

بررسی اندرکنش سازه-تونل در اثر ارتعاش ناشی از حرکت قطار با استفاده از روش مرز مقیاس شده

مسعود حاجی علیلوی بناب^{۱*}؛ حمیدرضا توحیدوند^۲؛ بابک بالا زاده^۲

۱- دانشیار؛ دانشکده مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکده مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه تبریز

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۱۲/۲۳؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۱۰/۰۹

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این مقاله به بررسی اثر وجود سازه‌های مجاور شامل ساختمان‌های شهری و یا تونل بر ارتعاشات ایجاد شده ناشی از ترافیک زیرزمینی پرداخته شده است. بدین منظور، از مدل‌های دو بعدی در حالت الاستودینامیک استفاده شده است. روش ترکیبی المان محدود و المان محدود مرزی مقیاس شده، برای مدل‌سازی بکار گرفته شده است. کاربرد روش مرز مقیاس شده در مدل‌سازی مساله ترافیک زیرزمینی در گذشته چندان رایج نبوده است. در این مقاله با استفاده از روش نوین مرز مقیاس شده، برای نخستین بار اندرکنش تونل-خاک-سازه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ساختمان‌های مجاور تونل‌ها می‌توانند نحوه ارتعاش تونل را تحت تاثیر قرار دهند و باعث ایجاد ارتعاشات بیشتر در تونل‌ها شوند. همچنین برای حالت وجود دو تونل مجاور، وضعیت بحرانی عبور همزمان دو قطار مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که اگر چه وجود تونل مجاور سختی جانبی تونل موجود را افزایش می‌دهد اما عبور همزمان دو قطار باعث تشدید قابل ملاحظه‌ای ارتعاشات خواهد شد.</p>	<p>مرز مقیاس شده اندرکنش ارتعاش ناشی از عبور قطار تونل میرایی تابشی</p>

۱- مقدمه

منجر به ارتعاش کلی سازه و در فرکانس‌های بالاتر تا ۲۵۰ هرتز باعث تحریک اجزای غیر سازه‌ای مانند درها و پنجره‌ها می‌گردد [2]. همچنین سازه‌های مجاور تونل‌های زیرزمینی می‌توانند امواج منتشره ناشی از عبور قطار را تحت تاثیر قرار داده و باعث افزایش ارتعاشات ایجاد شده در تونل شوند. تونل‌های دوقلو نیز از جمله مواردی است که ارتعاشات ایجاد شده توسط حرکت قطار می‌تواند تحت تاثیر وجود سازه‌ی مجاور قرار بگیرد. از سالیان گذشته تا کنون تحلیل ارتعاشات ناشی از حرکت قطار در بین محققین مورد توجه بوده است. بررسی‌های اولیه در این زمینه به صورت حل مساله بار متحرک در فضای ارتجاعی انجام می‌گرفت. در روش مدل‌سازی تحلیلی، اساس کار بر حل معادله دیفرانسیل جزئی انتشار امواج در نیم فضای ارتجاعی تحت بار متحرک است. فریبا (Feryba) (به نقل از منبع [2]) در سال ۱۹۷۲

احداث تونل‌های زیرزمینی در مناطق شهری به منظور تسهیل حمل و نقل عمومی و کاهش حجم ترافیک شهری در سال‌های اخیر در ایران توسعه‌ی زیادی یافته است. احداث خطوط مترو در شهرهای تبریز، مشهد، اهواز، شیراز، اصفهان و تکمیل خطوط مترو در شهر تهران از جمله این موارد هستند. وجود تونل‌های مترو در نزدیکی مناطق شهری و سازه‌های مجاور می‌تواند باعث بروز مشکلاتی شوند. ارتعاشات ایجاد شده ناشی از عبور قطار در تونل‌ها می‌تواند ارتعاشاتی را در سازه‌های مجاور ایجاد کند. این ارتعاشات اگرچه ویرانگر نیستند اما قادرند زندگی عادی ساکنین را تحت تاثیر قرار داده و احساس ناامنی را در آنان ایجاد کنند [1]. ارتعاشات در فرکانس‌های پایین‌تر از ۸۰ هرتز

روش‌های عددی هستند. هر یک از این روش‌های عددی معایب و مزایایی در حل معادلات دیفرانسیلی حاکم بر مساله دارند. روش المان محدود، متداول‌ترین روش برای مدل‌سازی مسایل استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها است. استفاده از این روش امکان مدل‌سازی هندسه‌های نامنظم، لایه‌بندی‌های مختلف و رفتار غیرخطی را فراهم می‌سازد [7]. اما استفاده از این روش در مدل‌سازی مسایل مربوط به محیط خاک که یک فضای نامحدود است، محدودیت‌هایی دارد. روش المان محدود اگرچه روشی شناخته شده برای مدل‌سازی عددی است اما حوزه‌ی کاربرد آن منحصر به دامنه‌های محدود است و تحلیل محیط‌های نامحدود خارج از توان المان‌های محدود است. خاک یک محیط نیمه بی‌نهایت محسوب می‌شود. بنابراین روش المان محدود به تنهایی قادر به مدل‌سازی محیط نامحدود خاک به ویژه برای تحلیل‌های دینامیکی نیست. متداول‌ترین راهکار در استفاده از المان‌های محدود برای مدل‌سازی محیط نامحدود، مدل‌سازی یک محیط بسیار بزرگ است به طوری که امواج منعکس شده از مرزها، پاسخ مورد نظر را در بازه زمانی دلخواه تحت تاثیر قرار ندهند. مدل‌سازی چنین محیط بزرگی هم از لحاظ زمانی و هم محاسباتی پرهزینه خواهد بود. در ضمن، در بازه‌های زمانی بلند مدت، اثر امواج بازگشتی بر پاسخ‌ها از دقت روش خواهد کاست. به این نحوه مدل‌سازی روش مستقیم (*direct method*) می‌گویند [8].

بر خلاف روش المان محدود، با استفاده از روش المان مرزی و استفاده از یک جواب اساسی (*fundamental solution*) مناسب می‌توان شرایط میرایی شعاعی (*radiation damping*) را در روش المان مرزی برآورده کرد. در روش المان مرزی، مدل‌سازی هندسه نامنظم محیط و تغییر در خواص مصالح همچنان در دسر ساز است. به دست آوردن پاسخ اساسی برای شرایط مختلف نیز زمان‌بر بوده و باعث دشواری روند محاسبات می‌شود. به طور خلاصه روش المان مرزی دو مشکل اساسی دارد، اول این که برای تحلیل مسایل، نیازمند پاسخ اساسی آن مساله است، دوم این که انتگرال‌گیری‌های موجود در این روش می‌توانند دچار تکینگی شوند [9]. از این رو برای حل مسایل انتشار امواج در محیط نامحدود، از مدل‌های ترکیبی استفاده می‌شود که در آن برای مدل‌سازی محیط، مساله به دو ناحیه نزدیک و دور

میلادی با استفاده از روش تبدیل انتگرال فوریه، پاسخ محیط نامحدود به بار متحرک نقطه‌ای را برای سه محدوده سرعت بررسی نمود. بر اساس این مطالعه، فریبا بیان نمود که در سرعت‌های بالاتر از سرعت بحرانی (معادل با سرعت موج ریلی) جابجایی‌ها به میزان قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابند. متریکین (*Metrikine*) و راوودر [3] (*Vrouwenvelder*) مساله ارتعاش ناشی از حرکت بار متحرک در داخل تونل را با استفاده از نظریه‌ی تیر بر روی بستر الاستیک تحلیل نموده‌اند. فورست (*Forrest*) و هانت (*Hunt*) [3] در سال ۲۰۰۶ میلادی مدل تحلیل سه بعدی دیگری را برای محاسبه ارتعاش ناشی از حرکت بار متحرک در داخل تونل پیشنهاد نمودند که بر اساس نظریه محیط پیوسته در دستگاه مختصات استوانه‌ای است. باید توجه داشت که تغییرات مشخصات محیطی و هندسه پیچیده مسایل، مانع از یافتن جواب تحلیلی برای بسیاری از مسایل مهندسی می‌شود.

