

مدل سازی عددی دیوارهای مکانیکی خاک مسلح تثبيت یافته با مهار صفحه‌یی تحت بار ارتعاشی قطار سریع السیر

امیرسعید مرادی اندراب (دانشجوی دکتری)

امیرعلی زاد* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

علی نورزاد (دانشیار)

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی

مریم یزدی (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی

مهندسی عمران تهرانیف، پاییز ۱۴۰۲ (۵۱-۶۰، صص. ۳، شماره ۳۹، دردی ۲۹)

پیشرفت روزافزون جامعه بشری و افزایش جمعیت، نیاز به جابه جایی با سرعت بالا و استفاده از قطارهای پرسرعت را بیش از پیش مطرح کرده است. جابه جایی با سرعت بالا به وسیله قطارها نیازمند بستری مناسب برای عبور از روی مناطق مختلف دارای خاک نرم و جاوگیری از خارج نشدن قطار از ریل و خسارت های جانی و مالی است. تاکنون مطالعات متعددی در خصوص دیوارهای مکانیکی خاک مسلح تثبیت شده با مهارهای صفحه‌یی به صورت استاتیکی و آزمایشگاهی انجام شده است، اما تأثیر عبور قطارهای پرسرعت در دیوارهای مذکور به صورت عددی مشاهده نشده است. در مطالعه حاضر، به بررسی نتایج مدل سازی عددی سه بعدی تأثیر عبور قطار سریع السیر از روی دیوارهای مکانیکی خاک مسلح تثبیت شده با مهارهای صفحه‌یی با استفاده از نرم افزار PLAXIS ۳D پرداخته شده است. نتایج مدل سازی ها نشان داد که با افزایش تعداد صفحه های مهار یی به همراه کاهش ابعاد آنها، جابه جایی افقی و نشست در تاج دیواره کاهش یافته است.

amir.saeid.moradi@gmail.com
a.zad@iauctb.ac.ir
a.noorzad@sbu.ac.ir
m.yazdi@gmail.com

واژگان کلیدی: قطار پرسرعت تالیس، دیوار حائل تثبیت شده، دیوار مکانیکی خاک مسلح، مهار صفحه‌یی، سرعت عبور قطار، نرم افزار PLAXIS ۳D.

۱. مقدمه

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و گسترش شهرها، حمل و نقل ریلی از نقطه نظر امنیت و سرعت در حال گسترش است. نیاز به عبور خطوط ریلی از محیط های شهری و همچنین ضرورت پیاده سازی مسیرهای ریلی در مناطق خاص، ضرورت استفاده از دیوارهای حائل و خاکریزهای مسلح شده را نشان می دهد. بنابراین لازم است که عملکرد سازه های ژئوتکنیکی اخیر در برابر بارهای ارتعاشی حاصل از عبور قطار ارزیابی شود. پژوهش های مختلفی در زمینه ی بررسی قطارها و آثار عبور آنها از مناطق مختلف با شرایط متفاوت صورت گرفته است. مقدم و اشتری (۲۰۲۰)، عملکرد راه آهن بر روی خاک نرم و تأثیر بهسازی آن با استفاده از لایه ی مسلح کننده ی

ژئوگرید را در تماس با بستر خاکی بررسی کرده اند. ایشان از مدل سازی عددی در نرم افزار المان محدود PLAXIS نسخه ی ۸/۶ به منظور بررسی اثر سرعت قطار، ارتفاع خاکریز در ژئوگرید، جابه جایی جانبی خاکریز، ضریب ایمنی کل خط آهن و سطح گسیختگی در زیر ریل استفاده کرده و دریافته اند که برخلاف شرایط استاتیکی، بیشینه ی جابه جایی افقی در حین عبور از قطار در پایین خاکریز رخ نمی دهد و بیشینه ی جابه جایی در وسط ارتفاع خاکریز اتفاق می افتد.^[۱] فرناندز رویز^۱ و همکاران (۲۰۲۰)، در خصوص افزایش سرعت بحرانی در راه آهن های سریع السیر با استفاده از ستون های سنگی و با اشاره به طول بحرانی مطالعاتی را انجام دادند و دریافته اند که در خاک های همگن، تأثیر ستون سنگی در سرعت بحرانی ناچیز است.^[۲] هادی و الزبیبی^۲ (۲۰۲۱)، با استفاده از نرم افزار PLAXIS ۳D به

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۸/۷، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۰/۱۷، پذیرش ۱۴۰۱/۱۱/۲۵.

استناد به این مقاله:

مرادی اندراب، امیرسعید، زاد، امیرعلی، نورزاد، علی و یزدی، مریم، ۱۴۰۲. مدل سازی عددی دیوارهای مکانیکی خاک مسلح تثبیت یافته با مهار صفحه‌یی تحت بار ارتعاشی قطار سریع السیر. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۳)، صص. ۵۱-۶۰. DOI:10.24200/J30.2023.61135.3151

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف در نشست مسیر خط آهن و در فاز دیگر به بررسی اثر پارامترهایی، مثل: اندازه‌ی شبکه، عمق در نظر گرفته شده‌ی لایه‌ی بستر، عرض مدل و بازه‌ی زمان و در یک مرحله‌ی دیگر، اثر پدیده‌ی تداخل^۳ در نشست سیستم خط آهن پرداخته‌اند. نتایج ایشان نشان داد که عرض مدل المان محدود لازم برای بررسی اثر پدیده‌ی تداخل باید ۴ برابر فاصله‌ی بین دو قطار باشد.^[۲] صدیقی مقدم و همکارانش (۲۰۲۲)، تأثیر بهسازی بستر زیر خط راه‌آهن با استفاده از ستون‌های اختلاط عمیق معمولی تی‌شکل^۴ را با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D بررسی کردند و دریافتند که الگوی تک‌خطی در میان هر سه الگوی مورد نظر برای ستون‌های DCM و TDM، بهترین عملکرد را در کاهش نشست و جلوگیری از تشکیل نشست تفاضلی در بستر شل زیر مسیر قطار داشته است.^[۴] کاظم‌زاده و همکارانش (۲۰۲۲)، نیز تأثیر استفاده از ستون‌های سنگی در بستر خاک نرم تحت عبور قطار با سرعت بالا را با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D بررسی کردند و دریافتند که افزایش سختی محوری ژئوگریدها، باعث کاهش نشست‌های کل و نامتقارن ناشی از عبور قطار پر سرعت می‌شود.^[۵]

