

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حذف فواصل تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر

رسی در راه آهن پرسرعت

فرزانه نجدیاریار، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
امین بهمن پور (مسئول مکاتبات)، استادیار، گروه ژئوتکنیک، دانشکده عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

E-mail: aminbahmanpour@srbiau.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۷

چکیده

تراکم پذیری خاک رس، به عنوان بستر مسیر راه آهن، می تواند یکی از مهم ترین موضوعات مورد بررسی در طراحی مسیر باشد؛ و باید، رفتار رس و عملکرد آن متناسب با اعمال تنش ناشی از تردد قطار، مورد توجه قرار گیرد. به ویژه در راه آهن پرسرعت، با توجه به سرعت بالا و کوتاه بودن زمان عبور قطار به نسبت زمان حذف فواصل دو عبور، که به تبع آن، تغییر شدت بار، قابل صرف نظر بوده و بارگذاری می تواند به صورت استاتیکی در نظر گرفته شود؛ فواصل عبور قطارها سهم بسزایی در مطالعه رفتار رس دارد؛ زیرا در واقع این زمان، فرصتی است که بخشی از تغییر شکل خاک رس بستر به حالت قبل بازگردد.

هدف عمده این تحقیق، تعیین نحوه تاثیر فواصل عبور قطارها، بر میزان نشست تحکیمی رس بوده است؛ زیرا در بهینه سازی تواتر عبور قطارها، نقش بسیار موثری دارد. با مدل سازی بار معادل عبور همزمان دو قطار روی راه آهن پرسرعت در نرم افزار "Plaxis-2D"، و مقایسه مقادیر نشست کلی حاصل از بارگذاری ممتد طی مدت ۵۰ سال (معادل عمر مفید) و نیز بارگذاری غیرممتد به مدت ۰-۱ روز، مشاهده شد مقدار نشست تحکیمی، با فاصله عبورها، نسبت عکس دارد؛ همچنین تغییرات اضافه فشار آب حفره ای و روند کاهش آن نیز در بارگذاری با فواصل بیشتر، مدت زیادتری به طول انجامید. از آنجا که پارامترهای تعیین نشست تحکیمی، به خصوصیات خاکها (ضریب نفوذپذیری K ، مدول الاستیسیته E ، ضریب پواسون ν) وابسته است؛ در صورتی که نشست کلی محاسباتی برای مدت سرویس دهی خط راه آهن، از حدمجاز آیین نامه ای تجاوز نماید؛ باید تمهیداتی جهت اصلاح ویژگی های خاک بستر مسیر ریلی و تقویت آن، اندیشیده شود.

واژگان کلیدی: راه آهن، ضریب اشباع خط، نشست تحکیمی، Plaxis-2D، بارگذاری غیرممتد

۱. مقدمه

همواره در طرح خطوط آهن سریع السیر، دو جنبه اساسی، که یکی حصول اطمینان از حرکت ایمن قطار در سراسر طول خط و دیگری ایجاد شرایط و شتاب قابل تحمل برای مسافری و رعایت آسایش آنها، مدنظر است. بنابراین، مشکلات مربوط به اجرای زیرسازی راه آهن مورد توجه قرار گرفته و مسئله نشست سابگرید در مناطق حاوی خاک ریزدانه‌ی نرم و اشباع به یک موضوع مهم تبدیل شده است. تراکم‌پذیری زیاد و نفوذپذیری کم خاک نرم، باعث دشوار شدن کنترل نشست (تحکیمی) پس از ساخت در این مناطق می‌شود؛ که این موضوع، ایمنی عملکرد خطوط ریلی را به طور جدی تهدید می‌کند [ژو و همکاران، ۲۰۲۰].

با وجود آنکه در حوزه ساخت شبکه ریلی، مطالعات زیادی در خصوص مناطق با زمین طبیعی نرم انجام شده، اما عموماً تمرکز مطالعات بر جانمایی و تناسب محل اجرای پروژه با ترافیک شهری بوده است. بنابراین شاید بتوان با احداث خطوط ریلی سریع السیر در زمین‌های کم هزینه تر، طولانی تر شدن مسیر را با افزایش سرعت و افزایش تعداد تردد قطارها جبران نمود. لذا در این مطالعه، نشست تحکیمی حاصل از تردد قطارها در حالت اشباع ظرفیت خط به‌طور مستقل از سایر فاکتورهای موثر در طراحی مسیر در نظر گرفته شده.

هرچه ظرفیت استفاده شده از خط ریلی بیشتر باشد؛ میزان باری که در طول زمان به بستر مسیر ریلی (زیرسازی) وارد می‌شود؛ بیشتر خواهد بود. طولانی شدن زمان بارگذاری می‌تواند در بستر ریزدانه، منجر به وقوع نشست از نوع تحکیمی گردد. از آنجا که فاصله زمانی بین عبور قطارها در زمان تردد اشباع، نسبتاً کوتاه است؛ جهت محاسبه بیشترین میزان نشست، می‌توانیم فرض کنیم خط ریل، به طور مداوم تحت بارگذاری قرار دارد. یعنی طی مدت چند سال، بارگذاری شامل بار استاتیکی و بار گذرا، به‌طور کامل به خاکریز وارد شده و سهم بزرگی از نشست را به خود اختصاص می‌دهد. ضمناً باید توجه داشت که در بستر ریلی، پاسخ عملکرد مناسب خط و زمین طبیعی (بستر) زیر آن، اغلب فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره سوم (۶۰) / بهار ۱۴۰۳

با توسعه زندگی شهری و پیشرفت علم و تکنولوژی، روز به روز میزان خودروها در شهرها در حال افزایش است. استفاده از وسایل نقلیه شخصی، جهت سفرهای درون‌شهری و برون‌شهری، ضمن ایجاد ترافیک، مشکلات زیاد دیگری نظیر آلودگی هوا، هزینه‌های مربوط به عوارض تردد، افزایش آمار حوادث و خسارات ناشی از تصادفات و ... را نیز موجب می‌شود. بنابراین، گسترش شبکه ریلی، راه‌حلی هوشمندانه و قابل دست‌یابی است. از آنجا که به جهت بهینه بودن مسیرها و دلایل بسیار دیگر، من جمله محدودیت زمین‌های مناسب شهری، احداث ریل، روی بسترهای متفاوتی انجام می‌شود؛ به مطالعات زیادی در خصوص توان باربری بستر نیاز است.

یک پروژه عمرانی حمل و نقل ریلی، با چالش‌های عمده‌ای در اجرای دو جزء اساسی خط ریلی، یعنی زیرسازی و روسازی مواجه است. از نظر اجرایی وزن عمده عملیات اجرا، بهسازی و بازسازی خطوط ریلی، به اجرای زیرسازی اختصاص می‌یابد؛ چراکه روسازی، عمدتاً دارای سیستم پیش‌ساخته بوده و بازرسی، عیب‌یابی و اصلاح آن نسبت به زیرسازی آسان‌تر و کم‌هزینه‌تر است. از طرف دیگر خرابی زیرسازی، در عمل، خرابی و ناکارآمدی روسازی را نتیجه می‌دهد. این موضوع به‌طور عمده، ناشی از تغییر مکان‌های دائمی بستر خط ریلی است. این نوع تغییر مکان‌ها در بسترهای ریزدانه رسی-سیلتی، تحت اثر بار تکراری راه آهن (بارگذاری تکرارشونده ناشی از حرکت قطار) رخ می‌دهد. وقوع این تغییر مکان‌ها در شرایط پیش‌رونده می‌تواند به خرابی‌هایی از نوع لغزش بستر بیانجامد. [اسماعیلی و همکاران، ۱۳۸۹].

به‌طور کلی در چنین مواردی، عیوب بستر می‌تواند در عدم تأمین الزامات باربری و نشست قابل ملاحظه خط ریلی، ظهور و بروز نماید [اسماعیلی و خلیلیان، ۱۳۹۳].

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حدفاصل تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

میزان نشست تحکیمی حاصل در لایه رسی به کمک مدل سازی عددی صورت گرفته است؛ و تغییرات، متناسب با میزان استفاده و حرکت قطار بر خط آهن (تواتر تردد) برآورد شده و در نهایت مقادیر نشست حاصله با نشست مجاز ارائه شده در آیین نامه ها مقایسه شود تا بتواند به عنوان معیاری در مطالعات پیرامون به کارگیری انواع روش های بهسازی، مورد استفاده قرار گیرد.

از جنبه نوآوری تحقیق حاضر، نسبت به مطالعات پیشین، طی مطالعات انجام شده برای این تحقیق و جستجوی منابع، هیچ نمونه مشابهی که دقیقاً به تاثیر فواصل زمانی تردد قطارها بر میزان نشست تحکیمی در بستر رسی راه آهن پرسرعت پرداخته باشد وجود نداشته و در نمونه هایی که یافت شد؛ فاکتورهای مذکور به تنهایی بدون در نظر گرفتن تاثیرشان بر یکدیگر مورد مطالعه قرار گرفته اند.

و از نظر کاربرد عملیاتی، با توجه به نیاز به گسترش شبکه حمل و نقل ریلی در کشور، می تواند در حوزه مطالعه و طراحی، مفید واقع شده و در برنامه ریزی جهت احداث خطوط ریلی در زمین های سست و مسئله دار، مورد استفاده قرار گیرد.

