

بررسی تاثیر تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف در رفتار خطوط ریلی با استفاده از یک مدل عددی سه بعدی

مرتضی اسماعیلی (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران
حمیدرضا حیدری نوقایی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: m_esmaeili@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۱/۲۰ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۷/۱۸

چکیده

خطوط بالاستی از مهم ترین زیرساختهای آسیب پذیر شبکه خطوط ریلی در زمان وقوع و پس از وقوع زلزله است که با وجود اهمیت کارآیی مناسب آن در سیر ایمن قطار، مطالعات اندکی در خصوص میزان تاثیرپذیری این خطوط در شرایط زلزله انجام شده است. بنابراین در مقاله حاضر که ابتدا یک مدل سه بعدی اجزای محدود مناسب برای تحلیل لرزه ای، توسعه داده شده که در آن ریلها و تراورسها با استفاده از المانهای تیر خمشی به عنوان روسازه خط و بالاست و زیربلاست با استفاده از المانهای جرم- فنر- میراگر به عنوان زیرسازه خط مدلسازی شده است. در مدل مذکور اثر مقاومت خط در راستای طولی و جانبی با استفاده از مدل فنر در نظر گرفته شده است. اعتبار سنجی مدل با انجام مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش میز لرزه و نتایج به دست آمده از تحلیل عددی لرزه ای انجام گرفته است. در ادامه، رفتار خطوط ریلی بالاستی در برابر زلزله با ساخت شتابنگاشت مصنوعی بررسی شده است. شرایط سازه ای خط شامل نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریلها و تراورسها نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج بیانگر آن است که حداکثر تغییر مکان طولی و جانبی خط به ترتیب از مقدار ۰/۰۷ و ۲۰/۳۵ میلیمتر در تحریک با شتاب اوج ۲۰۰ gal به مقدار ۰/۳۵ و ۱۰۱/۸ میلیمتر در تحریک با شتاب اوج ۱۰۰۰ gal می رسد که می تواند موجب مشکلات بهره برداری از خط شود. نتایج همچنین نشان می دهند هرچند تحریکات لرزه ای تاثیر سازه ای قابل توجهی بر تراورسها ندارند، اما می توانند بر ریلها اثرات نامطلوبی برجای گذارند. بویژه آن که موجب کماتش آنها حتی در شتاب اوجهای پایین می شوند.

واژه‌های کلیدی: تحلیل لرزه ای، خطوط ریلی، مدل سه بعدی عددی، شتاب اوج تحریک

۱. مقدمه

شبکه حمل و نقل ریلی هر کشوری از جمله مهم ترین زیرساختهای آن بشمار می رود که می بایست نقش خود را برای ایجاد خطی ایمن، سریع، راحت و همچنین پایدار در برابر بارهای عبوری و تغییرات محیطی به بهترین شکل ممکن ایفا نماید. با توجه به اینکه سیر ایمن قطار در خطوط ریلی به مشخصات هندسی خط نظیر عرض خط، پیچش، تراز قائم و افقی ریل و... وابسته است، بنابراین باید این پارامترها در شرایط عبور بار و یا در حالت خاص اعمال زلزله در حد قابل قبولی بمانند. معمولاً وقوع زلزله در محل قرارگیری خطوط ریلی موجب خارج شدن هندسه خط از وضعیت استاندارد و ایجاد اختلال در آن می شود.

به عنوان مثال در زلزله بزرگ سال ۱۹۸۶ تانسان چین با بزرگی ۸/۷ ریشتر، که موجب مرگ بیش از ۲۵۵ هزار نفر گردید، شبکه ریلی چین به طور کامل مختل شد. هنگام وقوع زلزله، ۲۸ قطار باری و ۷ قطار مسافری در خط بودند که وقوع زلزله موجب خروج از خط و واژگونی ۷ قطار باری و ۲ قطار مسافری شد. در عین حال وقوع زلزله مذکور موجب شد که ریلها به طور جدی آسیب دیده و خم شوند. تنها در خط بیجینگ-شانگهای و خط تانگژان-توزیتو بیش از ۶۳ کیلومتر خط به طور جدی آسیب دیدند. وقوع زلزله موجب ایجاد شکست، روانگرایی، ترک، نشست و... در خاکریزها شده و برای بازسازی آنها بیش از ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب بالاست و شن مورد استفاده قرار گرفت. [Housner and Xie, 2002]

بیشتر مطالعاتی که تاکنون در زمینه تاثیر زلزله بر خطوط ریلی صورت گرفته مربوط به کشور ژاپن بوده است. از جمله پژوهشهای انجام شده در این زمینه می توان به مطالعه صورت گرفته توسط ایشیکاوا و همکاران [Ishikawa and Sekine, 2005] اشاره کرد. در تحقیق یاد شده، به طور آزمایشگاهی و با استفاده از میز لرزان، اثر تحریکات زلزله بر خطوط بالاستی مورد بررسی قرار گرفته و طی آن تغییرشکلهای ایجاد شده در خط با تغییر مشخصات دانه های بالاست ارزیابی شده است. در مطالعه دیگری [Xiu, 2005] ایمنی عبور قطارها در هنگام

تحریکات لرزه ای را مورد ارزیابی قرار داد. در این مطالعه خروج از خط وسیله نقلیه در اثر نوسانات حاصل از زلزله با یک مدل عددی ساده مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۲۰۰۷ ژیانگ و همکاران [Jiang, Liu and Zhang, Zhao, 2007] اثر وقوع زلزله بر یک خاکریز متکی بر بستر اشباع راه آهن سریع السیر بیجینگ-شانگهای را به وسیله مدلسازی ارتعاش زلزله با یک موج سینوسی به کمک آزمایش میز لرزه و ساختن یک مدل ۱:۱۰ از خط، مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، اثر استفاده از شمعهای شامل شن متراکم و شمعهای شامل شن همراه با خاکستربادی و سیمان در کاهش وقوع روانگرایی و کاهش تغییر مکانهای برشی و نشستهای بستر مورد مطالعه قرار گرفته است. در سال ۲۰۱۰ ناکامورا و همکاران [Nakamura, Sekine, and Shirae, 2010] عملکرد لرزه ای خطوط بالاستی را با ساختن یک مدل تمام مقیاس و انجام آزمایش میز لرزه مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور مقاومت جانبی خط در مقابل زلزله با در نظر گرفتن حالتیهای مختلفی از خط مورد بررسی قرار گرفت. افزایش سطح تماس اصطکاک بالاست و بستر، استفاده از موانع ایجاد حرکت جانبی در انتهای شانه خط و استفاده از صفحات گیردار در بالاست در دو سر تراورسها، راهکارهایی بودند که جهت افزایش مقاومت جانبی خط در برابر زلزله مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. در ارزیابی لرزه ای دیگری نیز که در سال ۲۰۱۰ بر روی خطوط بالاستی با استفاده از میز لرزه توسط کوماکورا و همکاران [Kumakura, Ishii and Konishi, 2010] انجام گرفت، سعی گردید میزان مقاومت جانبی و رفتار بالاست در شتابها و فرکانسهای ارتعاشی مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

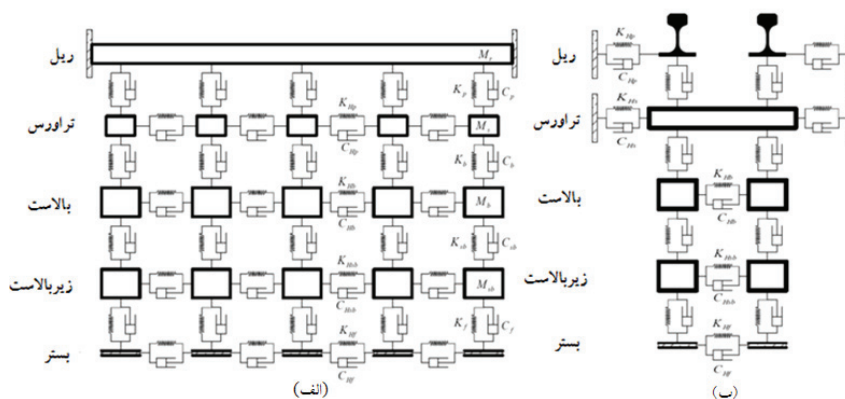
در مجموع، مرور ادبیات فنی در زمینه تاثیرات زلزله بر خطوط ریلی نشان می دهد که مطالعات تحلیلی بسیار اندکی در مورد اثر زلزله بر خطوط ریلی انجام گرفته است. این امر موجب گردیده است تا با توجه به گسترش استفاده از حمل و نقل ریلی و افزایش سرعت قطارها، لزوم مطالعات بیشتر در زمینه تاثیرات لرزه ای بر خطوط ریلی به منظور اطمینان از سیر ایمن قطارها بیش از پیش احساس شود.

