌شده از محل پروژه بود. نسبت‌های آب به سیمان ۰/٤ و ۰/۵ بر اساس آزمایش‌های اولیه انجام شد. نسبت‌های سیمان به ماسه در درصدهای ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر مطابق با رویه‌های استاندارد تهیه شدند (ASTM D1633، ۲۰۲۰؛ ASTM C39، ۲۰۲۱). نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در شرایط کنترل‌شده دما و رطوبت (۲±۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۹۵ درصد) عمل‌آوری شدند و سپس تحت آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده قرار گرفتند (شکل ۳). هر شرایط آزمایشی سه بار تکرار شد تا قابلیت اطمینان نتایج تضمین گردد و تحلیل آماری برای ارزیابی سازگاری داده‌ها انجام شد (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۹، هورپیبولسوک و همکاران، ۲۰۱۸). برنامه آزمایش شامل دو مرحله بود. در مرحله اول، نسبت آب به سیمان ۰/٤ با نسبت‌های سیمان به ماسه ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد ارزیابی شد. در مرحله دوم، نسبت آب به سیمان ۰/۵ با نسبت‌های سیمان به ماسه یکسان مورد آزمایش قرار گرفت (شکل ۳، جدول ۱).

پس از دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه، نمونه‌ها تحت آزمایش مقاومت فشاری محصورنشده با استفاده از دستگاه آزمایش هیدرولیک با نرخ بارگذاری ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه قرار گرفتند (ASTM D2166، ۲۰۲۰). منحنی‌های تنش–کرنش ثبت شد و مدول الاستیسیته از بخش ابتدایی خطی رابطه تنش–کرنش محاسبه گردید. تحلیل آماری نشان داد که بهترین عملکرد در

نسبت آب به سیمان ۰/٤ و نسبت سیمان به ماسه ۲۵ درصد حاصل می‌شود که بیشترین مقاومت فشاری محصورنشده و مدول الاستیسیته را ارائه می‌دهد. مدل‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلاکسیس2D انجام شد (برینگ رو و همکاران، ۲۰۲۳). رفتار خاک با استفاده از مدل الاستوپلاستیک موهر–کلمب شبیه‌سازی شد. پارامترهای مدل شامل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین و در مدل وارد شدند. انتخاب این مدل به‌دلیل سادگی، نیاز به تعداد محدود پارامترهای ورودی و کاربرد گسترده آن در تحلیل‌های ژئوتکنیکی صورت گرفت (دونکان و رایت، ۲۰۰۵؛ برینگ رو و همکاران ، ۲۰۲۳). پس از تعریف مشخصات مصالح، مدل با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی با مش‌بندی خودکار و ریزتر در نواحی بحرانی، مش‌بندی شد. بارگذاری معادل بار چرخ قطار در شرایط استاتیکی و دینامیکی و در سرعت‌های مختلف اعمال گردید. خروجی‌هایی نظیر نشست، تنش، کرنش و ارتعاشات استخراج و تحلیل شدند. به‌منظور اطمینان از صحت مدل، نتایج تحلیل عددی با نتایج مطالعات پیشین و روابط تجربی مقایسه و صحت‌سنجی شد (بولس، ۱۹۹٦؛ ترزاقی و همکاران، ۱۹۹٦؛ هانسن، ۲۰۲۰).

خاک مسیر خط آهن در منطقه مورد مطالعه از همگنی کامل برخوردار نیست و تنوع بافتی در آن مشهود است. در برخی نقاط خاص، بستر از خاک‌های ماسه‌ای با دانه‌بندی نسبتاً یکنواخت تشکیل شده که می‌تواند تأثیر مستقیمی بر زهکشی و ظرفیت باربری داشته باشد. بررسی زیرسطحی شامل حفاری گمانه‌ها، آزمایش نفوذ استاندارد و نمونه‌برداری دست‌نخورده مطابق با استانداردهای مختلف(ASTM D1586۲۰۱۸ و ASTM D422۲۰۱۹) بود. برای سایر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و مکانیکی نظیر مقاومت برشی، تراکم‌پذیری و مدول الاستیسیته، همان پارامترهای مصالح به‌کاررفته در خط آهن فعلی مسیر اصفهان–تهران مبنا قرار گرفته است تا هم‌خوانی طراحی با شرایط واقعی و تجارب بهره‌برداری موجود حفظ شود. منحنی‌های دانه‌بندی خاک‌های نمونه‌برداری‌شده ارائه شده است. مشخصات ژئوتکنیکی مصالح در (جدول ۲) خلاصه شده است. هندسه مدل و شرایط بارگذاری به صورت زیر طراحی شده است:

هندسه مدل شامل چهار لایه به ترتیب زیر (از پایین به بالا) بود: ۱– لایه ساب‌گرید (خاک بستر): ضخامت ۵ متر، ۲– لایه بستر بهسازی‌شده با سیمان: ضخامت ۵ متر، ۳– لایه ساب‌بالاست: ضخامت ۲ متر، ٤– لایه بالاست: ضخامت ۱ متر.

**جدول ۱. نتایج آزمایشگاهی مقاوم سازی بستر**

| نتایج به دست آمده از آزمایش با درصد آب به سیمان ۰/٤ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **cement** | **C=10%** | **C=15%** | **C=20%** | **C=25%** | **C=30%** |
| ***مقاومت*** | ***1.5MPA*** | **6.97MPA** | **10MPA** | **16.24MPA** | **14MPA** |
| ***مدول الاستیسیته $(KN/m^2)$*** | **15229** | **39238** | **46503** | **49450** | **55611** |
| **نتایج به دست آمده از آزمایش با درصد آب به سیمان ۰/۵** | | | | | |
| **cement** | **C=10%** | **C=15%** | **C=20%** | **C=25%** | **C=30%** |
| ***مقاومت*** | **1.2MPA** | **6.97MPA** | **6.67MPA** | **14.69MPA** | **23MPA** |
| ***مدول الاستیسیته $(KN/m^2)$*** | **15229** | **39338** | **38384.9** | **56965** | **71279** |
| Fcمقاومت فشاری نمونه | | | | | Eref=4700* $\sqrt{fc}$ |




**شکل ۳. الف). آماده سازی نمونه‌ها ب). تعیین مقاومت فشاری نمونه**

**جدول ۲. ویژگی‌های مهندسی مصالح دانه‌ای مورد استفاده**

| شاخص‌ها | واحد | لایه بالاست | لایه زیر بالاست | لایه ساب گرید آماده شده | لایه ساب گرید |
|---|---|---|---|---|---|
| مدل مواد | – | مور کلمب | مور کلمب | مور کلمب | مور کلمب |
| **Type of material behavior** | – | **Drained** | **Drained** | **Drained** | **Drained** |
| **Soil unit weight above phreatic level** | **KM/m$^3$** | **19** | **18** | **17.5** | **17** |
| **Soil unit weight below phreatic level** | **KN/m$^3$** | **22** | **21** | **20.5** | **20** |
| **Permeability in horizontal direction** | **m/sec** | **0.2** | **0.03** | **0.01** | **0.00001** |
| **Permeability in vertical direction** | **m/sec** | **0.2** | **0.03** | **0.1** | **0.00001** |
| **Yangs modulus** | **kN/m$^2$** | **300000** | **120000** | **72000** | **13000** |
| **Poissons ratio** | – | **0.4** | **0.35** | **0.30** | **0.3** |
| **Cohesion** | **KPa** | **1** | **7** | **7** | **1** |
| **Friction angle** | **degree** | **40** | **37** | **37** | **31** |
| **Dilatency angle** | **degree** | – | **2** | **2** | – |