۲. پیشینه و ادبیات فنی تحقیق

بنا بر اظهارات لی و سلینگ در سال ۱۹۹۵ و همچنین دانیلنکو و ریپکین در سال ۲۰۰۴، فاکتور بار، عاملی خارجی است که می تواند باعث ایجاد مشکل در زیرسازی شود و از دو نوع بار موجود، شامل وزن خود مصالح و بار دینامیکی تکرارشونده تشکیل شده است. بار نوع اول، می تواند یک عامل اصلی برای نشست تحکیمی یا گسیختگی برشی عظیمی باشد که در یک خاکریز مرتفع که به درستی طراحی و ساخته نشده است؛ محتمل است. اگرچه گسیختگی برشی پیش رونده، با تغییر شکل برشی پیش رونده همراه است، اما در اینجا، تغییر شکل پلاستیک پیش از حد، به عنوان یک نوع دیگر از مشکل، طبقه بندی می شود و نه تنها شامل مولفه عمودی تغییر شکل برشی پیش رونده است؛ بلکه تغییر شکل عمودی ناشی از تراکم تدریجی و تحکیم خاک تحت بارهای ترافیکی تکرارشونده را نیز در بر می گیرد.

می تواند شبه استاتیک تلقی شود؛ به این معنا که حتی اگر بار دینامیک باشد؛ اثرات اینرسی مرتبط با شتاب برای حرکت بستر طبیعی، قابل صرف نظر است. [پاوری و همکاران، ۲۰۱۹]. از طرفی با توجه به اینکه زمان عبور قطارها نیز به نسبت زمان فواصل آنها در خطوط سریع السیر، کوتاه است؛ بارگذاری خط ریل را می توان استاتیکی در نظر گرفت. بنابراین با توجه به اینکه در موارد بسیاری به ناچار خط آهن باید روی زمین های مسئله دار (نرم، اشباع و ریزدانه) اجرا گردد؛ نیاز است مطالعه ای برای تعیین یا تخمین اثر بار قطار (در حالت اشباع ظرفیت خط) روی بستر طبیعی زمین انجام شود.

بدیهی است که در این شرایط، و برای احداث خطوط ریلی در خاک های نرم با قابلیت فشرده سازی بالا، معیارهای نشست سازه پس از اجرای زیرسازی خط، به چالش مهمی برای طراحان تبدیل می گردد. به عنوان مثال، به دلیل وجود قابلیت بالای فشرده گی C_v و همچنین ناهمگونی خاک های نرم در بستر خطوط راه آهن سریع السیر احداث شده در مناطق حاوی خاک نرم در جنوب چین، ایجاد نشست های موضعی سابگرد در این نواحی، یک مسئله جدی است [ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵]. برای آنکه اهمیت موضوع نشست های تحکیمی مشخص شود می توان به مطالعه انجام شده در سال ۲۰۰۲ توسط برگادو و همکاران اشاره کرد که در آن، نشست اندازه گیری شده در یک بستر رسی نرم در بانکوک، تحت اثر وزن یک خاکریز آزمایشی به ارتفاع ۴٫۲ متر، برابر با مقدار قابل توجه ۱٫۴ تا ۱٫۰ متر بوده است. به همین علت سالانه، هزینه های هنگفتی صرف تعمیر و نگهداری خطوط ریلی مختلف در سراسر دنیا می شود. طبق برآوردهای صورت گرفته، نیمی از این هزینه ها مستقیم یا غیرمستقیم به منظور حفظ تراز ارتفاعی و تمیزی بالاست صرف شده است. [میرمحمد صادقی، ۱۳۸۷] لذا در مطالعه حاضر، تنش موثر وارد شده بر بستر طبیعی ریزدانه و اشباع، تحت اثر وزن اجزای مختلف روسازی تعیین شده و با افزودن اثر بار ناشی از عبور و مرور ناوگان ریلی (در حالت تردد اشباع) بر آن، بررسی

(تثبیت یا تسلیح) آن ارائه شده است (به عنوان مثال نشریه ۳۹۴). لذا با در نظر گرفتن هزینه‌های اضافی تحمیل شده به پروژه در شرایط فوق و ضمن توجه به اینکه در موارد بسیاری، خط آهن باید به‌ناچار روی زمین طبیعی ضعیف (ریزدانه نرم و اشباع) اجرا گردد؛ نیاز است که مطالعه‌ای برای تعیین یا تخمین اثر بار قطار (در حالت اشباع ظرفیت خط) بر بستر طبیعی زمین انجام شود. از طرفی هرچند تئوری تحکیم از پشتوانه قدرتمندی برخوردار است؛ اما همواره به بارگذاری‌های ممتد در طول یک زمان مشخص مرتبط شده و اثر بارگذاری حین خدمت‌دهی خط، در حالت اشباع ظرفیت خط بررسی نشده است.

هرچه ظرفیت استفاده شده از خط بیشتر باشد، میزان بار وارده در طول زمان به بستر مسیر ریلی (زیرسازی) بیشتر خواهد بود. طولانی شدن زمان بارگذاری می‌تواند در مورد بستر ریزدانه منجر به حصول نشست از نوع تحکیمی گردد. در واقع ظرفیت خط، عبارت است از حداکثر تعداد قطاری که بتواند در یک زمان مشخص از یک سیرگاه عبور کند [پارکینسون و فیشر، ۱۹۹۶]. به عبارت دیگر، در واقع ظرفیت خط، نسبت زمان اشغال شده ریل به زمان در دسترس، طی دوره زمانی مورد بررسی است [یقینی و همکاران، ۱۳۹۱]. تعداد قطارهایی که در زمان مشخصی، بدون توجه به میزان تاخیرها، امکان بهره‌برداری از آن وجود دارد؛ به عنوان ظرفیت فیزیکی (تئوری) تعریف می‌شود. از آنجا که این تاخیرها می‌تواند به دلیل توقف‌های برنامه‌ای، نظیر بازدید فنی، سوار و پیاده شدن مسافر، تخلیه و بارگیری یا توقف ناشی از تلاقی مسیر به‌خصوص در محورهای تک خطه باشد؛ هرگز قابل حذف نیست. به همین دلیل به جای مفهوم "حداکثر ظرفیت"، از "ظرفیت بهینه" استفاده می‌گردد که بیانگر حداکثر تعداد قطارهایی است که طی یک زمان مشخص و بر اساس میزان قابل قبولی از تاخیرها، امکان بهره‌برداری از آن وجود دارد. ظرفیت استفاده شده، بیانگر میزان ترافیک واقعی و عملیات جاری در مسیر است و به طور معمول مقدار آن، کمتر از ظرفیت

در سال ۲۰۰۴، دالبرگ طی بررسی ادبیات فنی حوزه نشست راه آهن، بیان کرد نشست خط به طور عمده در دو مرحله اتفاق می‌افتد:

- در مرحله اول، نشست سریع مستقیماً پس از احداث خط و در اثر کاهش فضای خالی بین ذرات بالاست رخ می‌دهد.
- مرحله دوم نشست کندتر است و بین نشست و زمان (یا بار) یک رابطه تقریباً خطی وجود دارد.
مرحله دوم نشست، توسط چندین مکانیسم اساسی بالاست و رفتار خاکریز ایجاد می‌شود:

۱- ادامه کاهش حجم (بعد از مرحله اول)، یعنی متراکم سازی بالاست و ساب‌گرید، ناشی از بازآرایی ذرات در اثر بارگذاری تکرار شونده قطار؛

۲- نفوذ زیر بالاست یا ساب‌گرید به حفرات بالاست؛

۳- کاهش حجم ناشی از خردشدگی ذرات ناشی از بار قطار یا عوامل محیطی؛

۴- کاهش حجم ناشی از سایش ذرات؛

۵- بازگشت‌های غیر الاستیک هنگام باربرداری؛

۶- حرکت ذرات بالاست و ساب‌گرید به خارج از محدوده تراورس؛

۷- حرکت جانبی و احتمالاً طولی تراورس‌ها (در مسیر ریل) باعث می‌شود که بالاست در زیر آن به بیرون رانده شود و جای تراورس‌ها در عمق بیشتری از بالاست قرار می‌گیرند.

در ادبیات فنی مورد مطالعه، هر جا که از نشست خط آهن سخن گفته شده، اگر منظور، نشست‌های حاصل از تراکم باشد (موارد ۱ الی ۴)؛ این نشست‌ها با لایه‌های روسازی (شامل بالاست و زیربلاست) یا بستر روسازی (ساب‌گرید) مرتبط می‌گردد. نشست‌های حاصل از لغزش و خصوصیات غیرالاستیک مصالح (موارد ۵ الی ۷) نیز هیچ‌گاه با بستر طبیعی خط مرتبط نشده‌اند. از طرفی در آیین‌نامه‌های موجود مرتبط با طراحی و اجرای زیرسازی شبکه ریلی، برای اجرای راه‌آهن در مناطق با زمین طبیعی نامرغوب، پیشنهاد جایگزینی خاک نامرغوب و یا بهسازی

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حداثه تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

بیشتر ایجاد می‌شود و تحکیم نقش مهمی در تحلیل پایداری خاکریزها، پی‌ها و یا ستون‌های ساخته شده بر بستر رسی دارد. نشست این سازه‌ها و فشار منفذی خاک بستر، باید پیش از ساخت و ساز روی این خاک‌ها بررسی شود. مسئله تحکیم توسط بسیاری از محققان با مرتبط کردن تغییر شکل خاک و فشار منفذی، فرموله شده است. اگرچه رفتار تنش-کرنش خاک کاملاً غیرخطی است، اما در کارهای اولیه در مورد آنالیز تحکیم، خاک، به صورت یک ماده الاستیک خطی ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود [رادیکا و همکاران، ۲۰۲۰].