Frederick] 1974، مدل تیر بر روی تکیه گاههای گسسته [and Newton, 1977]، مدل تیر بر روی تکیه گاه گسسته با توده جرمهای بالاست (و زیربلاست) [Sato, Odaka, Takai, 1988]، استفاده از دو المان تیر طولی برای مدلسازی ریل و تراورس [Grassie, Gregory and Johnson, 1982]، مدل تیر روی تکیه گاههای گسسته بر روی نیم فضای الاستیک [Vostroukhov and Metrikinie, 2003]، مدل تیر بر روی تکیه گاههای گسسته با در نظر گرفتن قفل و بستهای بین دانه ای در راستای قائم [Sun and Dhanasekar, 2002] اشاره کرد. این مدلها و همچنین مدلهایی که جهت بررسی اندرکنش پل-خط-قطار نظیر مدل ضیایی فر [Ziyaeifar, 2008]، [Ziyaeifar, 2005] ارائه شده اند، همگی برای تحلیل دینامیکی خط و قطار مناسب اند و بنابراین برای تحلیل لرزه ای نمی توان از این مدلها استفاده کرد. از آنجا که در اثر حرکت قطار به طور غالب ارتعاشات قائم بر خط وارد می شود و بویژه در خطوط مستقیم ارتعاشات طولی و جانبی محسوس می شود و وجود نمی آید، می توان از ارتعاشات طولی و جانبی صرف نظر کرده و مقاومتها طولی و جانبی خط را در محاسبات وارد نکرد. اما در اثر اعمال زلزله، ارتعاشات عرضی و طولی نیز در خط به وجود می آیند که در توسعه یک مدل تحلیل مناسب، بایستی این نقص به نحو مناسبی برطرف شود. بنابراین در ادامه با در نظر گرفتن این موضوع، مدلی سه بعدی با در نظر گرفتن مقاومتها طولی و عرضی همانند شکل ۱ پیشنهاد شده است.

بنابراین در این مطالعه سعی شده است تاثیرات تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف از دو دیدگاه سازه ای و بهره برداری بر خطوط ریلی مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور ابتدا یک مدل اجزای محدود سه بعدی از خط ریلی که بتواند به طور مناسبی رفتار لرزه ای خط را مدل کند توسعه داده شده و سپس تاثیر زلزله با شتاب اوجهای مختلف بر روی خطوط ریلی با ساخت شتابنگاشت‌های مصنوعی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بررسی شتابنگاشت‌های با شتاب اوجهای مختلف ۱۰۰۰، ۶۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ gal بر روی خط ریلی اعمال شده و تاثیر آن در تغییرشکل‌های خط شامل تغییرمکانهای طولی و جانبی و همچنین نیروهای ایجاد شده در اجزای خط شامل نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی ریلها و تراورسها مورد بررسی قرار گرفته و میزان پاسخگویی لرزه ای اجزای خط از نظر بهره برداری و سازه ای در زلزله های با شتاب اوجهای مختلف در مقایسه با مقادیر مجاز بررسی شده است.

۲. توسعه مدل خطوط ریلی جهت انجام تحلیل لرزه ای

جهت بررسی اندرکنش خط-قطار، مدل‌های بسیاری پیشنهاد گردیده اند که از آن جمله می توان به مدل توده های جرمی [Ah -beck, Meacham and Prause, 1978]، مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی [Frederick and Newton, 1977] و [Je -kins, Stephenson, Clatton, Morland and Lyon,



جدول ۱. روشهای کاهش ارتعاشهای ناشی از قطار

جرم، سختی و میرایی اجزای خط مشخص شود. برای تعیین مشخصات بالاست، زیربلاست و بستر می توان از مدل هرمی استفاده کرد. مدل هرمی از جمله مدل‌هایی است که جهت توزیع بار در بالاست زیر تراورس توسط آلبک و همکاران [Ahlbeck, Meacham and Prause, 1978] پیشنهاد گردیده است. ژای و همکاران [Zhai, Wang and Lin, 2004] از این روش برای تعیین مشخصات ارتعاشی بالاست استفاده کردند. در این مدل جرم موثر ارتعاشی بالاست، جرم بالاست ناحیه هرمی است که در شکل ۲-a و ۲-b نشان داده شده است.

بسته به آنکه ضخامت لایه بالاست، فاصله بین تراورسها و زاویه توزیع تنش در بالاست چقدر باشد، بلوکهای بالاست مجاور هم می توانند با یکدیگر همپوشانی داشته و یا اینکه فاقد همپوشانی باشند. با فرض همپوشانی بین بلوکهای بالاست مجاور می توان از روابط زیر برای محاسبه مشخصات ارتعاشی بالاست استفاده کرد.

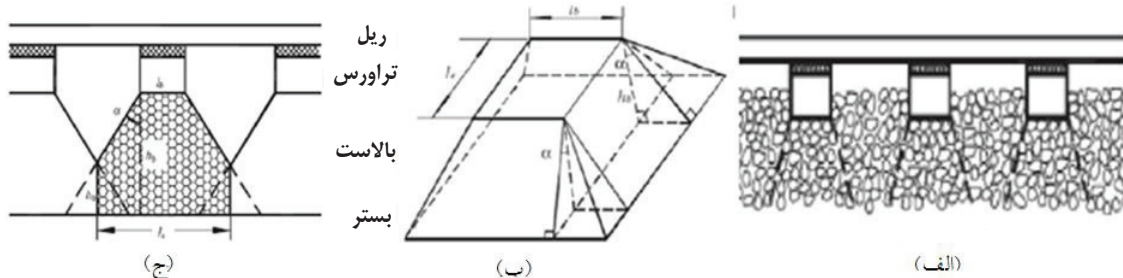
جرم موثر بالاست را می توان به صورت ناحیه هاشورخورده در شکل ۲-c نشان داد. بنابراین عمق ناحیه همپوشانی دو هرم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$h_0 = h_b - \frac{l_s - l_b}{2 \tan \alpha} \quad (1)$$

که در رابطه فوق l_s فاصله بین تراورسها، l_b عرض تراورس، h_b ضخامت لایه بالاست، h_0 عمق ناحیه همپوشانی و α زاویه توزیع تنش در بالاست است.

بنابراین جرم ارتعاشی بالاست طبق رابطه زیر به دست خواهد آمد:

$$M_b = \rho_b \left[l_b h_b (l_e + h_b \tan \alpha) + l_e (h_b^2 - h_0^2) \tan \alpha + \frac{4}{3} (h_b^3 - h_0^3) \tan^2 \alpha \right] \quad (2)$$



شکل ۲ جرم موثر بالاست در مدل هرمی: الف) عدم هم پوشانی جرم ها، ب) مشخصات هرم، ج) همپوشانی جرم ها [Zhai, Wang and Lin, 2004]

از آنجا که زلزله در راستای طولی و عرضی خط موجب ارتعاش خط می شود، در این مدل سعی شده است مقاومت‌های طولی و عرضی خط به نحوی در مدل وارد گردد. مقاومت طولی خط بیشتر تحت تاثیر سختی محوری ریل، گیرداری پابند و ریل، سختی بالاست ناحیه آخوری (بلاست بین تراورسها) و اندرکنش بین دانه های بالاست و زیر بالاست موجود در زیر تراورس و نیز اصطکاک آنها با تراورس و بستر است. برای در نظر گرفتن این اثرات، بین تراورسها و نیز بین بلوکهای بالاست وزیربلاست مجاور هم در راستای طولی از المانهای سختی و میرایی استفاده شده است تا در مجموع بیانگر مقاومت طولی خط باشد.