رفتار سازه در برابر بارگذاری دینامیکی را می‌توان با سنجش‌های درجا نیز مشخص نمود. این کار، نیاز به اندازه‌گیری‌های دقیق و متناوب و ساخت یک پایگاه داده برای سنجش‌های انجام گرفته دارد تا پس از انجام بررسی‌های آماری در شرایط مشابه، رفتار سازه مورد نظر را تخمین زد. مطالعات میدانی انجام گرفته توسط ملک (*Melke*) و کرامر (*Kraemer*) [5] و همچنین تحقیقات دگرنت (*Degrad*) و لمبرت (*Lombaret*) [6] نمونه‌ای از مطالعات درجا برای بررسی ارتعاشات ناشی از عبور قطار را نشان می‌دهد. سنجش‌های میدانی نیازمند تجهیزات دقیق اندازه‌گیری و زمان زیاد هستند که از مطلوبیت این روش‌ها می‌کاهد.

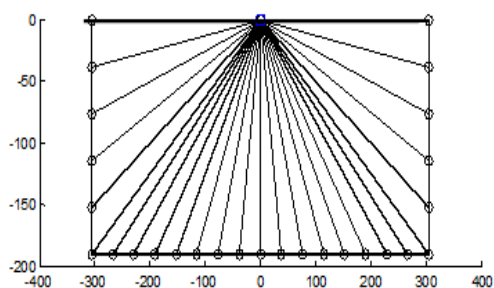
روش دیگری که می‌توان برای تحلیل ارتعاشات ناشی از عبور قطار مورد استفاده قرار داد، روش مدل‌سازی عددی است. از دهه‌ی هفتاد میلادی تاکنون و با توجه به پیشرفت رایانه‌ها، نقش روش‌های عددی در حل این دست مسایل پررنگ‌تر شده است. با انجام مطالعات گسترده روش‌های مختلفی ارائه شده است که برای حل مسایل واقعی مهندسی مقرون به صرفه‌تر است. روش تفاضل‌های محدود (*finite difference*)، المان‌های محدود (*finite element*) و المان‌های مرزی (*boundary element*) از نمونه‌های بارز

می‌کند تا تنش‌های برشی و قایم را در مرز مدل از بین برده و از بازگشت امواج به سیستم اجتناب کند [13]. نجاتی و همکاران [14] با استفاده از روش تفاضل محدود و مرزجاذب به بررسی پارامترهای موثر بر ارتعاش ناشی از عبور قطار در تونل پرداخته‌اند. از دیگر روش‌های مهم در بررسی ارتعاشات ناشی از عبور قطار می‌توان به روش‌های دو و نیم بعدی اشاره کرد. هانگ (Hung) [15] در سال ۲۰۱۰ میلادی مدل دو و نیم بعدی را با استفاده از المان‌های محدود-نامحدود برای مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه در حوزه فرکانس- عدد موج ایجاد کرد. همچنین گالوین (Galvin) و همکاران [16] در سال ۲۰۱۰ میلادی این روش را برای مدل ترکیبی المان محدود-المان مرزی استفاده کردند. در روش دو و نیم بعدی، با قرارگیری یک درجه آزادی در جهت خارج صفحه، علاوه بر دو درجه آزادی در حالت کرنش صفحه‌ای برای هر حرکت در جهت انتشار موج، می‌توان با مدل‌سازی دو بعدی پاسخ سه بعدی سازه را به دست آورد. در سال‌های اخیر روش المان محدود مرزی مقیاس شده (*scaled boundary finite element*) به عنوان روشی قدرتمند و نیمه تحلیلی که قادر است همانند روش المان مرزی محیط نامحدود خاک را به خوبی مدل کند و بر خلاف روش المان مرزی نیازی به پاسخ اساسی نداشته باشد، معرفی شده است. این روش نسبتاً نوین، متغیر مکانی (در مسایل مکانیک جامدات جابه‌جایی) را در مرز سیستم به صورت عددی و در داخل سیستم به صورت تحلیلی به دست می‌آورد [17]. روش المان محدود مرزی مقیاس شده توسط ولف (Wolf) و سونگ (Song) [17] ایجاد شده است. این روش تنها حاصل یک سری عملیات ریاضی به تنهایی نبوده بلکه محصول نبوغ و ابتکار به وجود آورندگان آن است. دیکس (Deeks) [18] در سال ۲۰۰۲ با همراهی ولف فرمول‌بندی روش مرز مقیاس شده را با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار بیان نمود. روش مرز مقیاس شده (حالت کلی روش) همانند روش المان مرزی و لایه نازک یک روش همه‌گیر محسوب می‌شود. برای کاهش هزینه محاسباتی روش مرز مقیاس شده، لمان (Lehmann) [19] فرمول‌بندی بازگشتی ارائه نمود که روش مرز مقیاس شده را برای حالت بارگذاری دینامیکی به یک روش نیمه موضعی (*Semi-Local*) تبدیل کرد. به طور خلاصه مزایای روش

تقسیم بندی می‌شود. برای مدل‌سازی ناحیه نزدیک از روش المان محدود و برای ناحیه دور به منظور ارضای شرایط میرایی شعاعی از روش المان مرزی استفاده می‌شود [8]. به این نحوه‌ی مدل‌سازی روش زیرسازه (*sub-structure*) می‌گویند. از جمله‌ی کاربردهای روش المان مرزی در مسایل مهندسی تونل می‌توان به بررسی انجام گرفته توسط گوپتا و همکاران [10] در سال ۲۰۰۹ میلادی اشاره کرد. وی با مدل‌سازی سه بعدی المان محدود و المان مرزی و با احتساب اندرکنش دینامیکی قطار- خط - تونل - خاک، مطالعه‌ای بر روی پارامترهای موثر مانند میرایی مواد و ضریب برشی خاک انجام داد. همچنین نتیجه‌گیری نمود که مقادیر ارتعاشی در نواحی مجاور تونل تاثیرپذیری بالایی از هندسه تونل دارا است. اندرسن (Andersen) و جونز (Jones) [11] نیز در سال ۲۰۰۶ میلادی با استفاده از مدل ترکیبی المان محدود-المان مرزی نسبت به مقایسه نتایج مدل‌سازی دو بعدی و سه بعدی اقدام کرده و بیان نمودند که مدل دو بعدی در فرکانس‌های مختلف به ویژه در فرکانس‌های پایین، نتایج مشابهی با مدل سه بعدی نشان می‌دهد. از این رو برای بررسی کیفی مدل دو بعدی کافی است، اما برای بررسی‌های دقیق‌تر مدل‌سازی سه بعدی ضروری است.

