

# بررسی اثر پارامترهای هندسی گروه شمع بر سرعت بحرانی خط ریلی قطار سریع‌السیر

(مطالعه موردی: خط ریلی قطار سریع‌السیر تهران - اصفهان)

مقاله علمی - پژوهشی

مرتضی صباغی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مرتضی اسماعیلی\*، استاد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
مهدی خرقانی، استادیار، دانشکده مهندسی معدن، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m\_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۸۸-۶۹

## چکیده

یکی از چالش‌های موجود در خط ریلی سریع‌السیر تهران-اصفهان، محدوده عبوری از دریاچه نمک استان قم است که با توجه به وجود خاک بسیار نرم و بالا بودن تراز آب زیرزمینی در این محدوده، نشست‌های قابل توجهی در اثر عبور قطار سریع‌السیر ایجاد می‌شود که به منظور کنترل نشست‌ها، شمع‌های بتنی درجاریز در بستر خاکی اجرا خواهد شد. اما با توجه به سرعت بالای قطار در این مسیر و وجود بستر نرم، علاوه بر مشکل نشست، انتظار می‌رود که پدیده تشدید نیز رخ دهد. علیرغم تحقیقاتی که تاکنون بر روی اثر بهسازی بستر خاکی نرم با شمع بر روی مقدار سرعت بحرانی که منجر به وقوع پدیده تشدید می‌شود، انجام شده است، همچنان ابهاماتی در خصوص تاثیر و یا عدم تاثیر اجرای شمع بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر ریلی وجود دارد. لذا در پژوهش پیش رو، ابتدا با مدل‌سازی عددی شمع منفرد و مقایسه نتایج آن با داده‌های بدست آمده از آزمایش بارگذاری فشاری استاتیکی در محل، ظرفیت باربری شمع و مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک در محل بدست آمده و سپس مسیر ریلی در محدوده مذکور با استفاده از مدل سه بعدی اجزاء محدود تحت سرعت‌های عبوری مختلف قطار (از سرعت کیلومتر بر ساعت ۶۰ الی ۴۵۰ کیلومتر بر ساعت) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته و مقدار سرعت بحرانی مسیر تعیین گردیده است که نتایج نشان‌دهنده وقوع پدیده تشدید در سرعت کیلومتر بر ساعت ۱۰۰ معادل سرعت موج ریلی لایه اول خاک بستر است. سپس به منظور بررسی تاثیر اجرای گروه شمع در بستر نرم بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر، آرایش هندسی مختلف گروه شمع با تغییر فواصل افقی شمع‌ها از  $5D$  ( $D$  قطر شمع) الی  $2D$  تحلیل شده است که نتایج نشان‌دهنده تاثیر بهسازی بستر نرم با شمع‌های بتنی بر افزایش مقدار سرعت بحرانی است؛ به نحوی که مقدار سرعت بحرانی به ۲۵۰ سرعت کیلومتر بر ساعت افزایش پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی: رفتار دینامیکی، سرعت بحرانی، قطار سریع‌السیر، گروه شمع، مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود

## ۱-مقدمه

در طی سال‌های اخیر اکثر کشورها استفاده از خطوط ریلی سریع‌السیر (با سرعت سیر بیش از ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت جهت جابجایی مسافران در دستور کار خود قرار داده‌اند که (نشریه شماره ۳۹۴)) را به عنوان یک گزینه مطمئن و به صرفه

بعد از این اتفاق، تحقیقات عددی و تحلیلی گسترده‌ای بر روی موضوع سرعت بحرانی و مسائل مربوط به آن توسط محققین مختلفی همچون Grundmann et al. (1999), Bian and Chen, Sheng et al. (2004) (2006), Auersch (2008), Bian et al. (2016), Costa et al. (2015) و ... صورت پذیرفت که اغلب آن‌ها مبتنی بر مدل‌سازی عددی ۲ یا ۲/۵ بعدی بوده و بارگذاری ناشی از عبور قطار را به صورت یک بار سیکلیک و یا بار حرکتی یک چرخ قطار در نظر گرفته شده است. مهمترین محدودیت این نوع مدل‌سازی‌ها صرف‌نظر از همزمانی تأثیر چرخ‌های قطار در حال حرکت بر محیط پیرامونی و سازه خط است که خط‌هایی را در مقادیر جابجایی، سرعت و شتاب ایجاد می‌کند. در ادامه Hall (2003) با استفاده از دو مدل اجزاء محدود ۳ بعدی و ۲/۵ بعدی و با در نظر گرفتن رفتار خطی مصالح، ارتعاشات ناشی از عبور قطار سریع‌السیر در بستر خاکی را مورد بررسی و تحلیل قرار داد. این محقق با ابزاربندی بخشی از مسیر ریلی مابین شهرهای Goteborg و Malmo در کشور سوئد مقدار جابجایی، سرعت و شتاب وارده بر خط ریلی را در اثر عبور قطار سریع‌السیر اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های عددی مقایسه نمود. نتایج بدست آمده مبین آن بود که گرچه مدل‌های عددی ۲/۵ بعدی برای بررسی تأثیرات قطعی ناشی از ارتعاش زمین می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد لیکن نتایج حاصل از آن‌ها با خطا همراه است و انجام تحلیل سه بعدی جهت رسیدن به نتایج بهتر و دقیق‌تر ضروری است.

Sayeed and Shahin (2016) به منظور شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی مسیر ریلی و بستر خاکی زیر آن در اثر عبور قطار سریع‌السیر یک مدل سه بعدی اجزاء محدود با در نظر گرفتن بار حرکتی همه چرخ‌های قطار به صورت یک بار ضربه‌ای مثلثی شکل بر روی سه تراورس مجاور هم ایجاد نمودند و اثر پارامترهای مختلفی از جمله رفتار غیر خطی مصالح، مقدار مدول الاستیسیته خاک بستر و ضخامت آن، مقدار بار چرخ‌ها و هندسه قطار را بر روی سرعت بحرانی مسیر بررسی کردند. این محققین به این نتیجه رسیدند که سرعت بحرانی مسیر ریلی همیشه برابر سرعت موج ریلی لایه بستر خاکی نمی‌باشد و به وجود و یا عدم وجود سنگ بستر، مشخصات لایه بالاست، ضخامت لایه بستر خاکی و ... بستگی دارد. و لذا با

وجه تمایز آن با خطوط ریلی معمولی، سرعت بالای حرکت قطار در ضمن حفظ ایمنی سیر و حرکت می‌باشد. در کنار مزایای یاد شده یکی از مسائل مهمی که طی سال‌های اخیر توجه محققین را به خود جلب کرده است، پدیده ارتعاشات محیطی و مشکلات ناشی از آن برای ساکنین اطراف خطوط پر سرعت، کارگاه‌های صنعتی خاص و بناهای تاریخی بوده است. در این میان در برخی موارد با افزایش سرعت سیر و رسیدن به سرعت بحرانی و وقوع پدیده تشدید دینامیکی، مشکلاتی نیز در بستر خط ریلی ایجاد شده که به صورت نشست‌های ماندگار پیش‌رونده بروز پیدا کرده است. Miller & Pursey (1995) بیان می‌کنند که ۶۷ درصد از امواج تنش ناشی از بارگذاری دینامیکی بر روی یک پی دایره‌ای به صورت امواج ریلی در سطح لایه خاکی، ۲۶ درصد به صورت امواج برشی و ۷ درصد به صورت امواج فشاری منتشر می‌شود. لذا، در اثر عبور قطار نیز انتظار می‌رود بخش عمده‌ای از امواج دینامیکی تنش ناشی از بارگذاری چرخ‌های قطار به صورت امواج ریلی در لایه‌های خاک منتشر شود. لذا، سرعت موج ریلی بستر خاکی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین سرعت بحرانی ناشی از فرکانس طبیعی بستر خاکی دارد.

مشاهدات صورت گرفته در خطوط ریلی کشورهای اروپایی نظیر فرانسه، آلمان، سوئیس، هلند و انگلستان نشان می‌دهد که وقتی سرعت قطارهای سریع‌السیر به سرعت موج ریلی لایه بستر خاکی نزدیک شده است، افزایش قابل توجهی در نشست مسیر ریلی ایجاد شده است (Dieterman and Wolfert and Dieterman, Metrikine (1997)). به عنوان نمونه مسیر ریلی قطار سریع‌السیر مابین شهرهای Göteborg و Malmö در کشور سوئد است که مدت کوتاهی بعد از افتتاح این خط، مشاهده شد که در بخش‌هایی از مسیر که از مناطق دارای خاک سست عبور می‌کند، ارتعاشات بیشتری در مسیر ریلی در حوالی سرعت عبوری ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت ایجاد می‌شود که این موضوع نگرانی‌هایی را در خصوص ایمنی خط ایجاد می‌کرد. Madchus & Kaynia (2000) با اندازه‌گیری‌های میدانی و انجام مدل‌سازی‌های عددی به این نتیجه رسیدند که سرعت ۲۳۵ کیلومتر بر ساعت همان سرعت بحرانی مسیر است که در این سرعت پدیده تشدید رخ می‌دهد.

این ساده‌سازی برای شرایط استفاده از سیستم شمع و عرشه قابل قبول است ولی در مسیرهای ریلی که در زیر لایه بالاست بر روی شمع‌های اجرا شده در بستر خاکی، یک لایه ژئوسینتتیک پهن می‌شود به علت آن‌که فرض در نظر گرفتن کرنش مساوی خاک و شمع درست نمی‌باشد، استفاده از این ساده‌سازی صحیح نیست (Tang et al. (2019)). لذا برخی از محققین سیستم گروه شمع در بستر خاکی را به طور کامل مدل‌سازی نمودند.

در این زمینه Thach et al. (2013) اثر شمع‌های بتنی در جاریز بر روی مقدار سرعت بحرانی خط ریلی Jing-Hu را در کشور چین با استفاده از یک مدل سه بعدی اجزاء محدود بررسی کردند. این خط ریلی شهر پکن را به شانگهای متصل نموده و بخشی از این خط ریلی بر روی بستر خاکی رس سیلت‌دار سست واقع شده است که ضخامت این لایه برابر ۱۱/۵ متر است. این محققین به منظور بررسی تاثیر بهسازی اجرای شمع‌های بتنی بر روی مقدار سرعت بحرانی، مدل عددی را یکبار در حالت بدون حضور شمع‌های بتنی و بار دیگر با در نظر گرفتن شمع‌های بتنی ایجاد کردند. جهت اطمینان از صحت عملکرد مدل عددی، نتایج حاصل از آن را با نتایج به دست آمده از روش تحلیلی ارایه شده توسط Krylov (1995) اعتبارسنجی کردند. نتیجه این تحقیق نشان داد که در دو سرعت ۲۰ و ۶۰ متر بر ثانیه که به ترتیب معادل سرعت موج رایلی لایه بستر خاک رس سیلت‌دار و لایه خاک دانه‌ای در خاکریز مسیر ریلی است، بیشینه نشست در خاکریز اتفاق می‌افتد که همان سرعت‌های بحرانی مسیر ریلی است. اما با اجرای شمع‌های بتنی، بستر خاکی رس سیلت‌دار سست بهسازی شده و دیگر بیشینه نشست در سرعت ۲۰ m/s اتفاق نمی‌افتد و در نتیجه مقدار سرعت بحرانی مسیر افزایش یافته و مقادیر نشست‌ها به میزان ۶۲/۵ درصد کاهش یافته است.