بر اساس نشریه شماره ۲۷۹، روسازی و زیرسازی راه آهن متأثر از بارهای نام برده شده در زیر بوده و باید پایداری خود را حفظ نموده و دچار نشست و تغییر شکل‌های غیر مجاز نگردند.

الف) بارهای دائمی

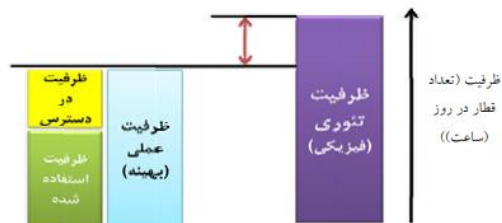
ب) بارهای مربوط به بهره‌برداری و اثرات حاصل از آنها

ج) بارهای ناشی از اثر زمین‌لرزه

نشست خاکریز، پدیده‌ای است که بسته به نوع خاک می‌تواند به صورت آبی (ارتجاعی)، بلند مدت (تحکیمی) و یا ثانویه رخ دهد. در خاک‌های دانه‌ای، نشست از نوع آبی و در خاک‌های ریزدانه (چسبنده)، نشست نهایی حاصل جمع نشست ارتجاعی، دراز مدت و ثانویه است. جدا از مسائل نشست تدریجی که به صورت عادی مورد محاسبه و تحلیل قرار می‌گیرد؛ برخی خاک‌ها به دلیل شرایط خاص چسبندگی و تراکم کم خود و یا تمایل شدید به جذب آب (خاک‌های مسئله‌دار)، می‌توانند در مواجهه با آب یا بروز زلزله و یا هر نوع بارگذاری غیر متعارف، نشست‌های اتفاقی و پیش‌بینی نشده‌ای پیدا کنند (خاک‌های روانگرا و رمنده).

بعضی دیگر از خاک‌های ریزدانه با چسبندگی زیاد، با حضور یا عدم حضور آب دچار تغییر حجم شده و می‌توانند سازه خاکریز را دچار تغییر شکل‌های ناشی از تورم یا انقباض خود نمایند. قبل از ساخت روسازی و یا حداکثر در شروع بهره‌برداری از

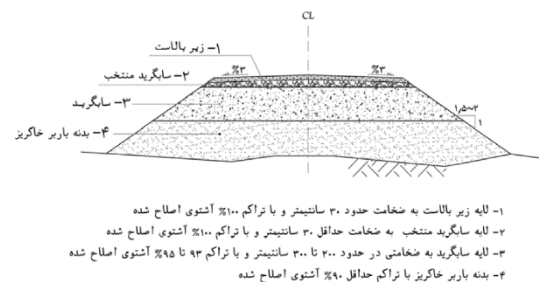
بهینه است. تفاوت میان ظرفیت استفاده شده و بهینه، نشان‌دهنده حجم ترافیکی است که می‌تواند به مسیر اضافه شود (شکل ۱).



شکل ۱. مفهوم ظرفیت در راه آهن (یقینی و همکاران، ۱۳۹۱)

سیستم یک خط راه آهن را می‌توان به صورت یک سیستم توزیع کننده بار در نظر گرفت. به صورتی که بار متناوب ناشی از عبور چرخ وسایل نقلیه ریلی ابتدا از ریل به تراورس و سپس از طریق یک لایه محافظ به نام بالاست بر لایه زیرسازی انتقال می‌یابد. اندازه و بزرگی مقدار تنش‌های وارد بر لایه زیرسازی، به عمق بالاست وابسته است. مطالعات نشان می‌دهد در نظریه‌های رایج و استانداردهای راه آهن، نقش ضخامت لایه بالاست و نوع بستر در تعیین بیشینه تنش سطح بالاست با توجه به شرایط رایج اجزا سیستم خط راه آهن نادیده گرفته شده است. (شکل ۲) [محمدزاده و همکاران، ۱۳۹۴].

به طور کلی، هرچه خاک، ریزتر و یا خصوصیات خمیری آن بیشتر باشد؛ عملکرد این مصالح به عنوان زیرسازی مسیر ریلی، ضعیف‌تر است [دو و سلینگ، ۱۹۹۵].



شکل ۲. مقطع تیپ خاکریزها و بخش‌های مختلف آن (نشریه

شماره ۳۹۴، دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن

سریع‌السير)

تراکم پذیری رس‌ها، عمدتاً در اثر خروج آب بین‌دانه‌ای و جایجایی ذرات به موقعیت جدید در جهت دستیابی به چگالی

در برخی از پروژه‌ها مانند راه‌آهن بسیار مهم باشد؛ روش جدید چونلین به دلیل سادگی و دقت بسیار جذاب است. با این حال نشست نهایی در چهار روش، بسیار به هم نزدیک است. در سال ۲۰۱۸، لیکیتلرسوانگ و همکارانش طی یک مطالعه عددی که بر اساس توصیه AREMA، بارگذاری قطار در آن، شبه‌استاتیک فرض شده بود؛ اعلام کردند قسمت اعظم نشست تحکیمی حادث شده در بستر نرم، طی ۵ سال اول رخ خواهد داد (شکل ۳). در این مطالعه، بار قطار اعمال شده به مدل در شرایط شبه استاتیک شبیه‌سازی شد و اثر دینامیکی بار اعمالی به صورت یک ضریب تأثیر در نظر گرفته شد. این روش با تأکید بر تأثیر بار دینامیکی بر ساختار راه‌آهن، دستورالعملی برای تبدیل شرایط ترافیک دینامیکی به یک بار شبه استاتیکی ارائه می‌دهد.

طبق اظهارات صادقی و براتی در سال ۲۰۱۰، ضریب تأثیر آیین نامه (AREMA 2002) آمریکا برای بارهای ریلی با سرعت بیش از ۸۰ کیلومتر در ساعت، کمی بیش از حد تخمین زده شده است. بنابراین استفاده از ضریب تأثیر AREMA برای شبیه‌سازی فشار بارگذاری در جهت اطمینان است.

ضریب تأثیر AREMA، تابعی از سرعت قطار (V) بر حسب کیلومتر در ساعت و قطر چرخ (D) به میلی‌متر است. بار شبه استاتیک (P) با استفاده از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$P = IF \times \frac{2 q_r}{L} \times DF$$

$$IF = 1 + 5.21 \left(\frac{V}{D} \right)$$

$$DF = \frac{(0.061 \times S) + 13.37}{100}$$

S: فاصله بین تراورس‌ها (میلی‌متر)

DF: فاکتور توزیع بار

q_r: بار ریل (بار چرخ که بر روی هر ریل منفرد عمل می‌کند که

نیمی از بار محور است)

خط، باید تغییرشکل‌های آنی و تدریجی، تا حد مطلوب بهره‌برداری از نظر آسایش مسافری و ایمنی حرکت قطار، به وقوع پیوسته باشد و مقادیر نشست‌های نسبی در طول آن محدود شده باشند. علاوه بر این، در طول دوره بهره‌برداری، خط باید از هرگونه نشست اتفاقی یا تورم ناگهانی ایمن باشد.

بنا به ضوابط محاسبه نشست خاکریز، مندرج در دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه‌آهن (نشریه ۳۵۵)، نشست ناشی از تحکیم یا نشست بلندمدت، در خاک‌های ریزدانه اشباع شده رخ می‌دهد. در این خاک‌ها در اثر اعمال بار، به‌علت کم بودن مقدار نفوذپذیری خاک و در نتیجه کند بودن روند خروج آب از خاک، فشار آب حفره‌ای ایجاد شده و در ازای خروج تدریجی آب از خاک، با کاهش فشار آب منفذی، نشست به صورت تدریجی صورت می‌گیرد.

هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۸، طی یک مدل‌سازی اجزاء محدود دوبعدی، اثر ارتعاشات مکرر را بر نشست بلند مدت یک تونل مترو واقع بر رس اشباع بررسی کردند. مشخص شد در مدت زمان کوتاهی پس از بهره‌برداری، اضافه‌فشار آب منفذی به حداکثر مقدار خود می‌رسد اما به مرور زمان از آن کاسته می‌شود. در این تحقیق عنوان شده مقدار نفوذپذیری خاک، تأثیر عمده‌ای بر توزیع اضافه‌فشار آب منفذی دارد اما اثر آن بر مقدار نشست، ناچیز است. آنها دریافتند که مقدار نشست نهایی تونل، عمدتاً ناشی از نشست استاتیکی متأثر از اتلاف اضافه‌فشار آب منفذی در طی توقف قطار است، در حالی که نشست دینامیکی ناشی از تحکیم سیکلیک در هر ارتعاش قطار، فقط قسمت کوچکی از نشست را شامل می‌گردد.