دیوارهای حائل، سازه‌های ژئوتکنیکی هستند که به لحاظ مدت زمان بهره‌برداری به دو گروه سرویس‌دهی کوتاه‌مدت یا موقت و سرویس‌دهی بلندمدت یا دائمی دسته‌بندی می‌شوند. از دیوارهای حائل موقت می‌توان به انواع گودبرداری‌های شهری و از دیوارهای حائل دائمی می‌توان به دیوارهای مکانیکی (دیوارهای خاک مسلح) مجاور اتوبان‌ها و دیوارهای اجرا شده در مناطق کوهستانی اشاره کرد. تحلیل و بررسی عملکرد دیوارهای حائل در برابر بارهای دینامیکی مختلف، از ملزومات طراحی سازه‌های اخیر است؛ در همین راستا، پژوهش‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته است. گولر^۵ و همکارانش (۲۰۱۱)، با استفاده از آزمایش میز لرزه‌یی، به بررسی رفتار دیوارهای حائل مسلح شده با ژئوگرید تحت اثر بار دینامیکی زلزله پرداختند و دریافتند که دیوار به صورت ارتجاعی رفتار کرده و جابه‌جایی‌های پسماند مشاهده شده در جلوی دیوار، بسیار کوچک بوده است.^[۶] بورژوا^۶ و همکارانش (۲۰۱۲)، یک مدل المان محدود خاص به منظور شبیه‌سازی سه‌بعدی رفتار دیوارهای مکانیکی تثبیت شده ارائه کردند و نشان دادند که مدل خطی و مدل ارتجاعی دوخطی^۷، هر دو نتایج بسیار نزدیکی با نتایج مدل‌سازی آزمایشگاهی مورد استفاده برای اعتبارسنجی داشته‌اند.^[۷] پاپور و همکارانش (۲۰۱۵)، نیز به صورت‌های عددی و آزمایشگاهی به بررسی پاسخ دینامیکی دیوارهای مکانیکی تثبیت‌یافته با تسمه‌های فلزی تحت عبور بار قطار پرداختند و نتایج آزمایشگاهی پژوهش ایشان نشان داد که جابه‌جایی دیوار، نیروی کششی در مسلح‌کننده‌ها و تنش‌ها در مصالح خاکریز همگی تابعی از بسامد هستند.^[۸] کورفدیر^۸ و همکارانش (۲۰۱۷)، با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی به بررسی پاسخ دینامیکی دیوار مکانیکی مسلح شده تحت عبور قطار پرسرعت پرداختند و دریافتند که سرعت عبور بار، تأثیر کمی در پارامترهای بررسی شده در پژوهش ایشان، نظیر: جابه‌جایی عمودی، تنش عمودی در خاکریز و نیروهای کششی در تسمه‌ها دارد.^[۹] ارتوگرویل و ارتوگرویل^۹ (۲۰۱۸)، در یک مطالعه‌ی عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC v۶/۰ و با استفاده از روش تفاضل محدود به بررسی اثر دینامیکی عبور قطار از روی دیوار مکانیکی تثبیت‌یافته با تسمه‌های فولادی پرداختند و دریافتند که نصب قالب‌های ژئوفوم به صورت افقی در زیر لایه‌ی زیربالاست، باعث کاهش بار دینامیکی بر روی نمای دیوار به میزان ۷۲٪ شده است.^[۱۰] لانگ سوپان^{۱۰} و همکارانش (۲۰۱۸)، به مقایسه‌ی عملکرد دیوارهای مکانیکی تثبیت‌یافته با ژئوگرید و تسمه‌ی فولادی تحت تأثیر بار هارمونیک دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D پرداختند و نتایج مدل‌سازی نشان داد که دیوارهای با ارتفاع بالا در برابر ارتعاش‌های قوی، آسیب‌پذیرند و نیازمند مسلح‌کننده‌های قوی هستند.^[۱۱]

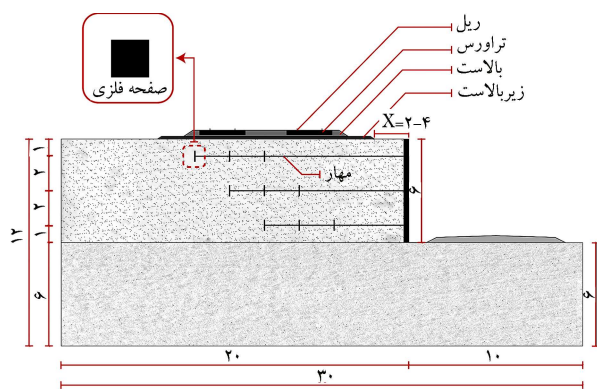
سازه‌های نگهدارنده‌ی خاک، از قبیل: دیوارهای حائل، پایه‌ی پل‌ها، دیوارهای دریایی، سپرهای فولادی و مهار خاک‌ها عمدتاً برای تحمل فشارهای جانبی طراحی می‌شوند. آنها معمولاً برای حفظ پایداری خود نیازمند سیستم‌های مهاریه مانند مهارهای صفحه‌یی هستند. مهارهای صفحه‌یی، گونه‌یی از مهارها هستند که می‌توانند از صفحات فولادی، صفحه‌های بتنی پیش‌ساخته، صفحه‌های بتن‌ریزی شده، ورقه‌های تیرچوبی و مثل آن ساخته شوند. جلالی مقدم و همکارانش (۲۰۱۸)، برای اولین بار در یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی از مهارهای صفحه‌یی به صورت قائم به منظور پایداری دیوارهای حائل استفاده کردند و نشان دادند که استفاده از آرایش پنج مهار، باعث عملکرد بهتر دیواره در مبحث ظرفیت باربری نسبت به آرایش لوزی و مربعی بوده است.^[۱۲] ایشان در ادامه‌ی مطالعاتشان، (۲۰۱۹)، به بررسی اثر پارامترهایی نظیر شکل و اندازه‌ی صفحات مهاریه بر پایداری دیواره پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دیوارهای ساخته‌شده با صفحات مهاریه دایره‌یی شکل، بیشترین ظرفیت باربری نسبت به بقیه‌ی دیوارها را دارند.^[۱۳] محمودی مهریزی و جلالی مقدم (۲۰۲۰)، با انجام مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی، عملکرد دو نوع رایج مهارهای مکانیکی، یعنی مهارهای ماریچ و جایگذاری مستقیم در پایداری دیوارهای حائل را ارزیابی و تحلیل کردند و دریافتند که افزایش تعداد صفحه‌ی مهارهای ماریچ از ۱ به ۲ و تغییر نوع مهارهای صفحه‌یی دایره‌یی و مربعی از اندازه‌ی کوچک به متوسط، به طور متوسط ۶۰٪ ظرفیت باربری پاشنه‌ی بارگذاری را افزایش داده است.^[۱۴]

در گذشته، پژوهش‌های مختلفی در ارتباط با بررسی پاسخ دینامیکی و بررسی رفتار دیوارهای مکانیکی تثبیت‌یافته با ژئوگرید و تسمه‌ی فولادی تحت بارهای مختلف دینامیکی نظیر قطار و زلزله انجام شده است؛ اما عملکرد دیوارهای مذکور که با مهارهای صفحه‌یی تثبیت شده‌اند، در برابر بارهای دینامیکی به صورت‌های عددی و آزمایشگاهی تا به حال بررسی نشده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی عملکرد دیوارهای مکانیکی تثبیت‌یافته با مهارهای صفحه‌یی در برابر عبور قطار پرسرعت بوده است. تأثیر پارامترهایی، نظیر: تعداد صفحه‌ها، فاصله‌ی خط آهن از تاج دیواره و سرعت قطار در عملکرد دیواره بحث و بررسی شده است.

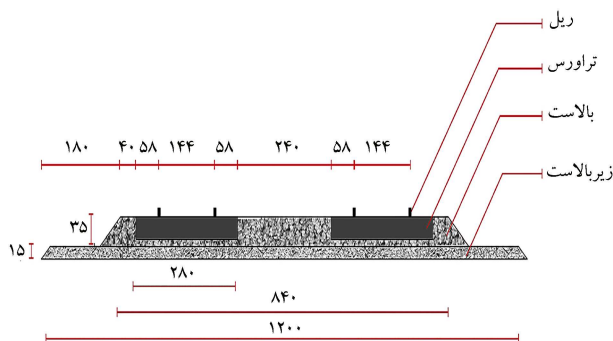
۲. مدل‌سازی عددی

۱.۲. راستی‌آزمایی نرم‌افزار

به منظور راستی‌آزمایی نتایج مدل‌سازی عددی و همچنین نرم‌افزار 3D 20۱۸ PLAXIS از نوشتار مدل‌سازی سه‌بعدی عبور بار قطار متحرک از روی بستر بهسازی شده با ستون‌های اختلاط عمیق T شکل، که توسط صدیقی مقدم و همکاران (۲۰۲۲) انجام شده،^[۴] استفاده شده است. ایشان برای مدل‌سازی عبور بار قطار از روی خاکریز از نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 3D (۲۰۱۸) استفاده کرده‌اند. طول و عرض مدل به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۳۵ m بوده و طبق متن نوشتار، به دلیل شرایط زمین‌شناسی، عمق لایه‌های خاک برای مدل‌سازی، ۱۵m در نظر گرفته شده است. همچنین برای کاهش بازتاب امواج در مرزهای مدل، از مرزهای جاذب و استاندارد در مرزهای مدل استفاده شده است. یک مسیر ریلی معمولی، شامل: ریل‌ها، گیره‌های ریلی یا پابندها (سیستم چفت و بست ریلی) و تراورس است، در حالی که تمام عناصر مسیر ذکر شده روی بالاست و خاک زیرین با لایه‌های مختلف خاک قرار دارند. ریل‌ها به وسیله‌ی المان Beam در راستای طول ۱۰۰ متری و با سطح مقطع مستطیلی معادل مدل شده‌اند. مشخصات



شکل ۳. نمایی از مدل سازی دیوار خاک مسلح.