Tang et al. (2019) به منظور بررسی اثر شمع‌های بتنی بر روی رفتار دینامیکی مسیر ریلی و مقدار سرعت بحرانی مسیر با استفاده از مدل سه بعدی اجزاء محدود تحقیقاتی بر روی این موضوع ترتیب دادند. این محققین شمع‌های بتنی را به صورت یک المان یک بعدی تیر مدل‌سازی نمودند و اندرکنش بین شمع‌ها و خاک را به صورت گیردار در نظر گرفتند. نتایج این محققین بر خلاف نتیجه‌گیری Thach et al. (2013) نشان داد که حضور شمع‌های بتنی صرفاً در کاهش نشست موثر

توجه به مقادیر نشست‌های محاسبه شده در سرعت‌های مختلف عبوری توصیه کردند که سرعت بهره برداری یک خط ریلی همواره کمتر از ۷۵ درصد سرعت بحرانی مسیر ریلی باشد. در تحقیق یاد شده به علت مقیاس بزرگ مدل‌سازی مسیر ریلی (ابعاد مسیر ریلی مدل‌سازی شده توسط Sayyed and Shahin (2016) ۱۲ متر × ۳۶ متر × ۸۰ متر و دارای ۲۸۵،۰۰۰ المان بود) و پیچیده بودن اعمال بارگذاری چرخ‌های قطار به صورت بار ضربه‌ای مثالی شکل تحلیل مدل نیازمند زمان زیاد و استفاده از کامپیوترهای پر قدرت بوده است. در ادامه Ling Li et al. (2018) به منظور کاهش زمان تحلیل و کم کردن تعداد المان‌ها، در مرزهای مدل سه بعدی مسیر ریلی از المان‌های نیم بی نهایت استفاده کردند که با این کار از بازتاب امواج دینامیکی منتشره از مرزهای مدل جلوگیری می‌شود. همچنین، به منظور شبیه‌سازی بار دینامیکی ناشی از عبور قطار سریع‌السیر، هر چرخ قطار به صورت یک بلوک مدل متحرک روی ریل مدل نموده اند. به منظور افزایش مقدار سرعت بحرانی خط ریلی در بسترهای نرم دو راهکار بهسازی وجود دارد (Madhus et al. (2004): ۱- افزایش سختی و مقاومت خاک بستر خط ریلی؛ ۲- افزایش سختی خمشی طولی روسازی خط ریلی. روش‌های مختلفی در زمینه بهسازی خاک بستر و تاثیر آن‌ها بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان به روش اجرای ستون‌های خاک-سیمان در بستر خاکی (Carlsten and Ekström (1996) و Halkola (1999)، اجرای ستون‌های تزریق پر فشار (Sonderman and Töth (2001) و Burke (2000)) و سایر روش‌های اختلاط عمیق (Terashi (2003) اشاره کرد که نتایج نشان‌دهنده کاهش نشست بستر خط ریلی است. در زمینه افزایش سختی خمشی نیز راهکارهایی از جمله افزایش ضخامت خاکریز روسازی، اجرای سیستم شمع و عرشه در زیر روسازی (Esveld (2001) و یا استفاده از مسلح کننده‌های ژئوگریدی وجود دارد. معمولاً در تحقیقات صورت گرفته در زمینه استفاده از پی‌های عمیق (شمع) در بستر خاکی خطوط ریلی به منظور ساده‌سازی در هندسه مدل‌سازی عددی، المان‌های شمع مدل نمی‌شوند و بستر خاکی بهسازی شده با شمع به صورت یک لایه مختلط معادل مشخصات فیزیکی لایه خاک و شمع در نظر گرفته می‌شود.

فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قم و اصفهان دارای ایستگاه است. قسمتی از مسیر از مسیری ۸۲+۰۰۰ کیلومتری تقریبی الی ۱۰۲+۰۰۰ از محدوده دریاچه نمک استان قم عبور می‌کند که با توجه به وجود خاک بسیار نرم و بالا بودن سطح تراز آب زیرزمینی در این محدوده، نشست‌های قابل توجهی در اثر عبور قطار سریع‌السیر ایجاد می‌شود. منطقه مورد مطالعه در پژوهش پیش رو در ۸۶+۲۹۵ کیلومتری مسیر ریلی قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان و در محدوده دریاچه نمک استان قم واقع شده است. (شکل ۱)

## ۲-۱- پارامترهای ژئوتکنیکی

این محدوده یک دریاچه منقرض شده بوده که تحت فرآیند تجمع نمک‌زایی، سطح خاک تا عمق تقریبی ۴/۵ متری دارای نمک است. بر اساس گمانه حفاری شده در محل، تا ۱۲/۵ متر رس به همراه رگه‌هایی از سیلت (CL)، از ۱۲/۵ تا ۲۵/۶ متر ماسه به همراه مقدار کمی رس (SP-SC)، از ۲۵/۶ تا ۲۸/۵ متر رس به همراه رگه‌هایی از سیلت (CL) و از ۲۸/۵ تا ۳۵ متر ماسه به همراه مقدار کمی رس (SP-SC) است. با توجه به لاگ گمانه حفر شده، مقاومت خاک در ۸ متر اول نرم، در ۴/۵ متر بعدی سخت، در ۱۳/۱ متر بعدی متراکم تا نیمه متراکم، در ۲/۹ متر بعدی سخت و در ۶/۵ متر آخر متراکم تا نیمه متراکم است. سطح آب زیرزمینی در تراز ۴- متر واقع شده است. در شکل ۲ پروفیل طولی لایه‌های خاک در محدوده مورد مطالعه قابل مشاهده است. به منظور تخمین مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک علاوه بر انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های اخذ شده از محل گمانه حفر شده، آزمایش‌های در محل نفوذ استاندارد (SPT) و نفوذ مخروط (CPTu) در نزدیکی محل مورد نظر (در ۸۵+۹۵۰ کیلومتری با فاصله تقریبی ۳۴۵ متر از شمع مورد آزمایش) صورت پذیرفته است که با توجه به نتایج آزمایش‌ها و قضاوت مهندسی، مشخصات لایه‌های مختلف خاک به شرح جدول ۱ تخمین زده می‌شود.

## ۲-۲- آزمایش بارگذاری شمع

در این محدوده با توجه به وجود بستر نرم و کنترل نشست‌های خط ریلی در محدوده مجاز، طرح اجرای شمع‌های کوبشی- درجا ریز بتنی استوانه‌ای شکل به قطر ۶۶

بوده و تأثیری بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر ریلی ندارد. اما در نگاه اول به نظر می‌رسد که بایستی این نظریه به صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد؛ چرا که در صورتی که فاصله شمع‌ها به هم نزدیک باشد، به طور تقریبی می‌توان فرض کرد که بستر خاکی مسیر ریلی معادل یک لایه بتنی شده است و در این صورت به علت تفاوت زیاد سرعت موج برشی مصالح خاکی با بتن بایستی تغییر قابل ملاحظه‌ای در سرعت بحرانی مسیر ریلی صورت پذیرد. بنابراین لازم است که رابطه‌ای بین تغییرات سرعت بحرانی مسیر ریلی با تغییرات فاصله بین شمع‌ها پیدا شود. لذا، در تحقیق پیش رو به علت وجود اختلاف نظر در نتایج ارائه شده در دو پژوهش قبلی و به منظور بررسی اثر اجرای شمع‌های بتنی در بستر نرم خاکی مسیر ریلی قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان در محدوده دریاچه نمک استان قم که برای کنترل نشست مسیر طراحی شده‌اند، بر روی رفتار دینامیکی بستر ریلی و مقدار سرعت بحرانی، مطالعاتی با استفاده از یک مدل سه بعدی اجزاء محدود صوت پذیرفته است. در این مطالعات پس از انتخاب محدوده بحرانی مسیر با توجه به وجود لایه‌های خاکی نرم در بستر، با مدل‌سازی استاتیکی شمع منفرد آزمایشی در محل و مقایسه نتایج آن با داده‌های بدست آمده از آزمایش بارگذاری استاتیکی، مشخصات فیزیکی و مکانیکی لایه‌های خاک مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. پس از اطمینان از صحت مقادیر پارامترهای در نظر گرفته شده برای لایه‌های خاک و کفایت طول شمع‌ها با توجه به مقدار ظرفیت باربری محاسبه شده، مسیر ریلی در محدوده مذکور به صورت سه بعدی مدل‌سازی شده و اثر اجرای شمع‌های مذکور و آرایش چیدمان آن‌ها بر روی سرعت بحرانی مسیر ریلی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- معرفی پروژه قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان

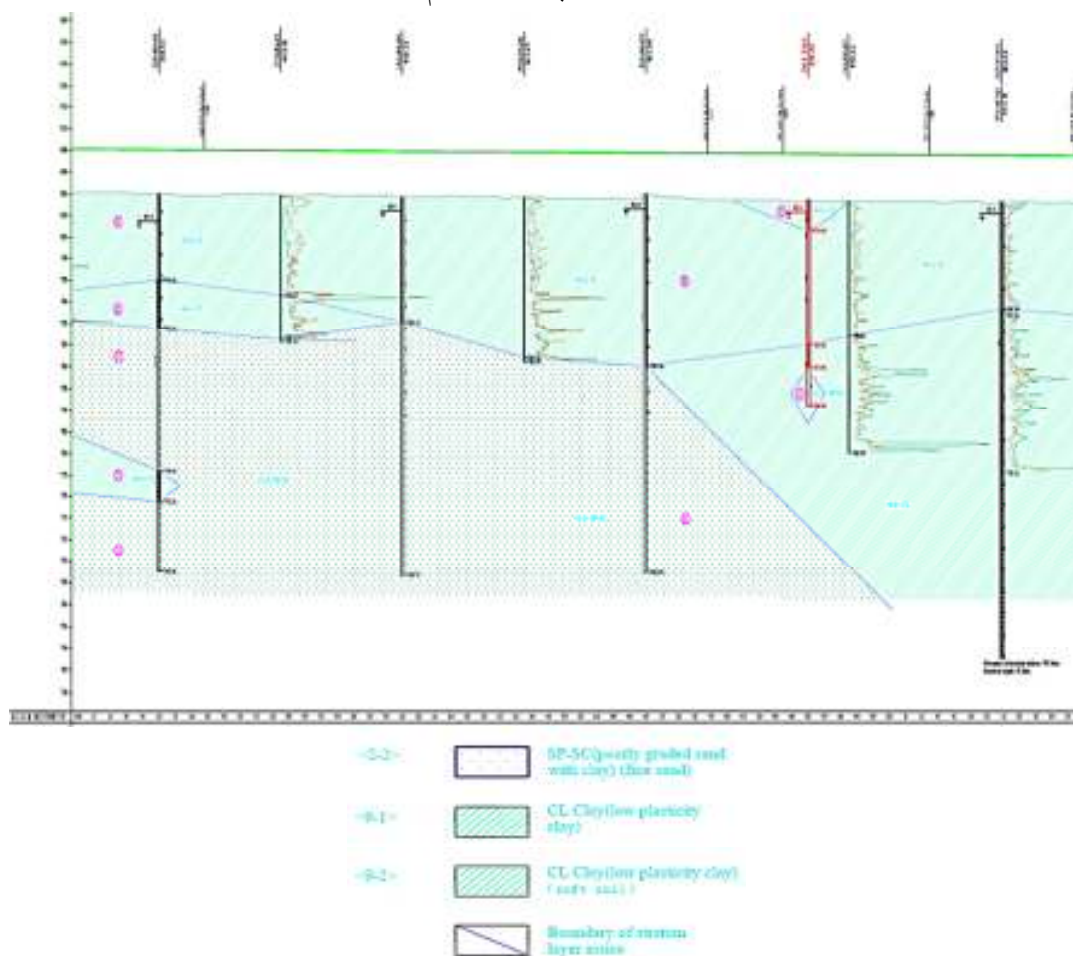
راه‌آهن سریع‌السیر تهران- اصفهان به طول ۴۱۰ کیلومتر با سرعت عملیاتی ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت در قالب ۲۲ ست قطار ۸ واگنی طراحی شده است. این مسیر شامل دو قطعه تهران- قم به طول ۱۶۵ کیلومتر و قم- اصفهان به طول ۲۴۵ کیلومتر است که قادر به جابجایی ۱۶ میلیون مسافر در سال است. و در طول مسیر از شهرهای قم، دلجان و میمه عبور خواهد کرد. در طرح‌های اولیه، این خط ریلی در تهران،