روش دیگری که برای مدل‌سازی محیط‌های نامحدود به ویژه در مسایل ژئومکانیک کاربرد دارد، روش لایه‌ی نازک (*thin layer*) است. روش لایه‌ی نازک یک روش نیمه تحلیلی است که قادر است به خوبی محیط نامحدود خاک را مدل‌سازی کند [12]. این روش برای محیطی که متشکل از لایه‌های بی‌نهایت یا نیمه‌بی‌نهایت افقی باشد، قابل کاربرد است. روش لایه‌ی نازک همانند روش المان مرزی یک روش همه‌گیر (*global*) در فضا و زمان محسوب می‌شود. همه‌گیری بدان معنا است که درجات آزادی مختلف و گام‌های زمانی متفاوت به یکدیگر وابسته هستند. روش‌های همه‌گیر از لحاظ محاسباتی گران و پرهزینه محسوب می‌شوند. در مقابل، روش‌های موضعی (*Local Methods*) وجود دارند که از لحاظ محاسباتی کم هزینه‌تر بوده اما دقت کمتری نیز دارند. از جمله‌ی این روش‌های می‌توان به روش مرز جاذب (*absorbing boundary*) اشاره کرد [13]. روش مرز جاذب با استفاده از فنرها و میراگرهایی تلاش

استفاده از اصل کار مجازی به یک دستگاه معادلات خطی تبدیل می‌کند. روش المان محدود مرزی مقیاس شده این معادله دیفرانسیل جزئی حاکم را به یک سری معادلات دیفرانسیل معمولی تبدیل می‌کند و سپس آن‌ها را به شکل نیمه تحلیلی حل می‌کند [17] در این روش، مرز محیط نسبت به یک مرکز مقیاس پاره‌سازی می‌گردد. این مرکز مقیاس با مختصات (x_0, y_0) مانند آن‌چه در شکل ۱ دیده می‌شود، چنان باید انتخاب شود که تمام المان‌های مرزی به وجود آمده، از این نقطه قابل مشاهده باشد. در روش المان محدود مرزی مقیاس شده، دامنه توسط گسسته‌سازی المان محدود با مختصات محلی در مرز و یک مولفه شعاعی با پارامتر مقیاسی بیان می‌شود. تطابق این تبدیل را می‌توان با نحوه مدل‌سازی محیط نامحدود بر اساس تشابه بین مرزهای فرضی مقایسه نمود. این تبدیل، فضا را از دستگاه مختصات دکارتی به دستگاه جدیدی می‌نگارد که توسط این تبدیل مختصاتی معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی به معادله دیفرانسیل معمولی با متغیر مستقل در جهت شعاعی تبدیل می‌گردد به گونه‌ای که ضرایب معادله اخیر از گسسته‌سازی المان محدود در جهت محیطی به دست می‌آید [20].



شکل ۱- گسسته‌سازی مرز دامنه به روش مرز مقیاس شده

گسسته‌سازی در جهت محیطی با استفاده از روش باقیمانده‌های وزنی انجام می‌شود. معادله دیفرانسیل معمولی به دست آمده را می‌توان به صورت تحلیلی حل نمود که منجر به تعیین جواب دقیق در راستای مولفه شعاعی مساله می‌شود. اگر اصل کار مجازی را در نظر گرفته و آن را با استفاده از روش باقیمانده‌های وزن‌دار بر اساس سیستم مختصات مرز مقیاس شده ضعیف (*weak form*) کنیم در نهایت به دو رابطه‌ی اساسی زیر خواهیم رسید [20].

مرز مقیاس شده نسبت به روش المان مرزی را می‌توان عدم نیاز روش مرز مقیاس شده به پاسخ اساسی، عدم وجود انتگرال‌های تکین در تشکیل ماتریس‌های ضرایب، عدم نیاز به تمهیدات خاص در مواجهه با گوشه‌ها (در مدل‌سازی مساله) و شرایط مرزی متنوع مانند تغییر مکانی یا نیرویی و همچنین قابلیت روش مرز مقیاس شده در مدل‌سازی هندسه‌های پیچیده و تغییرات مصالح برشمرده. تاکنون روش مرز مقیاس شده در حل مسایل متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است اما کاربرد این روش در مدل‌سازی و بررسی اندرکنش تونل-خاک-سازه چندان مورد توجه نبوده است. در این مقاله روش المان محدود مرزی مقیاس شده در ترکیب با روش المان محدود برای بررسی اندرکنش تونل-خاک-سازه در اثر ارتعاش ناشی از حرکت قطار به کار گرفته شده است.

در ابتدا توصیفی اجمالی از روش المان محدود مرزی مقیاس شده ارائه شده و در بخش بعدی برنامه‌ی نوشته شده برای تحلیل مسایل الاستودینامیک با استفاده از روش ترکیبی المان محدود- المان محدود مرزی مقیاس شده صحت سنجی شده است. در ادامه، جزئیات مدل‌سازی انجام گرفته نشان داده شده است. سپس نتایج ارائه شده و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- روش المان محدود مرزی مقیاس شده

روش المان محدود مرزی مقیاس شده که ابتدا تحت عنوان روش سلول المان محدود همسان (*Consistent infinitesimal finite element cell method*) ارائه شده بود [17]، برای مدل‌سازی محیط نامحدود استفاده می‌شود. مبنای استخراج معادلات روش قدیمی، مفاهیم فیزیکی انتشار موج در محیط گسسته‌سازی شده توسط المان محدود بود که باعث کاهش کارایی آن در کارهای عملی می‌شد. در این بخش معادلات اساسی مربوط به روش جدید عددی از طریق معرفی دستگاه مختصات ویژه ارائه می‌شود و نحوه کاربرد آن برای مدل‌سازی محیط نامحدود بیان می‌شود. روش المان محدود مرزی مقیاس شده به نحوی استخراج شده است که از مزایای موجود در تحلیل معادلات دیفرانسیل معمولی بهره‌گیرد [20]. روش المان محدود، معادلات دیفرانسیل جزئی ناهمگن حاکم بر مسایل را با

مقیاس شده در واقع جایگزین پاسخ اساسی در روش المان مرزی شده است. معادله‌ی لازم برای محاسبه‌ی آن، به صورت زیر است [22].

$$\int_0^t [M^\infty(t-\tau)][E^0]^{-1}[M^\infty(\tau)]d\tau + \int_0^t [M^\infty(\tau)]d\tau + ([E^1][E^0]^{-1} - 1.5[I]) \int_0^{\tau} [M^\infty(\tau')]d\tau' d\tau + \int_0^{\tau} [M^\infty(\tau')]d\tau' d\tau ([E^0]^{-1}[E^1]^T - 1.5[I]) - \frac{t^3}{6}([E^2] - [E^1][E^0]^{-1}[E^1]^T)H(t) - t[M^0]H(t) = 0 \quad (4)$$

$H(t)$ در رابطه‌ی فوق تابع پله است. با محاسبه‌ی ماتریس پاسخ شتاب به بار ضربه‌ی واحد، رابطه میان محیط دور و محیط نزدیک که رابطه‌ای به صورت انتگرال پیشینی است، به صورت زیر بیان می‌شود [22].

$$\{R(t)\} = \int_0^t [M^\infty(t-\tau)]\{a(\tau)\}d\tau \quad (5)$$

که در این رابطه، $a(t)$ بردار شتاب در زمان t است. در رابطه‌ی (۵) دو مجهول شتاب و نیروی اندرکنشی به صورت توأم وجود دارند. لذا لازم است در چرخه تحلیل دینامیکی برنامه، نیروی اندرکنشی نیز برای هر گام زمانی به صورت غیرصریح محاسبه شود. در این مقاله از روش نیومارک برای حل رابطه‌ی (۳) و (۵) استفاده گردیده است.