در یک تحلیل عددی استاتیکی در سال ۲۰۱۷ توسط بن‌امغر و بوجلال، مقایسه‌ای بین چهار روش نظری، شامل روش‌های ترزاقی، آساوکا، تان و چونلین برای تخمین نشست تحکیمی خاکریز راه‌آهن انجام شده است. همه این روش‌ها نتایج بسیار نزدیک و در عرض چند دهم میلی‌متر را نشان دادند. می‌توان نتیجه گرفت که برای برآورد نشست در فاز میانی، که می‌تواند

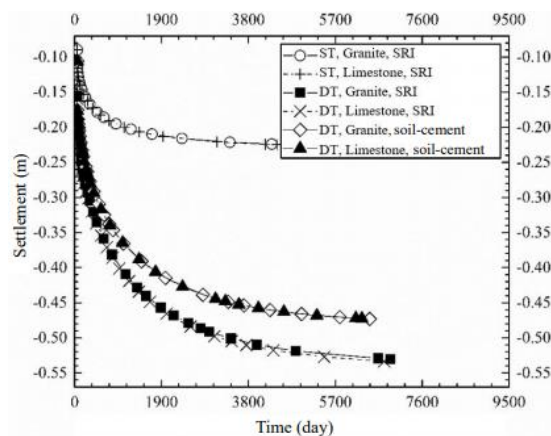
بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حدفاصل تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

نشست کلی حاصل از بارگذاری ممتد به مدت ۵۰ سال به عنوان حد نهایی نشست، و نیز بارگذاری با فواصل مختلف به مدت نهایی ده روز، مورد مقایسه قرار گرفت. به علت طولانی بودن زمان محاسبه در نرم افزار "Plaxis-2D" در ادامه با استفاده از ضریب نفوذپذیری K ، مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν پارامتر ضریب تحکیم CV ، محاسبه و رابطه محاسبه نشست تحکیمی، به همراه پارامترهای لازم و متغیرها در نرم افزار "MATLAB" تعریف شد و با تغییر زمان فواصل و زمان نهایی تردد، مقادیر نشان دهنده اضافه فشار آب حفره ای در وسط لایه خاک بستر، به دست آمد. نهایتاً با ترکیب معادلات و برابر قرار دادن روابط محاسبه نشست در مکانیک خاک، میزان نشست و تورم مربوط به هر سیکل بارگذاری با فواصل متفاوت، و همچنین زمان مورد نیاز جهت دست یابی به حد نهایی تحکیم در هریک از الگوهای بارگذاری (وابسته به فواصل عبور قطارها) محاسبه شد.

۱-۳ مدل سازی به کمک نرم افزار اجزای محدود

Plaxis-2D

با توجه به متداول و در دسترس بودن نتایج مطالعاتی مدل رفتاری مور-کولمب، در این تحقیق از این الگو استفاده شده است. برای مدل سازی عددی، خاک بستر از جنس رس، با ضریب نفوذپذیری 10^{-6} m/day ، وزن مخصوص 17 kN/m^3 ، ضریب پواسون 0.35 ، مدول الاستیسیته 10^{-4} kN/m^2 در شرایط زهکشی نشده (Undrained) و مدل رفتاری Linear Elastic ایجاد شده و بالاست با مقطع دوزنقه به ابعاد قاعده کوچک ۸ متر (به علت دوطرفه بودن مسیر) و شیب ۲:۱ با مصالح زهکشی شده و مدل رفتاری مور-کولمب دارای وزن مخصوص 22 kN/m^3 ، ضریب پواسون 0.35 ، مدول الاستیسیته 10^+ kN/m^2 ، زاویه اصطکاک 45° درجه و $\psi = 15^\circ$ روی بستر ساخته شده است (شکل ۴).

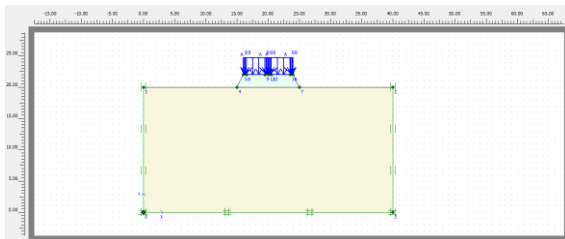


شکل ۳. تغییرات نشست سطح زمین در طی زمان در خط مرکزی خاکریز

۳. روش تحقیق

در این مطالعه، از تغییرات شدت بار و به تبع آن، از اثر سرعت و شتاب، صرف نظر شده و بار به صورت استاتیکی فرض شده است؛ زیرا با توجه به سرعت بالای قطار، زمان اعمال بار نسبت به فواصل عبور قطارها بسیار اندک بوده و بارگذاری ثابت به صورت منقطع و غیرممتد و با حضور یا عدم حضور بار استاتیکی به میزان معادل لوکوموتیو و واگن ها اعمال شده است. با توجه به عرض بارگیر بالاست به میزان ۸ متر خاک بستر رسی در ابعاد 20×40 متر از اطراف محدود شده که با توجه به اینکه ابعاد مورد تاثیر توزیع بار، تقریباً به میزان دو برابر از هر طرف است؛ این میزان را پوشش داده و کل محدوده تحت تاثیر بارگذاری منقطع را دربر گرفته باشد. در خصوص مصالح، از آنجا که می بایست قسمت تحت بارگذاری ناشی از عبور قطار، از مصالح درشت دانه با نفوذپذیری بالا ساخته شود؛ با بهره گیری از آیین نامه قطارهای سریع السیر کشور چین و همچنین مرجع راهنمای Burtlook، مشخصات مصالح انتخاب شده است. تحلیل با استفاده از تئوری تحکیم دوبعدی انجام شده و کلیه تغییر شکل ها و جابجایی ها، در زمان بعد از احداث و قبل از اولین عبور قطار، صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین در این تحقیق، بار معادل عبور همزمان دو قطار روی راه آهن پرسرعت در نرم افزار "Plaxis-2D"، مدل سازی شد و نتایج مربوط به

در تعریف مشخصات هندسی مقطع، و همچنین توالی بارگذاری و زمان بندی تردد قطارها نیز از آیین نامه قطارهای سریع السیر کشور چین استفاده و در مدل سازی اعمال شده است. بر این اساس، بارگذاری ها در مجموع به مدت ۳۰ ثانیه اعمال شده و عبورها با هم فواصل ۳۰ دقیقه، ۱، ۲ و ۴ ساعت دارند. با تعریف فازهای اعمال بار و عدم وجود بار، به تعداد لازم برای مدت ۱۰ روز در هریک از الگوهای بارگذاری، نهایتاً مقدار نشست تحکیمی حاصل از ظرفیت عبوری ریل طی هر مرحله، با استفاده از تئوری تحکیم دوبعدی، به دست آمد. یک بار هم بارگذاری به صورت ممتد و به مدت ۵۰ سال (عمر مفید تقریبی زیرسازی سیستم حمل و نقل) اعمال شد و در زمان های متناظر با بارگذاری های غیرممتد، نتایج قرائت شد.



شکل ۶. نمایش بارگذاری متمرکز و گسترده معادل بار لوکوموتیو و واگن های قطار

نهایتاً نتایج مربوط به تغییر شکل، نشست کلی تحکیمی، و همچنین تغییرات اضافه فشار آب حفره ای در الگوهای بارگذاری مختلف، مورد مقایسه قرار گرفت.

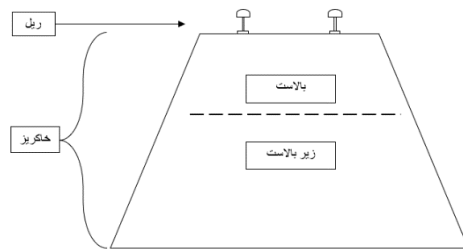
۲-۳ محاسبات در زمان های طولانی با استفاده از

نرم افزار MATLAB

برای محاسبه مقادیر مورد نیاز در هر زمان دلخواه، از حل معادله تحکیم، به کمک نرم افزار "MATLAB" استفاده شده و دو نمودار، به شرح ذیل، به دست آمد:

۱- نمودار مربوط به مقدار اضافه فشار آب حفره ای در وسط لایه بر حسب زمان؛ که در لحظات حرکت قطار با نقطه قرمز مشخص شده و بقیه زمان ها که مابین حرکت قطار است خط نازک آبی ترسیم می شود (نمودار ۷ و ۸).

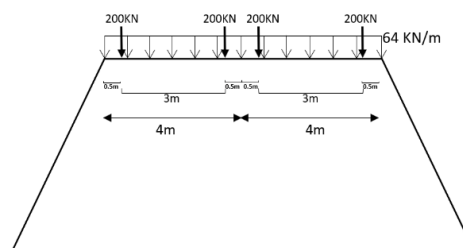
فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال پانزدهم / شماره سوم (۶۰) / بهار ۱۴۰۳



شکل ۴. مقطع مدل سازی دوبعدی

درخصوص مشخصات فنی و هندسی مقطع، از آیین نامه قطارهای سریع السیر کشور چین استفاده شده و همان طور که در شکل شماره ۵ قابل مشاهده است؛ شامل دو خط عبور مختلف الجبهت قطار با ریل های به فواصل ۳ متر بوده که بارهای متمرکز مربوط به لوکوموتیو وارد می شود و با توجه به اینکه واگن ها از هر طرف نسبت به لوکوموتیو، ۵۰ سانتی متر بزرگ تر است؛ عرض کل قسمت بارگیر برای بار گسترده معادل واگن ها، ۸ متر خواهد بود.