صورت پذیرفته است. شمع مورد آزمایش دارای طول ۱۱ متر بوده و بر اساس روابط تجربی ظرفیت باربری متصور برای آن برابر ۸۰ تن است. طبق استاندارد ASTM D-1143 (1994)، ۲۰۰ درصد بار نهایی طی ۹ مرحله بر شمع وارد شده است که در گام هفتم بارگذاری (۱۲۸ تن) به علت بروز نشست ۱۰۰ میلیمتر آزمایش متوقف گردید.

سانتی متر ارایه شده است (شمع‌های اجرا شده در محل پروژه به صورت لوله‌های توخالی ته بسته می‌باشند که ابتدا تا عمق مورد نظر کوبیده شده و سپس داخل آن با بتن پر شده است). به منظور ارزیابی مقدار ظرفیت باربری شمع بتنی و در نتیجه بدست آوردن طول مناسب، تعدادی شمع به صورت آزمایشی اجرا شده است و بر روی آن‌ها آزمایش بارگذاری استاتیکی



شکل ۱. محدوده انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی شمع بتنی آزمایشی در کیلومتر ۸۶+۲۹۵ (محدوده دریاچه نمک استان قم)



شکل ۲. پروفایل طولی زمین شناسی لایه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه



(ب)



(الف)

شکل ۳. نمایی از آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی شمع بتنی آزمایشی (الف) تیر مورد استفاده به منظور اعمال بار، (ب) جک و پمپ مورد استفاده در آزمایش

جدول ۱. پارامترهای ژئوتکنیکی تخمین زده شده لایه‌های خاک منطقه مورد مطالعه از آزمایش‌های در محل

$\mu$	$E_{oed}$ (اطراف شمع) (MPa)	$E_{oed}$ (MPa)	نسبت تخلخل ( $e_0$ )	$C'_v$ (kPa)	$\phi'$ (درجه)	$c_u$ (kPa)	$\phi$ (درجه)	وزن مخصوص (kN/m <sup>3</sup> )	نوع خاک	عمق (m)
۰/۳۵	۶	۳/۵	۰/۸۵	-	-	۲۰	۱	۲۰	CL	۰-۴
	۱۵	۶		-	-	۴۰	۱		CL	۴-۸
	۲۰	۱۲		-	-	۸۰	۱		CL	۸-۱۲
	۳۰	۳۰		۱۰	۳۲	-	-		SP-SC	۱۲-۳۵
	۴۵	۴۵		۱۰	۳۲	-	-		SP-SC	۳۵-۶۰

### ۳- مدل‌سازی استاتیکی تک شمع

and YE (2015) و ... انجام شده است. بر این اساس در پژوهش پیش رو شمع آزمایشی مذکور با استفاده از مدل سه بعدی اجزاء محدود در توده خاک به ابعاد مترمکعب  $10 \times 10 \times 60$  (ارتفاع، طول و عرض) مدل‌سازی شده است. از پارامترهای ژئوتکنیکی مندرج در جدول ۱ به همراه مدل رفتاری Mohr-Coulomb جهت مدل‌سازی لایه‌های خاک استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری است که به علت کوبش شمع خاک اطراف آن متراکم‌تر می‌شود و در نتیجه پارامترهای ژئوتکنیکی آن بهبود پیدا می‌کند. بر این اساس به اندازه دو برابر شعاع شمع از هر طرف، مقدار مدول الاستیسیته خاک به طور تقریبی به میزان ۲ برابر افزایش داده

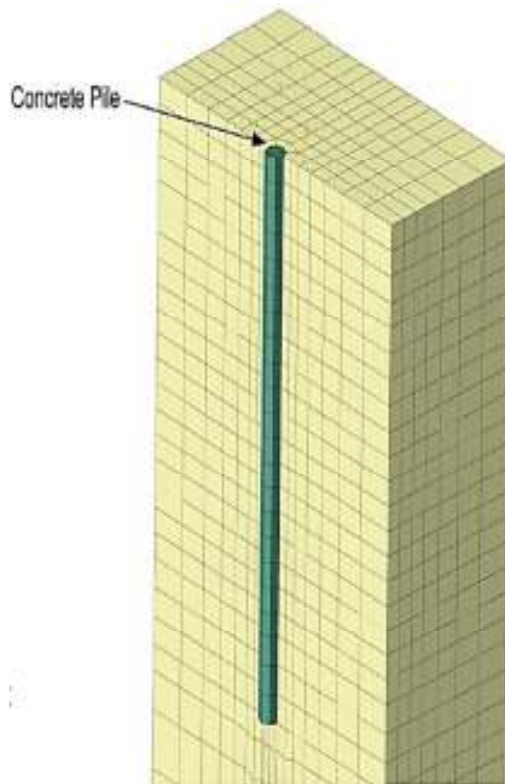
به منظور تدقیق و اطمینان از پارامترهای ژئوتکنیکی تخمین زده شده از نتایج آزمایش  $CPT_U$  و همچنین کافی بودن طول در نظر گرفته شده برای شمع بتنی، مقدار ظرفیت باربری شمع آزمایشی اجرا شده در محل با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم افزار ABAQUS-6.14 محاسبه و با داده‌های بدست آمده از آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی شمع آزمایشی مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است. تاکنون مدل‌سازی عددی تخمین ظرفیت باربری شمع منفرد تحت بار قائم توسط تعداد زیادی از محققین از جمله Basack and Zhan et al. (2012), Elias (2008), Sen (2014), Gao, Abu-Farsakh et al. (2003)

عدم نفوذ دو سطح در یکدیگر و بدون اجازه جدا شدگی از یکدیگر مدل گردید. ضریب اصطکاک  $\mu$  به توصیه Randolph and Wroth (1981) طبق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\mu = \tan(\delta) \quad , \quad \delta = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \phi' \times \cos \phi'}{1 + \sin^2 \phi'} \right) \quad (1)$$

بیشتری نسبت به واقعیت از خود نشان می‌دهد؛ اما در مجموع نتایج حاصل از انطباق قابل قبولی با یکدیگر برخوردار بوده و نشان‌دهنده صحت مدل‌سازی عددی و در نتیجه انتخاب صحیح پارامترهای ژئوتکنیکی محل است.

(۲)



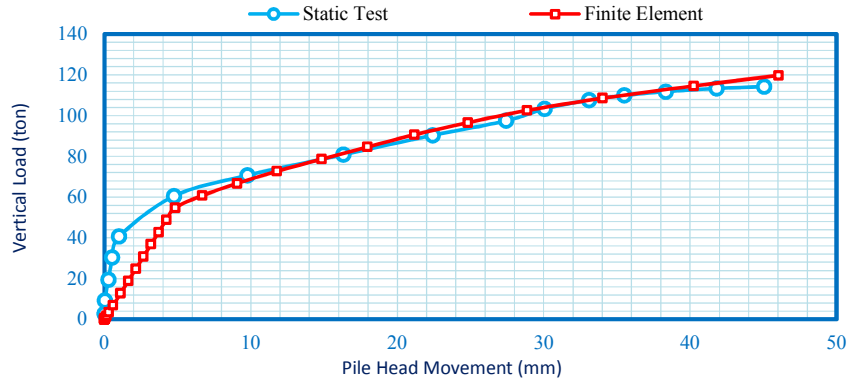
شکل ۴. هندسه مدل سه بعدی اجزاء محدود شمع منفرد

در ABAQUS نرم افزار

شده است. اندر کنش بین شمع با جداره خاک با الگوریتم تماسی موجود در آباکوس مدل شده است، به طوری که رفتار مماسی مرز بین سطوح با فرمولاسیون اصطکاکی پنائلی با ضریب اصطکاک  $\mu$  و در جهت قائم رفتار تماسی به صورت

در این رابطه  $\delta$ ، زاویه اصطکاک اندرکنش و  $\phi'$  زاویه اصطکاک داخلی مؤثر خاک است.

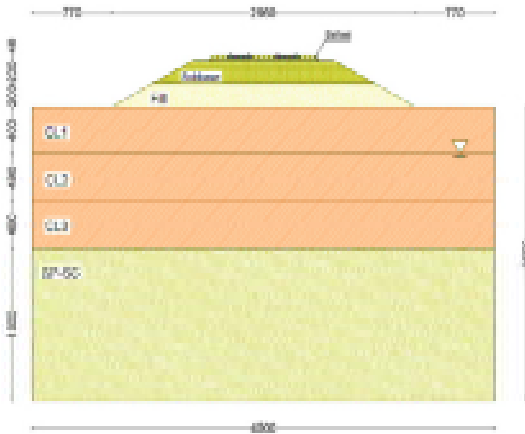
در مدل‌سازی فوق‌الذکر مقدار ضریب اصطکاک  $\mu$  برابر ۰/۳۷ در نظر گرفته شده است. مرز پایین مدل در یک جهت قائم و دو جهت افقی (به عنوان سنگ بستر) و مرزهای جانبی تنها در راستای افقی عمود بر خود بسته شده‌اند. جهت مش‌بندی مدل از المان‌های C3D8R- 3D stress برای شمع به تعداد ۲۶۴ المان و از المان‌های C3D8RP برای توده خاک به تعداد ۸۰۰۴ المان استفاده شده است (شکل ۴). همچنین مقدار ضریب رانش جانبی خاک در حالت سکون ( $K_0$ ) افزایش پیدا کرده است. علت این امر افزایش فشار آب حفره‌ای در خاک اطراف شمع در اثر کوبش شمع بتنی و در نتیجه متراکم‌تر شدن خاک اطراف آن در اثر زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای است (Khanmohammadi, M., & Fakharian, K. (2019)). بارگذاری بر روی شمع منفرد به روش کنترل جابجایی با اعمال ۵۰ میلی‌متر جابجایی سر شمع در راستای قائم در طول زمان تحلیل در مدل‌سازی عددی صورت پذیرفته است. با توجه به تغییر شکل‌های زیاد در المان‌های مدل عددی و به منظور جلوگیری از اعوجاج المان‌ها و در نتیجه واگرا شدن حل مسئله، از روش تحلیل Explicit استفاده شده است. نمودار ظرفیت باربری فشاری شمع منفرد ۱۱ متری بر اساس تغییر شکل حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج بدست آمده از آزمایش بارگذاری فشاری استاتیکی انجام شده در محل در شکل ۵ مقایسه گردیده است. اگر چه در قسمت شیب ابتدایی نمودار ظرفیت باربری، اختلافی بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های بدست آمده از آزمایش در محل وجود دارد که علت آن می‌تواند مربوط به مدل رفتاری انتخاب شده برای لایه‌های خاک باشد که در مراحل ابتدایی بارگذاری رفتار نرم‌شوندگی