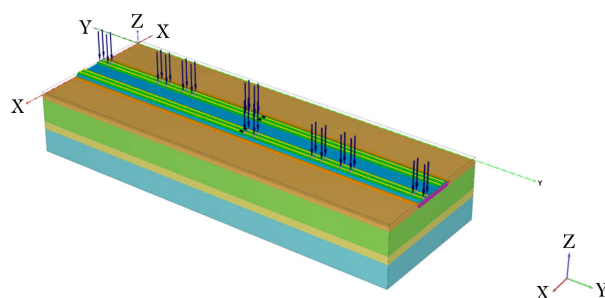


شکل ۴. جزئیات خاکریز.

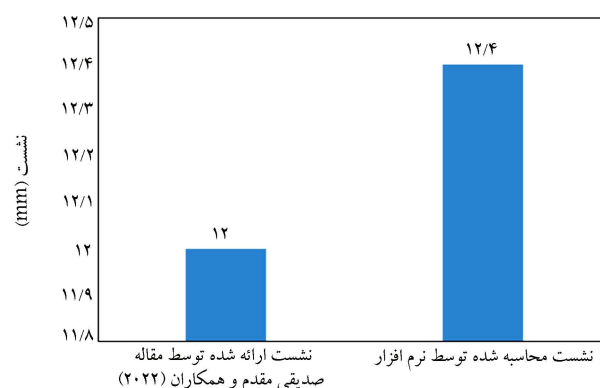
مدل به ترتیب ۱۰۰، ۳۰ و ۱۲ m و طول دیواری خاک مسلح، ۲۰ m بوده است. در پژوهش حاضر، مسیر خط آهن از نوع بالاستی و متشکل از زیربالاست، بالاست، ریل، پابند و تراورس بوده و جزئیات خاکریز مدل سازی شده در شکل ۴ مشاهده می شود. به منظور جلوگیری از نفوذ دانه های لایه ی بالاست به خاک بستر، لایه ی زیربالاست با ضخامت ۱۵ cm و با ضخامت ۱۲ m مدل سازی شده است. لایه ی بالاست به منظور عبور دو خط آهن دارای ضخامت برابر با ۳۵ cm و عرض ۹/۲ m و همچنین شیب طرفین لایه ی بالاست و زیربالاست، ۱ به ۱/۵ در نظر گرفته شده است. در هر ردیف از مسیر خط آهن، از تراورس های بتنی BV۰ که از بتن پیش تنیده ساخته شده اند، استفاده شده است. تراورس ها دارای طولی معادل ۲۶۰ cm بودند و از لایه ی لایه ی بالاست، ۴۰ cm فاصله داشتند. فاصله ی تراورس ها از یکدیگر ۶۰ cm بوده است. در هر خط آهن، دو ردیف ریل از نوع UIC۶۰ بر روی تراورس ها در طول مسیر قرار گرفته اند. برای اتصال ریل ها به تراورس ها از پابند پاندرول استفاده شده است.

۳.۲. مدل سازی

به منظور کاهش آثار ناشی از شرایط مرزی، با استفاده از آنالیز ابعادی، عرض مدل ۳۰ m و به منظور بررسی عبور قطار از روی دیوار مکانیکی تثبیت یافته، طول مدل برابر با ۱۰۰ m (معادل طول قطار) در نظر گرفته شده است. برای جلوگیری از تأثیر مرزها در نتایج، شرایط مرزی در هر سه جهت، و اسکوز در نظر گرفته شده و المان ها براساس پیش فرض نرم افزار، ۱۰ گره بی بوده اند. در پژوهش حاضر، از مشخصات هندسی قطار پرسرعت تالیس^{۱۱} به منظور مدل سازی بار قطار استفاده شده است. تالیس، یکی از قدیمی ترین و سریع ترین قطارهای جهان بوده است که در سال ۱۹۹۶ آغاز به کار کرده است. قطار سریع السیر برقی تالیس در مسیر آمستردام



شکل ۱. نمایی از هندسه ی مدل سازی شده جهت راستی آزمایی.



شکل ۲. مقایسه ی میان نشست به دست آمده در نوک ستون اختلاط عمیق.

مقطع ریل استفاده شده در نوشتار مذکور، مطابق مشخصات ریل UIC-۶۰ بوده است. پابندها به وسیله ی المان Node-to-Node-Anchor با ضخامت ۳۰ cm مدل سازی شده اند. هر تراورس به وسیله ی دو پابند به ریل ها متصل شده است. تراورس های استاندارد BV۰ به وسیله ی المان Beam مدل سازی و ۱۶۶ تراورس با فاصله ی مرکز تا مرکز ۶۰ cm در مدل جایگذاری شده اند. در شکل ۱، شماتیکی از هندسه ی مدل مشاهده می شود.

براساس نتایج به دست آمده از نوشتار صدیقی مقدم و همکارانش (۲۰۲۲)،^[۴] با افزایش ضریب شکل ستون ها، نشست به وجود آمده در نوک ستون تحت عبور برای قطار افزایش یافته است. به منظور بررسی و راستی آزمایی نرم افزار ذکر شده، ضریب شکل برابر با ۱ جهت بررسی و مقایسه انتخاب شده است. مقایسه ی میان نتایج نشان می دهد که نشست ارائه شده در نوشتار اخیر برای عبور قطار با سرعت ۵۵ m/s از روی ستون های اختلاط عمیق برابر با ۱۲ mm بوده است که مشابه با نتیجه ی ارائه شده در نوشتار حاضر به صورت میله یی در شکل ۲ مشاهده می شود. نتایج به دست آمده از مدل سازی نرم افزاری نشان داد که نشست نوک ستون برابر با ۱۲/۴ mm بوده است. تفسیر نتایج، نشان دهنده ی اختلاف کم میان نتایج به دست آمده از مدل سازی انجام گرفته و نتایج ارائه شده در نوشتار صدیقی مقدم و همکارانش است که در محدوده ی قابل قبول است.

۲.۲. هندسه ی مدل و پروفیل خاک

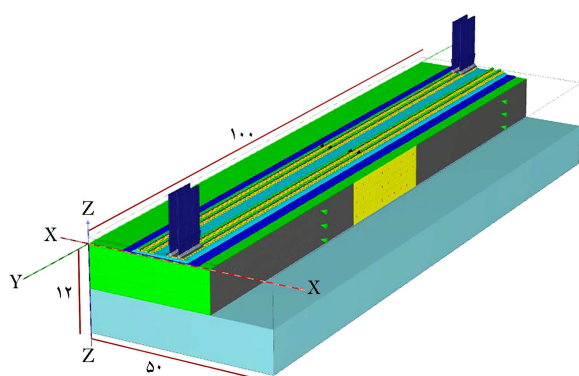
در پژوهش حاضر، به منظور مطالعه ی عددی از نرم افزار PLAXIS ۳D ۲۰۲۰ استفاده شده است. در شکل ۳، نمای جانبی از دیوار مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه یی مشاهده می شود. خاک بستر در پژوهش حاضر ۶ m و از نوع شن رس دار (GC) بوده است. خاکریز پشت دیوار از خاک ماسه یی با ارتفاع ۶ m تشکیل شده است. همچنین براساس طراحی و تحلیل ابعادی صورت گرفته، طول، عرض و ارتفاع

جدول ۱. ویژگی های هندسی و وزن قطار سریع السیر تالیس. [۱۵]

موتور قطار	حامل های کناری	حامل های مرکزی
۲	۲	۶
carriages		
۴	۳	۲
axles		
۲۲/۱۵	۲۱/۸۴	۱۸/۷۰
$L_t(m)$		
۱۴/۰۰	۱۸/۷۰	۱۸/۷۰
$L_b(m)$		
۱۷۰۰۰	۱۴۵۰۰۰	۱۷۰۰۰
$M_t(kg)$		
۱۵۲۶۷	۱۲۶۷۴	۱۵۱۷۰
$M_s(kg)$		
۱۷۳۳	۱۸۳۰	۱۸۲۶
$M_u(kg)$		