از سوی دیگر مقاومت جانبی خط ناشی از مقاومت بالاست ناحیه شانه، مقاومت بالاست ناحیه آخوری (فضای بین تراورسها)، اصطکاک دانه های بالاست با تراورس، اصطکاک دانه های زیر بالاست با بستر، گیرداری پابند و ریل و اندرکنش بین دانه های بالاست و زیر بالاست است.

در این تحقیق، با استفاده از روش اجزاء محدود، مدلی سه بعدی از خط بالاستی متشکل از المانهای تیر خمشی برای ریل و تراورس به عنوان روسازه و بالاست و زیربلاست به صورت جرم- فنر- میراگر به عنوان زیرسازه توسعه داده شده است. در ادامه با بکارگیری این مدل عددی به بررسی رفتار لرزه ای خطوط ریلی بالاستی پرداخته شده است.

۳. مشخصات اجزای خط مورد استفاده در تحلیل لرزه ای

برای انجام تحلیل لرزه ای مدل پیشنهادی، لازم است پارامترهای

۴. ارزیابی رفتار لرزه ای خط ریلی بالاستی

در این بخش از مقاله عملکرد خطوط ریلی در مقابل زلزله با استفاده از مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور در مرحله نخست، نتایج حاصل از تحلیل لرزه ای مدل با نتایج یک آزمایش میز لرزه جهت اعتبارسنجی مقایسه شده است. در ادامه تاثیر زلزله با شتاب اوجهای مختلف بر روی خطوط ریلی با ساخت شتابنگاشتهای مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ارزیابیهای فوق شرایط بهره برداری خط شامل تغییر مکانهای طولی و جانبی خط و همچنین شرایط سازه ای خط شامل نیروهای محوری، برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریلها و تراورسها مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته اند. برای بررسی وضعیت خط ریلی از دیدگاه سازه ای، مقادیر حداکثر نیروهای محوری (P)، مقادیر حداکثر نیروهای برشی (V) و مقادیر حداکثر لنگرهای خمشی (M) در ریلها و تراورسها مطالعه شده اند و از سوی دیگر برای بررسی وضعیت خط ریلی از دیدگاه بهره برداری، مقادیر حداکثر تغییر شکل‌های خط در راستای طولی و جانبی (U) مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱ اعتبار سنجی مدل عددی توسعه داده شده

در این بخش جهت اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از مدل تحت شرایط زلزله با نتایج حاصل از یک آزمایش میز لرزان مقایسه شده است. در سال ۲۰۱۰ ناکامورا و همکاران [Nakamura, Sekine and Shirae, 2010] عملکرد لرزه ای خطوط بالاستی را با ساختن یک مدل تمام مقیاس و انجام آزمایش میز لرزه مورد بررسی قرار دادند. در این آزمایش، خطی به طول ۵ متر و عرض ۷ متر و ریل UIC60 و تراورس B70 تحت تحریک زلزله شبیه سازی شده کوشیرو-اکی (Koshiro-Oki) قرار گرفته است. برای اعتبار سنجی، خطی با مشخصات خط مورد آزمایش ساخته شده و تحت تحریک زلزله کوشیرو-اکی قرار داده شد. نتایج دامنه تغییر مکانهای حداکثر و تغییر مکانهای نهایی خط برای مدل و آزمایش میز لرزه در مقابل تغییرات شتاب حداکثر زمین در نمودارهای شکل ۳ با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که

در این رابطه، چگالی سنگدانه های بالاست، ρ_b ضخامت لایه بالاست، l_e طول موثر ناحیه تکیه گاهی نصف تراورس، l_b عرض تراورس، α زاویه توزیع تنش در بالاست و M_b جرم موثر ارتعاشی بالاست است.

سختی بالاست نیز از ترکیب سختیهای دو ناحیه به صورت سری و از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\begin{cases} K_{b1} = \frac{2(l_e - l_b) \tan \alpha}{\ln \left[\frac{l_e l_s}{\ln(l_b(l_e + l_s - l_b))} \right]} E_b \\ K_{b2} = \frac{l_s(l_s - l_b + 2l_e + 2h_b \tan \alpha) \tan \alpha}{l_b - l_s + 2h_b \tan \alpha} E_b \end{cases} \Rightarrow K_b = \frac{K_{b1} K_{b2}}{K_{b1} + K_{b2}} \quad (3)$$

سختی بستر نیز با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌گردد:

$$K_f = l_s(l_e + 2h_b \tan \alpha) E_f \quad (4)$$

در روابط ۳ و ۴، E_b مدول الاستیسیته بالاست و E_f مدول بستر زمین است که مقدار آن را می‌توان از روی K_{30} یا مدول بستر به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه (بر روی صفحه ای دایره ای به قطر ۳۰ سانتیمتر) به دست آورد و K_b و K_f نیز به ترتیب سختی معادل بلوک بالاست و بستر است.

برای انجام تحلیل لرزه ای مدل پیشنهادی، مشخصات سایر اجزای خط نیز بایستی به طور مناسب و منطقی انتخاب شوند. با نگاهی به مطالعات انجام گرفته بر روی خطوط ریلی مشخص می‌شود که در تحقیقات مختلف، مقادیر متفاوتی برای پارامترها، بسته به تعداد جرمهای بکار رفته در مدل مورد استفاده قرار گرفته است. به طور نمونه می‌توان به مدل یک یا دو جرمی ارایه شده توسط گراسی و همکاران [Grassie, Gregory and Johnson, 1982]، مدل سه جرمی آقای چای و همکاران [Zhai, Wang and Lin, 2004] و مدل‌های چهار و پنج جرمی معرفی شده توسط ایشیدا و همکاران [Ishida, Suzuki, Koro, ABE, 2005], [Ishida and Suzuki, 2005] و همچنین سان و همکاران [Sun, Dhanasekar, 2002] اشاره کرد. در مجموع، مشخصات اجزای خط مورد استفاده در تحقیق حاضر برای انجام تحلیل لرزه ای در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱ مشخصات اجزای خط برای بررسی اثر زلزله در مدلسازی [Zhai, Wang and Lin, 2004]

عنوان پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
نوع ریل	UIC60	-	-
نوع تراورس	B70	-	-
فاصله بین تراورس ها	S	m	۰.۶۰
جرم ریل	M_r	kg/m	۶۰.۳۴
جرم تراورس	M_s	kg	۳۰۰
سختی طولی و عرضی بالاست بین تراورسها	K_{Hs}	MN/m	۷۸.۴
میرایی طولی و عرضی بالاست بین تراورسها	C_{Hs}	kN.s/m	۸۰
سختی صفحه لاستیکی زیر ریل	K_p	MN/m	۲۴۰
میرایی صفحه لاستیکی زیر ریل	C_p	kN.s/m	۲۴۸
سختی طولی و عرضی بالاست شانه	K_{Hsh}	MN/m	۷۸.۴
میرایی طولی و عرضی بالاست شانه	C_{Hsh}	kN.s/m	۸۰
جرم توده بالاست و زیر بالاست	M_b & M_{sb}	kg	۶۰۰
سختی قائم بالاست و زیر بالاست	K_b & K_{sb}	MN/m	۷۰
میرایی قائم بالاست و زیر بالاست	C_b & C_{sb}	kN.s/m	۱۸۰
سختی های طولی و عرضی بین بلوک های بالاست و زیر بالاست	K_{Hb} & K_{Hsb}	MN/m	۷۸.۴
میرایی های طولی و عرضی بین بلوک های بالاست و زیر بالاست	C_{Hb} & C_{Hsb}	kN.s/m	۸۰
سختی قائم بستر	K_f	MN/m	۱۳۰
میرایی قائم بستر	C_f	kN.s/m	۶۲.۳
سختی های طولی و عرضی بستر	K_{Hf}	MN/m	۱۳۰
میرایی های طولی و عرضی بستر	C_{Hf}	kN.s/m	۶۲.۳

زمانی موجک بوده و از آنها به عنوان ضریب میرایی و فرکانس طبیعی یک نوسانگر یک درجه آزادی تفسیر می شود. در تولید شتابنگاشت از مقادیر $\zeta = 0.05$ و $\Omega = \pi$ استفاده شده است. از آنجا که علاوه بر حداکثر حرکات زمین (حداکثر شتاب، حداکثر سرعت و حداکثر تغییر مکان زمین) مدت دوام حرکات شدید زمین نیز تاثیر عمده ای بر پاسخ سازه در زمین لرزه دارند، به منظور ارزیابی تاثیر شتاب اوجهای مختلف در سازه خط بایستی شتابنگاشتهای مورد استفاده در تحلیل لرزه ای دارای زمان دوام حرکات شدید یکسان باشند تا تاثیر شتاب اوجهای مختلف به وضوح قابل ملاحظه باشد، زیرا ممکن است زمین لرزه ای با حداکثر شتاب متوسط و مدت دوام طولانی، تاثیر مخرب تری نسبت به زمین لرزه با شتاب بزرگ تر، اما مدت دوام کوتاه تر برجای بگذارد.