شکل ۵. مقایسه نمودار بار- نشست شمع منفرد ۱۱ متری حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش بارگذاری استاتیکی در محل

#### ۴- مدل‌سازی دینامیکی خط ریلی

هندسه خاکریز خط ریلی قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان در محدوده دریاچه نمک استان قم در کیلومتر ۲۹۵+۸۶ مطابق شکل ۶ است. طبق این شکل، خاکریز از سه لایه بالاست به ضخامت ۴۰ سانتی‌متر، زیر بالاست به ضخامت ۲ متر و مصالح پرکننده به ضخامت ۲ متر تشکیل شده است و با توجه به وجود تقارن، نصف هندسه مسیر ریلی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده است.



شکل ۶. هندسه خاکریز مسیر ریلی قطار سریع‌السیر

تهران- اصفهان در محدوده دریاچه نمک قم

(اندازه‌ها به سانتی‌متر است)

#### ۴-۱- مش‌بندی مدل

در مدل‌سازی‌های عددی، ابعاد المان باید به نحوی انتخاب شود تا سه شرط زیر (به ویژه شرط سوم) برآورده شوند.

-دقت تحلیل؛ ابعاد ریزتر المان تا یک میزان به منزله دقت بیشتر تحلیل خواهد بود.

-سرعت تحلیل؛ با کاهش ابعاد المان سرعت تحلیل به ویژه در مسائل دینامیکی کاهش خواهد یافت.

انتشار صحیح موج در محیط؛ حداکثر اندازه المان در مسائل دینامیکی انتشار موج باید طوری باشد تا انتشار موج در محیط به درستی صورت گیرد. به منظور انتشار صحیح موج در محیط، Kuhlemeyer and Lysmer (1973) حداکثر ابعاد المان ( $\Delta l$ ) را به رابطه (۳) محدود کردند:

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (3)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج برشی انتشار یافته در محیط است که با حداقل سرعت موج برشی در محیط ( $V_{smin}$ ) و حداکثر فرکانس تحریک ورودی ( $f_{max}$ ) به صورت رابطه (۴) است.

$$\lambda_{min} = \frac{V_{smin}}{f_{max}} \quad (4)$$



بوده که برابر  $24/9 \text{ m/s}$  است. لذا حداکثر ابعاد المان طبق رابطه (۵) برابر  $1/1$  متر بدست می‌آید.

بنابراین در مدل‌سازی مذکور از المان‌های سه بعدی C3D8 با ابعاد  $1$  متر جهت مش‌بندی المان‌های مدل استفاده شده است. تعداد کل المان‌ها  $77797$  عدد است. در شکل ۷ هندسه مش‌بندی شده مدل مشاهده می‌شود. تراورس‌های بتنی با مقطع مستطیلی به ضخامت  $0/20$ ، عرض  $0/25$  و طول  $2/5$  متر مدل‌سازی شده‌اند. همچنین برای مدل‌سازی ریل جهت سادگی در مش‌بندی از المان مستطیلی شکل با مساحت و ممان اینرسی مشابه ریل UIC60 استفاده شده است که ضخامت و عرض مقطع مستطیلی معادل آن به ترتیب برابر  $0/125$  و  $0/10$  متر در نظر گرفته شده است.

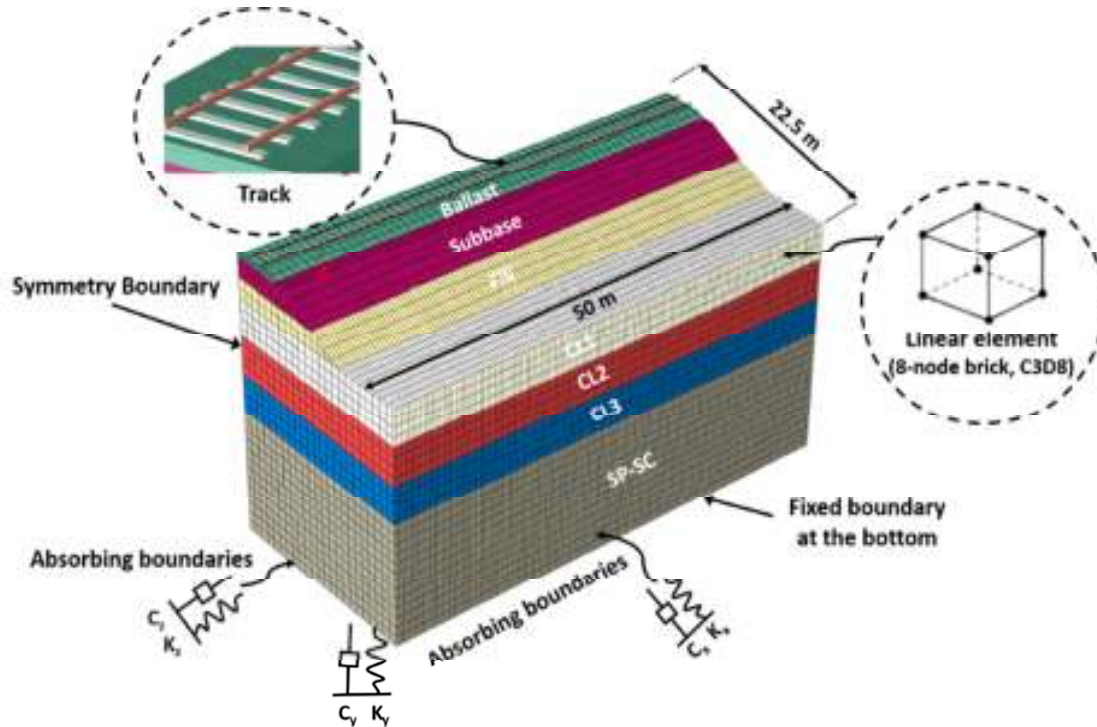
طبق روابط بالا، حداکثر ابعاد المان به منظور انتشار صحیح موج در محیط به رابطه (۵) محدود می‌شود.

$$\Delta l \leq \frac{V_{smin}}{10 \times f_{max}} \quad (5)$$

با توجه به سرعت متوسط عبوری  $200$  کیلومتر بر ساعت ( $55/5$  متر بر ثانیه) و فاصله  $24/4$  متری واگن‌های قطار X2000، مقدار فرکانس تحریک ورودی طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$f_{max} = V/L = 55.5/24.4 = 2.28 \text{ Hz} \quad (6)$$

در این رابطه  $f_{max}$  فرکانس تحریک ورودی،  $V$  سرعت عبوری قطار و  $L$  فاصله بین واگن‌های قطار است. همچنین مقدار سرعت موج برشی حداقل مربوط به لایه اول خاک بستر



شکل ۷. مش‌بندی مدل سه بعدی اجزاء محدود مسیر ریلی قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان در محدوده دریاچه نمک قم

آمده در بخش قبل، مقدار سرعت موج برشی لایه‌های مختلف خاک را از طریق رابطه (۷) محاسبه نمود.

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (7)$$

مقدار سرعت موج ریلی لایه خاک اندکی کمتر از مقدار سرعت موج برشی بوده که از طریق رابطه (۸) بدست می‌آید.

$$V_R = \frac{0.847+1.117\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (8)$$

## ۲-۴- مشخصات مصالح

به علت ماهیت بار وارده ناشی از عبور قطار سریع‌السیر، کرنش‌های ایجاد شده در خاک در حد الاستیک بوده و وارد مرحله پلاستیک نمی‌شود (Madshus et al. (2000)). از این رو لایه‌های مختلف خاک به صورت الاستیک و صرفاً با تعریف وزن مخصوص، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون مدل شده است. با توجه به مقادیر مدول الاستیسیته بدست

$$\alpha = \frac{2\omega_i \omega_j \xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \quad (11)$$

در روابط فوق،  $\xi$  نسبت میرایی و  $\omega_i$  و  $\omega_j$  فرکانس زاویه‌ای دو مود از مودهای ارتعاشی است. در مدل‌سازی مذکور، نسبت میرایی برابر مقادیر درج شده در جدول ۲ فرض شده است و با بدست آوردن مقادیر متوسط فرکانس زاویه‌ای لایه‌های خاک، مقادیر  $\alpha$  و  $\beta$  محاسبه می‌شوند. در جدول ۲ مشخصات مصالح مختلف مسیر ریلی قابل مشاهده است.

برای در نظر گرفتن رفتار هیسترسیس (Hysteresis) خاک تحت بارگذاری سیکلی، از میرایی رایلی استفاده شده است. بر مبنای مطالعات صورت گرفته توسط Chowdhury and Dasgupta (2003) میرایی سیستم، [C]، با یک ترکیب خطی از ماتریس جرم و ماتریس سختی طبق رابطه (۹) بدست می‌آید که ضرایب این ترکیب خطی از روی فرکانس مودهای لایه‌های خاک محاسبه می‌شوند.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (9)$$

در این رابطه  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب ترکیب خطی رایلی است که از روابط (۱۰) و (۱۱) بدست می‌آیند:

جدول ۲. مشخصات مصالح مختلف مسیر ریلی

عنوان	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_{oed}$ (MPa)	$\mu$	$V_s$ (m/s)	$V_R$ (m/s)	$\xi$	$\alpha$	$\beta$
ریل	۷۸/۵	$210 \times 10^3$	۰/۳	-	-	-	-	-
تراورس	۲۰/۱۵	$30 \times 10^3$	۰/۲	-	-	۰/۰۲	۰/۱۶۰۵	۰/۰۰۲۴
بالاست	۱۷	۲۰۰	۰/۳	۱۸۷	۱۷۰	۰/۰۳	۰/۲۴۰۷	۰/۰۰۳۶
بستر منتخب (ساب‌گرید)	۱۸	۱۵۰	۰/۳	۱۷۹	۱۶۲/۸	۰/۰۳	۰/۲۴۰۷	۰/۰۰۳۶
بدنه باربر خاکی	۱۸	۹۰	۰/۳	۱۳۸/۷	۱۲۶/۱	۰/۰۶	۰/۴۸۱۴	۰/۰۰۷۳
لایه CL1	۱۸	۳/۵	۰/۳۵	۲۷/۳۵	۲۴/۹	۰/۰۹	۰/۷۲۲۱	۰/۰۱۰۹
لایه CL2	۲۰	۶	۰/۳۵	۴۸	۴۳/۷	۰/۰۹	۰/۷۲۲۱	۰/۰۱۰۹
لایه CL3	۲۰	۱۲	۰/۳۵	۶۷/۹	۶۱/۸	۰/۰۹	۰/۷۲۲۱	۰/۰۱۰۹
لایه SP-SC	۲۰	۳۰	۰/۳۵	۱۰۷/۴	۹۷/۷	۰/۰۶	۰/۴۸۱۴	۰/۰۰۷۳