جدول ۲. مشخصات مکانیکی پایه و پیشرفته برای لایه های بالاست و زیر بالاست. [۱۶]

ردیف	لایه ی خاک	m	C' (kPa)	φ' (degree)	Ψ (degree)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E_{δ}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	v_{ur}	P_{ref}	k^{nc}	f
۱	بلاست	۰/۵	۲۰	۴۵	۵	۲۲	۲۷۵	۲۳۰	۵۵۰	۰/۲	۱۰۰	۰/۳	۰/۹
۲	زیربلاست	۰/۵	۱۰	۴۰	۵	۲۱	۲۵۰	۲۱۰	۵۰۰	۰/۲	۱۰۰	۰/۳	۰/۹



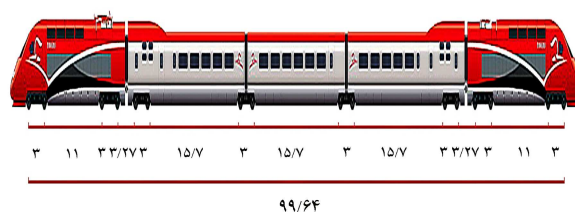
شکل ۶. نمایی از مدل سازی سه بُعدی انجام شده با نرم افزار PLAXIS.

بین ۱۰ تا ۱۰۰ (Hz) در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی لایه های بالاست و زیر بالاست از مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است، زیرا براساس نتایج به دست آمده از پژوهش شهرکی و همکارانش (۲۰۱۴)، [۱۶] استفاده از مدل رفتاری سخت شونده با کرنش های کوچک و به دلیل وجود تنش های عمودی در لایه های بالایی، نتایج غیرواقعی ارائه می شود. مشخصات لایه های بالاست و زیر بالاست در جدول ۲ و مشخصات پارامترهای خاکریز پشت دیواره و خاک بستر در جدول ۳ ارائه شده اند.

به منظور مدل سازی ریل و تراورس از المان تیر Beam در نرم افزار PLAXIS استفاده شده است. مشخصات مکانیکی ریل مشابه با خصوصیات ریل (UIC۶۰) و تراورس ها مشابه با تراورس بتنی پیش تنیده BV۰ بوده است. مشخصات ریل ها و تراورس در جدول ۴ ارائه شده است.

پابندهای استفاده شده در پژوهش حاضر از نوع پابند پاندول E ۲۰۳۹ و مهارها از میلگرد AIII با قطر ۳۲mm بوده اند که به وسیله ی المان Node to node anchor مدل سازی و مشخصات مکانیکی آنها، که خاصیت کشسان خمیری داشتند، در جدول ۵ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر از مهارهای صفحه ای به منظور تسلیح خاکریز پشت دیواره استفاده شده است. مهارهای صفحه ای مدنظر، از جنس فولاد و مربعی شکل



شکل ۵. قطار سریع السیر تالیس. [۱۵]

(هلند) تا پاریس (فرانسه) حرکت و در ۲۶ ایستگاه توقف می کند. در اواخر سال ۲۰۱۵، ریل های ترن مذکور تا شهر دورتمند آلمان نیز به سایر مسیرهای آن اضافه شد. تالیس، فاصله ی بیش از ۵۰۰ کیلومتری ما بین گاریس و آمستردام را در زمانی کمتر از ۳/۵ ساعت طی می کند و با توانایی دستیابی به بیشینه ی سرعت ۳۰۰ Km/h، یکی از قطارهای سریع السیر برقی جهان در سال ۲۰۱۸ به حساب می آید. در شکل ۵، هندسه ی قطار سریع السیر تالیس مشاهده می شود. همچنین مشخصات هندسی و وزن آن نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

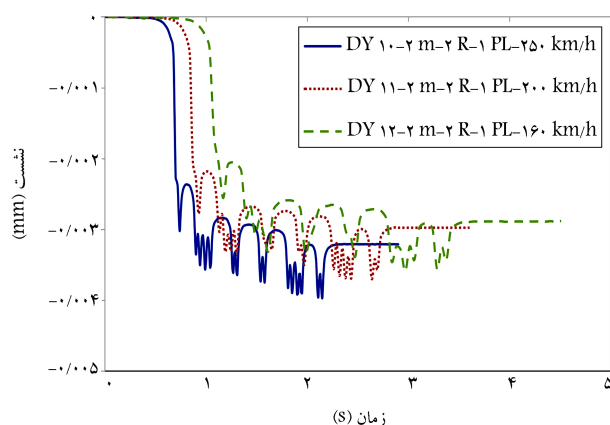
ریل ها با طول ۱۰۰m در راستای Y توسط المان تیر با مشخصات ریل UIC۶۰ مدل سازی شده اند. به منظور در نظر گرفتن خاصیت ارتجاعی ریل، پابندها نیز به ارتفاع معادل ۳۰cm توسط المان مهار مدل شده و فاصله ی میان دو ریل در یک خط آهن، ۱۴۳/۵cm بوده است. تراورس ها نیز به وسیله ی تیرهایی با سطح مقطع مستطیل شکل با مشخصات مکانیکی تراورس بتنی از نوع بتن پیش تنیده BV۰ با طول ۲۶۰cm و فاصله ی مرکز تا مرکز ۶۰cm مدل سازی شده اند. نمای کلی مدل سازی سه بُعدی انجام شده در شکل ۶ مشاهده می شود.

۴.۲. مشخصات مصالح

پروفیل خاک، شامل: ۶m شن رس دار (GC) در بستر و ۶m خاکریز ماسه ای پشت دیواره بوده است. به منظور مدل سازی خاک از مدل رفتاری سخت شونده با کرنش های کوچک استفاده شده است، زیرا که مدل مذکور، قابلیت در نظر گرفتن تغییرات سختی خاک با کرنش را داشته و همچنین میرایی هیستریزیس را نیز در نظر گرفته است. برای تخمین ضرایب میرایی رایلی، میرایی ۵٪ و کمترین و بالاترین بسامد

جدول ۳. مشخصات پارامترهای خاک بستر و خاک پرکننده پشت دیوار. [۱۶]

ردیف	لایه ی خاک	m	C' (kPa)	φ' (degree)	Ψ (degree)	γ_{unsat} (kN/m ³)	E _{oed} ^{ref} (MPa)	E _{ur} ^{ref} (MPa)	$\dot{\epsilon}_{ur}$	G _{d=0} ^{ref} (Kpa)	γ_o/γ
۱	خاک بستر	۰/۵	۲۰	۴۰	۵	۲۲	۱۳۰	۱۵۰	۳۰۰	۰/۲	$۱۰^{-۲} \times ۱/۹۸$
۲	خاک پرکننده	۰/۵	۵	۳۰	۰	۱۹	۶۰	۶۰	۱۸۰	۰/۳	$۱۰^{-۲} \times ۱/۸۱$



شکل ۸. نمودار جابه جایی قائم زیر ریل نزدیک به دیوار در زمان عبور قطار در سرعت های ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (km/h).