۳- صحت سنجی برنامه‌ی نوشته شده

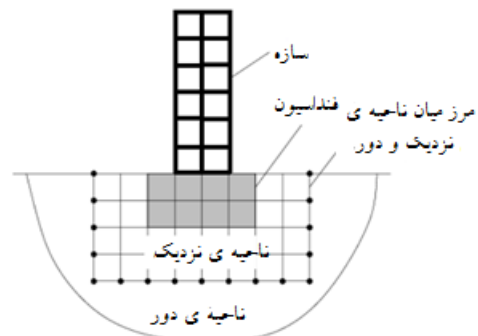
برای صحت سنجی برنامه‌ی نوشته شده به زبان *MATLAB*، مساله‌ای مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است. این مساله در اصل توسط استاموس (*Stamos*) و همکاران [23] با استفاده از روش ترکیبی المان محدود- المان مرزی مورد بررسی واقع شده است. سیستم، شامل یک تونل با روکش بتنی، یک سازه‌ی مجاور (از نوع بلوک الاستیک) و بار عبوری ترافیک سطحی و زیرزمینی است. برای سادگی مدل‌سازی، استاموس و همکاران در این تحقیق و سایر تحقیقات خود از بلوک الاستیک به عنوان سازه استفاده کرده‌اند. در این بخش نتایج حاصل از روش المان محدود- المان محدود مرزی مقیاس شده با نتایج ارایه شده توسط استاموس مقایسه شده است.

$$\{P\} = [E^0]\{u_n\}_\xi + [E^1]\{u_n\} \quad (1)$$

رابطه‌ی (۲)، یک معادله‌ی دیفرانسیل معمولی مرتبه دوم ناهمگن از جنس معادلات کوشی اولر (*Euler-Cauchy*) است. این رابطه را معادله‌ی المان محدود مرزی مقیاس شده در جابه‌جایی می‌نامند.

$$[E^0]\xi^2\{u(\xi)\}_{,\xi\xi} + ([E^0] - [E^1] + [E^1]^T)\xi\{u(\xi)\}_{,\xi} - [E^2]\{u(\xi)\} = \{0\} \quad (2)$$

ضرایبی که در روابط (۱) و (۲) به کار رفته‌اند، ماتریس‌های ضرایب روش المان محدود مرزی مقیاس شده می‌باشند. اگر مطابق شکل ۲ دامنه را به دو بخش محیط دور و محیط نزدیک تقسیم کنیم، معادله‌ی حرکت به صورت رابطه‌ی (۳) بیان خواهد شد [21].



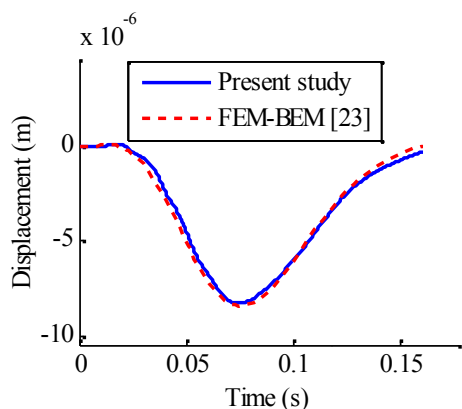
شکل ۲- تقسیم دامنه به حوزه‌ی دور و نزدیک

در رابطه‌ی (۳)، زیرنویس b بیان‌گر درجات آزادی موجود در گره‌های واقع بر مرز ناحیه‌ی دور و ناحیه نزدیک است، در حالی که زیرنویس s بیان‌گر سایر درجات آزادی است. γ ضریب نیومارک برای تحلیل انتگرال زمانی معادله‌ی حرکت است.

$$\begin{bmatrix} \{M_{ss}\} & \{M_{sb}\} \\ \{M_{bs}\} & \{M_{bb}\} + \gamma\Delta t [M^\infty]_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \{C_{ss}\} & \{C_{sb}\} \\ \{C_{bs}\} & \{C_{bb}\} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_s \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_s \\ P_b - R \end{Bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه‌ی فوق M^∞ ماتریس پاسخ شتاب به بار ضربه‌ی واحد (*acceleration unit impulse response*) است. ماتریس پاسخ شتاب به ضربه‌ی واحد در روش مرز

محدود-المان محدود مرزی مقیاس شده و روش قدیمی تر
المان محدود-المان مرزی به دست آمده است.



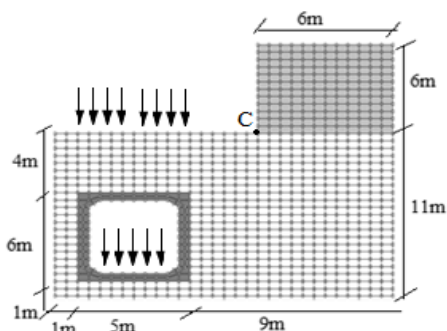
شکل ۵- تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی در نقطه‌ی C

برای اطمینان بیشتر از صحت برنامه نوشته شده، مساله مشابه دیگری که توسط ژنر (Genes) [24] با روش ترکیبی المان مرزی-المان محدود و مرز مقیاس شده ارائه شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات هندسی تونل در تحقیق ژنر مشابه با تحقیق استاموس است. مشخصات مکانیکی سیستم در جدول ۲ ذکر شده است. در این مدل سازی، ژنر از وجود سازه مجاور صرف نظر کرده است.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی سیستم مفروض در تحقیق ژنر [24]

تونل	خاک	مشخصه‌ی مکانیکی
6×10^6	$2,66 \times 10^5$	مدول الاستیک (kN/m^2)
۲۰۰۰	۲۰۰۰	دانسیته (Kg/m^3)
۰,۲۵	۰,۳۳	نسبت پواسون

مشخصات هندسی سیستم مدل سازی شده در تحقیق ژنر در شکل ۶ رسم شده است. نقطه‌ی A و B به عنوان نقطه‌ی ثبت جابه‌جایی در نظر گرفته شده و به علت تقارن، فقط نیمی از مدل پاره‌سازی (Discretization) گردیده است. بار اعمالی یک بار تک پله‌ای مشابه شکل ۴ است. شدت بار وارده برابر $50 kN/m$ و زمان اعمال بار مشابه بار نشان داده شده در شکل ۴ انتخاب شده است. شکل ۸ تاریخچه زمانی جابه‌جایی نقاط کنترل را نشان می‌دهد.