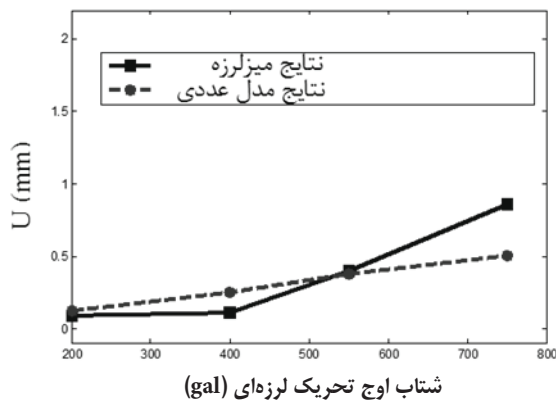
از این نمودارها مشخص است، نتایج به دست آمده از مدل و آزمایش میز لرزه اختلاف اندکی با یکدیگر دارند که این موضوع بیانگر قابل اعتماد بودن مدل پیشنهادی جهت تحلیل لرزه ای است.

۲-۴ روند ایجاد شتابنگاشتهای مصنوعی با شتاب اوجهای مختلف

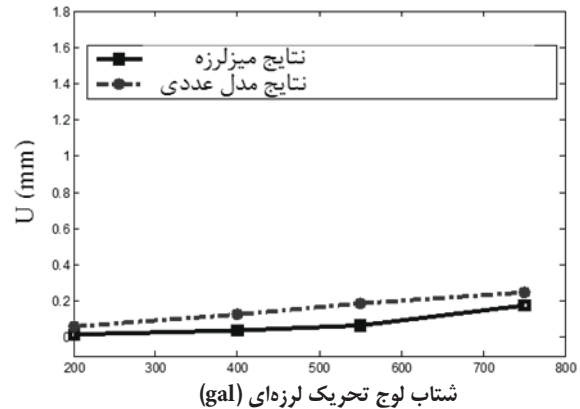
به منظور بررسی رفتار لرزه ای خطوط ریلی تحت تحریک شتاب اوجهای مختلف، از تابع موجک پایه سوارز و مونتجو [Suarez and Montejo, 2005] استفاده شده است. این تابع پایه در این حالت به صورت زیر تعریف می شود:

$$\psi(t) = e^{-\zeta\Omega|t|} \sin \Omega t \quad (5)$$

که در رابطه فوق ζ و Ω به ترتیب کاهش دامنه و تغییر



(ب)



(الف)

شکل ۳ مقایسه نتایج تست میز لرزه و مدل سازی عددی برای مقادیر شتاب اوج های مختلف لرزه ای: (الف) تغییر شکل های جانبی نهایی، (ب) دامنه تغییر شکل های جانبی

شتابنگاشت است.

با توجه به مطالب بیان شده، به منظور بررسی تاثیر شتاب اوجهای مختلف بر خط با استفاده از رابطه فوق، پنج شتابنگاشت با شتاب اوجهای ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ gal مطابق شکل ۴ ساخته شده است. به منظور بررسی یکسان بودن مدت دوام تحریک شدید این شتابنگاشتها، ابتدا شدت آریاس مطابق رابطه ۶ محاسبه شده و سپس زمان دوام معنی دار مطابق رابطه تریفناک و برادی محاسبه شده است. نتایج محاسبه شدت آریاس برای شتابنگاشتهای مختلف در شکل ۵ آمده است. همان طور که در شکل ۶ مشخص است، زمان دوام معنی دار برای تمامی شتابنگاشتهای مورد بررسی برابر ۱۴/۸ ثانیه محاسبه شده است.

حال به منظور بررسی تاثیر تحریکهای لرزه ای با شتاب اوجهای متفاوت، شتابنگاشتهای مذکور بر مدل لرزه ای اعمال شده و تاثیر شتاب تحریکهای مختلف بر مقادیر تغییر مکانهای خط (تغییر مکانهای طولی و جانبی) و نیروهای به وجود آمده در ریلها و تراورسها (نیروهای طولی، برشی و لنگر خمشی) مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۳ اثر شتاب اوجهای تحریک مختلف بر مقادیر

تغییر شکل‌های ایجاد شده در خط

به منظور بررسی اثر تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف

برای محاسبه مدت دوام حرکات شدید زلزله های مختلف می توان از تعریف زمان دوام معنی دار استفاده کرد. زمان دوام معنی دار به صورت فاصله زمانی که درصد معینی از شدت آریاس را شامل می شود قابل تعریف است. این درصد توسط پژوهشگران مختلف به صورتهای متفاوتی تعریف شده است. متداول ترین آنها تعریفی است که تریفناک و برادی [Trifunac and Brady, 1975] بر اساس فاصله بین ۵٪ و ۹۵٪ شتاب آریاس ارایه کرده اند.

شدت آریاس پارامتری است که نشان دهنده میزان انرژی وارده به سازه است و معیار مناسبی برای برآورد پتانسیل خسارت حاصل از زلزله به شمار می آید. این پارامتر به صورت انتگرال زمانی مجذور شتابهای تحریک زمین و به صورت زیر تعریف می شود:

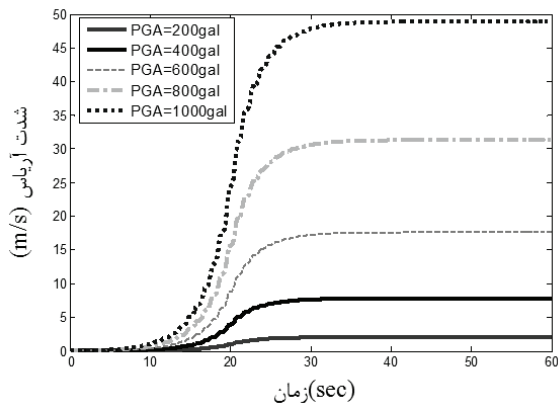
$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} (a(t))^2 dt \quad (6)$$

که در رابطه فوق g شتاب گرانشی زمین، $a(t)$ شتاب تاریخیچه زمانی تحریک زمین، و T_d زمان اعمال تحریک لرزه ای است.

بنابراین در این مقاله با بهره بردن از تابع موجک پایه سوارز و مونتجو، برای ساخت شتابنگاشتهای با شتابهای اوج متفاوت، به طوری که دارای زمانهای دوام معنی دار یکسانی باشند، رابطه زیر استفاده شده است:

$$a(t) = A_{PGA} \cdot e^{-\zeta|\Omega|t} \sin \Omega t \quad (7)$$

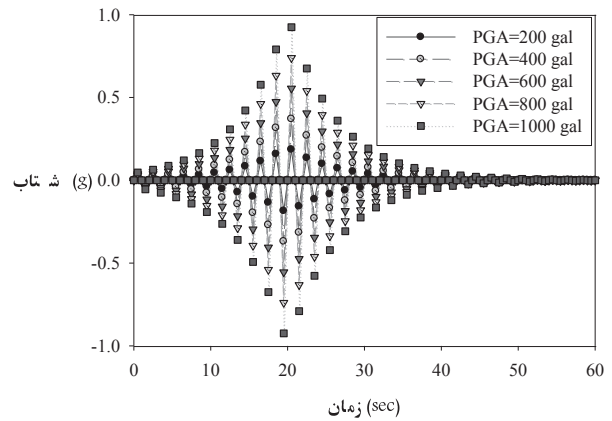
در رابطه فوق A_{PGA} ضریبی است که بیانگر شتاب اوج



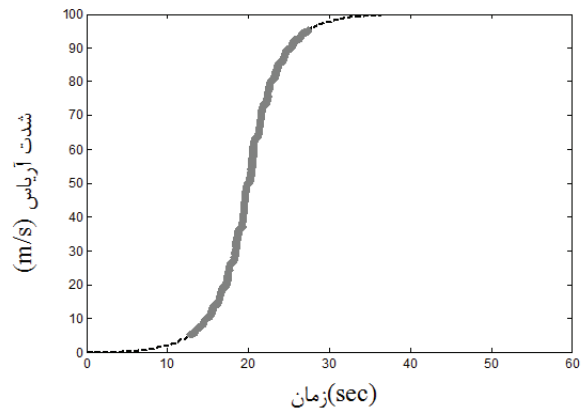
شکل ۵ مقادیر شدت آریاس برای شتابنگاشت‌های تولید شده

همان طور که مشاهده می شود مقادیر تغییرمکانهای طولی خط قابل توجه نیست.