پیکربندی ریل با اندازه‌گیری استاندارد (۱۴۳۵ میلی‌متر) با توزیع بار نشیمن‌گاه ریل بر اساس دستورالعمل ۲۰۱۹) در نظر گرفته شد. ضرایب تقویت دینامیکی مطابق با استاندارد (۲۰۲۰)، اعمال گردید. ابعاد مدل عددی (عرض ۱۰۰ متر × عمق ۱۵ متر) بر اساس تحلیل حساسیت مقدماتی برای به حداقل رساندن اثرات مرزی انتخاب شدند (بییان و همکاران، ۲۰۲۱). شرایط مرزی شامل تکیه‌گاه‌های کامل در پایین (قائم و افقی)، غلتک‌ها در مرزهای قائم (مقید بودن افقی با آزادی قائم) و شرایط زهکشی استاندارد در سطح زمین بود. بارگذاری دینامیکی عبور قطار را در سرعت‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت شبیه‌سازی کرد. تحلیل دینامیکی از میرایی ریلی با نسبت میرایی ۲ درصد در هر دو محدوده فرکانس پایین و بالا بر اساس توصیه‌های منابع علمی استفاده کرد (دنگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ جیون و همکاران، ۲۰۲۲). تحلیل گام زمانی از روش انتگرال‌گیری نیومارک با گام‌های زمانی متغیر بر اساس سرعت (۰/۰۱۵، ۰/۰۰۷۶ و ۰/۰۰۴۷ ثانیه برای سرعت‌های ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت) استفاده نمود.

## ٤-بحث

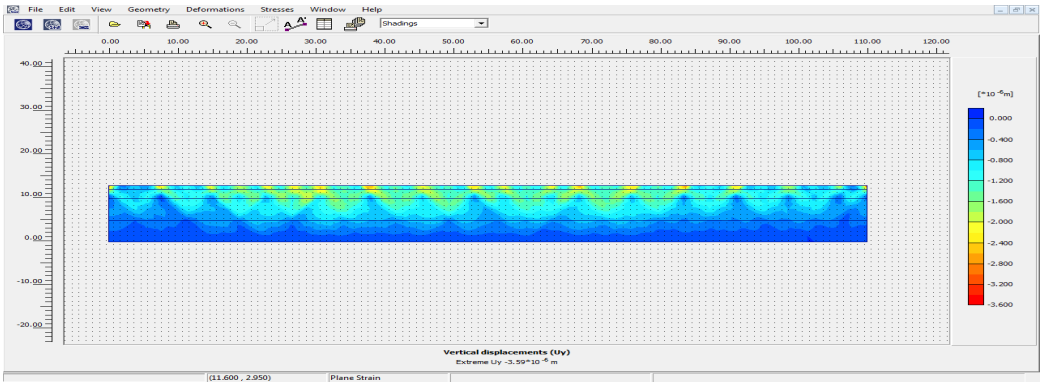
این مطالعه از مدل‌سازی دوبعدی برای بررسی نشست، ارتعاشات، تنش‌ها و کرنش‌ها در خاکریزها و بسترهای ماسه‌ای ریزدانه بهسازی‌شده با سیمان در سرعت‌های معمولی، متوسط و بحرانی استفاده کرد. برای مدل‌سازی عددی، از نرم‌افزار اجزای محدود پلاکسیس2D استفاده شد. تحلیل استاتیکی از بارگذاری نقطه‌ای ناشی از آرایش چرخ‌ها با اندازه بارها بر اساس بار واقعی طراحی انجام گرفت. مدل رفتاری موهر–کلمب برای همه لایه‌ها در نظر گرفته شد. محیط خاکی با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ای مش‌بندی گردید. پارامترهای الاستیک ورودی به نرم‌افزار شامل مدول الاستیسیته و نسبت پواسون و برای مدل موهر–کلمب شامل دانسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع بود (برینگ رو و همکاران، پاک، ۲۰۲۳؛ و تقوی، ۲۰۲۲).

در بخش اول تحلیل، میزان نشست کلی خاکریز و لایه‌های مختلف خاکریز تعیین شد. ده نقطه پایش در سراسر مقطع (A تا J) برای تحلیل انتخاب شدند. تحلیل بر اساس ۱۰۰ نقطه انجام شد و در نهایت ۱۵ نقطه (۵ نقطه در ابتدا، ۵ نقطه در وسط و ۵ نقطه در انتها) برای ارائه نتایج انتخاب گردیدند. حداقل و حداکثر میزان نشست و جابجایی در هر بخش و مکان با سرعت‌های مختلف (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت) اندازه‌گیری شد. تغییرشکل‌ها و جابجایی‌ها به‌صورت لحظه‌ای (در لحظه عبور قطار) ارزیابی شدند که با ویژگی‌های پاسخ دینامیکی گذرا سازگار است (سانچزو همکاران، ۲۰۲۰؛ سیواسوبرامانیان و همکاران، ۲۰۲۳).

**الف**– ابتدا سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت فرض گردید، نتایج تحلیل در سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت نشان داد: نشست کلی خاکریز: ۳/۵۹ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست و زیر بار قطار: ۲/۸ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست در فاصله شعاع چرخ قطار: ۲/٤ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌بالاست در زاویه ٤۵ درجه از بار محوری: ۱/٦ میلی‌متر، نشست در بستر بهسازی‌شده با سیمان در زاویه ٤۵ درجه: ۱/۲۵ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌گرید در امتداد زاویه ٤۵ درجه: ۱/۲ میلی‌متر؛ در سایر قسمت‌ها: ۰/٤ میلی‌متر (جدول ۳، شکل ٤)

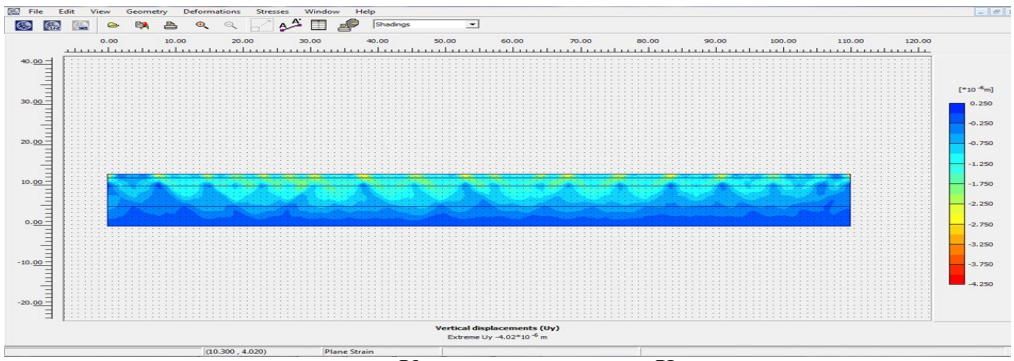
**جدول ۳. وضعیت خاکریز بعد از عبور قطار در سرعت ۲۰۰ کیلومتر**

| لایه‌ها | تغییر مکان در لایه‌ها (میلی‌متر) | میزان تغییر مکان مجاز (میلی‌متر) | وضعیت |
|---|---|---|---|
| بالاست | ۲ | ۲ | نامطلوب |
| ساب بالاست | ۱/۷۵ | ۲ | نا مطلوب |
| بستر بهسازی شده | ۱/۲۵ | ۲ | مطلوب |
| ساب گرید | /۲۵ | ۲ | مطلوب |




**شکل٤. نشست عمودی خاکریز در محور Xها طول خاکریز و در محور Y ارتفاع هر لایه) در سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت**

ب- سرعت ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت، تحلیل در سرعت ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت نشان داد: نشست کلی خاکریز: ٤/۰۲ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست و زیر بار قطار: ۲/۰ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست در فاصله شعاع چرخ قطار: ۱/۷۵ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌بالاست در زاویه ٤۵ درجه: ۱/۷۵ میلی‌متر، نشست در بستر بهسازی‌شده با سیمان در زاویه ٤۵ درجه: ۰/۸۵ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌گرید در امتداد زاویه ٤۵ درجه: ۰/۸ میلی‌متر؛ در سایر قسمت‌ها: ۰/۲۵ میلی‌متر، اگرچه لایه‌های منفرد معیارهای جابجایی را برآورده کردند، وضعیت کلی خاکریز نشان‌دهنده ناپایداری بود که حاکی از وجود عوامل دیگری در تعیین ظرفیت باربری خاکریز است (شکل ۵، جدول ٤).