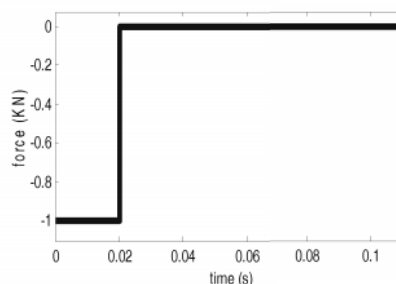
شکل ۳- هندسه‌ی مساله‌ی استاموس برای صحت‌سنجی برنامه‌ی نوشته شده

ضخامت لاینینگ (*lining*) بتنی تونل در شکل فوق ۰,۵ متر است. مشخصات مکانیکی خاک، تونل و سازه‌ی مجاور در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی سیستم مفروض استاموس [23]

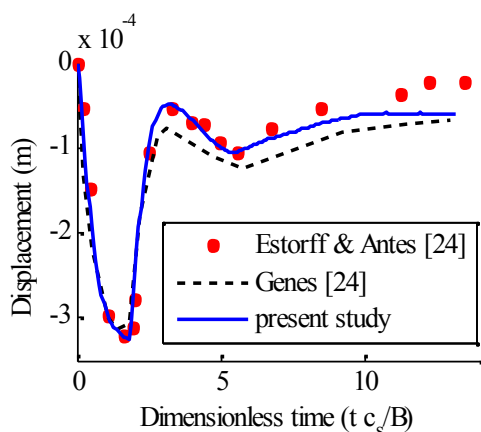
تونل	سازه	خاک	مشخصه‌ی مکانیکی
3×10^7	3×10^6	$2,66 \times 10^5$	مدول الاستیک (kN/m^2)
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	دانسیته (Kg/m^3)
۰,۲۵	۰,۳	۰,۳۳	نسبت پواسون

برای شدت بار وارده در شکل فوق برای ترافیک سطحی و بار قطار برابر $1 kN/m$ در نظر گرفته شده است. تاریخچه‌ی زمانی بار وارده در شکل ۴ رسم شده است.

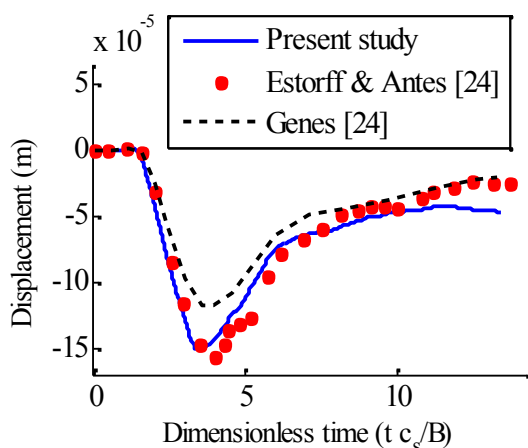


شکل ۴- تاریخچه‌ی زمانی بار اعمالی

تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی برای نقطه‌ی C در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد، تطابق بسیار مناسبی میان روش ترکیبی نوین المان



(الف)

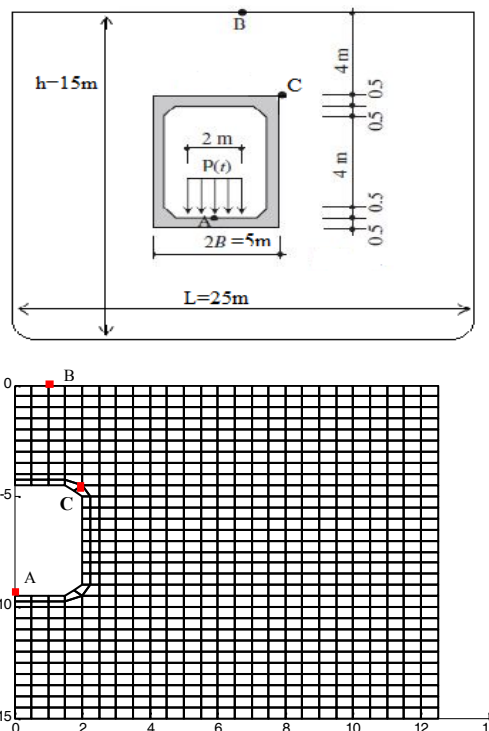


(ب)

شکل ۷- تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی
الف- نقطه‌ی A ب- نقطه‌ی B

به واقع در این مقاله، پاسخ سیستم به ضربه‌ی واحد سنجیده شده است. این بارگذاری برای بررسی نحوه اندرکنش تونل-خاک-سازه کافی است. سیستم مورد ارزیابی در شکل ۸ نشان داده شده است. مشخصات مکانیکی لایه‌های خاکی مفروض در جدول ۲ بیان شده‌اند.

مشخصات روکش بتنی (لاینینگ) و سازه‌ی مجاور همانند جدول ۲ انتخاب شده و از لغزش میان لایه‌های خاک صرف نظر شده است.

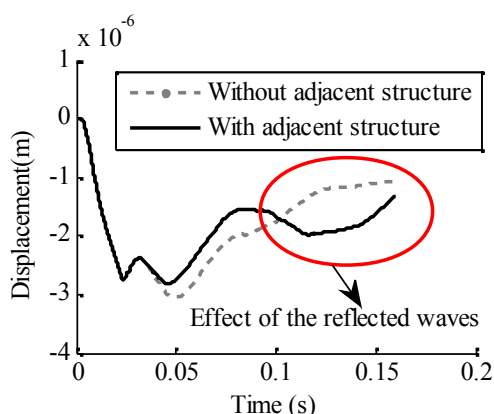


شکل ۶- هندسه‌ی مساله‌ی ژنز برای صحت‌سنجی برنامه‌ی نوشته شده

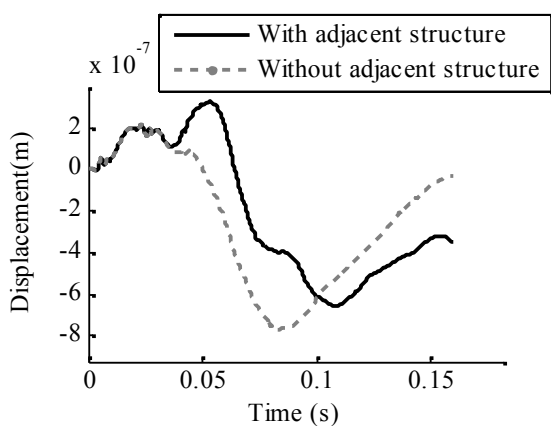
به منظور انجام صحت‌سنجی بهتر، نتایج ارایه شده توسط انتس (Antes) و استورف (Estorff) (با روش المان مرزی) نیز از مقاله‌ی ارایه شده توسط ژنز استخراج و مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تطابق مناسبی میان نتایج به دست آمده در این مقاله و سایر تحقیقات حاصل شده است. پس از کسب اطمینان از صحت برنامه نوشته شده، در بخش بعد به بررسی اثر سازه‌ی مجاور تونل بر پاسخ ارتعاش ناشی از عبور قطار پرداخته شده است.