در شکل ۸ مقادیر تغییرمکانهای جانبی خط برای شتاب اوجهای مختلف تحریک، ترسیم شده است. همان طور که مشخص است، تغییرمکانهای جانبی خط با افزایش شتاب اوج تحریک افزایش می یابد. روند تغییرات بیشینه تغییرمکان جانبی خط با شتاب اوج تحریک به صورت خطی است. حداکثر تغییرمکان جانبی خط برای شتاب اوج تحریک ۲۰۰ gal برابر ۲۰/۳۵ میلیمتر است که مقدار آن به ۱۱/۷۸ میلیمتر برای شتاب اوج تحریک ۱۰۰۰ gal افزایش می یابد. مطابق آیین نامه ۳۰۱ مشخصات فنی عمومی راه آهن [سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۸۴]، چنان که اختلاف تراز عرضی خط در یک طول وتر ۲۰ متری، بزرگ تر از ۲۴ میلیمتر باشد، سرعت عبور قطارها بایستی به ۱۲۰ کیلومتر در ساعت محدود شود. همچنین چنان که تغییرات تراز عرضی خط بیش از ۴۱ میلیمتر باشد، بایستی عبور قطارها با محدودیت سرعت ۸۰ کیلومتر در ساعت صورت گیرد. بنابراین بهره برداری از خطوط ریلی بعد از تحریکات لرزه‌ای با شتاب اوجهای ۲۰۰ gal و ۴۰۰ با اعمال محدودیتهای سرعت ۱۲۰ و ۸۰ کیلومتر در ساعت امکان پذیر خواهد بود و در مورد تحریکات با شتاب اوجهای بالاتر امکان بهره برداری از خط با مشکل روبرو خواهد شد.



شکل ۶ شتاب نگاشت‌های مصنوعی با شتاب اوجهای gal



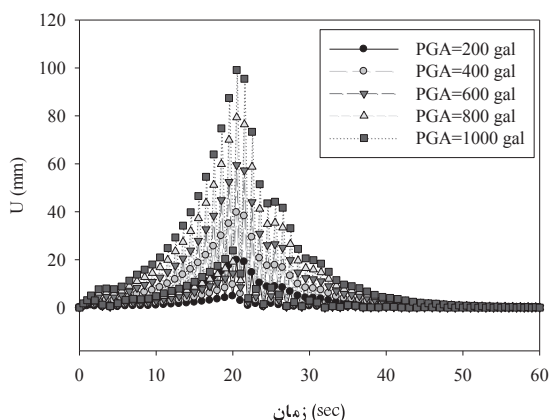
شکل ۷ زمان دوام معنی دار برای شتابنگاشت‌های تولید شده

بر رفتار خطوط ریلی، شتابنگاشت‌های ساخته شده در مرحله قبل، مورد استفاده قرار گرفتند. این شتابنگاشت‌ها به مدل خط توسعه داده شده با طول ۴۰ متر که بحرانی ترین شرایط خط از نظر سازه‌ای و بهره برداری را موجب می گردد، اعمال شد. [Esmail and Heydari, 2012]

نتایج حاصل از تاثیر تحریکات لرزه‌ای با شتابنگاشت‌های مختلف بر مقادیر تغییرمکانهای طولی و جانبی خط در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

همان طور که از شکل ۷ مشخص است، با افزایش شتاب اوج تحریک، تغییرمکانهای طولی خط افزایش می یابد. حداکثر تغییرمکان طولی خط در شتاب اوج ۲۰۰ gal برابر ۷/۷۰ میلیمتر است که با افزایش شتاب اوج تحریک، حداکثر تغییرمکان طولی به طور خطی افزایش می یابد، به طوری که در شتاب اوج gal ۱۰۰۰ حداکثر تغییرمکان طولی خط به ۰/۳۵ میلیمتر می رسد.

بررسی تاثیر تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف در رفتار خطوط ...

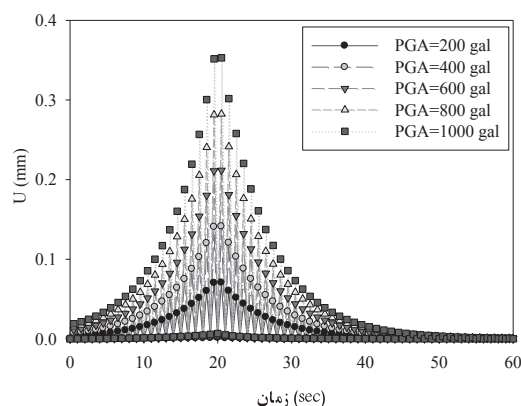


شکل ۸، تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر مقادیر تغییرشکل‌های جانبی ایجاد شده در خط

برشی ایجاد شده در ریل ترسیم شده است. با افزایش شتاب اوجهای تحریک، نیروی برشی ایجاد شده در ریل نیز افزایش می‌یابد. روند تغییرات حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در ریل در مقابل افزایش شتاب اوج تحریکات لرزه ای خطی بوده و از حدود ۱۳ کیلونیوتن برای شتاب اوج ۲۰۰ gal به ۶۵ کیلونیوتن در شتاب اوج ۱۰۰۰ gal رسیده است. در هر صورت نیروهای برشی ایجاد شده در ریل از مقادیر مجاز نیروی برشی که در مورد خط مورد بررسی بیش از ۲۰۰ کیلونیوتن است، کمتر بوده و بنابراین پاسخگوی نیازهای طراحی لرزه ای خواهد بود.

تغییرات لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریل تحت تاثیر شتابانگشت‌های با شتاب اوجهای مختلف در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، لنگرهای خمشی ریلی نیز با افزایش شتاب اوج تحریک زلزله افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه لنگر خمشی ایجاد شده در ریل در شتاب اوج تحریک ۲۰۰ gal حدود ۵ کیلونیوتن متر است که با افزایش شتاب اوج تا ۱۰۰۰ gal به ۲۶ کیلونیوتن متر افزایش می‌یابد که باز هم از مقدار تنش مجاز خمشی ریل مورد بررسی که حدود ۱۲۰ کیلونیوتن متر است، کمتر است.

با توجه به مطالب فوق می‌توان گفت که ریلها از نظر سازه ای تا حدود زیادی پاسخگوی نیازهای طراحی لرزه ای، بویژه در زلزله های با شتاب اوجهای پایین هستند. مقاومت ریلها در مقابل نیروهای برشی تا حدودی بایستی کنترل شود، اما به



شکل ۹، تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر مقادیر تغییرشکل‌های طولی ایجاد شده در خط

۴-۴-۴ اثر شتاب اوجهای تحریک مختلف بر مقادیر نیروهای ایجاد شده در ریلها

برای بررسی تاثیر تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای تحریک مختلف در شرایط سازه ای خطوط ریلی، نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریلها و تراورسها مورد مطالعه قرار گرفته اند.