با توجه به اینکه کشور چین، بیشترین میزان خطوط ریلی پرسرعت را داراست؛ آیین نامه مذکور قابل استناد و معتبر تلقی شده و مقادیر بار متمرکز معادل لوکوموتیو و بار گسترده معادل واگن ها نیز بر اساس این آیین نامه انتخاب شده است. بنابراین بارهای متمرکز استاتیک به فاصله ۰.۵m از دو طرف لبه و فاصله 3m از یکدیگر که محل قرارگیری ریل ها است؛ به عنوان معادل بار لوکوموتیو و به اندازه 200 kN و بار گسترده استاتیک در کل طول 4m مسیر رفت و برگشت یعنی در مجموع در طول 8m به میزان 64 kN/m^3 معادل بار واگن های قطار (256 kN در هر مسیر به ازای واحد طول قطار) اعمال می شود (شکل ۵).



شکل ۵. طرح شماتیک بستر راه آهن و بارگذاری گسترده (واگن) و بارهای متمرکز (لوکوموتیو)

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حداثه تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

در معادله تحکیم در نرم افزار متلب، تنش کل معادل عبور همزمان دو قطار، 1312 Kpa در نظر گرفته شده و ضریب تحکیم، از محاسبات ذیل (روابط ۱ و ۲)، به دست آمده است. عمق لایه زیرین، ۵ متر در نظر گرفته شده که متعاقباً تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای در وسط لایه (۲/۵ متر) بررسی شود. زمان عبور قطار با فواصل مختلف، ۳۰ ثانیه و فواصل آنالیز، ۱۰ دقیقه است.

$$\frac{1}{m_v} = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad (1)$$

$$C_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \quad (2)$$

$$\frac{1}{m_v} = \frac{10^{-4} \cdot (1-0.35)}{(1-0.7)(1+0.35)} \Rightarrow$$

$$m_v = 6.23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$$

$$C_v = \frac{17 \cdot 10^{-6}}{6.23 \cdot 10^{-5} \cdot 10} \Rightarrow$$

$$C_v = 3.17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

بنابراین m_v برابر با $6.23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$ و C_v مقدار $3.17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ، معادل 10 متر مربع در سال به دست می‌آید.

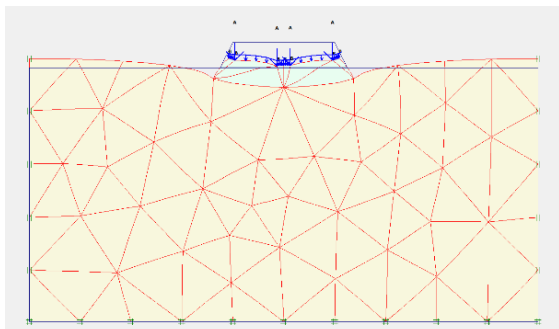
۴. تحلیل نتایج

۴-۱ نتایج حاصل از بررسی مدل‌ها در نرم‌افزار

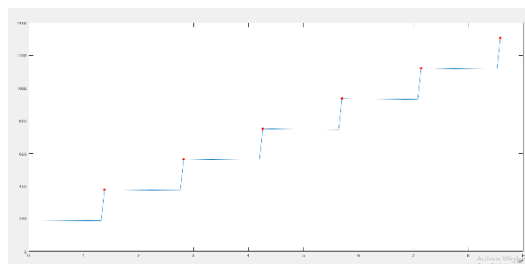
Plaxis

۴-۱-۱ نتایج مربوط به نشست و تغییر شکل کلی

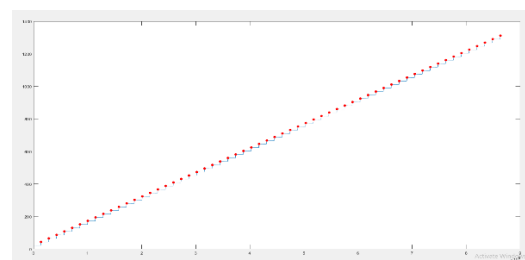
تغییر شکل کلی و نهایی، در کلیه مدل‌های بارگذاری شده با زمان‌های استراحت متفاوت، و همچنین بارگذاری ممتد، رفتار مشابه داشته و مقدار آن با افزایش زمان بارگذاری، رو به افزایش بوده است (شکل‌های ۱۱، ۱۲، ۱۳).



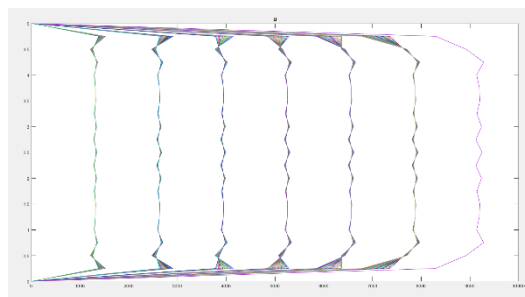
۲- نمودار توزیع فشار در عمق، متناظر با زمان‌های مختلف (شکل ۹ و ۱۰).



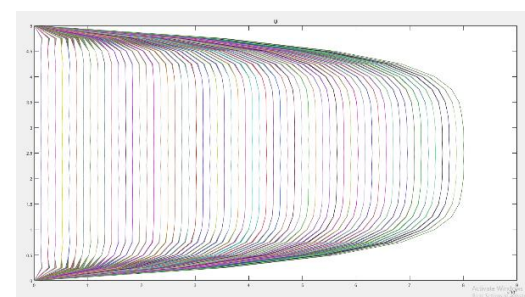
شکل ۷. نمودار مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای در وسط لایه بر حسب زمان، بعد از گذشت یک روز



شکل ۸. نمودار اضافه فشار آب حفره‌ای در وسط لایه بر حسب زمان، بعد از گذشت ده روز



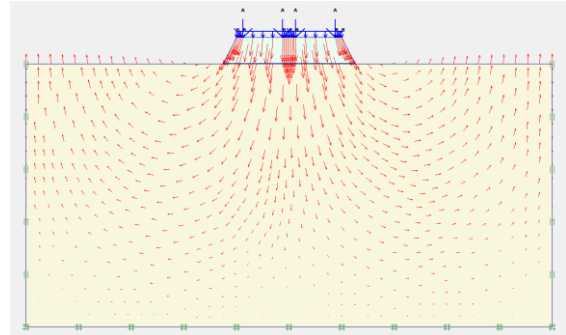
شکل ۹. نمودار توزیع فشار در عمق، بعد از گذشت یک روز



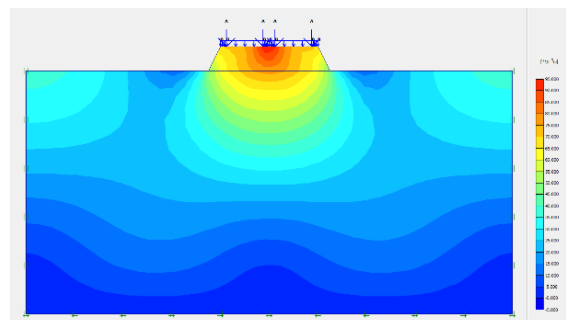
شکل ۱۰. نمودار توزیع فشار در عمق، بعد از گذشت ده روز

شکل ۱۱. شمای کلی تغییر شکل بستر خاک تحت اثر بارگذاری

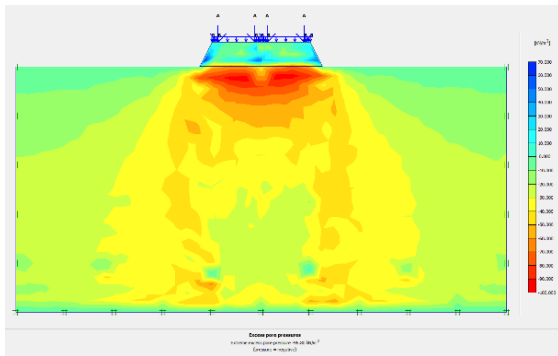
ناشی از عبور قطار با فواصل مختلف



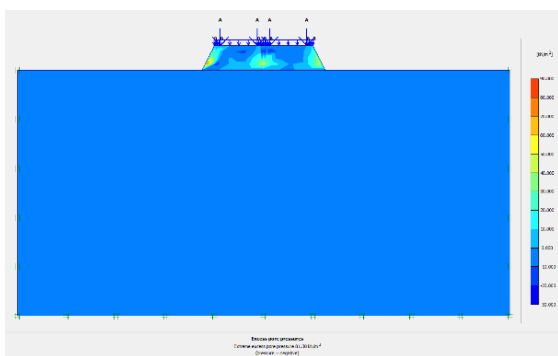
شکل ۱۲. مسیر توزیع تنش حاصل از بارگذاری در بستر خاک



شکل ۱۳. نحوه تاثیر تنش حاصل از بارگذاری و ایجاد نشست در بستر خاک



شکل ۱۴. اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده تحت اثر بارگذاری ممتد معادل بار کلی قطار در پایان روز اول



شکل ۱۵. اضافه فشار آب حفره‌ای ایجاد شده تحت اثر بارگذاری ممتد معادل بار کلی قطار بعد از پنجاه سال

با سعی و خطای مکرر مشخص گردید زمان تغییر جهت روند تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای، تقریباً در صد و دهمین روز بارگذاری ممتد اتفاق می‌افتد. بدین صورت که اضافه فشار حفره‌ای در روز صدم و روز صد و یازدهم، مقدار منفی 73.82 kN/m^2 دارد و مقدار منفی در روز صد و دهم، 73.79 kN/m^2 است. یعنی تا صد و دهمین روز، اضافه فشار آب حفره‌ای در حال افزایش (کاهش عدد منفی) بوده و پس از روز صد و دهم، رو به کاهش (افزایش مقدار منفی) است.