جدول ۳. مشخصات هندسی و مقادیر بار محوری قطار

سریع‌السیر X2000 (Takemiya (2001))

شماره واگن	فواصل			بار محوری (kN)	
	a (m)	b (m)	L (m)	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
۱	۲۲/۲	۱۱/۶	۲/۹	۱۶۲	۱۲۲/۵
۲	۲۴/۴	۱۴/۸	۲/۹	۱۲۲/۵	۱۲۲/۵
۳	۲۴/۴	۱۴/۸	۲/۹	۱۲۲/۵	۱۲۲/۵
۴	۲۴/۴	۱۴/۸	۲/۹	۱۲۲/۵	۱۲۲/۵
۵	۱۷/۲	۶/۶	۲/۹	۱۸۰	۱۸۰

### ۳-۴- بارگذاری

شبیه‌سازی بار حرکتی عبور قطار سریع‌السیر، با مدل‌کردن هر یک از چرخ‌های قطار به شکل یک بلوک مکعبی که بر روی ریل با سرعت عبوری قطار لغزش و حرکت می‌کنند، صورت پذیرفته است (شکل ۸). با توجه به مشخص نبودن نوع ناوگان ریلی برای مسیر تهران- اصفهان، در مدل‌سازی عددی، ناوگان ریلی سریع‌السیر کشور سوئد با نام X2000 در نظر گرفته شده است که مشخصات هندسی چرخ‌های این قطار به همراه مقدار بار هر یک در جدول و شکل ۸ قابل مشاهده است.

مستقیماً از نتایج در لحظه قبل از آن ( $x_n$ ) بدست می‌آید. بدین صورت که با در نظر گرفتن سرعت و شتاب المان‌ها در لحظه  $n$  با جایگذاری در رابطه (۱) موقعیت‌های جدید محاسبه می‌شود.

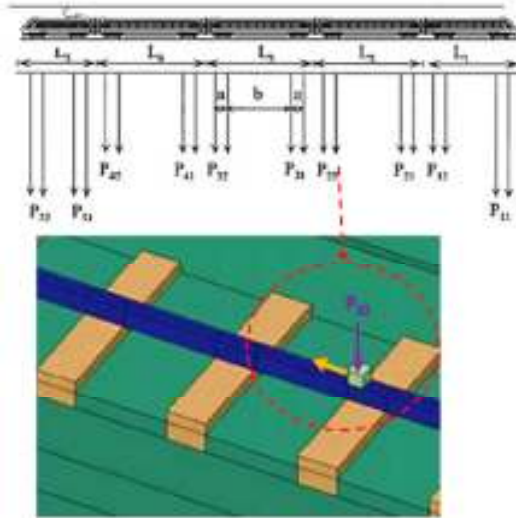
$$x_{n+1} = x_n + \Delta t_{n+1/2} \dot{x}_{n+1/2} \quad (14)$$

سرعت گره‌ها و المان‌ها به طور پیوسته در حال تغییر است. لذا نتایج بدست آمده از این شیوه، زمانی صحیح و پایدار خواهد بود که  $\Delta t$  در نظر گرفته شده به اندازه کافی کوچک باشد تا بتواند روند تغییر سرعت و شتاب در گره‌ها را دنبال کند. از همین جا مشخص است که در روش Explicit بازه‌های زمانی بسیار کوچک و تعداد آن‌ها

بسیار زیاد است. از آنجایی که روند حل، تغییرات سرعت و شتاب در گره‌ها را دنبال می‌کند، در مسائلی که در آن‌ها محاسبه پارامترهایی از جنس موج همانند موج تنش اهمیت دارد، فقط می‌توان از روش Explicit استفاده کرد. البته همین امر باعث بروز noise در جواب‌ها نیز هست. اما در روش Implicit، مجموعه معادلات سیستم به روش مستقیم حل می‌شود؛ به عبارت دیگر در این روش، ماتریس سختی برای کل سازه تشکیل شده و برای هر گره جابجایی متناظر با آن به دست می‌آید و حل مسأله بر مبنای معکوس کردن ماتریس سختی استوار است. به همین دلیل زمان حل در روش Implicit در مقایسه با روش Explicit بیشتر خواهد بود. در عوض، نتایج روش Implicit نسبت به روش Explicit، تطابق بهتری با واقعیت دارند. در پژوهش پیش رو زمان تحلیل به روش Implicit قابل قبول بوده و به خاطر دقت بیشتر آن، از این روش جهت مدل‌سازی بار حرکتی قطار استفاده شده است. گام‌های زمانی مناسب برای خروجی نتایج طبق رابطه معروف CFL (۱۵) محاسبه می‌شود ((Kacimi et al. (2013)).

$$\delta t = \frac{h}{c_p} \quad (15)$$

در این رابطه  $\delta t$  گام زمانی برای گرفتن خروجی،  $h$  کوچکترین اندازه المان‌های مش بندی شده و  $C_p$  سرعت موج حجمی است. در این مدل‌سازی خروجی نتایج در گام‌های زمانی ۰/۰۱ ثانیه صورت پذیرفته است.



شکل ۸. نمایی شماتیک از قطار سریع‌السیر X2000 و نحوه شبیه‌سازی بار حرکتی قطار با مدل کردن چرخ‌های قطار در مدل سه بعدی اجزاء محدود ((Takemiya (2001)

#### ۴-۴- شرایط مرزی، اندرکنش و قیود تماسی

در این مدل‌سازی مرز پایین در یک جهت قائم و دو جهت افقی (به عنوان سنگ بستر) و مرزهای جانبی تنها در راستای افقی عمود بر خود بسته شده‌اند. همچنین به منظور ممانعت از بازگشت امواج سطحی از مرزها به داخل مدل از فنرهای میراگر متصل به زمین در مرزهای مدل استفاده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده گردید، هر نقطه از نقاط مرزی مدل با یک فنر به زمین متصل شده که مقدار میرایی آن از رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود (Bian et al. (2008)).

$$k_x = k_y = \rho V_s \quad (12)$$

$$k_z = \rho V_p \quad (13)$$

اندرکنش بین کلاهک و سر شمع و همچنین بین ریل و تراورس بدون هیچگونه اجازه لغزشی به صورت گیردار مدل شده است. همچنین به منظور حرکت چرخ‌های قطار بر روی ریل، اندرکنش بین چرخ‌ها و ریل به صورت بدون اصطکاک در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۵- روش تحلیل

تحلیل دینامیکی در مدل اجزاء محدود نرم‌افزار ABAQUS به دو صورت Implicit و Explicit انجام می‌گیرد. در تحلیل Explicit نتایج در هر لحظه ( $x_{n+1}$ ،

## ۶-۴- صحت‌سنجی مدل عددی

وجود محدودیت‌هایی در بدست آوردن مشخصات واقعی لایه‌های خاک نظیر نمونه‌برداری دست‌خورده، خطاهای آزمایش‌های در محل و ...، اختلافاتی بین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در نظر گرفته شده در مدل عددی با واقعیت دارد. لایه‌های خاک به صورت افقی و همگن در مدل عددی در نظر گرفته شده‌اند و این در حالی است که در واقعیت ممکن است لایه‌های خاک به صورت شیبدار و غیرهمگن باشند. در مجموع با توجه به توضیحات فوق‌الذکر درصد اختلاف بین نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های در محل قابل قبول بوده و مدل عددی مذکور مورد اعتبارسنجی قرار می‌گیرد.

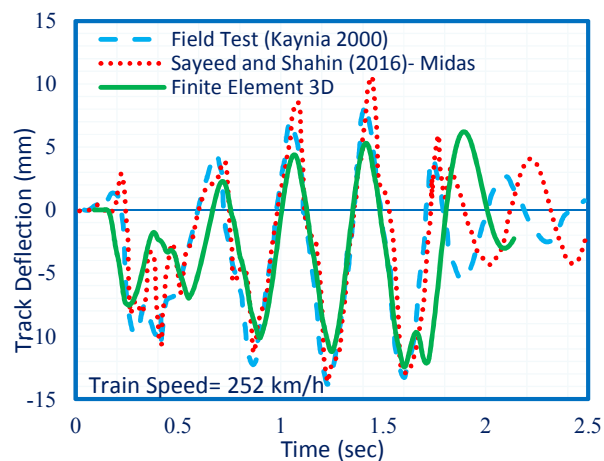
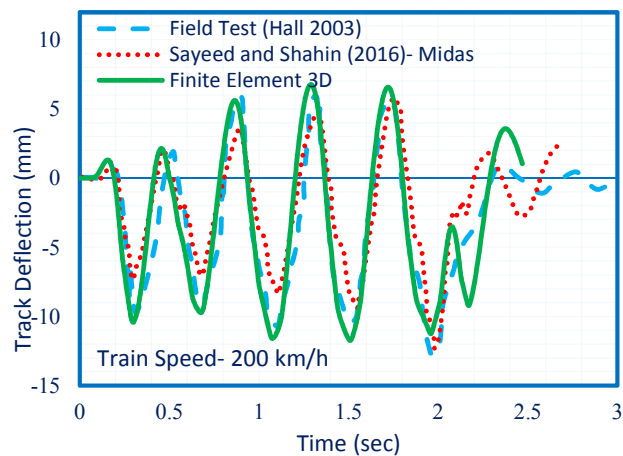
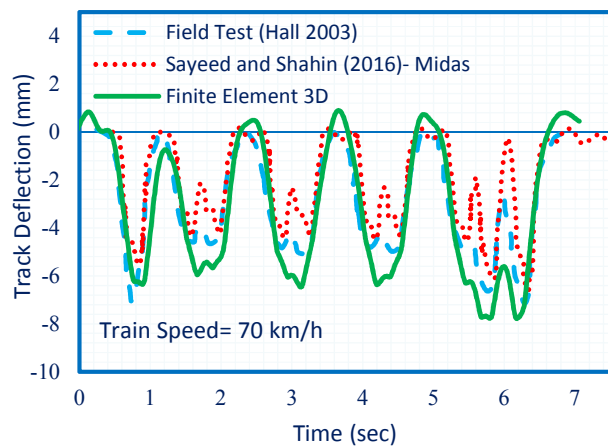
به منظور اطمینان از صحت نتایج مدل‌سازی عددی، بایستی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج بدست آمده از ابزار دقیق‌های نصب شده در یک مسیر ریلی مورد اعتبارسنجی قرار گیرد. در این تحققات نتایج مدل‌سازی با داده‌های بدست آمده از ابزار دقیق‌های نصب شده در یکی از خطوط ریلی کشور سوئد مورد مقایسه و صحت‌سنجی قرار گرفته است. خط ریلی مذکور در منطقه Ledsgard در حومه شهر Göteborg واقع شده است که به منظور اندازه‌گیری تنش، جابجایی و شتاب وارده به خط ریلی در اثر عبور قطار سریع‌السیر، از سه نوع حسگر شتاب‌سنج، انبساط‌سنج و ژئوفون استفاده شده است (Hall (2003)). قطار عبوری از این مسیر نیز ناوگان ریلی سریع‌السیر کشور سوئد با نام X2000 است. با انجام تحلیل دینامیکی، نمودار نشست بستر ریلی در طول زمان در اثر عبور قطار سریع‌السیر X-2000 در سه سرعت عبوری ۷۰، ۲۰۰ و ۲۵۲ کیلومتر بر ساعت به همراه داده‌های نشست بدست آمده از ابزار دقیق‌های نصب شده بر روی مسیر ریلی و همچنین نمودارهای نشست بدست آمده از مدل‌سازی عددی صورت گرفته توسط Sayyed and Shahin (2016) بر روی این مسیر در شکل ۹ ترسیم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در سرعت ۷۰ کیلومتر بر ساعت تنها نشست‌های شبه استاتیکی مشاهده می‌شود و این در حالی است که در سرعت‌های بالاتر، ارتعاشات مسیر بیشتر شده و پدیده تشدید رخ داده است. به عبارتی دیگر در سرعت‌های کمتر از سرعت موج ریلی لایه‌های خاک، مسیر تحت اثر عبور قطار صرفاً دچار نشست می‌شود ولی با نزدیک شدن به سرعت بحرانی، تغییر شکل‌های مسیر از حالت استاتیکی خارج شده و به صورت نشست و برآمدگی‌های متعدد بروز می‌یابد.