۴- بررسی نتایج

سیستم مورد ارزیابی در این بخش تقریباً مشابه سیستم نشان داده شده در شکل ۳ است. به جای خاک همگن از خاک متشکل از سه لایه استفاده شده است. لایه‌ی اول رس نرم، لایه‌ی دوم ماسه با تراکم معمولی و لایه‌ی سوم ماسه‌ی متراکم. بار اعمالی مشابه شکل ۴ انتخاب شده است.



(الف)



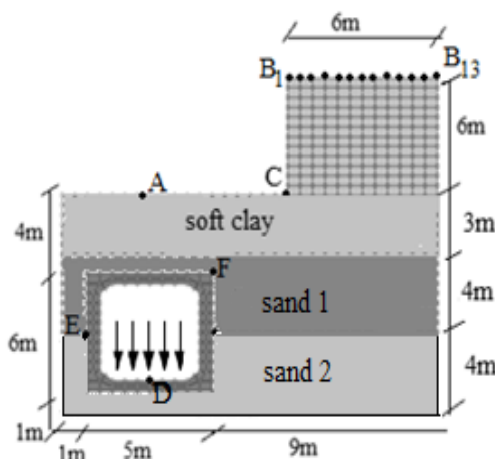
(ب)

شکل ۹- جابه‌جایی نقطه‌ی F تحت بار اعمالی با شدت واحد
الف- جابه‌جایی قائم ب- جابه‌جایی افقی

شکل ۱۰ نحوه‌ی انتشار امواج ایجاد و نحوه بازگشت امواج از سازه به سمت را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد. شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان می‌دهند که برای مولفه‌ی قائم جابه‌جایی، از ثانیه‌ی ۰٫۰۸ موجی از سمت سازه به سمت تونل باز می‌گردد که باعث افزایش مقادیر جابه‌جایی در نقطه‌ی F می‌شود. در ثانیه‌ی ۰٫۱۱۲۵، افزایش جابه‌جایی قائم ناشی از موج بازگشتی به مقدار بیشینه‌ی خود رسیده است. برای حالت جابه‌جایی افقی نیز دیده می‌شود که بدون وجود سازه‌ی مجاور، ارتعاش بعد از ۰٫۱۶ ثانیه به مقدار صفر رسیده در حالی که وجود سازه‌ی مجاور باعث شده است که بعد از ۰٫۱۶ ثانیه هنوز جابه‌جایی صفر نشود.

جدول ۲- مشخصات مکانیکی لایه‌های خاک در سیستم

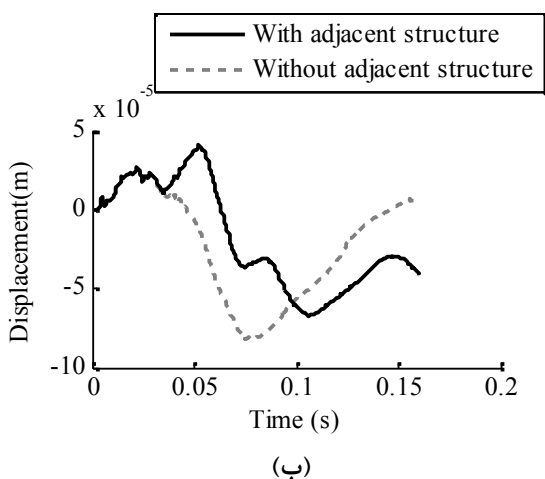
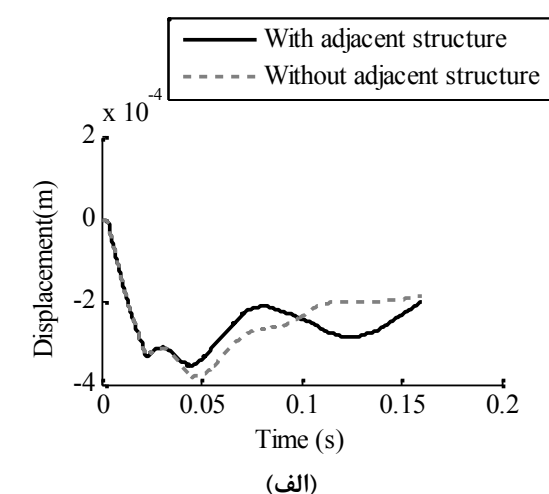
مورد ارزیابی				
مشخصه‌ی مکانیکی	ماسه نوع ۱	ماسه نوع ۲	رس نرم	
مدول الاستیک (KN/m^2)	8×10^4	2×10^5	7×10^3	
دانشیه (Kg/m^3)	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	
نسبت پواسون	۰٫۳۳	۰٫۳۳	۰٫۳۳	



شکل ۸- سیستم مورد ارزیابی و موقعیت نقاط کنترل

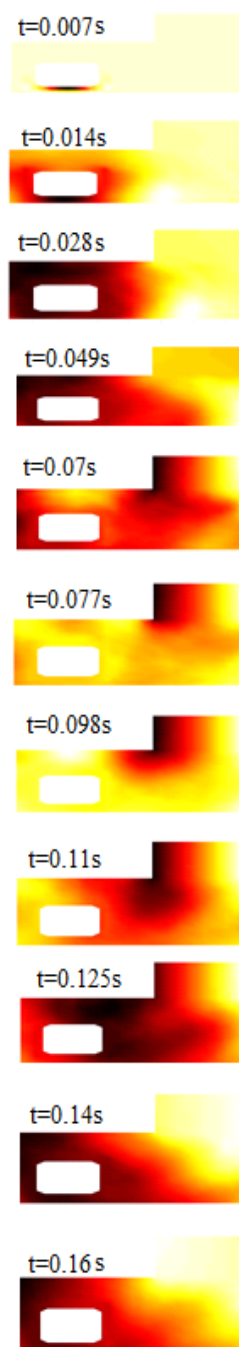
با اعمال بار نشان داده شده در شکل ۴ به عنوان بار ترافیک زیرزمینی، تاریخچه‌ی زمانی جابه‌جایی در نقطه‌ی F ثبت شده است. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، اگر چه بار اعمالی تک پالسی اثر عبور واگن‌های متوالی را در بر ندارد اما برای بررسی رفتار سیستم تحت عبور قطار و بررسی اثرات وجود سازه‌ی مجاور کفایت می‌کند. برای روشن شدن اثر امواج بازگشتی، سازه مجاور از سیستم حذف شده و نتایج حاصل از آن، با حالت وجود سازه‌ی مجاور مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این بررسی در شکل ۹ برای نقطه‌ی F نشان داده شده است. جابه‌جایی قائم نقطه‌ی F نشان می‌دهد که وجود سازه مجاور منجر به بازگشت موج به سمت تونل پس از ۰٫۱۵ شده است. این بازگشت موج به سمت تونل منجر به افزایش جابه‌جایی قائم جداره تونل شده است.

