

# ارزیابی سه بعدی رفتار خطوط ریلی به روش عددی در تحریک زلزله

مرتضی اسماعیلی، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
حمیدرضا حیدری نوقایی\*، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: heydari\_hr@rail.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵ - پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۰۳

## چکیده

شبکه حمل و نقل ریلی یکی از شریان‌های حیاتی در حمل و نقل مسافری و باری هر کشور به حساب می‌آید. وقوع زلزله در منطقه محل احداث خط ریلی موجب خارج شدن هندسه خط از وضعیت استاندارد می‌شود که با توجه به حساسیت سیر ایمن قطار روی خطی دارای هندسه استاندارد، در عمل بعد از وقوع زلزله بهره‌برداری از خط امکان‌پذیر نخواهد بود. با توجه به این مسئله لزوم ارزیابی لرزه‌ای خطوط ریلی ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه برای انجام تحلیل لرزه‌ای ابتدا مدلی سه بعدی از خط، توسعه داده شده است. در این مدل اجزای محدود، ریل‌ها و تراورس‌ها با استفاده از المان‌های تیر خمشی به‌عنوان روسازه خط و بالاست و زیربلاست با استفاده از المان‌های جرم-فنر-میراگر به‌عنوان زیرسازه خط، مدل‌سازی گردیده و اثر مقاومت‌های خط در راستای طولی و جانبی نیز در نظر گرفته شده است. در مرحله بعد به دلیل حساس بودن نتایج تحلیل لرزه‌ای به طول مدل خط، سعی شده است طولی از خط که در آن بحرانی‌ترین شرایط سازهای و بهره‌برداری برای خط ایجاد می‌گردد، تعیین شود. برای این منظور تغییر شکل‌های حداکثر خط و نیروهای پیشینه ایجاد شده در ریل‌ها و تراورس‌ها ملاک ارزیابی قرار گرفته‌اند. در گام آخر برای این طول بحرانی، اثر زلزله روی خطوط با سختی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل لرزه‌ای برای زلزله کوبه در جهات مختلف اعمال شده بر خط، نشان می‌دهد که حداقل طول مؤثر از تحریکات لرزه‌ای خطوط ریلی باید ۷۰ متر در نظر گرفته شود و سخت شدن خط موجب کاهش تغییر شکل‌های ناشی از زلزله می‌گردد، اما در نیروهای ایجاد شده در اجزای خط تأثیر چندانی ندارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل لرزه‌ای، خطوط ریلی، مقاومت‌های طولی و جانبی خط، مدل‌های تحلیل دینامیکی خط

## ۱- مقدمه

حمل و نقل کارا، شبکه‌های ریلی و خطوط راه آهن هستند. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد شبکه راه آهن در حمل و نقل بار و مسافر، گسترش شبکه‌های ریلی و استفاده از آنها روز به روز در حال افزایش می‌باشد، به طوری که امروزه مختل شدن سرویس‌دهی خطوط ریلی حتی برای مدت زمانی کوتاه، موجب وارد آمدن هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی فراوانی به خصوص در بخش حمل و نقل باری می‌شود. با توجه به این‌که سیر ایمن قطار روی خطوط ریلی به تغییرات پارامترهای هندسی خط از جمله

شبکه حمل و نقل هر کشور از جمله زیرساخت‌های حیاتی آن می‌باشد که باید وظیفه خود را که برقراری دسترسی سریع، ایمن، ارزان، راحت و متناسب با حجم و نوع ترافیک (باری و مسافری) است، به بهترین شکل ممکن ایفا کند. از جمله ویژگی‌های یک شبکه حمل و نقل مفید و کارا آن است که در مواجهه با حوادث طبیعی و غیرطبیعی مختل نشود و حتی در صورت لزوم، برای امداد رسانی و دسترسی سریع و ایمن به محل حادثه، قابل استفاده باشد. از جمله مهم‌ترین شریان‌های حیاتی در یک سیستم

در سال ۱۹۹۵ با بزرگی  $6/8$  در مقیاس ریشتر در کوبه ژاپن رخ داد و باعث مرگ حدود ۶۵۰ نفر و خسارتی معادل بیش از ۱۰۰ میلیارد دلار شد. بیشتر خطوط راه آهن این ناحیه تخریب گردید به طوری که تنها ۳۰ درصد از خط راه آهن کوبه-اساکا قابل بهره‌برداری بود. وقوع زلزله همچنین موجب خروج از خط قطار در ایستگاه سامی‌یوشی واقع در خط اصلی هان شین و خرابی کلی حداقل ۵۰۰ متر از خط بین ایستگاه‌های شوکوگاوا و نیشی‌نومیا و کیتاگوچی واقع در خط اصلی هان‌کیو شد (Bardet et al., 1995).