## ۵- تعیین سرعت بحرانی در اثر عبور قطار

### سریع‌السیر

بر اساس نتایج بدست آمده پیشینه نشست ایجاد شده در مسیر ریلی، در نقطه‌ای مابین تراورس‌های دو خط عبوری است که نحوه ایجاد کانتورهای نشست خاکریز و بستر خاکی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. به منظور بدست آوردن سرعت بحرانی در مسیر ریلی مذکور، با عبور دادن قطار سریع‌السیر با سرعت‌های عبوری مختلف (از سرعت عبوری ۶۰ الی ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت)، تحلیل‌های دینامیکی متعددی صورت پذیرفت که با ترسیم پیشینه نشست رخ داده در هر سرعت عبوری قطار، نمودار شکل ۱۱ بدست آمده است. بر اساس ادبیات فنی در یک مسیر ریلی فرض می‌شود که ریل به عنوان یک تیر به تراورس متصل می‌شود و هر دو به صورت الاستیک بر روی لایه بالاست و مجموعه خط ریلی و خاکریز بالاستی به صورت یک تیر الاستیک بر روی بستر خاکی به عنوان یک محیط نیم بی‌نهایت قرار می‌گیرند. لذا، در مجموع دو فرکانس طبیعی غالب در مسیر ریلی وجود دارد؛ یکی بر اساس سختی خمشی و جرم اجزای خط ریلی و خاکریز و دیگری بر اساس فرکانس طبیعی بستر خاکی تعیین می‌شود و در صورت عبور قطار در سرعتی معادل فرکانس طبیعی (سرعت بحرانی)، پدیده تشدید ایجاد می‌شود و تغییر شکل‌های مسیر افزایش می‌یابد (Hall (2003)). با توجه به مشخصات ریل و تراورس، سرعت بحرانی ناشی از اجزای خط ریلی به طور تقریبی برابر ۵۰۰ متر بر ثانیه (۱۸۰۰ کیلومتر بر ساعت) است که بسیار بیشتر از سرعت رایج عبور و مرور قطارها بوده و در نتیجه پدیده تشدید ناشی از فرکانس طبیعی اجزای خط ریلی رخ نمی‌دهد. اما سرعت بحرانی دیگر، توسط فرکانس طبیعی بستر خاکی کنترل می‌شود که طبق مبانی دینامیک خاک، فرکانس طبیعی یک لایه خاک طبق رابطه (۱۶) تخمین زده می‌شود (Madshus et al. (2000)).

مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و داده‌های در محل، نشان از تطابق قابل قبول نتایج با یکدیگر دارد؛ چرا که محل کمینه و بیشینه نشست مسیر ریلی در هر سه نمودار یکی بوده که نشان از مدل‌سازی صحیح فرکانس بارگذاری مدل عددی مذکور است. اگر چه اختلافاتی بین مقادیر کمینه و بیشینه نشست‌های محاسبه شده در مدل عددی مذکور با داده‌های در محل وجود دارد که مقادیر تقریبی خطای مذکور در سرعت‌های ۷۰، ۲۰۰ و ۲۵۲ کیلومتر بر ساعت به ترتیب برابر ۲۱ درصد، ۸/۵ درصد و ۳۱ درصد است که با توجه به درصد خطای تقریبی موجود بین نتایج بدست آمده از مدل عددی انجام شده توسط Sayyed and Shahin (2016) با داده‌های بدست آمده در محل در سرعت‌های فوق‌الذکر که به ترتیب برابر ۱۰/۷ درصد، ۱۸ درصد و ۲۰ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که به طور نسبی درصد خطاها با یکدیگر مشابهت دارد به طور معمول با توجه به

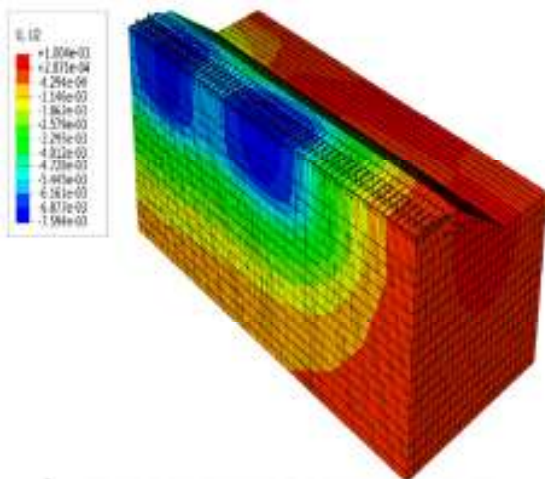


شکل ۹. مقایسه مقادیر نشست بستر ریلی واقع در منطقه Ledsgard کشور سوئد ناشی از عبور قطار سریع السیر با سرعت‌های عبوری ۷۰، ۲۰۰ و ۲۵۲ کیلومتر بر ساعت بدست آمده از مدل‌سازی عددی و آزمایش در محل

سریع‌السیر مسیر ریلی تهران- اصفهان ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت است، لذا بایستی خاک بستر در این نواحی تحت بهسازی قرار گیرد.

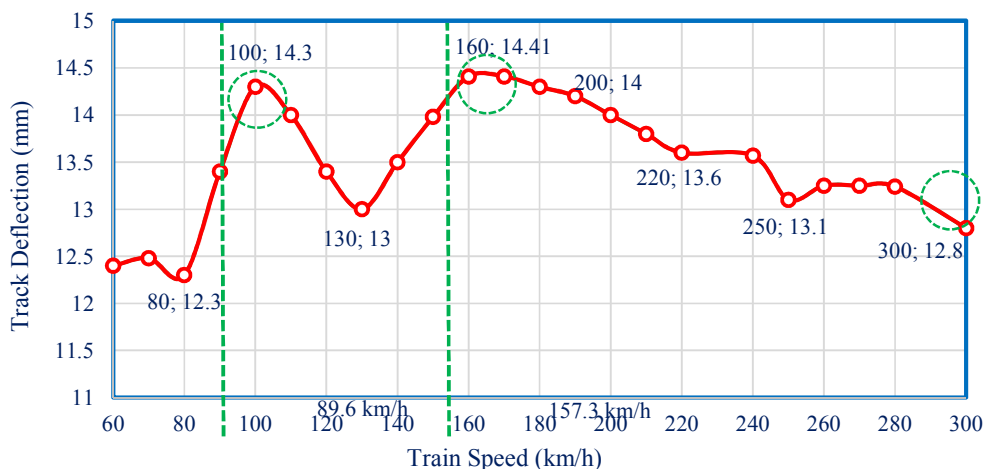
$$f_n = \frac{(2n+1)C_s}{4H} \quad (16)$$

که در آن  $n$  مودهای ارتعاشی،  $C_s$  سرعت موج برشی و  $H$  ضخامت لایه خاکی است. بنابراین در صورتی که سرعت عبوری قطار با سرعت موج ریلی لایه خاک برابر شود، پدیده تشدید اتفاق افتاده و در نتیجه مقدار نشست لایه‌های خاک افزایش پیدا می‌کند. لذا همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در سرعت‌های عبوری ۱۰۰ و ۱۶۵ جابجایی‌های بیشینه‌ای رخ داده است که مقادیر سرعت‌های فوق‌الذکر همان سرعت‌های بحرانی خط ریلی است. با توجه به سرعت موج ریلی هر لایه خاک بستر که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است و ایجاد پدیده تشدید در این نواحی، صحت تحلیل دینامیکی صورت گرفته مجدداً مورد اعتبار سنجی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰. کانتورهای نشست ایجاد شده در خاکریز و بستر ریلی در اثر عبور قطار با سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت

نکته حائز اهمیت از تحلیل صورت گرفته این است که سرعت بحرانی مسیر ریلی ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است و این در حالی است که بایستی سرعت مجاز عبوری قطار طبق آیین‌نامه‌های معتبر برابر ۶۰ درصد سرعت بحرانی مسیر باشد. با توجه به این‌که سرعت طراحی صورت گرفته برای قطار



شکل ۱۱. مقادیر نشست بیشینه خط ریلی در اثر عبور قطار با سرعت‌های عبوری مختلف

شمع‌های بتنی به قطر ۶۶ سانتیمتر، طول ۱۱ متر و فواصل افقی ۳/۳ متر ( $S/D=5$ ) به نحوی که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است، طراحی گردیده است. جهت ایجاد عملکرد یکپارچه گروه شمع، یک لایه خاکریز متراکم به ضخامت ۵۰ سانتی‌متری به همراه دو ردیف ژئوگرید سر شمع‌ها را به

## ۶- تاثیر هندسه گروه شمع بر روی مقدار سرعت بحرانی

همان‌طور که در بخش‌های ابتدایی توضیح داده شد، به منظور کنترل نشست‌های مسیر ریلی در محدوده مجاز،

شمع با فواصل افقی 3D و 2D (D= قطر شمع) مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که مقادیر بیشینه نشست رخ داده در مسیر ریلی در سرعت‌های عبوری مختلف در نمودار قابل مشاهده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش فواصل افقی شمع‌های بتنی و در نتیجه افزایش سختی گروه شمع، مقادیر بیشینه نشست مسیر ریلی در حالت بهسازی بستر خاکی با گروه شمع به فواصل افقی 3D و 2D نسبت به گروه شمع با فاصله افقی 5D به ترتیب ۱۲ درصد و ۳۲ درصد کاهش یافته است. اما همچنان پدیده تشدید در محدوده سرعت‌های ۲۵۰ الی ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عدم تاثیر قابل ملاحظه فاصله افقی شمع‌ها بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر ریلی است. به عبارت دیگر انتظار بر این است که با افزایش سختی گروه شمع، مقدار مدول الاستیسیته و در نتیجه سرعت موج ریلی لایه معادل خاک بستر و شمع افزایش یابد و در نتیجه پدید تشدید در مقادیر سرعت عبوری بیشتری رخ دهد. اما در نتایج بدست آمده این روند مشاهده نمی‌شود که نیازمند بررسی دقیق‌تر است.