کاسته است. به منظور این که به جای شدت بار واحد، شدت بار واقعی مدنظر قرار گیرد، شدت بار 125 kN/m انتخاب و به سیستم اعمال می‌شود. جابه‌جایی نقطه‌ی F مطابق شکل ۱۱ به دست آمده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تفاوت رفتاری میان سیستم با باری به شدت واحد و سیستم تحت بار واقعی وجود ندارد. این شکل نیز همانند شکل ۹ نشان می‌دهد که موج بازگشتی باعث افزایش ارتعاش نقطه‌ی F بعد از 0.1 ثانیه از زمان اعمال بار شده است.



شکل ۱۱- جابه‌جایی نقطه‌ی F تحت بار واقعی
الف- جابه‌جایی قائم ب- جابه‌جایی افقی

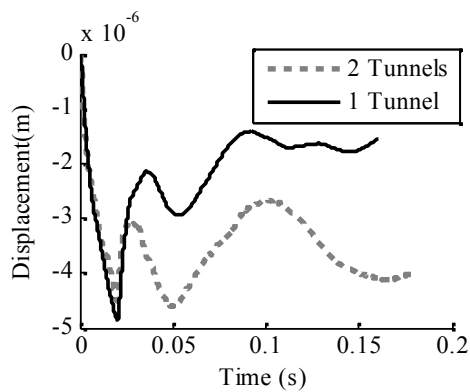
اگر یک تونل دیگر، مجاور تونل موجود احداث شده باشد، برای حالت بحرانی یعنی عبور هم‌زمان دو قطار از تونل‌ها،



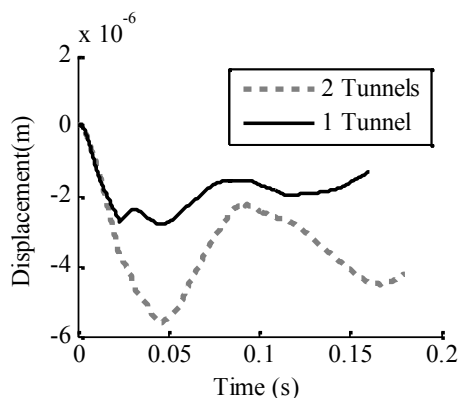
شکل ۱۰- نحوه‌ی انتشار امواج در سیستم با وجود سازه‌ی مجاور

همچنین این شکل‌ها نشان می‌دهند که وجود سازه‌ی مجاور اندکی از جابه‌جایی دینامیکی پیشین‌هی نقطه‌ی F را

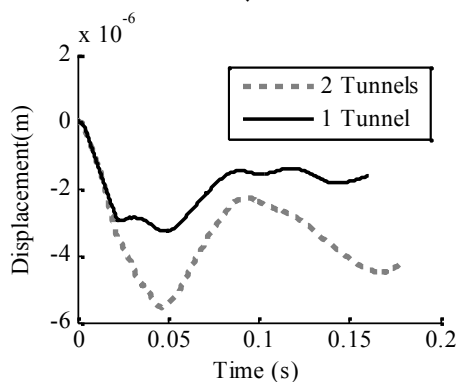
جاهه‌جایی قائم نقاط E ، D و F (نشان داده شده در شکل ۸) در شکل ۱۳ رسم شده است.



(الف)



(ب)

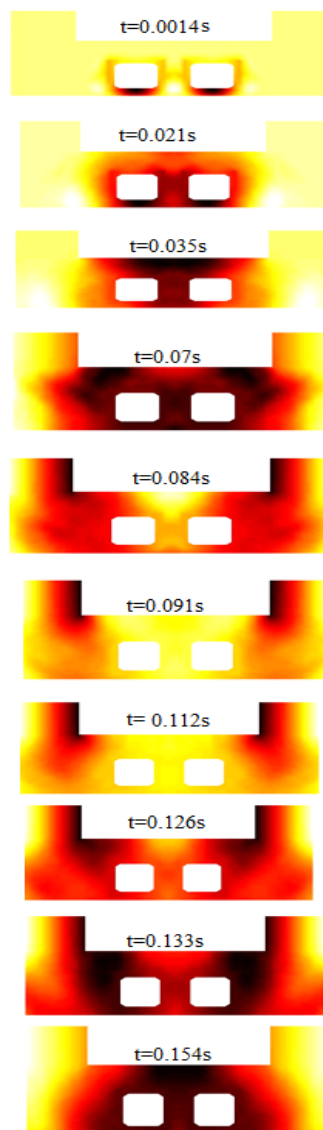


(ج)

شکل ۱۳- جاهه‌جایی قائم در نقاط الف- D -ب- F -ج- E

همان‌طور که شکل ۱۳ نشان می‌دهد، عبور هم‌زمان دو قطار در تونل‌ها موجب افزایش قابل ملاحظه‌ی جاهه‌جایی

نحوی انتشار امواج برای زمان‌های متفاوت در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- نحوه‌ی انتشار امواج در سیستم با وجود تونل و سازه‌ی مجاور

در این تحلیل مشخصات خاک لایه بندی شده و سازه مطابق مساله‌ی حل شده در بخش قبل انتخاب شده و بار اعمالی به صورت بار تک پالسی با شدت واحد انتخاب شده‌است. به دلیل تقارن فقط نصف سیستم تحلیل شده است. برای درک بیشتر از نحوه‌ی تاثیر تونل مجاور،

لاینینگ بتنی سبب افزایش سختی افقی جانبی در سمت تونل مجاور شده و ارتعاشات کمتر افقی مابین دو تونل شاهد خواهیم بود. این شکل همچنین نشان می‌دهد که در سمت دیگر تونل که در مجاورت تونل دوم نیست، حرکت هم‌زمان دو قطار سبب افزایش ارتعاشات خواهد شد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش ترکیبی المان محدود-المان محدود مرزی مقیاس شده به بررسی اندرکنش میان خاک- تونل و سازه‌ی مجاور تونل پرداخته شد. نشان داده شد، اگر تونل در کنار ساختمان‌های شهری احداث شده باشد، علاوه بر این که ارتعاشات ناشی از عبور قطار ساختمان مجاور را تحت تاثیر قرار می‌دهد، ساختمان مجاور نیز می‌تواند بر نحوه‌ی ارتعاش تونل اثرگذار باشد. این امواج انعکاس یافته از سازه به تونل، موجب افزایش جابه‌جایی‌ها در تونل خواهند شد. وجود سازه‌ی مجاور همچنین موجب کاهش اثر میرایی تابشی محیط خاک می‌گردد. همچنین اثر وجود تونل مجاور نیز مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که برای حالت عبور هم‌زمان دو قطار در تونل‌ها، جابه‌جایی قائم در تمام نقاط سیستم افزایش پیدا خواهد کرد، در حالی که جابه‌جایی افقی در ناحیه‌ی میان دو تونل کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان گفت وجود تونل مجاور می‌تواند سختی افقی دینامیکی را افزایش دهد. در این مقاله همچنین به طور ضمنی نشان داده شد که مرز مقیاس شده‌ی به کار رفته، به خوبی توانست شرایط مرزی لازم برای عدم انعکاس امواج رسیده را تامین کند.