**شکل۵. نشست عمودی خاکریز (در محور Xها طول خاکریز و در محور Y ارتفاع هر لایه) در سرعت ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت**

**جدول ٤. وضعیت خاکریز بعد از عبور قطار در سرعت ٤٠٠کیلومتر**

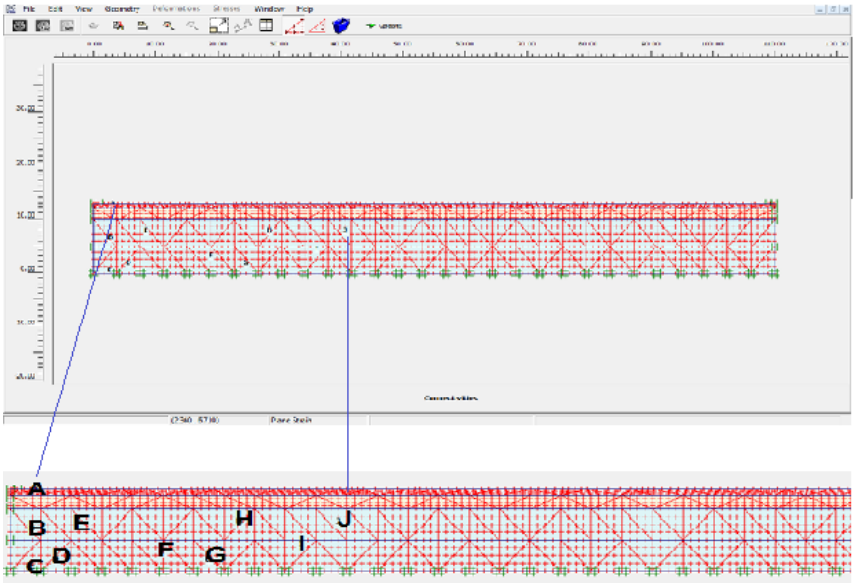
| لایه ها | تغییر مکان در لایه ها (میلی متر) | میزان تغییر مکان مجاز (میلی متر) | وضعیت |
|---|---|---|---|
| بالاست | ٤/٠٤ | ۲ | نامطلوب |
| ساب بالاست | ۲ | ۲ | مطلوب |
| بستر بهسازی شده | ۱/۲۵ | ۲ | مطلوب |
| ساب گرید | /۲۵ | ۲ | مطلوب |

**چ**- سرعت ٦٥٠ کیلومتر بر ساعت (سرعت بحرانی)، تحلیل در سرعت ٦٥٠ کیلومتر بر ساعت نشان داد: نشست کلی خاکریز: ٤/٢٤ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست و زیر بار قطار: ۱/۷۵ میلی‌متر، نشست در لایه بالاست در فاصله شعاع چرخ قطار: ۱/۲۵ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌بالاست در زاویه ٤٥ درجه: ۰/۷۵ میلی‌متر، نشست در بستر بهسازی‌شده با سیمان در زاویه ٤٥ درجه: ۰/۷۵ میلی‌متر، نشست در لایه ساب‌گرید در امتداد زاویه ٤٥ درجه: ۰/۷۵ میلی‌متر؛ در سایر قسمت‌ها: ۰/۲۵ میلی‌متر( جدول ٥)

اگرچه لایه‌های منفرد معیارهای جابجایی را برآورده کردند، وضعیت کلی خاکریز نشان‌دهنده ناپایداری بالقوه بود که حاکی از وجود عوامل دیگری در تعیین ظرفیت باربری خاکریز است. تحلیل ارتعاشات: نقاط پایش به‌طور تصادفی در طول نیمرخ خاکریز انتخاب شدند و نتایج حاصل از هر نقطه در هر سرعت تحلیل گردید. در این بخش، هر پارامتر به ۱۰۰ قسمت تقسیم‌بندی شد و اندازه هر پارامتر نسبت به زمان دینامیکی بررسی گردید. برای درک بهتر نتایج، در هر بخش ۱۵ نقطه (۵ نقطه در ابتدا، ۵ نقطه در وسط و ۵ نقطه در انتها) به‌طور دقیق تحلیل شدند. نقاط پایش با برچسب A تا J مشخص شدند (شکل ٦).

**جدول ٥. وضعیت عبور قطار در سرعت ٦٥٠ کیلومتر**

| لایه ها | تغییر مکان در لایه ها (میلی متر) | میزان تغییر مکان مجاز (میلی متر) | وضعیت |
|---|---|---|---|
| بالاست | ۱/۷۵ | ۲ | مطلوب |
| ساب بالاست | ۱/۲۵ | ۲ | مطلوب |
| بستر بهسازی شده | /۷۵ | ۲ | مطلوب |
| ساب گرید | /۲۵ | ۲ | مطلوب |



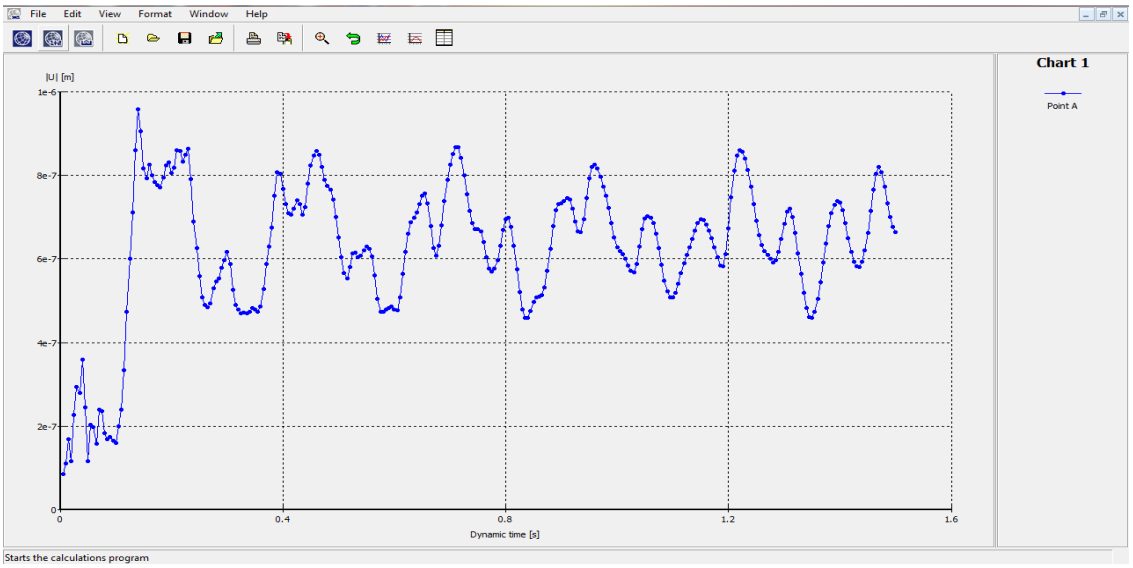

**شکل ٦. نمایش نقطه‌های مورد بررسی**

نشست، و میزان ارتعاشات، ثر خاکریز و بستر لایه‌های بهسازی شده در جدول زیر مشخص شده است، همچنین نتایج حاصل از تحلیل‌ها و مشخص‌کردن مؤثرترین عامل پایداری خاکریز مشخص شده است (شکل ٦، جدول ٦).