به منظور بررسی تاثیر شتاب اوجهای مختلف بر نیروهای ایجاد شده در ریلها، شتابانگشت‌های با شتاب اوجهای مختلف به مدل ۴۰ متری اعمال شده است. نتایج تاثیر شتاب اوجهای مختلف بر نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ریل در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است تحریک زلزله بر نیروهای محوری ایجاد شده در ریل زیاد بوده و با افزایش شتاب اوج تحریک، نیروهای محوری ایجاد شده نیز افزایش می‌یابد. نیروی محوری حداکثر ایجاد شده در ریلها برای شتابانگشت با شتاب اوج ۲۰۰ gal حدود ۱۳۴ کیلونیوتن است که این مقدار در شتاب اوج ۱۰۰۰ gal به ۶۶۸ کیلونیوتن نیز می‌رسد. هرچند مقادیر نیروهای محوری ایجاد شده در ریل تحت تحریکات لرزه ای زیاد است، اما با این وجود حتی برای شتاب اوج ۱۰۰۰ نیز این مقادیر از نیروی محوری مجاز ریل که حدود ۱۰۰۰ کیلونیوتن است تجاوز نمی‌کند.

در شکل ۱۰ تاثیر شتاب اوجهای تحریک مختلف در نیروهای

طول کمانشی ریل ۴ متر باشد، کمانش در ریل‌های UIC50، UIC54 و UIC60 در تحریک‌های با شتاب اوج به ترتیب gal ۱۰۰۰، ۸۰۰، ۶۰۰ رخ خواهد داد. به عبارت دیگر حداقل طول کمانشی ریل در تحریک gal ۶۰۰ که موجب وقوع کمانش در ریل‌های UIC54، UIC50، و UIC60 می‌شود، به ترتیب طول‌های ۴، ۶/۴ و ۵/۱ متر است.

بنابراین در طراحی لرزه ای ریل‌ها بایستی با توجه به شتاب اوج تحریک زلزله اتصالات، مقاومت جانبی و نوع ریل به نحوی انتخاب گردد که از وقوع کمانش جلوگیری شده و همچنین مقادیر نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی، بخصوص در زلزله های با شتاب اوج تحریک بالا کنترل شوند.

۴-۵ اثر شتاب اوج‌های تحریک مختلف بر مقادیر نیروهای

ایجاد شده در تراورسها

تاثیر شتاب اوج‌های تحریک مختلف بر مقادیر نیروهای ایجاد شده در تراورس شامل نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی در شکل‌های ۱۳، ۱۴ و ۱۵ ارایه شده است. همان طور که در شکل ۱۳ مشخص است، تاثیر تحریک زلزله بر نیروهای محوری ایجاد شده در تراورس بسیار ناچیز بوده و برای شتاب اوج‌های مختلف می‌توان تاثیر آن را قابل اغماض دانست.

تاثیر شتاب اوج‌های تحریک مختلف در نیروهای برشی ایجاد شده در تراورس در شکل ۱۴ ترسیم شده است. با افزایش شتاب اوج‌های تحریک، نیروی برشی ایجاد شده در تراورس نیز افزایش می‌یابد. روند تغییرات حداکثر نیروی برشی ایجاد شده در تراورس در مقابل افزایش شتاب اوج تحریکات لرزه‌ای، خطی بوده و از حدود ۱۰ کیلونیوتن برای شتاب اوج gal ۲۰۰ به ۶۰ کیلونیوتن در شتاب اوج gal ۱۰۰۰ رسیده است. بنابراین، نیروهای برشی ایجاد شده در تراورس از مقادیر مجاز نیروی برشی تراورس که بیش از ۱۵۰ کیلونیوتن است کمتر بوده و بنابراین پاسخگوی نیازهای طراحی لرزه ای هست.

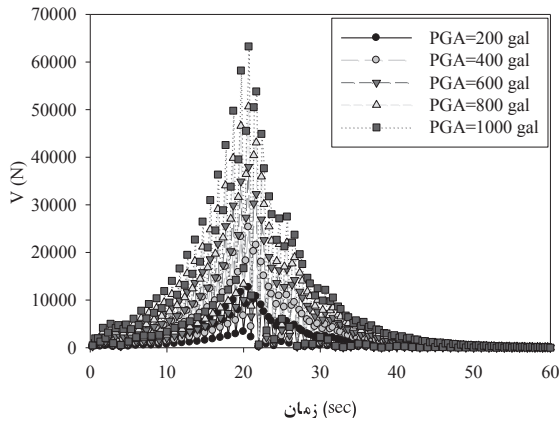
نظر نمی‌رسد نیازی به کنترل لنگرهای خمشی باشد. از دیدگاه عملکرد سازه‌ای، مهم ترین نگرانی در مورد ریل‌ها وجود نیروهای محوری زیاد است. هر چند که نیروهای محوری ریل‌ها از نیروهای محوری مجاز کمتر است، اما با وجود این، خطری که از ناحیه نیروهای محوری در ریل‌ها وجود دارد، وقوع کمانش است. وقوع کمانش در ریل‌ها از جمله شایع ترین مسایلی است که در اثر وقوع زلزله در خط ایجاد شده و بهره برداری از خط را مختل می‌کند. چنان که بار محوری ایجاد شده ناشی از تحریک زلزله، از نیروی بحرانی ریل بیشتر باشد، وقوع کمانش در ریل موجب خارج شدن خط از وضعیت استاندارد خواهد شد.

در شکل ۱۲، نیروی بحرانی ریل بر اساس طول‌های مختلف کمانشی برای سه نوع ریل UIC54، UIC50 و UIC60 ترسیم شده است. طول کمانشی ریل بسته به شرایط هندسی و کیفی خط در هنگام وقوع زلزله تعیین می‌شود. مطابق شکل، چنان که طول موثر کمانشی ریل از ۳ متر کمتر باشد، حتی در تحریک‌های با شتاب اوج gal ۱۰۰۰ نیروهای محوری ایجاد شده در ریل از نیروی بحرانی ریل تجاوز ننموده و کمانشی رخ نمی‌دهد. این طول کمانشی می‌تواند در خطوط با اتصالات ریل به تراورس قوی و خط با مقاومت جانبی بالا رخ دهد. در این گونه خطوط طول کمانشی ریل می‌تواند حتی به اندازه فاصله بین تراورسها محدود شود که در نتیجه وقوع کمانش ریل در اثر زلزله غیرمحمول خواهد بود.

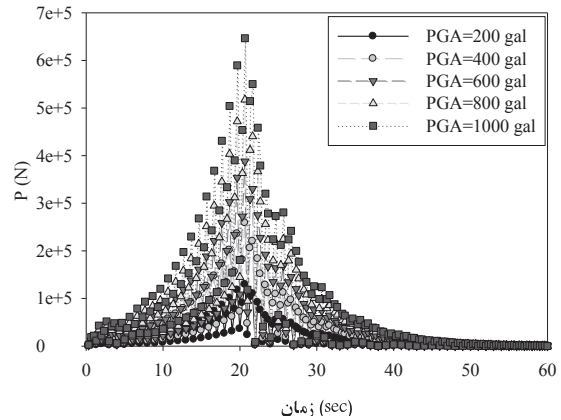
چنانچه طول کمانشی ریل بیش از ۹ متر باشد، حتی در تحریکات لرزه ای با شتاب اوج کمتر از gal ۲۰۰ امکان وقوع کمانش در ریل وجود خواهد داشت. این حالت در خطوط دارای اتصالات ضعیف و با مقاومت جانبی کم متصور است و چنان که طول کمانشی ریل بین ۳ و ۹ متر باشد، با توجه به نوع ریل و شتاب اوج تحریک، امکان وقوع کمانش وجود دارد که در جداول ۲ و ۳ این مقادیر خلاصه شده است.

نوع ریل می‌تواند در مقاومت ریل در برابر کمانش موثر باشد، به طوری که با افزایش جرم ریل حداقل طول کمانشی ریل افزایش می‌یابد. برای مثال با توجه به نمودار شکل ۱۲ چنان که

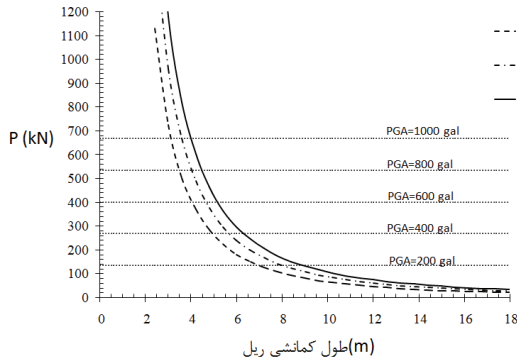
بررسی است تحریکات لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف در رفتار خطوط ...