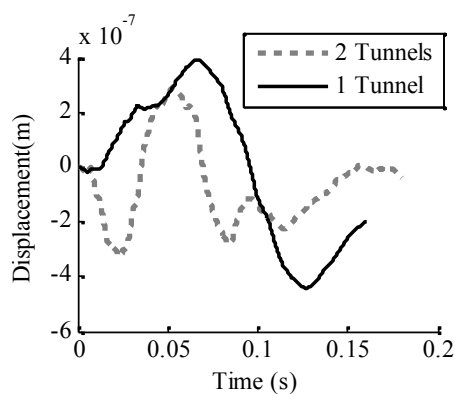
۶- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول آورده شده است.

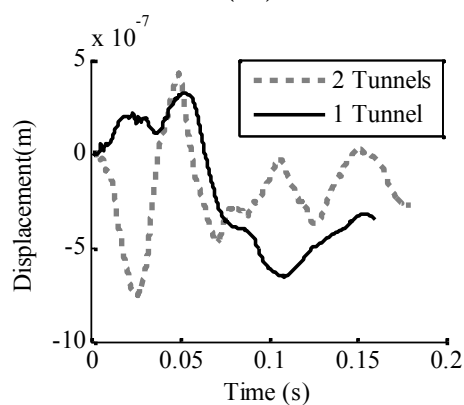
جدول ۳- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
u	m	جابه‌جایی
t	s	زمان
E	kN/m^2	مدول الاستیک
ρ	Ton/m^3	دانسیته
ν	-	نسبت پواسون

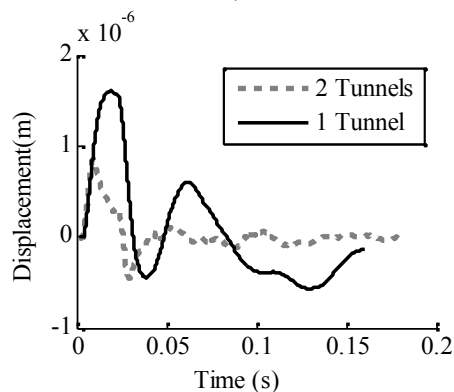
قائم در تمام نقاط ارزیابی شده است. برای بررسی رفتار جابه‌جایی افقی، شکل ۱۴ برای سه نقطه‌ی ارزیابی رسم گردیده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴- جابه‌جایی افقی در نقاط الف- D - ب- F - ج- E

شکل ۱۴ نشان می‌دهد که وجود تونل مجاور با

۷- منابع

- [1] Yang, H. H., & Hung, Y. (2008). *Wave Propagation for Train Induced Vibration: A finite/infinite Elements Approach*. Singapore: World Scientific. ISBN-13 978-981-283-582-6.
- [2] Thompson, D. (2009). *Railway Noises And Vibration : Mechanisem, Modeling and Means Of Controls*. Amsterdam: Elsevier. ISBN-13: 978-0-08-045147-3.
- [3] Metrikine, A., & Vrouwenvelder, A. (2000). Surface Ground Vibration due to a Moving Train in a Tunnel: Two-Dimensional Model. *Journal of Sound and vibration*, 234(1), 43-66.
- [4] Forrest, J. A., & Hunt, H. E. (2006). A Three-Dimensional Tunnel Model for Calculation of Train-Induced Ground Vibration. *Journal of Sound and vibration*, 294, 678-705. DOI:10.1260/026309203322770338.
- [5] Melke, J., & Kraemer, S. (1983). Diagnostic Methods in the Control of Railway Nois and Vibration. *Journal of Sound and vibration*, 87(2), 377-386.
- [6] Degrande, G., & Lombaert, G. (2000). High-Speed Train Induced Freefield Vibrations: In situ Measurements and Numerical Modelling. *Proc. Int. Workshop Wave 2000*, (pp. 29-41). Rotterdam, The Netherlands.
- [7] Cook, R. D., Malkus, R. S., & Plesha, M. E. (1989). *Concepts and Application of Finite Element Analysis*. John Wiley & Sons.
- [8] Prempramote, S. (2011). *Development of Higher-Order Doubly Asymptotic Open Boundaries for Wave Propagation in Unbounded Domains by Extending the Scaled Boundary Finite Element Method*. PhD thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- [9] Beer, G., Smith, I., & Duenser, C. (2008). *The Boundary Element Method with Programing*. Morlenbach, Germany: Springer. ISBN: 978-3-211-71574-1.
- [10] Gupta, S., Stanus, Y., Lombaert, G., & Degrande, G. (2009). Influence of Tunnel and Soil Parameters on Vibrations from Underground Railways. *Journal of Sound and Vibration*, 327, 70-91.
- [11] Andersen, L., & Jones, C. J. (2006). Coupled Boundary and Finite Element Analysis of Vibration from Railway Tunnels - a Comparison of Two- and Three-Dimensional Models. *Journal of Sound and vibration*, 293, 611-625. DOI:10.1016/j.jsv.2005.08.044.
- [12] Kausel, E., & Roesset, J. M. (1981). Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 1743- 1761. ISSN: 1943-3573.
- [13] Lysmer, J., & Kuhlemeyer, A. R. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of Engineering Mechanics Division*, 95, 859-877. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000250.
- [14] Nejati, H. R., Ahmadi, M., & Hashemolhosseini, H. (2012). Numerical Analysis of Ground Surface Vibration Induced by Underground Train Movement. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 29, 1-9. DOI:10.1016/j.tust.2011.12.006.

- [15] Hung, H.-H., & Yang, Y. B. (2010). Analysis of Ground Vibrations due to Underground Trains by 2.5D Finite/Infinite Element Approach. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 9(5), 327-33.
- [16] Galvin, P., François, S., Schevenels, M., Bongin, E., G., D., & Lombaert, G. (2010). A 2.5D Coupled FE-BE Model for the Prediction of Railway Induced Vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30, 1500-1512.
- [17] Wolf, J. P., & Song, C. (1996). *Finite-Element Modelling of unbounded Media*. England: John Wiley & Sons. ISBN: 9780471961345.
- [18] Deeks, A. J., & Wolf, J. p. (2002). A Virtual Work Derivation of the Scaled Boundary Finite-Element Method for Elastostatics. *Computational Mechanics*, 28, 489-504. ISSN: 1432-0924.
- [19] Lehmann, L. (2007). *Wave Propagation in Infinite Domains With Applications to Structure Interaction*. Berlin: Springer. ISBN: 978-3-540-71108-7.
- [20] Wolf, J. P. (2003). *Scaled Boundary Finite Element Method*. England: John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-48682-5.
- [21] Bazyar, M. H. (2007). *Dynamic soil-structure interaction analysis using the scaled boundary finite element method*. Ph.D. thesis. University of New South Wales.
- [22] Bazyar, M., & Song, C. (2008). A Continued-Fraction-Based High-order Transmitting Boundary for Wave Propagation in Unbounded Domains of Arbitrary Geometry. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 74, 209-237.
- [23] Stamos, A., Estorff, O., Antes, H., & Beskos, D. (1994). Vibration Isolation in Road Tunnel Traffic Systems. *International Journal for Engineering Analysis and Design*, 1, 109-121.
- [24] Genes, M. C. (2012). Dynamic Analysis of Large Scale SSI Systems for Layered Unbounded Media via a Parallelized Coupled Finite Element/Boundary Element/Scaled Boundary Finite Element Model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 36, 845-857. doi:10.1016/j.engabound.2011.11.013.