به منظور بررسی میزان حساسیت نتایج مدل به ابعاد شبکه، آنالیز حساسیت شبکه انجام شده است. پنج مدل با مشخصات یکسان با اندازه ی شبکه از Very Coarse تا Medium ساخته و جابه جایی افقی دیوار در مدل های ذکر شده اندازه گیری شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، جابه جایی افقی مدل با تغییر اندازه ی شبکه از Medium به موارد ریزتر، تغییر چشمگیری نداشته است؛ در نتیجه، به منظور کاهش زمان تحلیل دینامیکی، اندازه ی شبکه، Medium در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، سه سرعت ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (Km/h) به منظور بررسی تأثیر سرعت عبور قطار از روی دیوار مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه یی در نظر گرفته شدند که با استفاده از Movement Load و استفاده از روش Movement Function مدل شدند. برای بررسی تأثیر تعداد و اندازه ی صفحه های مهار، سه حالت تک، دوتایی و سه تایی مدل سازی شدند و در نهایت، تعداد مسیرهای عبوری به صورت تک و دو مسیر برای بررسی تأثیر عبور قطار در نظر گرفته شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. تأثیر سرعت عبور قطار

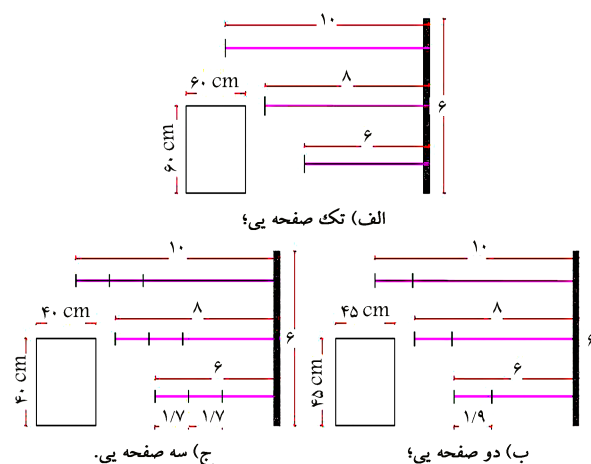
نتایج به دست آمده از تأثیر سرعت عبور قطار در نشست زیر ریل، جابه جایی افقی تاج دیواره و جابه جایی افقی کل دیواره به ترتیب در شکل های ۸ الی ۱۰ مشاهده می شوند. لازم به ذکر است که اعداد نوشته شده در جلوی قسمت راهنمای نمودارها در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج شکل ۸، نشست زیر ریل (در خاک پشت دیوار) در سرعت ۲۵۰ Km/h برابر با ۳/۲۱، در

جدول ۴. مشخصات ریل و تراورس. [۱۶]

نوع	تراورس	ریل
مدل	B۷۰	UIC۶۰
A (m ^۲)	$۵/۱۳ \times ۱۰^{-۳}$	$۷/۷ \times ۱۰^{-۳}$
γ (kN/m ^۳)	۲۵	۷۸
E (kPa)	۳۶×۱۰^۶	۲۰۰×۱۰^۶
I _r (m ^۴)	۰/۰۲۵۳	$۳/۰۵۵ \times ۱۰^{-۵}$
I _r (M ^۴)	$۲/۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۵/۱۳ \times ۱۰^{-۶}$

جدول ۵. مشخصات پابند پاندرول و مهارها E. ۲۰۳۹. [۱۶]

مصارف	پابند	مهار
بیشینه ی نیروی کششی	F _{max,com}	۳۱۲ kN
بیشینه ی نیروی فشاری	F _{max,com}	۱۷۱۶ kN
سختی محوری	EA	۲×۱۰^۶ kN



شکل ۷. نمایی از صفحه های فولادی.

بوده و به صورت تک، دوتایی و سه تایی استفاده شده اند. طول میله های مهار استفاده شده از بالا به پایین کم شده و به ترتیب برابر با ۸، ۱۰ و ۶ m بوده است. فواصل افقی و عمودی میله های مهار نیز برابر با ۲ m و آرایش قرارگیری میله های مهار نیز مربعی انتخاب شده است. براساس پژوهش انجام گرفته توسط مقدم و همکاران (۲۰۱۹)، [۱۲] آرایش مربعی، بحرانی ترین آرایش قرارگیری مهارهای صفحه یی نسبت به یکدیگر هستند و کمترین ظرفیت باربری و بیشترین جابه جایی افقی به وجود آمده در نمای دیواره را دارند. مشخصات صفحه های فولادی استفاده شده در پژوهش حاضر در جدول ۶ و نمایی از آنها در شکل ۷ ارائه شده است.

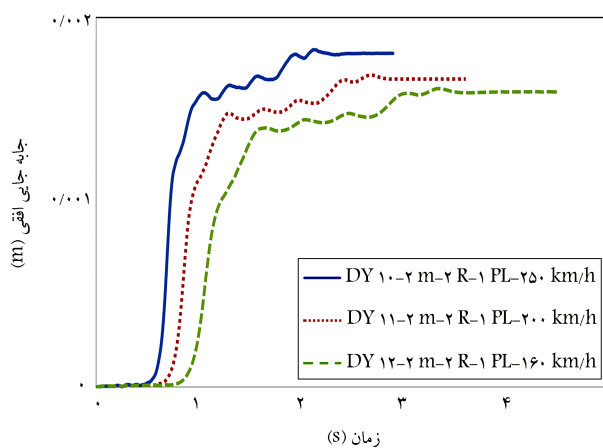
جدول ۶. مشخصات صفحات مهاري فولادی استفاده شده.

ابعاد (m)	ضخامت (mm)	وزن صفحه‌ی فولادی (kg)	فاصله‌ی صفحه‌ها (m)
تک صفحه‌یی	۲۰	۵۶/۵۲	-
دو صفحه‌یی	۱۸	۲۸/۲۶	۱/۹
سه صفحه‌یی	۱۵	۱۸/۸۴	۱/۷

جدول ۷. راهنمای مدل‌ها.

سرعت عبور قطار (Km/h)	تعداد صفحات مهاري	تعداد خطوط ریلی	فاصله از دیوار	شماره‌ی مدل
۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (Km/h)	۱PL-۲PL-۳PL	۱R-۲R	۲ m	DY
۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (Km/h)	تک صفحه‌یی، دو صفحه‌یی و سه صفحه‌یی	رفت - برگشت	-	-

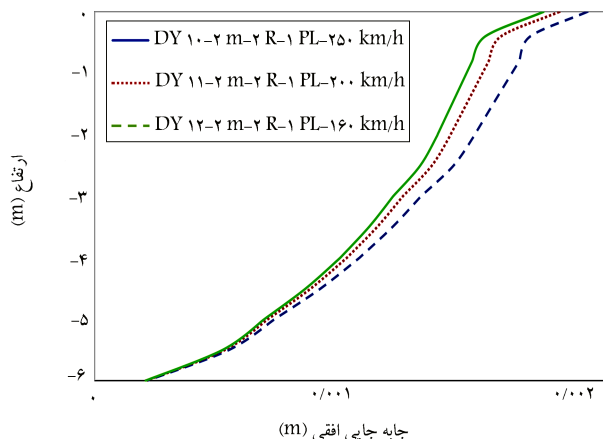
۲۵۰ جابه‌جایی افقی برابر با ۱/۸mm، با ۲۰۰ Km/h مساوی ۱/۶۷mm و تحت اثر قطار با سرعت ۱۶۰ Km/h، ۱/۱۶mm بوده است. نتایج بیانگر این مطلب است که افزایش سرعت عبور قطار از ۱۶۰ به ۲۵۰ (Km/h) منجر به افزایش جابه‌جایی افقی دیوار به میزان ۱۳٪ شده است. در شکل ۱۰، نیز جابه‌جایی افقی دیوار نسبت به عمق در سرعت‌های مذکور بررسی شده است که بیشینه‌ی جابه‌جایی در تاج دیوار در ۲۵۰ Km/h به میزان ۲/۰۱mm، در سرعت ۲۰۰ Km/h برابر با ۱/۹mm و در سرعت ۱۶۰ Km/h به میزان ۱/۸۴mm بوده است. نتایج نشان می‌دهند با افزایش سرعت قطار از ۱۶۰ به ۲۵۰ (Km/h)، جابه‌جایی افقی کل دیوار مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه‌یی به میزان ۱۰٪ افزایش یافته است. با افزایش سرعت عبور قطار، ارتعاش‌های شکل گرفته در خاکریز پشت دیواره بیشتر شده و جابه‌جایی ذرات خاک افزایش یافته است.



شکل ۹. نمودار جابه‌جایی افقی تاج دیوار در زمان عبور قطار در سرعت‌های ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (km/h).