نکته جالب توجه در این مقایسه‌ها این است که مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای به دست آمده در پایان سال پنجاهم، -81.30 kN/m^2 است و در پایان روز دهم و در ادامه روند افزایشی، مقدار -86.08 kN/m^2 دارد که با توجه به افزایش تقریباً ۱ واحدی این مقدار با گذشت هر دو روز، که البته با گذشت زمان، میزان این تغییر، کمتر می‌شود؛ می‌توان پیش‌بینی کرد که مقدار

۴-۱-۲ نتایج مربوط به تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای

در مدل بارگذاری شده به صورت ممتد، تغییرات اضافه فشار آب حفره‌ای، در بازه منفی بوده و در قرائت‌های مربوط به فازهای ۱ روزه الی ۶ روزه، روند افزایشی اندکی داشته، سپس در روز هشتم، نسبت به روز ششم، کاهش مقدار و مجدداً در روز دهم نسبت به روز هشتم، افزایش داشته است. سپس عدد متناظر با سال اول، از عدد متناظر با روز دهم به میزان چشمگیری کمتر است و از سال اول به بعد، مقدار عدد منفی، رو به افزایش بوده و کاهش اضافه فشار آب حفره‌ای، تا ۵۰ سال، قابل مشاهده است. تا حدی که به نظر می‌رسد در حوالی سال پنجاهم، اضافه فشار آب حفره‌ای تقریباً به‌طور کامل در بستر رسی مسیر، حذف شده است (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حدفاصل تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

که تغییر جهت روند، حوالی فازهای ۲۴ الی ۵۰ در تردد ۲ ساعت یک بار و ۴ ساعت یک بار رخ داده است؛ این زمان در الگوهای با فواصل ۳۰ دقیقه و ۱ ساعت، متناظر با زمانی کمتر از یک روز است. (۶ ساعت برای مدل ۳۰ دقیقه‌ای و ۱۲ ساعت برای مدل یک ساعتی) و در واقع تغییر روند در این مدل‌ها نیز وجود دارد؛ ولی چون زمان‌های ۶ ساعت و ۱۲ ساعت، ملاک مقایسه مقادیر نبوده، در نتایج اولیه، مشاهده نشده است.

۴-۲ نتایج حاصل از محاسبات با استفاده از نرم افزار

MATLAB

با تغییر مقادیر زمان فواصل عبور قطارها (T_R)، به میزان ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۲۴۰ دقیقه و همچنین تغییر زمان اتمام بارگذاری مقطع (T_{End}) به مدت ۱، ۲، ۴، ۶، ۸، ۱۰ روز، (مشابه زمان‌های اعمال شده در مدل Plaxis) نتایج حاصل، تحلیل و بررسی شده است.

نهایتاً، نموداری بر اساس P/P_{max} نسبت به T_R/T_{End} ترسیم شده؛ که معکوس نسبت T_R/T_{End} ، نشان‌دهنده تعداد تردد قطار در زمان مشخص یا در واقع، همان مفهوم ضریب اشباع خط است. (شکل ۱۰)

ضریب اشباع خط:

$$\frac{1}{\frac{T_{Rest}}{T_{End}}} = \text{میزان تردد وسیله نقلیه در زمان معین}$$

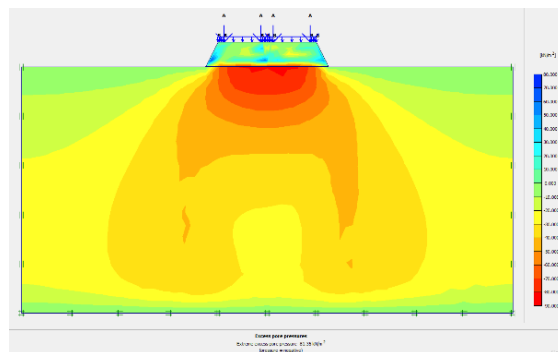
که تغییرات رفتار خاک، به نسبت تغییرات ضریب اشباع خط، از این نمودار قابل استنتاج است.

افزایش زمان فواصل عبور قطارها، با ثابت نگه داشتن زمان نهایی آنالیز، مقدار نسبت T_R/T_{End} را افزایش می‌دهد که به معنی کاهش ضریب اشباع خط (کاهش تردد) است.

در این تحقیق، صرفاً جهت مقایسه رفتار خاک نسبت به تغییر ضریب اشباع خط، به عنوان نمونه برای عمق ۲/۵ متر (وسط لایه) در زمان نهایی ۱ شبانه‌روز، نمودار مذکور ترسیم شده است؛ که با توجه به فواصل ۱۰ دقیقه‌ای آنالیزها، ۱۴۵ قرائت را نتیجه

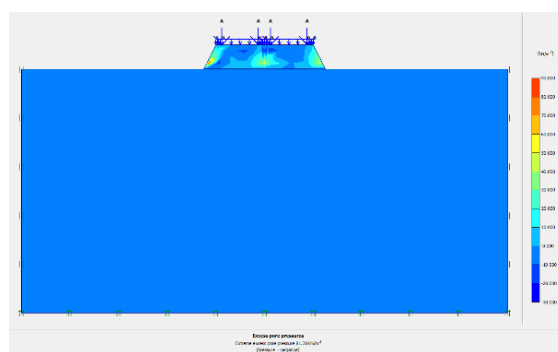
$$\text{داده است. } (24 * (\frac{60}{10}) + 1 = 145)$$

اضافه فشار آب حفره‌ای حوالی روزهای ۳۰ الی ۴۰، با ۵ واحد افزایش، مقداری در حدود 81 kN/m^2 داشته باشد. که این مورد با چندین بار سعی و خطا و تعریف فازها و زمان‌های متفاوت در مدل اعمال شده و مشاهده شد که مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای در روز ۳۶ و سال ۵۰، مشابه است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).



شکل ۱۶. کانتور اضافه فشار آب حفره ای در روز ۳۶ م بارگذاری

ممتد

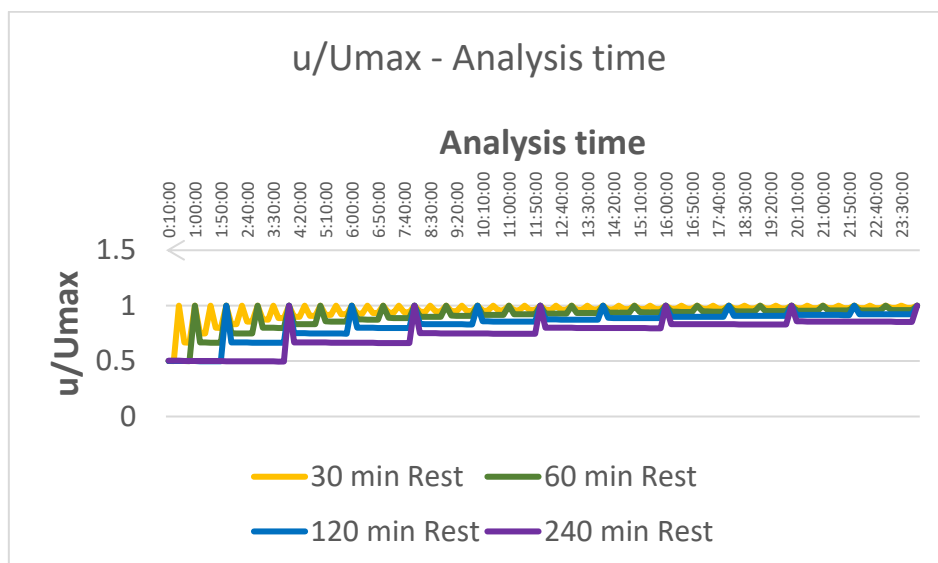


شکل ۱۷. کانتور اضافه فشار آب حفره ای در پایان ۵۰ سال

بارگذاری ممتد

در مدل‌های بارگذاری شده با عبورهای قطار به مدت ۳۰ ثانیه و زمان استراحت مختلف نیز مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای، در ناحیه منفی بوده و عدد آن، با افزایش مدت زمان اعمال بار، افزایش می‌یابد که به معنی کاهش مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای با افزایش زمان بارگذاری است.

البته در مدل مربوط به فواصل عبور ۲ ساعت و ۴ ساعت، در روز دوم، نسبت به روز اول، افزایش مقدار اضافه فشار آب حفره‌ای و در ادامه، روند کاهش مشاهده شده است. با توجه این است



شکل ۱۸. نمودار نحوه تاثیر فواصل بارگذاری بر نسبت $\frac{u}{U_{max}}$

$$= \frac{1.521 * 10^{-6} * 4 * 10^4}{3.14} = 1.937 * 10^{-2}$$

$$U\% = \sqrt{1.937 * 10^{-2}} = 0.139$$

یعنی می‌توان گفت در هر بارگذاری به مدت ۳۰ ثانیه، ۰/۱۳۹ درصد از تحکیم نهایی رخ می‌دهد.