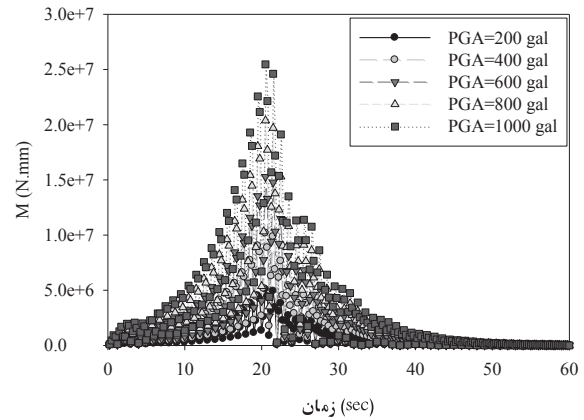
شکل ۱۰ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر نیروهای برشی ایجاد شده در ریلها



شکل ۹ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر نیروهای محوری ایجاد شده ریلها



شکل ۱۲ اثر طول کمانشی ریل، نوع ریل و شتاب اوج تحریک لرزه ای در وقوع کمانش در ریل



شکل ۱۱ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریلها

جدول ۲ خطر وقوع کمانش در تحریکات با شتاب اوج های مختلف با توجه به طول کمانشی ریل

طول کمانشی (m)	خطر وقوع کمانش
$L_e < 3m$	خطر کمانش در تحریک های با شتاب اوج بالاتر از ۱۰۰۰ gal وجود ندارد
$3m < L_e < 9m$	خطر کمانش با توجه به نوع ریل و شتاب اوج تحریک زلزله از نمودار شکل (۱۲) مشخص می گردد
$9m < L_e$	خطر کمانش در تمامی تحریکات با شتاب اوج بالای ۲۰۰ gal وجود دارد

جدول ۳ حداقل طول کمانشی ریل در تحریکات با شتاب اوج های مختلف برای انواع ریل ها

شتاب اوج تحریک (gal)	$PGA > 1000gal$	۱۰۰۰	۸۰۰	۶۰۰	۴۰۰	۲۰	$PGA < 200gal$	نوع ریل
$L_e < 3m$	۳.۱	۳.۵	۴	۴.۹	۷	$L_e > 9m$	UIC50	نوع ریل
$L_e < 3m$	۳.۶	۴	۴.۶	۵.۷	۸	$L_e > 9m$	UIC54	
$L_e < 3m$	۴	۲.۵	۵.۱	۶.۳	۸.۹	$L_e > 9m$	UIC60	

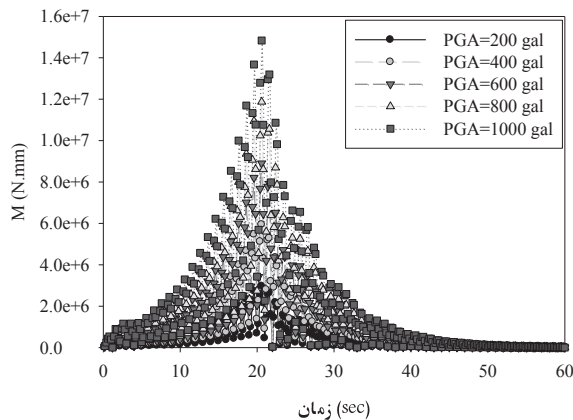
۵. جمع بندی و نتیجه گیری

در این مطالعه، برای انجام تحلیل لرزه ای، ابتدا مدلی سه بعدی از خط ریلی، معرفی و توسعه داده شده است. در این مدل اجزای محدود، ریلها و تراورسها، با استفاده از المانهای تیر خمشی به عنوان روسازه خط و بالاست و وزیربالات با استفاده از المانهای جرم- فنر- میراگر، به عنوان زیرسازه خط، مدلسازی شده و اثر مقاومتهای خط در راستای طولی و جانبی نیز در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج به دست آمده از تحلیل لرزه ای مدل با نتایج حاصل از یک آزمایش میزلرزه، برای اعتبار سنجی آن انجام شده است.

تاثیر زلزله با شتاب اوجهای مختلف بر روی خطوط ریلی با ساخت شتابنگاشتهای مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفته است. به این منظور شتابنگاشتهای با شتاب اوجهای مختلف gal ۱۰۰۰، ۸۰۰، ۶۰۰، ۴۰۰، ۲۰۰ بر خط ریلی اعمال شده اند و از دو دیدگاه سازه ای و بهره برداری تاثیرات آن بر خط ریلی بالاستی مورد مطالعه قرار گرفته است.

به منظور بررسی تاثیرات شرایط بهره برداری خط شامل تغییر مکانهای طولی و جانبی خط و نیز شرایط سازه ای خط شامل نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریلها و تراورس ها، یک سری تحلیل لرزه ای با شتاب اوجهای مختلف انجام شد که عمده نتایج به دست آمده در ادامه بیان می شود:

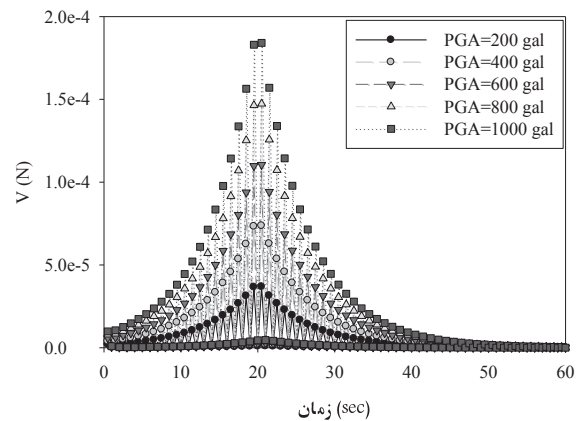
۱- نتایج نشان می دهند که تغییر مکانهای طولی و جانبی خط با افزایش شتاب اوج تحریک افزایش می یابد و تغییرات مقادیر



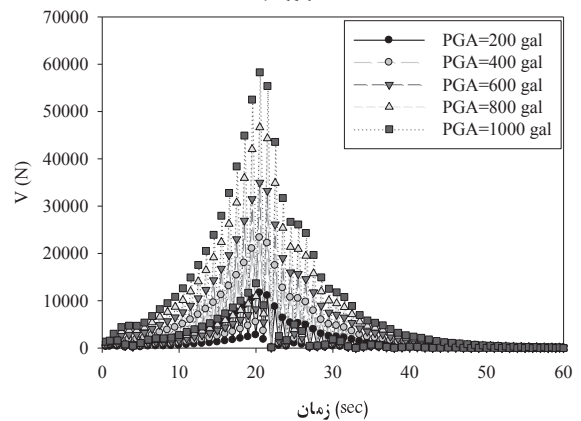
شکل ۱۵ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر لنگرهای خمشی ایجاد شده در تراورسها

تغییرات لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریل تحت تاثیر شتابنگاشتهای با شتاب اوجهای مختلف در شکل ۱۵ نمایش داده شده است. همان طور که از شکل مشخص است، لنگرهای خمشی ریلی نیز با افزایش شتاب اوج تحریک زلزله افزایش می یابد. مقدار حداکثر لنگر خمشی ایجاد شده در ریل در شتاب اوج تحریک ۲۰۰ gal حدود ۹ کیلونیوتن متر بوده و با افزایش شتاب اوج تا ۱۰۰۰ gal به ۴۵ کیلونیوتن متر نیز افزایش می یابد که باز هم از مقدار تنش مجاز خمشی تراورس مورد بررسی یا همان ۲۰۰ کیلونیوتن متر کمتر است.

بنابراین می توان گفت که تراورسها از نظر سازه ای در زلزله های با شتاب اوجهای تحریک مختلف حتی در شتاب اوجهای بالا، پاسخگوی نیازهای طراحی لرزه ای هستند.



شکل ۱۳ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر نیروهای محوری ایجاد شده در تراورسها



شکل ۱۴ تاثیر اوج تحریک لرزه ای بر نیروهای برشی ایجاد شده در تراورسها

ایجاد نمی‌کنند، اما در شتابهای اوج بالا بایستی کنترل و با مقادیر مجازشان مقایسه شوند.