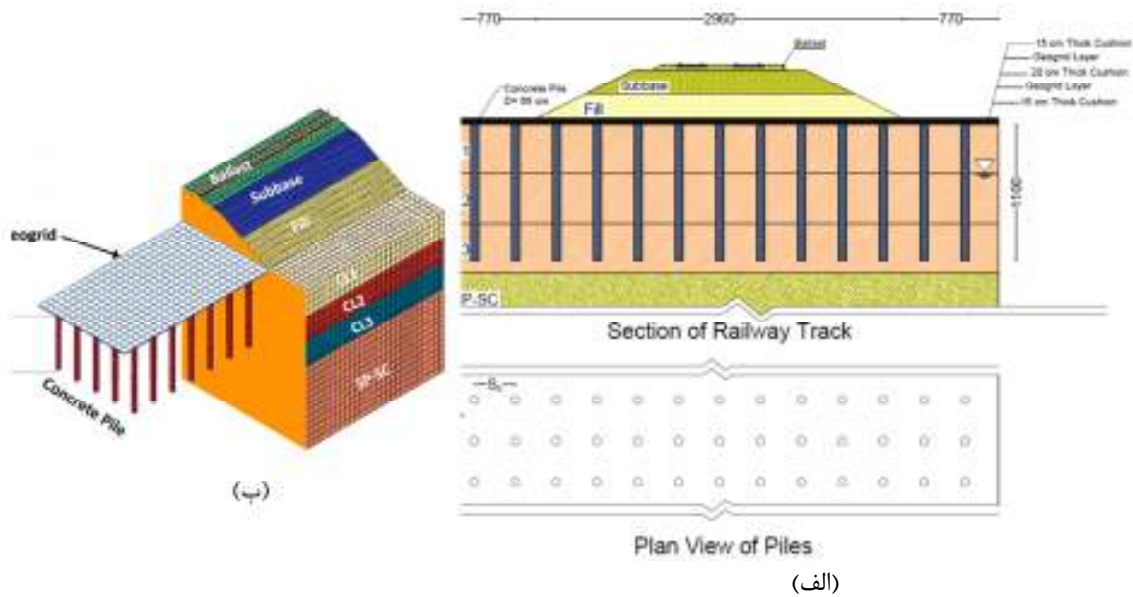
همان‌طور که در نمودار شکل ۱۱ مشاهده گردید، سومین سرعت بحرانی در سرعت عبوری ۲۶۰ کیلومتر بر ساعت رخ داد که با توجه به سرعت موج ریلی لایه‌های CL3 و SP-SM که به ترتیب برابر ۲۲۰ و ۳۵۲ کیلومتر بر ساعت است، می‌توان نتیجه گرفت که امواج دینامیکی منتشره ناشی از عبور قطار تا لایه چهارم بستر خاکی (لایه SP-SM) انتقال می‌یابد و در سرعتی معادل میانگین سرعت امواج ریلی دو لایه فوق‌الذکر پدیده تشدید رخ می‌دهد.

این سرعت بحرانی در حالت بهسازی بستر خاکی با آرایش‌های مختلف شمع‌های بتنی نیز مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده این است که با اجرای شمع‌های بتنی و بهسازی لایه‌های اول تا سوم خاک بستر، مدول الاستیسیته و در نتیجه سرعت موج ریلی لایه‌های مذکور افزایش قابل توجهی یافته و پدیده تشدید در این لایه‌ها رخ نمی‌دهد. اما با توجه به طول ۱۱ متری شمع‌های بتنی و عدم بهسازی یک متر انتهایی لایه سوم و کل لایه چهارم، پدیده تشدید در سرعت عبوری معادل میانگین سرعت امواج ریلی در لایه‌های سوم و چهارم ایجاد می‌شود. به همین علت است که با کاهش فواصل افقی شمع‌های بتنی و افزایش سختی گروه شمع، تاثیری بر روی مقدار سرعت بحرانی مشاهده نمی‌شود و بایستی طول شمع‌ها تا لایه چهارم ادامه پیدا کند.

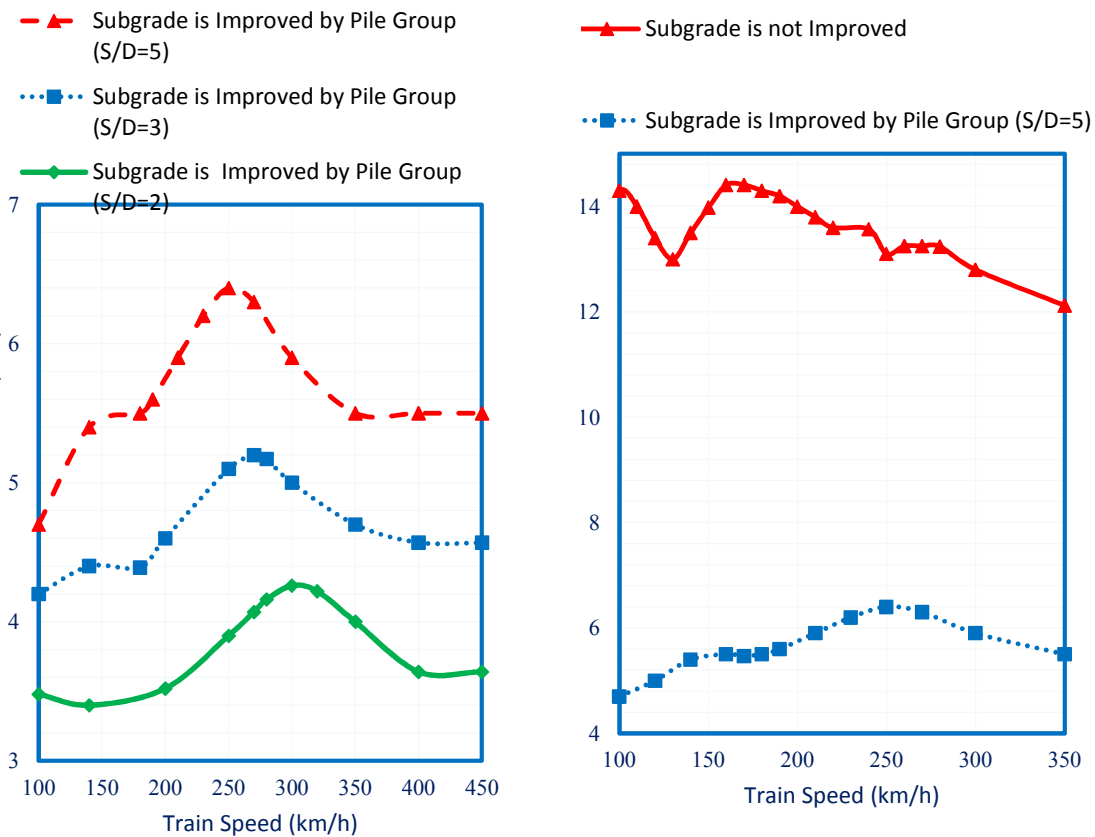
یکدیگر متصل نموده است. ژئوگریدها با استفاده از المان صفحه‌ای و با مدل رفتاری الاستیک با وزن مخصوص ۱۰۰۰ کیلومتر بر مکعب، مدول الاستیسیته ۲۵۰۰ کیلونیوتن بر متر و نسبت پواسون ۰/۴ مدل شده‌اند. همچنین مشخصات لایه خاکریز متراکم مابین ژئوگریدها مشابه لایه بدنه باربر خاکی در جدول ۲ می‌باشد. به منظور بررسی اثر شمع‌های اجرا شده بر روی مقدار سرعت بحرانی مسیر، مدل سه بعدی اجزاء محدود به ترتیبی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد، ایجاد گردید. در مدل عددی مذکور بر خلاف مدل ایجاد شده توسط Tang et al. (2019) که شمع‌ها با المان‌های یک بعدی تیر (Beam) مدل شده بودند، به منظور بررسی دقیق‌تر، شمع‌های بتنی به صورت المان‌های سه بعدی 3D Solid مدل شده‌اند. اندرکنش بین شمع‌ها و جداره خاک به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ هندسه مش‌بندی شده مدل سه بعدی اجزاء محدود خاکریز مسیر ریلی به همراه شمع‌های بتنی مشاهده می‌شود.

مقادیر بیشینه نشست رخ داده در هر سرعت عبوری قطار در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که با اجرای شمع‌های بتنی مقدار نشست بیشینه در مسیر ریلی به میزان ۵۵ درصد کاهش یافته است. همچنین در سرعت‌های عبوری ۱۰۰ و ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت و افزایش نشست مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده رفع مشکل پدیده تشدید در اثر اجرای شمع‌های بتنی در لایه‌های بستر خاک است. (Tang et al. (2019) در طی تحقیقات خود ادعا کرده بودند که اجرای شمع‌های بتنی تاثیری بر مقدار سرعت بحرانی مسیر ریلی ندارد که نتایج بدست آمده در تحقیق پیش رو خلاف این ادعا را ثابت می‌کند و با نتایج ارایه شده توسط Thach et al. (2013) مطابقت دارد. اما در مدل بهسازی بستر خاکی با شمع‌های بتنی، پدیده تشدید در سرعت ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت رخ داده است که با توجه به سرعت طرح قطار عبوری در این مسیر، همچنان سرعت طرح از سرعت بحرانی مسیر کمتر بوده و طرح بهسازی مذکور کفایت نمی‌کند و در نتیجه نیاز به بهبود بیشتر مشخصات مکانیکی بستر خاکی است.

لذا، بدین منظور آرایش مختلف شمع‌های مذکور با تغییر فواصل افقی شمع‌ها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این راستا تحلیل حساسیت اثر فواصل افقی شمع‌های بتنی بر روی مقدار سرعت بحرانی با مدل‌سازی عددی دو گروه



شکل ۱۲. الف) هندسه جانمایی شمع‌های بتنی در بستر خاکی مسیر ریلی در محدوده دریاچه نمک استان قم، (ب) مش بندی شده مدل سه بعدی اجزاء محدود خاکریز مسیر ریلی محدوده دریاچه نمک استان قم به همراه شمع‌های بتنی



شکل ۱۴. مقادیر نشست بیشینه خط ریلی در اثر عبور قطار با سرعت‌های عبوری مختلف در حالت بستر خاکی بهسازی شده با شمع‌های بتنی به فواصل افقی مختلف

شکل ۱۳. مقادیر نشست بیشینه خط ریلی در اثر عبور قطار با سرعت‌های عبوری مختلف در حالت بستر خاکی بدون بهسازی و بهسازی شده با شمع‌های بتنی به فواصل افقی 5D



## ۷- نتیجه گیری

عمل آورده است و لزومی به کاهش فواصل افقی شمع‌ها و در نتیجه افزایش سختی گروه شمع نمی باشد. با توجه به سرعت طرح قطار سریع‌السیر در مسیر ریلی تهران- اصفهان (۳۰۰ کیلومتر بر ساعت) و لزوم افزایش سرعت بحرانی مسیر به مقدار ۱/۶۷ برابر سرعت طرح، بایستی طول شمع‌ها تا انتهای لایه چهارم (SP-SC) افزایش یابد تا یک متر انتهایی لایه سوم و لایه چهارم خاک بستر نیز بهسازی شده و در نتیجه مقادیر سرعت موج ریلی خاک بستر افزایش یابد.