و از آنجا که ضریب تورم که به طور تقریبی، ۰/۱ الی ۰/۲ ضریب فشردگی است؛ با صرف نظر از زمان فاصله بین عبورها، مقدار تورم نیز در حدود ۰/۰۲۸ درصد از تحکیم نهایی است. البته نمی‌توان با کسر درصد مربوط به تورم از درصد مربوط به نشست، مقدار نشست کلی مربوط به هر سیکل را به صورت "مقدار تحکیم نهایی \times ۰/۱۱۱ درصد"، تعیین نمود زیرا نشست و تورم، ماهیت جمعی دارد و با وجود اینکه طبق محاسبات، بعد از هر مرحله بارگذاری، ۰/۰۲۸ درصد از مقدار تحکیم نهایی، به حالت قبل بازمی‌گردد؛ در حداصل دو بارگذاری و باربرداری و با گذشت زمان، در واقعیت مبنای محاسبه تغییر کرده و هرچه زمان بیشتری بگذرد؛ مقدار نشست و تورم کمتر خواهد شد زیرا خاک به وضعیت تحکیم نهایی خود نزدیک‌تر شده و قابلیت فشردگی و ارتجاع کمتری دارد.

برای دستیابی به تحکیم نسبتاً کامل یعنی $90\% < U\% < 100\%$

مقدار تقریبی فاکتور زمان طبق جدول (۱)، باید عددی بیشتر از

۳-۴ نتایج حاصل از حل معادلات و بهره‌گیری از

روابط بین پارامترها

با توجه به اینکه هدف تحقیق، بررسی بارگذاری غیرممتد به مدت ۳۰ ثانیه معادل عبور قطار بوده با به‌دست آمدن C_v ، از روابط (۱) و (۲)، فاکتور زمان و میزان نشست و تورم مرحله‌ای در هر عمق مورد نظر و همچنین تحکیم نهایی حاصل از سیکل‌های اعمال بار، به صورت ذیل محاسبه شده است.

$$T_V = \frac{C_v * t}{H_{dr}^2} \quad (۳)$$

$$T_V = \frac{3.17 * 10^{-7}}{(2.5)^2} * t$$

$$T_V = 5.07 * 10^{-8} t$$

$$T_V = 5.07 * 10^{-8} * 30 = 1.521 * 10^{-6}$$

بنابراین در بارگذاری به مدت ۳۰ ثانیه (معادل زمان عبور قطار)،

فاکتور زمان، مقدار $6 - 10 \times 10^{-6}$ دارد.

با توجه به اینکه در این مدت زمان کوتاه، مقدار نشست تحکیمی

بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است و برای $0\% < u\% < 60\%$

داریم:

$$T_V = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \quad (۴)$$

بنابراین:

$$(U\%)^2 = \frac{4 * 10^4 * T_V}{\pi}$$

بررسی عددی نحوه تاثیر زمان حدفاصل تردد قطارها بر نشست تحکیمی بستر رسی در راه آهن پرسرعت

ساعت، رسیدن به تحکیم نهایی، ۳۰۰ سال! به طول خواهد انجامید.

۵. جمع بندی و نتیجه گیری

همان طور که از قسمت قبلی نیز اثبات شد؛ میزان نشست نهایی، با تعداد تردد قطار، رابطه مستقیم و با فواصل عبور قطارها رابطه معکوس دارد؛ بنابراین هرچه زمان مابین عبور قطارها افزایش یابد؛ مقدار نشست و تورم مرحله ای و تحکیم نهایی، کمتر خواهد بود.

از آنجا که معکوس نسبت زمان فواصل عبور قطارها، به زمان نهایی مورد مطالعه، در صورتی که زمان نهایی، معین و استاندارد در نظر گرفته شود؛ بیانگر مفهوم ضریب اشباع و تعداد تردد وسیله نقلیه در زمان معین است؛ به عبارتی روند تغییرات میزان نشست نهایی، با تغییر فواصل عبور قطارها (افزایشی یا کاهش) بودن) رابطه معکوس، با ضریب اشباع خط راه آهن، رابطه مستقیم دارد.

جهت اعتبارسنجی و تحلیل دقیق نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی می بایست نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و بارها به صورت مشابه اعمال شود؛ از آنجا که شرایط این کار و انجام تست آزمایشگاهی، فراهم نبود؛ با توجه به محدود بودن متغیرهای مورد مطالعه، تلاش شده است تا با حل معادله تحکیم در نرم افزار متلب، و مقایسه نتایج، خروجی تحلیل ها اعتبار بیشتری یابند. بنابراین مقادیر، یک بار هم در نرم افزار متلب مورد مطالعه قرار گرفته و پس از حل معادله تحکیم در این نرم افزار، نتایج مقایسه شده است. که نتایج تا حد زیادی به هم نزدیک بوده و اختلاف نسبتا اندکی که به وجود آمده می توان گفت ناشی از تفاوت روش های محاسبه است؛ زیرا تحلیل در نرم افزار پلکسیس، به صورت دوبعدی انجام شده و محاسبات متلب، به صورت تک بعدی است.

در ادامه محاسبات، بدون اعمال اثر تورم و صرفا با در نظر گرفتن خود بارگذاری ها، به صورت منقطع، زمان کلی رسیدن به تحکیم نهایی در عبور با فواصل ۳۰ دقیقه، تقریبا ۳۸ سال به دست آمد و

۰/۸۴۸ باشد. در این تحقیق، جهت سهولت محاسبات، مقدار T_V برابر با ۱ در نظر گرفته شده است.

جدول ۱. تغییرات درجه تحکیم بر حسب عامل زمان

درجه تحکیم U%	عامل زمان T_V
0	0
10	0.008
20	0.031
30	0.071
40	0.126
50	0.197
60	0.287
70	0.403
80	0.567
90	0.848
100	∞

$$C_V * t = H_{dr}^2 \quad (5)$$

$$t = \frac{6.25}{3.17 * 10^{-7}} = 1.972 * 10^7 \text{ sec}$$

یعنی زمان نهایی برای تحکیم کامل، $1.972 * 10^7$ ثانیه است.

$$\frac{1.972 * 10^7}{30} = 6.57 * 10^5$$

پس با فرض بارگذاری های منقطع با زمان ۳۰ ثانیه، تقریبا تعداد ۶۵۷ هزار بار عبور قطار باید انجام شود تا تحکیم کامل رخ بدهد. بنابراین بدون در نظر گرفتن مقدار تورم که در مدت فواصل بین عبور قطارها ایجاد می شود؛ مدت زمان کلی رسیدن به تحکیم نهایی در هریک از الگوهای تردد قطار، قابل محاسبه است. به عنوان مثال برای بارگذاری با فواصل ۳۰ دقیقه که هر سیکل بارگذاری شامل ۱۸۰۰ ثانیه استراحت و ۳۰ ثانیه عبور قطار است؛ مجموعا هر سیکل بارگذاری، ۱۸۳۰ ثانیه طول می کشد.

$$\frac{24 * 60 * 60}{1830} = 47.2 \text{ : تعداد سیکل در شبانه روز}$$

$$\frac{657000}{47.2} = 13'919.5 \text{ : تعداد شبانه روز تا وقوع تحکیم کامل}$$

$$\frac{13919.5}{365} = 38.13 \text{ سال}$$

پس در بارگذاری با فواصل ۳۰ دقیقه، تقریبا ۳۸ سال طول می کشد تا تحکیم کامل رخ دهد.

به همین ترتیب، برای بارگذاری با فواصل ۶۰ دقیقه، تقریبا ۷۵ سال، فواصل ۲ ساعت، ۱۵۰ سال و در بارگذاری با فواصل ۴

- اسماعیلی، مرتضی و خلیلیان، ولی اله، ۱۳۹۳. بررسی عددی رفتار استاتیکی و دینامیکی خاکریز های راه آهن ساخته شده با ژئوفوم. مدل سازی در مهندسی، سال دوازدهم، شماره ۳۶، صفحه ۸۳-۶۵.

- تمنایی، محمد؛ حسین حق شناس؛ هاشم کلاتری و خسرو آذری، ۱۳۹۴، ارائه روش مناسب محاسبه ظرفیت برای خطوط راه آهن ایران، چهاردهمین کنفرانس بین المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران، معاونت و سازمان حمل و نقل ترافیک.

- محمدزاده، سعید؛ ذاکری، جبارعلی و خورده بینان، محمد وریا. (۱۳۹۴). تحلیل حساسیت تنش و بیشینه تغییر مکان قائم سطح بالاست بر اساس مشخصات سیستم خطوط بالاستی راه آهن ایران. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۴۵(۷۸)، ۱۰۳-۱۱۴.

- میرمحمد صادقی، سیدجواد و هاشمی رضوانی، سیدفرشاد، ۱۳۹۰، بررسی تاثیر سرعت بر نشست خط در راه آهن های سریع السیر. پژوهش نامه حمل و نقل، دوره ۸، شماره ۴(۲۹)، صفحه ۴۲۴-۴۱۵.

- میرمحمدصادقی، سید جواد، (۱۳۸۷)، کتاب "اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن" چاپ اول، ایران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- یقینی، مسعود؛ مفاخری، زهرا؛ نیکو، نریمان. ۱۳۹۱، محاسبه ظرفیت استفاده شده در راه آهن ایران بر اساس روش UIC406 (مطالعه موردی: مسیر تهران- مشهد). پژوهش نامه حمل و نقل، سال نهم، شماره چهارم.