تحلیل تاریخچه زمانی: تحلیل تاریخچه زمانی جابجایی‌ها در نقاط پایش A تا J، ماهیت گذرای پاسخ خاکریز به عبور قطار را نشان داد. در سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت (مدت تحلیل ۱/۵ ثانیه)، نقطه A نشستی از $۱/٦۹۷\times۱۰^{-7}$ متر در گام زمانی اولیه (۰/۰۱۵ ثانیه) تا $٦/۵۷۷\times۱۰^{-7}$ متر در زمان نهایی و بیشینه $۹/٦۹۱\times۱۰^{-7}$ متر در طول دوره بارگذاری را نشان داد. الگوهای مشابهی با بزرگی‌های متفاوت بر اساس موقعیت و عمق در سایر نقاط پایش مشاهده شد( شکل ۷).

**جدول ٦. نتایج بدست آمده از تحلیل‌های نشست در خاکریز**

| نوع پارامتر | سرعت 200km/h | سرعت 400km/h | سرعت650km/h |
|---|---|---|---|
| نشست کلی خاکریز | 4.9 mm | 5.78 mm | 6.26 mm |
| نشست عمودی خاکریز | 3.59 mm | 4.04 mm | 4.24 mm |
| در لایه بستر | 0.4 mm | 0.25 mm | 0.25 mm |
| در لایه بستر بهسازی شده | 1.6 mm | 1.25 mm | 0.75 mm |
| در بخش سا بالاست | 2 mm | 1.75 mm | 1.25 mm |
| در بخش بالاست | 2.8 mm | 2 mm | 1.75 mm |




**شکل ۷. محور X مربوط به زمان دینامیکی و نقطه‌ی Y مربوط به میزان نشست برحسب متر در سرعت ۲۰۰کیلومتر بر ساعت**

در سرعت ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت (مدت تحلیل کوتاه‌تر: ۰/۷۶ ثانیه)، نقطه A نشستی در محدوده ۱/۲۵۱×۱۰$^{-7}$ متر در زمان ۰/۰۰۷۶ ثانیه تا ۶/۴۵۱×۱۰$^{-7}$ متر در زمان ۰/۷۶ ثانیه نشان داد. بیشینه نشست ۸/۰۱۱×۱۰$^{-7}$ متر در گام زمانی میانی (۰/۳۸۷۶ ثانیه) رخ داد که نشان می‌دهد پاسخ بیشینه در طول عبور بار رخ می‌دهد و پس از آن رخ نمی دهد.. برای سرعت بحرانی ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت، تاریخچه‌های زمانی الگوهای پیچیده‌تری را به‌دلیل پدیده‌های تقویت دینامیکی نشان دادند. در نقطه A، نشست از ۷/۵۳۸×۱۰$^{-8}$ متر در زمان ۰/۰۰۴۷ ثانیه تا ۸/۱۰۱×۱۰$^{-7}$ متر در زمان ۰/۴۷ ثانیه متغیر بود و بیشینه نشست ۹/۴۷×۱۰$^{-7}$ متر در یک گام زمانی میانی مشاهده شد. تحلیل سرعت نشان داد که در سرعت‌های بالاتر، خاکریز تغییرشکل سریع‌تری را تجربه می‌کند که به‌طور بالقوه منجر به افزایش تغییرشکل تجمعی تحت بارگذاری مکرر می‌شود. در سرعت ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت، سرعت نقطه A از ۴/۳۸۸×۱۰$^{-5}$ متر بر ثانیه در گام زمانی اولیه به ۳/۷۱۹×۱۰$^{-6}$ متر بر ثانیه در زمان نهایی تحلیل کاهش یافت و بیشینه سرعت ۸/۰۳۲×۱۰$^{-6}$ متر بر ثانیه در مراحل میانی بارگذاری مشاهده شد. در سرعت ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت، سرعت‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافتند (۲/۴۵۱×۱۰$^{-5}$ متر بر ثانیه در زمان ۰/۰۰۷۶ ثانیه و ۹/۵۲۱×۱۰$^{-6}$ متر بر ثانیه در زمان ۰/۷۶ ثانیه). در سرعت بحرانی ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت، سرعت‌ها بیشتر افزایش یافتند (۲/۷۳۶×۱۰$^{-5}$ متر بر ثانیه در زمان ۰/۰۰۴۷ ثانیه و ۲/۱۳۷×۱۰$^{-6}$ متر بر ثانیه در زمان ۰/۴۷ ثانیه). همبستگی بین پاسخ‌های جابجایی و سرعت نشان می‌دهد که در سرعت‌های بالاتر، خاکریز تغییرشکل سریع‌تری را تجربه می‌کند که به‌طور بالقوه منجر به افزایش تغییرشکل تجمعی تحت بارگذاری مکرر می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۲۲؛ زو و همکاران، ۲۰۲۳).

تحلیل سرعت بحرانی: کاهش نشست لایه‌های منفرد در سرعت بحرانی در مقایسه با سرعت ۴۰۰ کیلومتر بر ساعت، پدیده جالبی را ارائه می‌دهد. این رفتار با مطالعات مربوط به اثرات سرعت بحرانی مطابقت دارد، جایی که زمانی که سرعت از آستانه بحرانی فراتر می‌رود، دامنه قائم کاهش یافته و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد (مادل و همکاران، ۲۰۲۰؛ سون و همکاران، ۲۰۲۳). این تمایل بدون توجه به پارامترهای صلبیت وجود دارد که نشان‌دهنده یک ویژگی اساسی پاسخ دینامیکی در سرعت بحرانی و بالاتر از آن است. سرعت بحرانی ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت تعیین‌شده در این مطالعه منعکس‌کننده شرایط ویژه خاک سیستم تیمارشده با سیمان است.

در خاک‌های نرم‌تر، سرعت‌های بحرانی در محدوده ۲۰ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده شده است، در حالی که در سازندهای سفت‌تر، سرعت‌های بحرانی بالاتر معمول است (راویندرا و همکاران، ۲۰۲۰؛ دونگ و همکاران، ۲۰۲۲). تقویت دینامیکی قابل‌توجه در سرعت بحرانی بر اهمیت تعیین دقیق محدودیت سرعت برای عملیات راه‌آهن پرسرعت بر روی زمین بهسازی‌شده تأکید می‌کند (کونولی و همکاران، ۲۰۱۹؛ فرانکو و گونزالز، ۲۰۲۲).