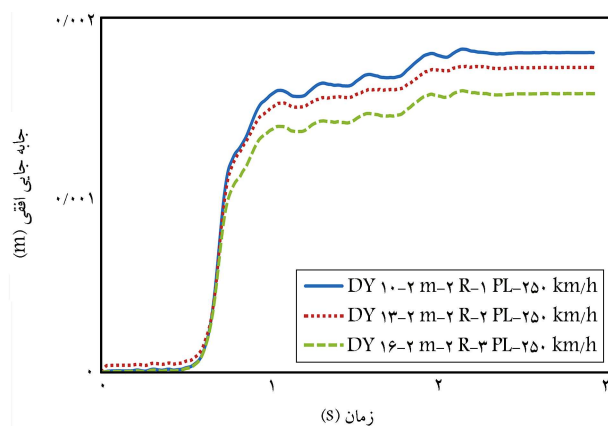
۲.۳. تأثیر تعداد صفحه‌های مهاري

خطوط هم‌تراز جابه‌جایی قائم شکل گرفته در پشت دیواره‌ی خاک مسلح در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که بیانگر نحوه‌ی عملکرد صفحه‌ها در مقابل نشست است. در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، تغییرات نشست زیر ریل، جابه‌جایی افقی تاج دیواره و جابه‌جایی افقی کل دیواره درازاء تغییر در تعداد صفحه‌های مهاري مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۱۲، نشست در زیر ریل در حالت تک‌مهاري، ۳/۲۱ mm و در حالت سه‌مهاري ۲/۹۴ mm بوده است که به مفهوم کاهش نشست به میزان ۹٪ است. شکل ۱۳، نیز نشانگر جابه‌جایی بیشینه در تاج دیوار در حالت تک‌مهاري، ۱/۸ mm و در حالت سه‌مهاري، ۱/۵۷ mm است که به معنای کاهش جابه‌جایی افقی تاج دیواره به میزان ۱۵٪ است. همچنین در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد صفحه‌های مهاري، جابه‌جایی افقی کل دیوار مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه‌یی کاهش یافته است. جمع‌بندی نتایج اخیر نشان می‌دهد که افزایش تعداد صفحه‌های مهاري همراه با کاهش ابعاد صفحه‌ها، منجر به افزایش سطح تماس صفحه‌های مهاري با خاک شده و در نتیجه باربری سیستم خاکریز-مهار صفحه‌یی پشت دیوار افزایش یافته است. افزایش باربری دیواره در نهایت منجر به کاهش نشست زیر ریل تحت عبور قطار سریع‌السیر و کاهش جابه‌جایی دیواره شده و با مصرف میزان یکسان از آهن، نتایج بهتری به دست آمده است.

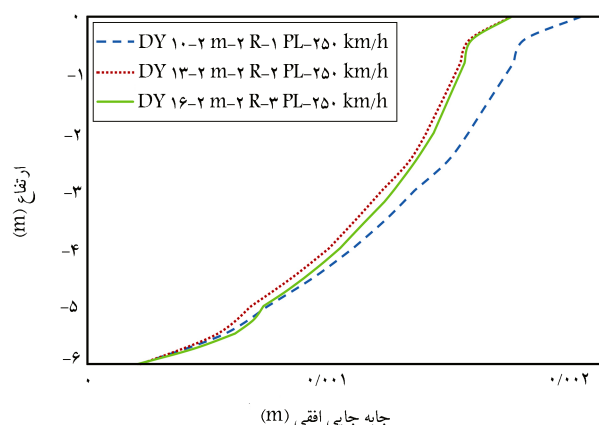


شکل ۱۰. نمودار جابه‌جایی افقی دیوار در سرعت‌های ۱۶۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ (km/h).

سرعت ۲۰۰ Km/h برابر با ۲/۹۷ و در سرعت ۱۶۰ Km/h برابر با ۲/۸۸mm بوده است؛ که نشان می‌دهد افزایش سرعت قطار از ۱۶۰ به ۲۵۰ (Km/h) باعث افزایش نشست در زیر ریل به میزان ۱۱٪ شده است. شکل ۹، نیز نشان‌دهنده‌ی جابه‌جایی افقی شکل گرفته در تاج دیواره‌ی خاک مسلح تثبیت یافته با مهارهای صفحه‌یی تکی است که در اثر عبور قطار با سرعت‌های Km/h



شکل ۱۳. نمودار جابه جایی افقی تاج دیوار در زمان عبور قطار در حالت های تک صفحه ای، دو صفحه ای و سه صفحه ای.

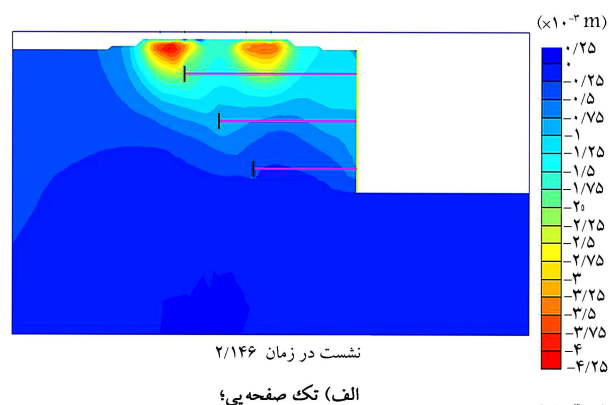


شکل ۱۴. نمودار جابه جایی افقی دیوار در حالت های تک صفحه ای، دو صفحه ای و سه صفحه ای.

در شکل ۱۵، نیز خطوط هم تراز جابه جایی های افقی شکل گرفته در پشت دیواره در اثر عبور قطار با سرعت بالا و با تغییر تعداد صفحه ها مشاهده می شود؛ که مطابق آن با افزایش تعداد صفحه های مهار در پشت دیواره ی خاک مسلح، جابه جایی افقی شکل گرفته کاهش یافته است.

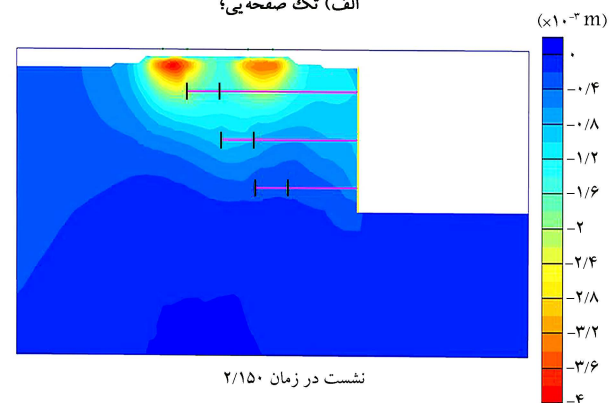
۳.۳. تأثیر تعداد مسیرهای عبور قطار

در شکل ۱۶، تغییرات به وجود آمده در نشست زیر ریل در برابر زمان دینامیکی سپری شده برای عبور قطار با سرعت 250 Km/h به صورت تک مسیره و دو مسیره مشاهده می شود. براساس نتایج به دست آمده عبور قطار به صورت همزمان (رفت و برگشت) از روی دیوار منجر به پدید آمدن نشست بیشتری در زیر ریل شده است. افزایش تعداد مسیرهای عبور قطار از یک به دو منجر به افزایش نشست به وجود آمده در زیر ریل به میزان ۵٪ شده است. در شکل ۱۷، جابه جایی افقی اتفاق افتاده در تاج دیواره در اثر عبور قطار با سرعت ثابت 250 Km/h از دیوار خاک مسلح مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه ای به صورت تکی مشاهده می شود. تحلیل نتایج به دست آمده نشان داد در شرایطی که فاصله ی نزدیک ترین مسیر عبور قطار از تاج دیواره ۲m است، کاهش تعداد مسیرهای عبور قطار از یک به دو منجر به افزایش جابه جایی افقی تاج دیواره به میزان ۲۰٪ شده است. براساس نتایج شکل ۱۸، افزایش تعداد مسیرهای عبور قطار