۴- از جمله مهم ترین پارامترهایی که بایستی در تحریکات لرزه‌ای کنترل شود، وقوع کمانش ریل است. کمانش ریلها حتی ممکن است در شتاب اوجهای پایین و یا حتی هنگامی که نیروی محوری مجاز ریل بزرگ تر از نیروی زلزله است رخ دهد. چنان که طول موثر کمانشی ریل از ۳ متر کمتر باشد، حتی در تحریکهای با شتاب اوج بالای ۱۰۰۰ gal نیروهای محوری ایجاد شده در ریل، از نیروی بحرانی ریل تجاوز نکرده و کمانشی رخ نمی‌دهد. اما چنان که طول کمانشی ریل بیش از ۹ متر باشد، حتی در تحریکات لرزه ای با شتاب اوج کمتر از ۲۰۰ gal امکان وقوع کمانش در ریل وجود خواهد داشت. چنان که طول کمانشی ریل بین ۳ و ۹ متر باشد، بایستی با توجه به نوع ریل و شتاب اوج تحریک امکان وقوع کمانش مورد بررسی قرار گیرد.

۶. مراجع

- سازمان مدیریت و برنامه ریزی (۱۳۸۴) "مشخصات فنی و عمومی روسازی راه آهن، نشریه ۳۰۱"، چاپ اول.

- Ahlbeck, D. R., Kish, A. and Sluz, A. (1986) "An assessment of design criteria for continuous-welded rail on elevated transit structures", Transportation Research Record, 1071, Transportation Research Board, Washington, DC.

- Ahlbeck, D. R., Meacham, H. C. and Prause, R. H (1978) "The development of analytical models for railroad track dynamics", in: A.D. Kerr (Ed.), Railroad Track Mechanics & Technology, Pergamon Press, Oxford

- Arias, A. (1970) "A measure of earthquake intensity", In Seismic Design for Nuclear Power Plants, Hansen RJ (ed.). MIT Press: Cambridge, MA, pp. 438-483.

- Esmaili, M. and Heydari, H. (2012) "Determining the effective excited length of railway tracks in earthquake excitation using a 3D numerical model", 9th.

بیشینه، به صورت خطی است، هر چند که تغییر مکانهای طولی خط ناشی از تحریکات مختلف موجب ایجاد مشکلات در بهره‌برداری از خط نمی‌شوند و مقدار آنها ناچیز است، تغییر مکانهای جانبی ایجاد شده، حتی در شتاب اوجهای پایین می‌توانند موجب مشکلات بهره‌برداری شوند. مقدار بیشینه تغییر مکان جانبی خط از ۳۵/۲۰ میلی‌متر در تحریک با شتاب اوج ۲۰۰ gal به مقدار ۱۰۱۸ میلی‌متر در تحریک با شتاب اوج ۱۰۰۰ gal می‌رسد. بنابراین با توجه به مقادیر مجاز تغییرات تراز عرضی خط می‌توان گفت که در تحریکات با شتاب اوجهای پایین مانند ۲۰۰ gal و ۴۰۰ می‌توان با اعمال محدودیتهای سرعت ۱۲۰ و ۸۰ کیلومتر در ساعت از خط بهره‌برداری کرد.

۲- نیروهای ایجاد شده ناشی از تحریکات زلزله در ریلها و تراورسها با افزایش شتاب اوج تحریک افزایش می‌یابند که این تغییرات برای مقادیر بیشینه آنها به صورت خطی است. تحریکات لرزه ای، تاثیر قابل توجهی بر نیروهای محوری ایجاد شده در تراورسها ندارند. بیشینه مقادیر نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در تراورسها از مقدار ۱۰ kN و ۹ kN.m در شتاب تحریک ۲۰۰ gal به مقدار ۶۰ kN و ۴۵ kN.m در شتاب تحریک ۱۰۰۰ gal افزایش می‌یابند، اما با این وجود هرگز از مقادیر مجاز تجاوز نمی‌کنند.

۳- هر چند که نیروهای ایجاد شده در تراورسها مسئله خاصی از نظر سازه ای ایجاد نمی‌کنند، اما در مورد نیروهای ایجاد شده در ریل، نگرانیهایی، بخصوص در تحریکات با شتاب اوجهای بالا وجود دارد. تغییرات مقادیر بیشینه نیروهای ایجاد شده در ریلها در برابر افزایش شتاب اوج تحریکات لرزه ای از ۲۰۰ gal به ۱۰۰۰ gal روندی خطی دارد: افزایش نیروهای محوری از ۱۳۴ به ۶۶۹ KN، افزایش نیروهای برشی از ۱۳ kN به ۶۵ و افزایش لنگرهای خمشی از ۲۶ kN.m به ۱۲۰ kN.m. نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی ایجاد شده در ریل در شتاب اوجهای تحریک پایین مسئله سازه ای خاصی

analyses on vibration of ballasted track", Quarterly

- Sekine, E. and Ishikawa, T. (2005) "Deformation characteristics of ballasted track during earthquake", RTRI Report, Japan

- Suarez, L. E. and Montejo, L. A. (2005) "Generation of artificial earthquakes via the wavelet transform", International Journal of Solids and Structures, 42, pp. 5905-5919

- Sun, Y. Q. and Dhanasekar, M. (2002) "A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system", International Journal of Solids and Structures, 39(5), pp. 1337-1359

- Trifunac, M. D. and Brady, A. G. (1975) "A study on the duration of strong earthquake ground motion", Bulletin of the Seismological Society of America, 65, pp.581-626

- Vostroukhov, A.V. and Metrikine, A. V. (2003) "Periodically supported beam on a visco-elastic layer as a model for dynamic analysis of a high-speed railway track", International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp.5723-5752

- Xiu, Luo (2005) "Study on methodology for running safety assessment of trains in seismic", Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 25, pp.79-91

- Zhai, W.M., Wang, K.Y. and Lin, J. H. (2004) "Modeling and experiment of railway ballast vibrations", Journal of Sound and Vibration, 270(4-5), pp.673-683

- Ziyaeifar, M. (2005) "Interaction study of train-bridge-track systems using Maxwell model", Journal of Vehicle System Dynamics, 43(11), pp. 771 - 794

- Ziyaeifar, M. (2008) "Vibration control in train-bridge-track systems", Journal of Vehicle System Dynamics, 46(5), pp.355 - 384

International Congress on Civil Engineering, Isfahan, Iran, May 8-10.

- Frederick, C. O. and Newton, S. G. (1977) "The relationship between traffic and track damage- The effect of vertical loads." British Railways Boards Research and Development Division Technical Note TN.T.2.

- Grassie, S. L., Gregory, R. W. and Johnson, K. L (1982) "The dynamic response of railway track to high frequency lateral excitation", Journal of Mechanical Engineering Science.

- Housner, G. W. and Xie, Lili (2002) "Report on the great Tangshan earthquake of 1967", California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, Volume III, Chapter 1: Railway Engineering, pp. 1-60

- Ishida, M. and Suzuki, T. (2005) "Effect on track settlement of interaction excited by leading and trailing axles", QR of RTRI, Vol. 64, No. 1

- Ishida, M., Suzuki, T., Koro, K. and Abe, K. (2005) "Measurement on dynamic behavior of track near rail joints and prediction of track settlement", QR of RTRI, Vol. 64, No. 2

- Jenkins, H. H, Stephenson, J. E., Clatton, G. A., Morland, J. W. and Lyon, D. (1974) "The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces.", Railway Engineering Journal, Jan. pp. 2-16

- Jiang, G., Liu, X., Zhang, J. and Zhao, R. (2007) "Shaking table test of composite foundation reinforcement of saturated silty soil for high speed railway", Journal of Southwest Jiaotong University (Natural Science Edition), 41(2), pp.190-19

- Kumakura, T., Ishii, H. and Konishi, T. (2010) "Seismic assessment of ballasted tracks in large-scale earthquakes", JR EAST Technical Review, No. 17, pp. 25-28, Japan

- Nakamura, T., Sekine, E. and Shirae, Y. (2010) "Assessment of aseismic performance of ballasted track for large-scale shaking table test", RTRI Report, 24(12), pp. 23-29

- Sato, Y, Odaka, T. and Takai, H. (1988) "Theoretical