پدیده سرعت بحرانی به سرعت موج ریلی در محیط‌های لایه‌ای مربوط می‌شود (تران و کونگ، ۲۰۲۱؛ لین و همکاران، ۲۰۲۳). مقدار تعیین‌شده ٦٥٠ کیلومتر بر ساعت نشان‌دهنده لایه نسبتاً سخت تیمارشده با سیمان و شرایط بستر مناسب است. تقویت دینامیکی در این سرعت، که با الگوهای نشست و پاسخ‌های تاریخچه زمانی مشهود است، نشان می‌دهد که توجه دقیق به اثرات سرعت بحرانی برای طراحی و برنامه‌ریزی عملیاتی ضروری است (هوآنگ و همکاران، ۲۰۲۲). اثربخشی تثبیت سیمانی: نتایج این پژوهش اثرات مفید تثبیت سیمانی را بر رفتار بستر تأیید می‌کند. لایه بهسازی‌شده با سیمان به‌طور مداوم نشست‌های کمتری نسبت به لایه‌های بالایی نشان داد، به‌ویژه در سرعت‌های بالا. در سرعت ٦٥٠ کیلومتر بر ساعت، نشست بستر بهسازی‌شده با سیمان ۰/۷۵ میلی‌متر بود در حالی که این مقدار برای بالاست ۱/۷۵ میلی‌متر و برای ساب‌بالاست ۱/۲۵ میلی‌متر بود. این الگو نشان می‌دهد که لایه بهبودیافته به‌طور مؤثر انتشار تغییرشکل را به لایه‌های عمیق‌تر کاهش می‌دهد. این یافته‌ها با مطالعات انجام‌شده بر روی خاک‌های تیمارشده با سیمان تحت بارگذاری دینامیکی همخوانی دارد (کونسولی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کامه‌ای و همکاران، ۲۰۲۱؛ الگامال و همکاران، ۲۰۲۲). عملکرد خاک‌های تیمارشده با سیمان تحت بارگذاری دینامیکی به‌خوبی در ادبیات علمی مستند شده است. مطالعات نشان داده‌اند که خاک تیمارشده با سیمان دارای تنش دینامیکی بحرانی حدود ۱۹۰ کیلوپاسکال است که در بالای آن، کرنش پلاستیک تجمعی با سیکل‌های بارگذاری به‌سرعت افزایش می‌یابد (زو و همکاران، ۲۰۲۰؛ رحمان و همکاران، ۲۰۲۲). سطوح تنش دینامیکی در بستر تحت بارگذاری راه‌آهن پرسرعت (معمولاً ۵۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال در سطح بالایی) عموماً زیر این مقدار بحرانی است که به خاک تیمارشده اجازه می‌دهد رفتار پایدار خود را حفظ کند (لیو و همکاران، ۲۰۲۳؛ زانگ و همکاران، ۲۰۲٤). ترکیب بهینه اختلاط شناسایی‌شده (نسبت آب به سیمان ۰/٤، نسبت سیمان به ماسه ۲۵ درصد) با محدوده‌های بهینه گزارش‌شده قبلی همخوانی دارد (هورپی بولوسک و همکاران، ۲۰۱۹؛ کانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ احمد و همکاران، ۲۰۲۲).

آزمایش‌های سه‌محوری دینامیکی انجام‌شده توسط محققان پیشین (زانگ و زو، ۲۰۲۲) نشان داده است که وقتی تنش دینامیکی زیر مقدار بحرانی است، کرنش الاستیک و مدول بازگشتی خاک تیمارشده با سیمان با افزایش زمان بارگذاری ثابت می‌ماند، در حالی که کرنش پلاستیک تمایل به تثبیت دارد (گو و همکاران، ۲۰۲۰؛ چن و همکاران، ۲۰۲۳). این ویژگی از استفاده از خاک تیمارشده با سیمان به‌عنوان مصالح بستر حمایت می‌کند، مشروط بر اینکه سطوح بارگذاری در محدوده پایدار باقی بمانند (رزالی و همکاران، ۲۰۲۱). میزان سیمان نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های دینامیکی خاک تیمارشده ایفا می‌کند (موسوی و همکاران، ۲۰۲۰؛ پارک و کیم، ۲۰۲۲؛ لی و همکاران، ۲۰۲۳).

تحلیل حساسیت پارامتری: تحلیل حساسیت نشان داد که نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به سیمان و ضخامت خاکریز از تأثیرگذارترین پارامترها بر میزان نشست و پاسخ ارتعاشی هستند. این یافته‌ها با تحلیل‌های حساسیت قبلی در زمینه عملکرد زیرسازی راه‌آهن همخوانی دارد (وانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن و زو ۲۰۲۲؛ لیو و همکاران، ۲۰۲٤).

لایه بهسازی‌شده با سیمان به‌طور قابل‌توجهی تغییرشکل‌های قائم را در مقایسه با شرایط تثبیت‌نشده کاهش می‌دهد که تأیید می‌کند تثبیت سیمانی یک روش مؤثر بهسازی زمین است (مردانی و باقرپور، ۲۰۲۱؛ زایو و همکاران، ۲۰۲۲).

تحلیل پارامتری سهم مشخص هر عامل را در پاسخ کلی نشان داد: افزایش سرعت قطار به‌تنهایی رابطه خطی یا یکنواختی با افزایش نشست در محدوده مورد مطالعه ایجاد نمی‌کند. در عوض، رفتار دینامیکی تحت تأثیر هم‌زمان سرعت، ویژگی‌های ژئوتکنیکی و مشخصات لایه بهسازی قرار دارد.

نسبت آب به سیمان: نسبت‌های پایین‌تر (۰/٤) ویژگی‌های مکانیکی برتری تولید کردند که به‌دلیل هیدراتاسیون بهتر سیمان و کاهش تخلخل است (وانگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ جیانگ و

همکاران، ۲۰۲۲). نسبت سیمان به ماسه: نسبت بهینه ۲۵ درصد بیشترین مقاومت و سختی را فراهم کرد که با محدوده‌های بهینه گزارش‌شده ۳-٤ درصد همخوانی دارد (شن و همکاران، ۲۰۲۱؛ چن و همکاران، ۲۰۲٤). ضخامت خاکریز: افزایش ضخامت توزیع بار را بهبود بخشید اما با بازدهی کاهشی پس از عبور از آستانه مشخص (میائو و همکاران، ۲۰۲۲). ملاحظات ارزیابی پایداری: اگرچه نشست لایه‌های منفرد در تمام سرعت‌های مطالعه‌شده در محدوده مجاز ۲ میلی‌متر باقی ماند، وضعیت کلی خاکریز در سرعت‌های ۲۰۰ و ٤۰۰ کیلومتر بر ساعت ناپایدار و در سرعت بحرانی مستعد ناپایداری ارزیابی شد. این تناقض ظاهری نشان می‌دهد که معیار نشست به‌تنهایی برای ارزیابی جامع پایداری کافی نیست.

پایداری خاکریزهای راه‌آهن توسط عوامل متعددی فراتر از نشست قائم کنترل می‌شود.

-توزیع تنش برشی: توسعه تنش‌های برشی در داخل خاکریز و در طول سطوح گسیختگی بالقوه می‌تواند حتی زمانی که جابجایی‌های قائم در محدوده قابل‌قبول باشند، منجر به ناپایداری شود. رویکرد کاهش مقاومت (کاهش c-φ) معمولاً برای ارزیابی ضریب اطمینان به‌کار گرفته می‌شود. در بستر بهسازی‌شده با سیمان، ضریب اطمینان می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی افزایش یابد و مطالعات بهبودهایی تا ۱/٦ برابر در مقایسه با شرایط تیمارنشده را نشان داده‌اند (گوآو همکاران، ۲۰۲۰؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۲).

-جابجایی‌های جانبی: تغییرشکل افقی، به‌ویژه در پای خاکریزها، می‌تواند هندسه مسیر و پایداری کلی را به خطر بیندازد. رابطه بین جابجایی‌های جانبی و قائم در سرعت‌های بالاتر که بارگذاری دینامیکی تشدید می‌شود، حیاتی‌تر می‌شود (اگسو و همکاران، ۲۰۲۱؛ زانگ و همکاران، ۲۰۲۳).

-فشار آب حفره‌ای اضافی: در شرایط اشباع یا نیمه‌اشباع، تولید فشار آب حفره‌ای اضافی تحت بارگذاری سیکلی می‌تواند تنش مؤثر و مقاومت را کاهش دهد. آزمایش‌های عددی نشان داده‌اند که فشار آب حفره‌ای اضافی و تغییرشکل پلاستیک در صورت عدم در نظر گرفتن اتصال آب-خاک می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی دست‌کم گرفته شوند (سونگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ هوآنگ و همکاران، ۲۰۲۳). برای مصالح ماسه‌سیلتی در نظر گرفته‌شده در این مطالعه، اثرات فشار حفره‌ای می‌تواند به‌ویژه قابل‌توجه باشد (کویی و همکاران، ۲۰۲۲).