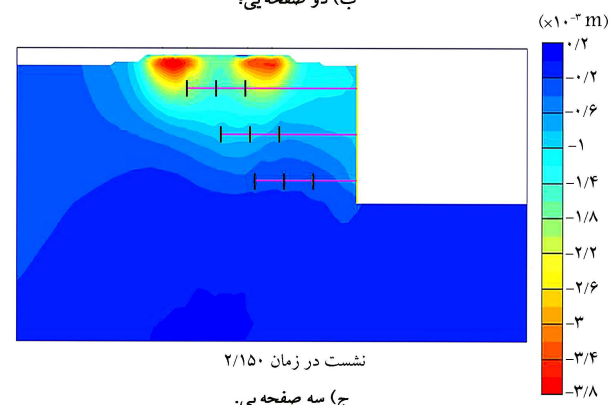
نشست در زمان ۲/۱۴۶

الف) تک صفحه ای؛



نشست در زمان ۲/۱۵۰

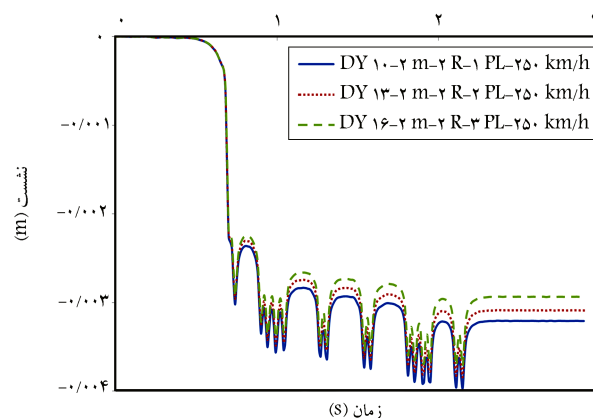
ب) دو صفحه ای؛



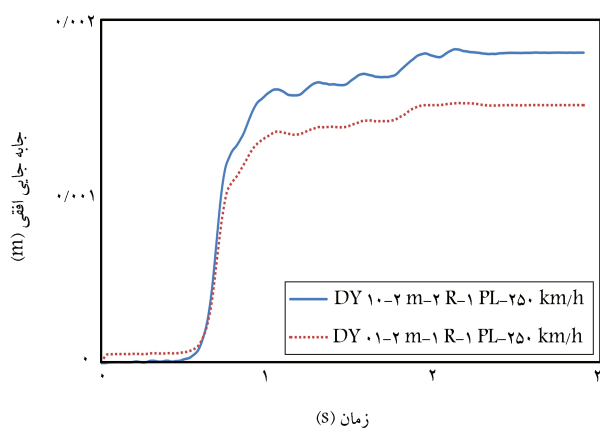
نشست در زمان ۲/۱۵۰

ج) سه صفحه ای.

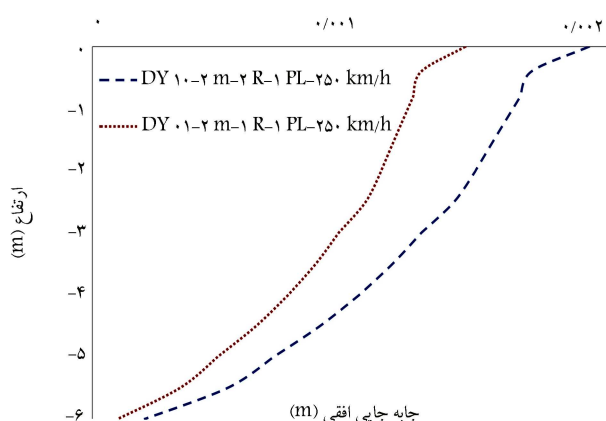
شکل ۱۱. خطوط هم تراز جابه جایی قائم در حالت های مختلف.



شکل ۱۲. نمودار جابه جایی قائم زیر ریل نزدیک به دیوار در حالت های تک صفحه ای، دو صفحه ای و سه صفحه ای.



شکل ۱۷. نمودار جابه جایی افقی تاج دیوار در زمان عبور قطار در حالت های عبور یک قطار و دو قطار رفت و برگشت.



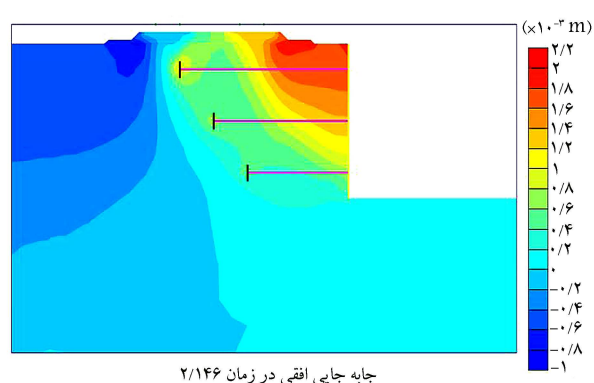
شکل ۱۸. نمودار جابه جایی افقی دیوار در حالت های عبور یک قطار و دو قطار رفت و برگشت.

از یک به دو، منجر به افزایش جابه جایی افقی به وجود آمده در ارتفاع دیواره شده است.

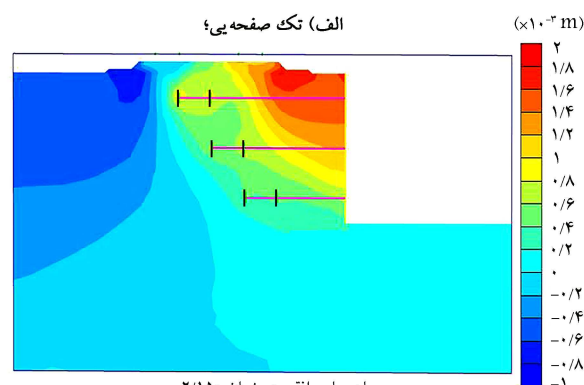
۴. نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، به بحث و ارائه ی نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی سه بعدی عبور قطار از روی دیوارهای خاک مسلح مکانیکی تثبیت یافته با مهارهای صفحه یی پرداخته شده است. مدل سازی عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS ۳D صورت گرفته و به بررسی تأثیر عوامل مختلفی نظیر: سرعت عبور قطار، تعداد صفحه های مهار، تأثیر تعداد مسیرهای عبور قطار پرداخته شده است. به طور خلاصه این نتایج به دست آمده است:

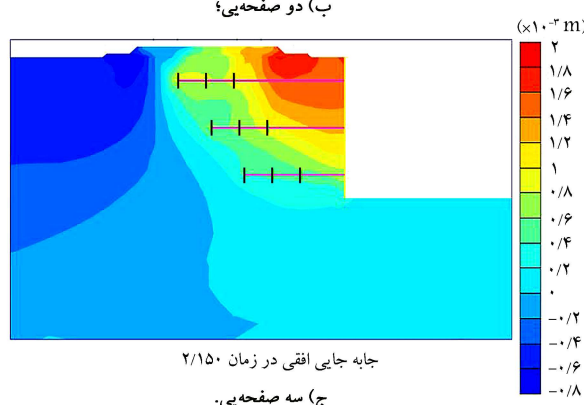
۱. افزایش سرعت عبور قطار از ۱۶۰ به ۲۵۰ Km/h باعث افزایش نشست به وجود آمده در زیر ریل تا ۱۱٪ و افزایش جابه جایی افقی تاج دیواره به میزان ۱۳٪ شده است. همچنین با افزایش سرعت قطار، جابه جایی افقی شکل گرفته در ارتفاع دیوار افزایش یافته و بیشینه ی میزان آن در تاج دیواره بوده است. افزایش سرعت قطار باعث افزایش نیروی دینامیکی ناشی از بار قطار و وارد بر دیوار شده و در نتیجه، جابه جایی های دیواره افزایش یافته است. استفاده از مهارهای صفحه یی به عنوان مسلح کننده در خاک ریز پشت دیوار خاک مسلح،



جابجایی افقی در زمان ۲/۱۴۶

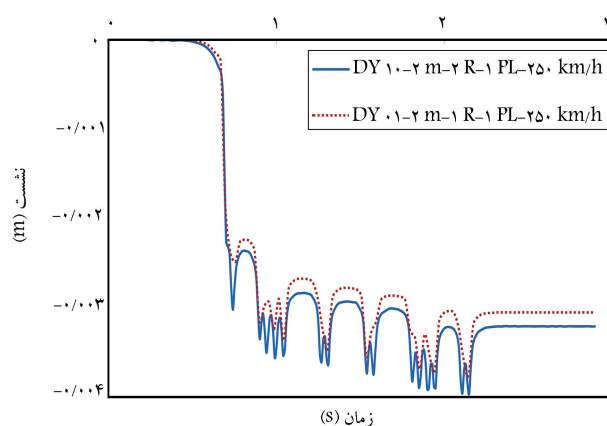


جابجایی افقی در زمان ۲/۱۵۰



جابجایی افقی در زمان ۲/۱۵۰

شکل ۱۵. خطوط هم تراز جابه جایی افقی در حالت های مختلف.