- نشریه شماره ۲۷۹، مشخصات فنی عمومی زیرسازی راه آهن

طبق برآورد صورت گرفته، دستیابی به تحکیم نهایی، برای بارگذاری با فواصل ۴ ساعت، ۳۰۰ سال طول خواهد کشید. بر اساس پارامترهای لحاظ شده در این تحقیق، تحکیم مرحله‌ای، در هر بارگذاری ۳۰ ثانیه‌ای، ۰/۱۳۹ درصد از تحکیم نهایی به دست آمد که با توجه به دوران سرویس دهی مدنظر برای زیرسازی سیستم حمل و نقل ریلی، زمان بهینه جهت فواصل عبور قطارها قابل تعیین است. با توجه به اینکه پارامترهای اصلی موثر بر مقدار نشست تحکیمی، یعنی ضریب تحکیم C_v و ضریب فشردگی C_c ، به کمک روابط بین پارامترها و با استفاده از ضریب نفوذپذیری K ، مدول الاستیسیته E و ضریب پواسون ν ، و نهایتاً با برابر قرار دادن نشست محاسبه شده از روابط مختلف به دست آمده است؛ و E ، K و ν ، جزء پارامترهای اختصاصی هر ماده است؛ بنابراین بدیهی است که با تغییر نوع خاک، این پارامترها نیز تغییر کند و به تبع آن همه پارامترهای حاصل از آنها و کلیه محاسبات تغییر خواهد کرد. و در صورتی که نشست ایجاد شده در شرایط تردد اشباع، در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای قرار نگیرد؛ با اصلاح فاکتورهای ویژه خاک بستر مسیر ریلی، تقویت و بهبود کیفیت مسیر، امکان پذیر است.

۶. پی‌نوشت‌ها

۱. از منظر ترافیکی، آنچه که به عنوان ظرفیت خط ریل شناخته می‌شود توانایی مسیر در عبور دادن تعداد مشخصی از وسایل حمل و نقل است که درحالت بیشینه به آن تردد (یا ضریب) اشباع خط ریلی نیز می‌گویند.

۷. مراجع

- اسماعیلی، مرتضی؛ نصرآزادانی، سید مسعود و سعادت راد، اصغر. (۱۳۸۹). بررسی اثر ژئوستتیکها بر افزایش مدول خط آهن بر اساس نتایج بارگذاری میدانی و مقایسه آن با نتایج تحلیل عددی. فصل‌نامه مهندسی حمل و نقل، ۱(۳)، ۱۳-۲۶.

“Modelling railway ballasted track settlement in vehicle-track interaction analysis”. *Transportation Geotechnics* 26.

– Hayashi, Yoshitsugu. Ram, KE Seetha, and Bharule, Shreyas. (Edit). (2020) “Handbook on High-Speed Rail and Quality of Life”. Asian Development Bank Institute. ISBN 978-4-89974-201-2 (Print). ISBN 978-4-89974-202-9 (PDF)

– Jiamin, Zhang. (2015). “Analysis on line capacity usage for China high speed railway with optimization approach”, *Transportation Research Part A* 77 (2015) 336–349.

– Jayalekshmi, S. and Elamathi, V. (2020). “A Review on Correlations for Consolidation Characteristics of Various Soils”. *Conf. Series: Materials Science and Engineering*, doi10.1088/1757-899X/1006/1/012007

– Kang, Gaoliang. “Influence and control strategy for local settlement for high-speed railway infrastructure.” *Engineering* 2.3 (2016): 374-379.

– Khan, Shah Nawaz. (2018). “Numerical analysis of deformation and stability in the formation for railway tracks (Master Thesis)”. Bauhaus University Weimar Germany.

– Kurhan, D. M. (2016) “Determination of Load for Quasi-static Calculations of Railway Track Stress-strain State”, *Acta Technica Jaurinensis*, 9(1), pp. pp. 83-96.

– Landex, A., Kaas, A.H., Schittenhelm, B. & Schneider-Tilli, J. (2006) “Practical use of the UIC 406 capacity leaflet by including timetable tools in the investigations”. *WIT Transactions on the Built Environment*, Vol 88. doi:10.2495/CR060631

– نشریه شماره ۳۹۴، دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر.

– Benamghar, A., and Boudjellal, M., (2017). “Comparative study of four consolidation settlement estimation methods of a railway embankment”. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 120, p. 06002). EDP Sciences.

– Chen, Renpeng, Jinmiao Chen, and Han-lin Wang. “Recent Research on the Track-Subgrade of High-Speed Railways.” In *China's High-Speed Rail Technology*, pp. 243-249. Springer, Singapore, 2018.

– Dahlberg, T. (2004). *Railway track settlements-a literature review*. Report for the EU project SUPERTRACK.

– Das, Braja M. (1983). “Advanced Soil Mechanics”. Taylor & Francis/Balkema. New York, USA, ISBN13: 978-0-415-42026-6 (hbk), ISBN13: 978-0-203-93584-2 (ebk)

– Fujiwara, Haruo, Shunji Ue, and Kazuya Yasuhara. “Secondary compression of clay under repeated loading.” *Soils and Foundations* 27, no. 2 (1987): 21-30.

– Fujiwara, Haruo, Toyotoshi Yamanouchi, Kazuya Yasuhara, and Shunji Ue. “Consolidation of alluvial clay under repeated loading.” *Soils and Foundations* 25, no. 3 (1985): 19-30.

– Gao, Mo, Leishan Zhou, and Yongjun Chen. “An alternative approach for high speed railway carrying capacity calculation based on multiagent simulation.” *Discrete Dynamics in Nature and Society* 2016 (2016).

– Grossoni, Ilaria. Powrie, William. Zervos, Antonis. Bezin, Yann. Le Pen, Louis. (2021).

- Rui Dias, Jose M. Goicolea, Felipe Gabaldón. (2008). “A study of the lateral dynamic behaviour of high-speed railway viaducts and its effect on vehicle ride comfort and stability”, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, ISBN 978-0-415-46844-2.
- Shtompel, A.M., Kondratenko, O.P., Bratchenko, O.V., Pashchenko, V.V. and Shunhua, Zhou, Binglong Wang, and Yao Shan. “Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area. Rail. Eng. Science 28, 129–145 (2020).
- Yoshikuni, Hiroshi and, Nakanodo, Hirofumi. (1974) “Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability”. Soils and foundations Vol. 14, No. 2.
- Zhou, Shunhua. Wang, Binglong. Shan, Yao. (2020)” Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area”. Rail. Eng. Science (2020) 28(2):129–145. doi: 10.1007/s40534-020-00214-x
- “UIC leaflet 406”, Capacity, UIC International Union of Railways, France, 2013.
- “UIC leaflet 719 & 722 Into IRS”. CEDEX. T&S–TTI common meeting (2018).
- “Upgrading of infrastructure in order to meet new operation and market demands”. Capacity4rail SCP3-GA-2013-605650
- Landex, Alex, Bernd Schittenhelm, Anders H. Kaas, and Schneider-Tilli.Jan (2008) “Capacity measurement with the UIC 406 capacity method”, WIT Transactions on The Built Environment, Vol 103, doi:10.2495/CR080061
- Li, Duo, and Selig, E.T. “Evaluation of railway subgrade problems.” Transportation research record 1489 (1995): 17.
- Likitlersuang Suched, Pholkainuwatra Phitsanu, Chompoorat Thanakorn, and Keawsawasvong, Suraparb. (2018). “Numerical modelling of railway embankments for high-speed trains constructed on soft soil”. Journal of GeoEngineering, Vol. 13, No. 3.
- Look, Burt G. (2007). “Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables”. Taylor & Francis/Balkema. ISBN 13: 978-0-415-43038-8 (hardback). ISBN 13: 978-0-203-94660-2 (e-book).
- Malmborg, J. Persson, P. Persson, K. (2022). “Numerical investigation of railway subgrade stiffening Critical speed and free-field vibrations”. Transportation Geotechnics 34.
- Parkinson, Tom, and Ian Fisher. Rail transit capacity. Vol. 13. Transportation Research Board, 1996.
- Powrie, W., Le Pen, L., Milne, D. and Thompson, D., 2019. Train loading effects in railway geotechnical engineering: Ground response, analysis, measurement and interpretation. Transportation Geotechnics, 21, p.100261.
- Roghani, Alireza. (2017). “A quantitative evaluation of the impact of soft subgrades on railway track structure”. A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. University of Alberta.

فرزانه نجدیاری، امین بهمن پور

فرزانه نجدیاری، درجه کاردانی رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۸۳، از دانشگاه علم و فرهنگ تهران و درجه کارشناسی ناپیوسته را در سال ۱۳۹۱، از دانشگاه ایوانکی، اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه وی، ژئوتکنیک حمل و نقل، مهندسی تونل، حمل و نقل ریلی و بهسازی خاک بوده و در سال ۱۴۰۱، در دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک را به اتمام رسانده است.



امین بهمن پور، درجه کارشناسی را در رشته مهندسی عمران، در سال ۱۳۸۳، از دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیر و درجه کارشناسی ارشد را در رشته مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک، در سال ۱۳۸۵ از دانشگاه صنعتی شریف اخذ نمود. وی در سال ۱۳۸۹، موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران، گرایش ژئوتکنیک از دانشگاه توکیو گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان، ژئوتکنیک دریایی، مهندسی شمع و ژئوتکنیک لرزه‌ای بوده و در حال حاضر، عضو هیات علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه آزاد اسلامی تهران، واحد علوم و تحقیقات است.