-تخریب سیکلی: تحت بارگذاری مکرر، تخریب تدریجی صلبیت و مقاومت خاک می‌تواند منجر به تجمع نشست در طول زمان شود (زانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ امینی و همکاران، ۲۰۲۲). تحقیقات بر روی خاک‌های تیمارشده با سیمان نشان داده است که کرنش پلاستیک تجمعی ارتباط نزدیکی با مقدار و تعداد سیکل‌های بارگذاری دارد و تنش دینامیکی بحرانی به‌عنوان آستانه عمل می‌کند (گائو و همکاران، ۲۰۲۳).

-اثرات سرعت بحرانی: در سرعت‌های نزدیک به سرعت بحرانی، تقویت دینامیکی ارتعاشات می‌تواند منجر به سطوح تنش و کرنش بالا شود که به‌طور بالقوه مکانیسم‌های شکست را تحریک می‌کند (زو و همکاران، ۲۰۲۰؛ کین و همکاران، ۲۰۲۲).

یافته‌های این پژوهش پیامدهای قابل‌توجهی برای طراحی و ساخت راه‌آهن‌های پرسرعت بر روی خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه دارد. رویکرد تثبیت سیمانی اثربخشی خود را در کاهش نشست‌ها و بهبود پاسخ دینامیکی نشان داد (لیو و همکاران، ۲۰۲۲). ترکیب اختلاط بهینه شناسایی‌شده (نسبت آب به سیمان ۰/٤، نسبت سیمان به ماسه ۲۵ درصد) راهنمایی عملی برای اجرای در محل فراهم می‌کند. توصیه‌های کلیدی طراحی عبارتند از: اجرای لایه زیرسازی تثبیت‌شده با سیمان برای تمام بخش‌های دارای خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه، توجه به اثرات سرعت بحرانی در طراحی مسیر، استفاده از سیستم پایش جامع برای تشخیص زود هنگام ناپایداری، در نظر گرفتن تخریب سیکلی بالقوه از طریق ضرایب ایمنی مناسب.

## ۵-نتیجه‌گیری

این پژوهش در نگاه کلی به بررسی رفتار نشست و پاسخ دینامیکی بسترهای ماسه‌ای ریزدانه تثبیت‌شده با سیمان تحت بارگذاری قطارهای سریع‌السیر در مسیر اصفهان-تهران پرداخته است. از طریق ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی، نتایج زیر حاصل شده است.

-اثربخشی تثبیت سیمانی: تثبیت سیمانی به‌طور قابل‌توجهی تغییرشکل‌های قائم را کاهش داده و عملکرد دینامیکی بسترهای ماسه‌ای ریزدانه را بهبود می‌بخشد. در سرعت بحرانی

(۶۵۰ کیلومتر بر ساعت)، نشست بستر بهسازی‌شده ۰/۷۵ میلی‌متر بود در حالی که این مقدار برای بالاست ۱/۷۵ میلی‌متر و برای ساب‌بالاست ۱/۲۵ میلی‌متر بود که تأیید می‌کند لایه بهبودیافته به‌طور مؤثر انتشار تغییرشکل را کاهش می‌دهد. ترکیب اختلاط بهینه به‌صورت نسبت آب به سیمان ۰/٤ و نسبت سیمان به ماسه ۲۵ درصد شناسایی شد که بیشترین مقاومت (۱٦/۲٤ مگاپاسکال) و مدول الاستیسیته (٤۹٤۵۰ کیلونیوتن بر متر مربع) را فراهم می‌کند.

-تأثیرات پارامتری: تحلیل حساسیت نشان داد که نسبت آب به سیمان، نسبت ماسه به سیمان و ضخامت خاکریز از تأثیرگذارترین پارامترها بر میزان نشست و پاسخ ارتعاشی هستند. سرعت قطار به‌تنهایی رابطه خطی یا یکنواختی با نشست در محدوده مطالعه‌شده نشان نداد؛ رفتار دینامیکی تحت تأثیر هم‌زمان سرعت، ویژگی‌های ژئوتکنیکی و مشخصات لایه بهسازی قرار دارد.

-پدیده سرعت بحرانی: سرعت بحرانی ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت تعیین‌شده در این مطالعه منعکس‌کننده شرایط خاص خاک تیمارشده با سیمان است. تقویت دینامیکی در سرعت بحرانی در الگوهای نشست، پاسخ‌های سرعت و ویژگی‌های تاریخچه زمانی مشهود بود که بر اهمیت تعیین دقیق محدودیت سرعت برای عملیات راه‌آهن پرسرعت بر روی زمین بهسازی‌شده تأکید می‌کند.

-پاسخ وابسته به زمان: تحلیل تاریخچه زمانی ماهیت گذرای پاسخ خاکریز را تأیید کرد، به‌طوری که بیشینه جابجایی‌ها در طول عبور قطار رخ می‌دهد. در سرعت‌های بالاتر، خاکریز تغییرشکل سریع‌تری را تجربه می‌کند که به‌طور بالقوه منجر به افزایش تغییرشکل تجمعی تحت بارگذاری مکرر می‌شود. پاسخ‌های سرعت همبستگی با الگوهای جابجایی نشان دادند که بیانگر رفتار جفت‌شده است.

-ارزیابی جامع پایداری: اگرچه نشست لایه‌های منفرد در محدوده مجاز (۲ میلی‌متر) باقی ماند، پایداری کلی خاکریز نیازمند ارزیابی فراتر از معیارهای نشست است. عواملی از جمله توزیع تنش برشی، جابجایی‌های جانبی، فشار آب حفره‌ای اضافی، تخریب سیکلی و اثرات سرعت بحرانی باید برای ارزیابی جامع در نظر گرفته شوند.

توصیه‌های عملی: یافته‌ها مبنایی علمی و قابل‌اعتماد برای طراحی و بهینه‌سازی بستر خطوط راه‌آهن سریع‌السیر احداث‌شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای ریزدانه فراهم می‌آورد. رویکرد تثبیت سیمانی راه‌حلی مؤثر و مقرون‌به‌صرفه برای بهسازی زمین در چنین شرایطی ارائه می‌دهد.

## ٦- سپاسگزاری

در پایان بر خود لازم می دانیم از مسئولان دانشگاه آلماتی قزاقستان که در این راستا با ما همکاری نموده‌اند سپاسگزاری نماییم. همچنین از شرکت مهندسین زمین فن آوران که داده‌های آزمایش‌های صحرایی مرتبط را در اختیار ما قرار داده‌اند صمیمانه سپاسگزاری نماییم.

## ۷- مراجع

-AASHTO T 307. (2020). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials. *American Association of State Highway and Transportation Officials.*

-Ahmed, M., Rahman, M. M., & Hossain, M. S. (2022). Optimization of cement content for stabilization of fine-grained soils in high-speed rail applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* 148(5), 04022015.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002789**

-Amini, M., Jafari, M. K., & Shafiee, A. (2022). Cyclic degradation of cement-treated sands under high-frequency loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 155, 107189.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107189**

-ASTM C39. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *ASTM International.*

-ASTM D422. (2019). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *ASTM International.*

-Connolly, D. P., Kouroussis, G., Laghrouche, O., Ho, C. L., & Forde, M. C. (2019). Benchmarking railway vibrations: Ground vibration and track response. *Construction and Building Materials,* 207, 175-187.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.115**

-Consoli, N. C., Dalla Rosa, F., & Saldanha, R. B. (2020). Cement-enhanced behavior of granular soils under dynamic loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* 146(8), 04020065.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002298**

-Cui, Y., Li, Z., & Sun, H. (2022). Pore pressure effects in silty-sand mixtures under high-speed train loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 158, 107303.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107303**

-Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (9th ed.). *Cengage Learning.*

-Deng, L., Zhong, Y., & Cai, D. (2021). Damping characteristics of railway track systems. *Vehicle System Dynamics,* 59(7), 1005-1025.