## ۸- مراجع

-نشریه شماره ۳۹۴، (۱۳۸۶)، "دستورالعمل طراحی و نظارت بر روسازی راه آهن سریع السیر"، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، معاونت امور فنی.

-Abaqus Analysis User's Guide 6.14, (2014), ABAQUS Inc: USA.

-Abu-Farsakh, M., Tumay, M., & Voyiadjis, G., (2003), "Numerical parametric study of piezocone penetration test in clays. International Journal of Geomechanics", 3(2), pp.170-181.

-ASTM., (1994), "Standard test method for piles under static axial compression load", Designation D 1143-81, Annual book of ASTM standards, 4.

-Auersch, L., (2008), "The effect of critically moving loads on the vibrations of soft soils and isolated railway tracks", Journal of Sound and Vibration, 310(3), pp.587-607.

-Basack, S., & Sen, S., (2014), "Numerical solution of single pile subjected to simultaneous torsional and axial loads", International Journal of Geomechanics, 14(4), 06014006.

-Bian, X., & Chen, Y., (2006), "An explicit time domain solution for ground stratum response to harmonic moving

در پژوهش پیش رو پدیده تشدید در مسیر ریلی قطار سریع‌السیر تهران- اصفهان در محدوده دریاچه نمک استان قم به علت وجود بستر خاکی نرم با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی اجزاء محدود مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. به منظور اطمینان از صحت مدل عددی سه بعدی ایجاد شده، نتایج مدل با داده‌های به دست آمده از ابزار دقیق‌های نصب شده در مسیر ریلی واقع در منطقه Ledsgard کشور سوئد مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. همچنین به منظور اطمینان از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در نظر گرفته شده برای لایه‌های خاک منطقه، مدل عددی سه بعدی شمع منفرد با نتایج بدست آمده از آزمایش بارگذاری استاتیکی بر روی شمع آزمایشی اجرا شده در محل مورد صحت‌سنجی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به شرح موارد زیر است: -بستر خاکی مسیر ریلی از لایه‌های خاک رسی سست تشکیل شده است و در نتیجه مقادیر نشست ایجاد شده در مسیر ریلی در اثر عبور قطار به طور تقریبی ۱۴ میلی‌متر بوده و بیش از حد مجاز است. همچنین در سرعت‌های عبوری نزدیک به سرعت موج ریلی لایه‌های اول تا سوم خاک بستر پدیده تشدید رخ می‌دهد و در نتیجه در این سرعت‌های بحرانی ارتعاشات دینامیکی به مسیر وارده شده و نشست مسیر افزایش می‌یابد.

-در مدل‌سازی عددی به منظور کنترل نشست و افزایش مقدار سرعت بحرانی مسیر ریلی، بستر خاکی با اجرای شمع‌های بتنی به طول ۱۱ متر تحت بهسازی قرار گرفت که مقادیر بیشینه نشست مسیر به میزان ۵۵ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین در اثر بهسازی لایه‌های خاک بستر، پدیده تشدید در سرعت‌های عبوری ۱۰۰ و ۱۶۵ کیلومتر بر ساعت رخ نمی‌دهد و اولین بیشینه نشست مسیر در سرعت عبوری ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت معادل میانگین سرعت موج ریلی در لایه‌های سوم و چهارم بستر خاکی ایجاد می‌شود که نتیجه حاصله بر خلاف تحقیقات صورت گرفته توسط Tang et al (2019) است.

-کاهش فواصل افقی شمع‌ها تاثیری بر مقدار سرعت بحرانی مسیر نداشته و صرفاً مقدار نشست مسیر ریلی را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر گروه شمع اجرا شده در بستر خاکی به طور کامل لایه‌های اول و دوم خاک بستر را بهسازی نموده و با افزایش مقدار مدول الاستیسیته معادل لایه‌های مذکور، از ایجاد پدیده تشدید در سرعت‌های کم ممانعت به

- El Kacimi, A., Woodward, P. K., Laghrouche, O., & Medero, G. (2013), "Time domain 3D finite element modelling of train-induced vibration at high speed. *Computers & Structures*, 118, pp.66-73.
- Elias, Mohammed B., (2008), "Numerical Simulation of Pile Installation and Setup." Ph.D., diss University of Wisconsin-Milwaukee.
- Esveld, C., & Esveld, C., (2001), "Modern railway track, Vol. 385, Zaltbommel, Netherlands: MRT-productions.
- GAO, L. C., & YE, S. Y., (2015), "Numerical simulation of the single pile static load test based on ABAQUS software", *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, (3), 12.
- Grundmann, H., Lieb, M., & Trommer, E., (1999), "The response of a layered half-space to traffic loads moving along its surface", *Archive of Applied Mechanics*, 69(1), pp.55-67.
- Halkola, H., (1999), "Keynote lecture: Quality control for dry mix methods", *Dry mix methods for deep soil stabilization*. Edited by H. Bredenberg, G. Holm, and BB Broms. Stockholm, Sweden, pp.285-294.
- Hall, L., (2002), "Simulations and analyses of train-induced ground vibrations: A comparative study of two- and three-dimensional calculations with actual measurements".
- Khanmohammadi, M., & Fakharian, K., (2019), "Numerical modelling of pile installation and set-up effects on pile shaft capacity", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 13(5), pp.484-498.
- load", *Acta Mechanica Sinica*, 22(5), pp.469-478.
- Bian, X., Chen, Y., & Hu, T., (2008), "Numerical simulation of high-speed train induced ground vibrations using 2.5 D finite element approach", *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 51(6), pp.632.
- Bian, X., Cheng, C., Jiang, J., Chen, R., & Chen, Y., (2016), "Numerical analysis of soil vibrations due to trains moving at critical speed", *Acta Geotechnica*, 11(2), pp.281-294.
- Burke, G. K., Cacoilo, D. M., & Chadwick, K. R. (2000), "Super jet grouting: New technology for in situ soil improvement", *Transportation research record*, 1721(1), pp.45-53.
- Carlsten, P., & Ekström, J., (1996), "Lime and lime cement columns: guide for design", construction and control, Report 4: 95. Swedish Geotechnical Society.
- Chowdhury, I. and Dasgupta, S.P., (2003), "Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems", *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 8(0).
- Costa, P. A., Colaço, A., Calçada, R., & Cardoso, A. S., (2015), "Critical speed of railway tracks", *Detailed and simplified approaches*. *Transportation Geotechnics*, 2, pp.30-46.
- Dieterman, H. A., & Metrikine, V., (1997), "Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load", *European Journal of mechanics series a solids*, 16, pp.295-306.

- ground vibration, *Journal of Sound and Vibration*, 272(3-5), pp.909-936.
- Sondermann, W., & Toth, P. S., (2001), "State of the art of the jet grouting shown on different applications", In *Grouting Soil Improvement/ Geosystems including Reinforcement*, Fourth International Conference on Ground Improvement Geosystems, pp. 181-194.
- Tang, Y., Xiao, S., & Yang, Q., (2019), "Numerical study of dynamic stress developed in the high speed rail foundation under train loads", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123, pp.36-47.
- Terashi, M., (2003), "The state of practice in deep mixing methods", In *Grouting and ground treatment*, pp. 25-49.
- Thach, P. N., Liu, H. L., & Kong, G. Q. (2013). Evaluation of PCC pile method in mitigating embankment vibrations from a high-speed train. *Journal of geotechnical and geo environmental engineering*, 139(12), pp.2225-2228.
- Wolfert, A. R. M., Dieterman, H. A., & Metrikine, A. V., (1997), "Passing through the "elastic wave barrier" by a load moving along a waveguide", *Journal of Sound and Vibration*, 203(4), pp.597-606.
- Zhan, Y. G., Wang, H., & Liu, F. C., (2012), Modeling vertical bearing capacity of pile foundation by using ABAQUS. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17, pp.1855-1865.
- Krylov, V. V., (1995), "Generation of ground vibrations by superfast trains", *Applied Acoustics*, 44(2), pp.149-164.
- Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J., (1973), "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*, 99, (Tech Rpt).
- Li, L., Nimbalkar, S., & Zhong, R., (2018), "Finite element model of ballasted railway with infinite boundaries considering effects of moving train loads and Rayleigh waves", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, pp.147-153.
- Madshus, C. S., & Kaynia, A. M., (2000), "High-speed railway lines on soft ground: dynamic behaviour at critical train speed", *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), pp.689-701.
- Madshus, C., Lacasse, S., Kaynia, A., & Hårvik, L., (2004), "Geodynamic challenges in high speed railway projects", In *Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, pp. 192-215.
- Miller, G. F., Pursey, H., & Bullard, E. C., (1955), "On the partition of energy between elastic waves in a semi-infinite solid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 233(1192), pp.55-69.
- Randolph, M.F. and Wroth, C.P., (1981). "Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles". *Geotechnique*, 31(1), pp.143-157.
- Sayeed, M. A., & Shahin, M. A., (2016), "Three-dimensional numerical modelling of ballasted railway track foundations for high-speed trains with special reference to critical speed", *Transportation Geotechnics*, 6, pp.55-65.
- Sheng, X., Jones, C. J. C., & Thompson, D. J. (2004), A theoretical study on the influence of the track on train-induced

# **Three- Dimensional Numerical Simulation of the Geometrical Dimension Pile Group Effects on the Critical Speed of High- Speed Track Railway (Case Study: Tehran- Isfahan High Speed Track Railway)**

*Morteza Sabbaghi, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Morteza Esmaeili, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.*

*Mehdi kharghani, Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*E-mail: m\_esmaeili@iust.ac.ir*

Received: August 2021-Accepted: February 2022

## **ABSTRACT**

Existence of soft soil layers and high ground water level in the Qom Salt Lake area have caused deflection more than allowable limitation in Tehran- Isfahan high speed track railway. Due to reduce deflection of track railway in this area, improving the stiffness and strength of the soil beneath will be done by means of concrete pile group. But also, due to the high speed of train, resonance phenomenon is expected to happen. Despite conducting some researches on the effect of improving soft ground by pile in recent years, but there are ambiguities about performance of pile on the increasing critical speed of the track-ground system which track has been experienced large dynamic amplification as the train speed approaches that speed. So first, the bearing capacity of pile and soil layers geotechnical parameters have been determined by comparing the numerical modeling results of single pile with data obtained from in situ compressive loading test on that in this paper. Afterwards, the effect of the geometrical dimension pile group on the dynamic behavior and critical speed of track-ground system has been investigated under various speed of train (60-450 Km/h) using 3D finite element model. The results indicate that resonance phenomenon has been occurred at speed of 100 Km/h, which is equal to Rayleigh speed of first subgrade layer. However, improving of soil layers by pile group increases the value of the critical speed to 250 Km/h.

**Keywords:** Dynamic Behavior, Critical Speed, High Speed Railway Track, Pile Group, 3D Finite Element Model