زمان (s)

شکل ۱۶. نمودار جابه جایی قائم زیر ریل نزدیک به دیوار در حالت های عبور یک قطار و دو قطار رفت و برگشت.

تکی و چندتایی با توجه به مزیت‌های آنها در کنترل جابه‌جایی‌های به وجود آمده در خاکریز پشت دیوار، در دیوارهای مهارشده‌ی پشت به پشت خاک مسلح تحت سربارهای مختلف استاتیکی و دینامیکی پیشنهاد می‌شود؛

۳. افزایش تعداد مسیرهای عبور قطار از یک مسیر به دو مسیر رفت و برگشت منجر به افزایش نشست زیر ریل‌ها و کاهش جابه‌جایی افقی تاج دیوار به ترتیب به میزان ۵ و ۲۰ درصد شده است. کاهش تعداد مسیرهای عبور قطار منجر به کاهش سربار روی دیوار و همچنین کاهش ارتعاش‌های به وجود آمده ناشی از عبور قطار شده است. کاهش ارتعاش‌های به وجود آمده در اثر عبور قطار به طور متقابل باعث کاهش جابه‌جایی‌های افقی و قائم شکل گرفته در ذرات خاکریز پشت دیوار می‌شود. با توجه به دور بودن قطار برگشت از دیوار مکانیکی انتظار می‌رفت جابه‌جایی‌های شکل گرفته در دیوار مشهود نباشد، اما حرکت قطار برگشت باعث تشدید انتشار امواج در محیط خاکی و در نتیجه افزایش جابه‌جایی‌های دیواره شده است؛

۴. در مهارهای صفحه‌ی پیشنهاد می‌شود فاصله‌ی بین صفحه‌ها بیش از ۳ برابر ضخامت صفحه در نظر گرفته شود تا از تداخل حباب‌های تنش جهت بهره‌گیری بیشینه از ظرفیت باربری جلوگیری شود.

منجر به کاهش جابه‌جایی‌های شکل گرفته در اثر عبور بار قطار شده است. لذا، استفاده از مسلح‌کننده‌های مذکور به جای مسلح‌کننده‌هایی، نظیر تسمه‌ی فولادی و ژئوگریدها در خاکریز دیوارهای خاک مسلح را می‌توان توصیه کرد؛

۲. با افزایش تعداد صفحه‌های مهاری از یک به سه عدد و کاهش ابعاد آن از ۶۰ به ۴۰ (cm) و همچنین کاهش ضخامت آن از ۲۰ به ۱۵ (mm)، نشست ۹٪ و جابه‌جایی افقی ۱۵٪ کاهش یافته‌اند. افزایش تعداد صفحه‌های مهاری منجر به افزایش سطح تماس بین صفحه‌ها و خاکریز پشت دیوار و نیز افزایش ظرفیت باربری سیستم خاکریز پشت دیوار در برابر بارهای دینامیکی شده است. در نتیجه، نشست شکل گرفته در زیر ریل و جابه‌جایی افقی تاج دیواره کاهش یافته است. صفحه‌های مهاری با تعداد بیشتر و ابعاد کوچک‌تر در مقایسه با صفحه‌های مهاری با ابعاد بزرگ‌تر و تعداد کمتر باعث کنترل و کاهش نیروی دینامیکی وارد بر دیوار شده و در نتیجه، جابه‌جایی‌های شکل گرفته در دیوار کاهش یافته است. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت که در مسلح‌سازی به وسیله‌ی صفحه‌های مهاری، استفاده از چند صفحه‌ی کوچک به جای یک صفحه‌ی بزرگ، بسیار در تثبیت و پایداری دیوار بسیار مؤثرتر است. استفاده از مهارهای صفحه‌ی به صورت

پانویس‌ها

1. Fernández-Ruiz
2. Hadi & Alzabeebee
3. Inference
4. T-Shaped and Conventional Cement-Soil Deep Mixing Piles
5. Guler
6. Bourgeois
7. Bilinear Elastic
8. Corfdir
9. Ertugrul
10. Langcuyan
11. Thalys

منابع (References)

1. Moghadam, M.J. and Ashtari, K., 2020. Numerical analysis of railways on soft soil under various train speeds. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7(1), pp.103-125. DOI:10.1007/s40515-019-00096-5.
2. Fernández-Ruiz, J., Miranda, M., Castro, J. and et al., 2021. Improvement of the critical speed in high-speed ballasted railway tracks with stone columns: A numerical study on critical length. *Transportation Geotechnics*, 30, p.100628. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100628>.
3. Hadi, M.A. and Alzabeebee, S., 2023. Development of a finite element model to study the settlement of ballasted railway tracks subjected to two adjacent moving trains. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(5), pp.733-748. <http://dx.doi.org/10.1007/s40515-022-00245-3>.
4. Sedighi Moghadam, M., Zad, A., Yazdi, M. and et al., 2022. Performance of T-shaped and conventional cement-soil deep mixing piles to stabilize soft base of high-speed trains. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(10), pp.1-15 <https://doi.org/10.1080/19386362.2022.2096324>.
5. Kazemzadeh, M., Zad, A. and Yazdi, M., 2022. Numerical modeling of improvement of soft soil with stone columns under high-speed train crossing. *Civil Infrastructure Researches*, 7(2), pp.157-168. <https://doi.org/10.22091/cer.2021.7397.1304>.
6. Guler, E., Alexiew, D. and Basbug, E., 2011. Dynamic behavior of geogrid reinforced segmental block walls under earthquake loads. *Proceedings of the 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Santiago, Chile.
7. Bourgeois, E., Le Kouby, A. and Soyez, L., 2012. Influence of the strip-backfill interaction model in the analysis of the behavior of a mechanically stabilized earth wall. *Soils and Foundations*, 52(3), pp.550-561. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.012>.
8. Payeur, J.-B., Corfdir, A. and Bourgeois, E., 2015. Dynamic behavior of a Mechanically Stabilized Earth wall under harmonic loading: Experimental characterization and 3D finite elements model. *Computers and Geotechnics*, 65, pp.199-211. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.12.001>.
9. Corfdir, A., Bourgeois, E. and Payeur, J.B., 2017. Numerical simulation of the response of a reinforced wall to a high speed train passage. *International Journal for Numerical and Analytical*

- Methods in Geomechanics*, 41(11), pp.1285-1303. <https://doi.org/10.1002/nag.2674>.
10. Ertugrul, O.L. and Ertugrul, N.A., 2018. Analysis of train induced vibrations and investigation of preventive measures for reinforced earth walls. In *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, V*, pp.247-257. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
 11. Langcuyan, C.P., Gao, Y. and Won, M.S., 2018. Effects of surface vibrations on the behavior of panel-type MSE walls. World Congress on Advances in Civil, Environmental, & Materials Research.
 12. Moghadam, M.J., Zad, A., Mehrannia, N. and et al., 2018. Experimental evaluation of mechanically stabilized earth walls with recycled crumb rubbers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(5), pp.947-957. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.04.012>.
 13. Moghadam, M.J., Zad, A., Mehrannia, N. and et al., 2019. Experimental study on the performance of plate anchor retaining walls. *International Journal of Physical Modeling in Geotechnics*, 19(3), pp.128-140. <https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00040>.
 14. Mahmoudi-Mehrizi, M.E. and Jalali-Moghadam, M., 2020. Comparing the performance of helical anchors and direct-embedded plate anchors in cohesionless soil for top-down retaining walls stabilization: An experimental study. *Journal of GeoEngineering*, 15(1), pp.31-45. [https://doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).3).
 15. Degrande, G. and Schillemans, L., 2001. Free field vibrations during the passage of a thalys high-speed train at variable speed. *Journal of Sound and Vibration*, 247(1), pp.131-144. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2001.3718>.
 16. Shahraki, M., Sadaghiani, M.R.S., Witt, K.-J. and et al., 2014. 3D modeling of train induced moving loads on an embankment. *Plaxis Bulletin*, 36(2014), p.10-15.