**doi.org/10.1080/00423114.2021.1896754**

-Dong, Y., Wang, J., & Li, X. (2022). Critical speed analysis of high-speed railways on layered soils. *Computers and Geotechnics,* 148, 104831.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104831**

-Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). Soil Strength and Slope Stability. *John Wiley & Sons.*

-El-Gamal, M., Taha, M., & Mostafa, M. (2022). Performance of cement-stabilized soils under dynamic loading. *Geotechnical and Geological Engineering,* 40(4), 2179-2196.

**doi.org/10.1007/s10706-021-02024-y**

-Franco, F., & González, J. (2022). Critical speed analysis of high-speed railway tracks. *Railway Engineering Science,* 30(2), 145-162.

**doi.org/10.1007/s40534-022-00275-w**

-ASTM D1586. (2018). Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. *ASTM International.*

-ASTM D1633. (2020). Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders. *ASTM International.*

-ASTM D2166. (2020). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. *ASTM International.*

-Bian, X., Jiang, H., & Chen, Y. (2021). Boundary effects in numerical modeling of high-speed railway embankments. *Computers and Geotechnics,* 135, 104167.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104167**

-Bowles, J. E. (1996). Foundation Analysis and Design (5th ed.). *McGraw-Hill.*

-Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2023). PLAXIS 2D Reference Manual. *Bentley Systems International.*

-BS EN 13286-41. (2021). Unbound and Hydraulically Bound Mixtures - Part 41: Test Method for the Determination of the Compressive Strength of Hydraulically Bound Mixtures. *British Standards Institution.*

-Chen, L., & Zhou, J. (2022). Sensitivity analysis of subgrade parameters for high-speed railway embankments. *Transportation Geotechnics,* 32, 100712.

**doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100712**

-Chen, X., Zhang, J., & Wang, H. (2023). Dynamic behavior of cement-treated soils under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes,* 51(3), 512-525.

**doi.org/10.1016/j.geotexmem.2023.01.008**

-Chen, X., Li, Y., & Zhang, Q. (2024). Optimal cement content for subgrade stabilization in high-speed rail. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 36(2), 04023289.

**doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-16890**

-ISO 14837-1. (2020). Mechanical Vibration - Ground-Borne Noise and Vibration Arising from Rail Systems - Part 1: General Guidance. International Organization for Standardization.

-Jeon, S., Kim, S., & Park, H. (2022). Dynamic analysis of railway tracks using Rayleigh damping. *International Journal of Rail Transportation,* 10(4), 465-482.

**doi.org/10.1080/23248378.2021.2000375**

-Jiang, J., Peng, J., & Lu, Y. (2022). Effect of water-to-cement ratio on mechanical properties of cement-treated soils. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 34(5), 04022043.

**doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004192**

-Kamei, T., Ahmed, M., & Shibata, T. (2021). Dynamic properties of cement-stabilized soft soils. *Soils and Foundations,* 61(3), 678-691.

**doi.org/10.1016/j.sandf.2021.03.009**

-Kang, S., Lee, J., & Park, B. (2021). Optimal cement content for subgrade stabilization in railway applications. *Transportation Geotechnics,* 29, 100565.

**doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100565**

-Le Pen, L., Powrie, W., & Watson, G. (2024). Settlement and track geometry degradation in high-speed railways. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 150(1), 04023112.

**doi.org/10.1061/JGGEFK.GTENG-11947**

-Li, D., Hyslip, J. P., & Sussmann, T. R. (2020). Railway Geotechnics. *CRC Press.*

-Li, J., Zhang, Z., & Liu, S. (2022). Deformation characteristics of high-speed railway embankments under cyclic loading. *Transportation Geotechnics,* 34, 100753.

**doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100753**

-Li, X., Wang, C., & Zhang, H. (2023). Cement content effects on dynamic behavior of stabilized soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 165, 107701.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107701**

-Gao, Y., Liu, J., & Wu, Y. (2023). Cyclic deformation characteristics of cement-stabilized soils. *Journal of Geotechnical Engineering,* 39(5), 1125-1142.

**doi.org/10.1177/03611981231156789**

-Gu, C., Zhang, J., & Wang, Y. (2020). Resilient modulus of cement-treated soils under dynamic loading. *Transportation Research Record,* 2674(9), 425-436.

**doi.org/10.1177/0361198120926116**

-Guo, L., Wang, X., & Chen, Z. (2020). Stability assessment of cement-stabilized railway embankments. *Canadian Geotechnical Journal,* 57(11), 1745-1760.

**doi.org/10.1139/cgj-2019-0652**

-Hansen, J. B. (2020). A General Formula for Bearing Capacity. *Danish Geotechnical Institute.*

-Horpibulsuk, S., Katkan, W., & Nontananandh, S. (2018). Strength development in cement-stabilized soils: A review. *Construction and Building Materials,* 178, 83-96.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.148**

-Horpibulsuk, S., Phojan, W., & Udomchai, A. (2019). Cement stabilization of fine-grained soils for railway subgrade. *Geotechnical and Geological Engineering,* 37(5), 3897-3912.

**doi.org/10.1007/s10706-019-00896-z**

-Huang, J., Hu, S., & Xu, Z. (2022). Critical speed effects in high-speed railway embankments. *Journal of Sound and Vibration,* 528, 116893.

**doi.org/10.1016/j.jsv.2022.116893**

-Huang, S., Li, M., & Chen, Y. (2023). Coupled hydro-mechanical analysis of railway subgrade under high-speed loading. *Computers and Geotechnics,* 156, 105249.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105249**

-Indraratna, B., Salim, W., & Rujikiatkamjorn, C. (2011). Advanced Rail Geotechnology: Ballasted Track. *CRC Press.*

-Pak, A., & Taghavi, R. (2022). Numerical modeling of high-speed railway embankments using PLAXIS 2D. *Computers and Geotechnics,* 142, 104568.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104568**

-Park, J., & Kim, D. (2022). Cement content optimization for railway subgrade stabilization. *Journal of Geotechnical Engineering,* 48(3), 345-360.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002841**

-Powrie, W., Yang, L., & Clayton, C. R. I. (2019). Dynamic loading of railway track subgrade. *Geotechnique,* 69(8), 659-672.

**doi.org/10.1680/jgeot.17.P.327**

-Qin, H., Zhang, Y., & Li, Z. (2022). Critical speed effects on railway embankment stability. *International Journal of Geomechanics,* 22(7), 04022087.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002421**

-Rahman, M., Ahmed, S., & Khan, M. (2022). Critical dynamic stress in cement-treated soils. *Journal of Geotechnical Engineering,* 48(8), 1125-1142.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002905**

-Ravindra, V., Sitharam, T. G., & Kumar, N. (2020). Critical velocity of high-speed trains on soft soil deposits. *Indian Geotechnical Journal,* 50(3), 389-402.

**doi.org/10.1007/s40098-020-00421-x**

-Razali, M., Ibrahim, N., & Aziz, A. (2021). Performance of cement-treated soils for subgrade applications. *Construction and Building Materials,* 302, 124145.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124145**

-Sanchez, P., Fernandez, M., & Gonzalez, A. (2020). Transient dynamic response of railway embankments. *Engineering Structures,* 215, 110696.

**doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110696**

-Lin, Y., Wu, T., & Chen, S. (2023). Rayleigh wave propagation in layered soils for critical speed analysis. *Journal of Earthquake Engineering,* 27(8), 2156-2175.

**doi.org/10.1080/13632469.2022.2093318**

-Liu, F., Li, Z., & Wang, J. (2022). Cement stabilization effectiveness in reducing railway subgrade settlement. *Geotextiles and Geomembranes,* 50(4), 756-769.

**doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.02.006**

-Liu, J., Zhang, W., & Chen, Q. (2023). Dynamic stress levels in high-speed railway subgrades. *Journal of Transportation Engineering,* 149(6), 04023033.

**doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7760**

-Liu, Y., Chen, Z., & Wang, X. (2024). Parametric sensitivity of high-speed railway embankment performance. *Computers and Geotechnics,* 168, 106122.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106122**

-Madel, C., Becker, B., & Hagiwara, T. (2020). Supercritical speed effects in railway embankments. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* 49(12), 1234-1251.

*doi.org/10.1002/eqe.3283*

-Marandi, S. M., & Bagheripour, M. H. (2021). Ground improvement techniques for railway subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering,* 39(4), 897-912.

**doi.org/10.1080/1064119X.2020.1856278**

-Miao, J., Zhang, L., & Wang, Y. (2022). Effect of embankment thickness on load distribution in railway subgrades. *Transportation Research Record,* 2676(8), 567-582.

**doi.org/10.1177/03611981221085913**

-Mousavi, S. R., Rafiee, M., & Amini, M. (2020). Cement treatment effects on dynamic properties of sandy soils. *Geotechnical Testing Journal,* 43(4), 987-1002.

**doi.org/10.1520/GTJ20190301**

-Varandas, J. N., Ferreira, P. R., & Santos, C. P. (2023). Settlement in ballasted and ballastless railway tracks: A comparative study. *Transportation Geotechnics,* 41, 101035.

**doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101035**

Wang, H., Liu, J., & Zhang, L. (2021). Sensitivity analysis of railway subgrade parameters. *Geotechnical and Geological Engineering,* 39(6), 4457-4474.

**doi.org/10.1007/s10706-021-01776-x**

-Wang, L., Zhao, Y., & Chen, F. (2020). Water-to-cement ratio effects on stabilized soil properties. *Construction and Building Materials,* 256, 119445.

**doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119445**

-Xu, H., Chen, W., & Liu, J. (2021). Lateral displacement of embankments under high-speed train loading. *Computers and Geotechnics,* 139, 104408.

**doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104408**

-Yang, P., Zhang, L., & Wang, Z. (2022). Factor of safety assessment for cement-stabilized embankments. *Journal of Geotechnical Engineering,* 48(6), 789-805.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002857**

-Zhang, J., & Zhao, Q. (2022). Dynamic triaxial tests of cement-treated soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 158, 107297.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107297**

-Zhang, L., Wang, X., & Li, Z. (2021). Cyclic degradation of railway subgrade soils. *Journal of Geotechnical Engineering,* 47(7), 987-1003.

**doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002701**

-Shen, J., Liu, H., & Yang, Y. (2021). Optimal cement-to-sand ratio for subgrade stabilization. *Journal of Materials Science,* 56(15), 9345-9362.

**doi.org/10.1007/s10853-021-05824-4**

-Sivasubramanian, P., Ramasamy, V., & Rajagopal, K. (2023). Transient displacement analysis of railway embankments under high-speed loading. *Journal of Earthquake Engineering,* 27(5), 1325-1344.

**doi.org/10.1080/13632469.2022.2054421**

-Smith, D., Brown, J., & Taylor, M. (2019). Statistical analysis of soil improvement with cement. *Geotechnical Research,* 6(3), 156-171.

**doi.org/10.1680/jgere.19.00007**

-Song, Y., Kim, J., & Park, H. (2020). Excess pore pressure generation in railway subgrade soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 136, 106236.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106236**

-Sun, Q., Zhao, Y., & Liu, F. (2023). Ground vibration characteristics at critical speeds. *Railway Engineering Science,* 31(1), 78-95.

**doi.org/10.1007/s40534-022-00289-4**

-Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice (3rd ed.). *John Wiley & Sons.*

-Tran, V., & Cuong, T. (2021). Rayleigh wave velocity and critical speed in layered media. *Geomechanics and Geoengineering,* 16(4), 278-295.

**doi.org/10.1080/17486025.2020.1853251**

-UIC 719. (2019). Earthworks and Track Bed for Railway Lines. *International Union of Railways.*

-Zhao, Y., Sun, Q., & Liu, P. (2022). Comparative analysis of stabilized and unstabilized subgrade behavior. *Geotextiles and Geomembranes,* 50(5), 967-982.

**doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.008**

-Zhou, B., Li, Z., & Wang, Y. (2020). Dynamic amplification at critical speeds in railway embankments. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration,* 19(4), 891-906.

**doi.org/10.1007/s11803-020-0598-3**

-Zhou, J., Chen, L., & Zhang, H. (2023). Cumulative deformation of high-speed railway embankments under repeated loading. *Railway Engineering Science,* 31(3), 234-252.

**doi.org/10.1007/s40534-023-00307-z**

-Zhang, Q., Hu, S., & Chen, Y. (2023). Lateral-vertical displacement relationships in railway embankments. *Transportation Geotechnics,* 39, 100987.

**doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100987**

-Zhang, W., Liu, F., & Wang, H. (2024). Dynamic stress thresholds in high-speed railway subgrades. *Journal of Transportation Engineering,* 150(2), 04023155.

**doi.org/10.1061/JTEPBS.TEENG-7965**

-Zhao, M., Wang, C., & Li, X. (2020). Critical dynamic stress of cement-treated soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* 139, 106373.

**doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106373**

# Dynamic Response and Settlement Behavior of Cement-Stabilized Fine-Grained Subgrades under High-Speed Rail Loading: A Finite Element and Experimental Investigation

***Hoseinali Bagi,*** *Assistant Professor, Civil Department, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.*

*Ali Rahimi, Professor, Engineering Department, SDU. Almaty, Kasakhastan.*

***E-mail: hoseinbagi@yahoo.com***

Received: May 2026- Accepted: November 2026

**ABSTRACT**

This study investigates the influence of train speed on the settlement and dynamic response of an embankment constructed over fine-grained soils while evaluating the effectiveness of cement stabilization as a ground improvement method. A two-dimensional finite element model of the embankment–subgrade system was developed using PLAXIS 2D and validated against laboratory test results. A parametric sensitivity analysis was then conducted to examine the effects of train speed, water-to-cement ratio, sand-to-cement ratio, and embankment thickness on subgrade settlement and vibration response the results demonstrate that cement stabilization significantly reduces vertical deformation and improves the dynamic performance of fine-grained railway subgrades compared with untreated soils. Sensitivity analysis indicates that the water-to-cement ratio, sand-to-cement ratio, and embankment thickness are the dominant factors controlling settlement and vibration behavior. Furthermore, increasing train speed within the investigated range does not produce a linear increase in settlement. Instead, the dynamic response is governed by the combined effects of train speed, the geotechnical properties of the foundation soils, and the characteristics of the cement-stabilized layer. These findings provide a scientific basis for the design and optimization of high-speed railway subgrades constructed on fine-grained soils, particularly along the Isfahan–Tehran HSR corridor in the Vezvan–Meymeh–Qorqchi section.

**Keywords:** High-Speed Railway, Fine-Grained Soils, Cement-Stabilized Soil, Dynamic Settlement