به لحاظ لرزه‌خیزی، ایران روی کمربند زلزله آسیا-اروپا قرار گرفته و جزء نقاط با خطر لرزه‌خیزی زیاد به‌شمار می‌رود و از نظر شبکه ریلی دارای ۹۷۴۶ کیلومتر خط بین شهری موجود و ۱۲۳۸۵ در حال احداث و یا در دست مطالعه می‌باشد. با توجه به رشد چشمگیر استفاده از خطوط ریلی به‌عنوان یک شریان مواصلاتی ایمن، راحت و ارزان و با توجه به این‌که اکثر این خطوط از نظر لرزه‌خیزی روی پهنه لرزه‌خیزی با خط نسبی زیاد قرار دارند، باید اقدامات لازم برای مقاوم‌سازی شبکه ریلی در مقابل خطر زلزله صورت گیرد تا با وقوع زلزله، شبکه مختل نشده و حتی به‌عنوان یک وسیله دسترسی سریع برای امدادسانی به مناطق آسیب دیده بتوان از آن استفاده کرد.

به‌طور کلی در اثر وقوع زلزله چهار دسته از سازه‌های ریلی تحت تأثیر قرار می‌گیرند که عبارتند از:

- ساختمان‌های موجود در شبکه راه آهن نظیر پایانه‌های انتظار مسافران، ایستگاه‌ها، ساختمان‌های اداری و ...؛
- پل‌های راه آهن؛
- تونل‌ها؛
- سازه خط شامل روسازه و زیر سازه.

برای داشتن یک شبکه حمل و نقل ریلی کارا، نه تنها لازم است این سازه‌ها در اثر وقوع زلزله به‌لحاظ سازه‌ای آسیب جدی نبینند بلکه می‌بایست به‌لحاظ بهره‌برداری نیز قابل استفاده بوده و جواب‌گوی نیازهای شبکه باشد. در مورد تأثیر زلزله روی سازه‌های سه دسته نخست، کارهای بسیاری جهت افزایش مقاوم‌سازی لرزه‌ای آنها صورت گرفته است اما در مورد سازه خط مطالعات بسیار اندک بوده و می‌توان گفت در عمل اقدام خاصی برای بررسی اثر زلزله بر سازه خط صورت نگرفته است. ایشیکاوا و همکاران در سال ۲۰۰۵ (Sekine and Ishikawa, 2005)، به‌طور تجربی با ساخت چند میز لرزه اثر تحریکات زلزله

عرض خط، تراز افقی و قائم خط و... بسیار حساس می‌باشد، محافظت از سازه‌های ریلی به طوری که کارایی خود را بعد از وقوع حوادث، به‌ویژه حوادثی نظیر زلزله، سیل، طوفان و... حفظ کند، بسیار حائز اهمیت است.

تجربیات گذشته نشان می‌دهد که شبکه ریلی بعد از وقوع زلزله عملاً کارایی خود را از دست داده است و بهره‌برداری از آنها با مشکل روبه‌رو می‌گردد. به طوری که بعد از وقوع زلزله‌های با شدت بالا مشاهده شده است، شبکه ریلی به دلیل انجام عملیات بهسازی و تعمیر خط تا مدت‌ها بعد از وقوع حادثه نیز مسدود بوده است. به‌عنوان مثال در اثر وقوع زلزله تانگ شان چین با شدت  $7/6$  ریشتر در سال ۱۹۷۶ که منجر به کشته شدن بیش از ۶۵۰۰۰۰ نفر گردید، شبکه راه آهن این منطقه به‌طور کامل مختل شد. چهار خط اصلی راه آهن چین<sup>۱</sup> و بیش از ۱۰۰ خط فرعی که از این ناحیه عبور می‌کردند، دچار آسیب‌های جدی شدند. تنها در خطوط بیجینگ-شانگهای و تانگژیان-توزیتو بیش از ۶۳ کیلومتر از خط دچار آسیب جدی شد. در اثر وقوع این زلزله ۷ قطار باری و ۲ قطار مسافربری از خط خارج شدند و ریل‌ها در بسیاری از نقاط دچار خمیدگی و اعوجاج و تغییر مکان‌های بیش از حد شدند. بیشتر پل‌ها آسیب دیدند و پایه‌های آنها دچار تغییر شکل‌های زیاد و گاه شکستگی شدند. خاکریز و بستر خط در بسیاری از نقاط آسیب دید، به طوری که برای بازسازی خط بیش از ۱۰۰۰۰۰ متر مکعب بالاست جایگزین شد (Housner and Xie Lili, 2002).

در زلزله دیگری که در اکتبر ۲۰۰۴ در نیگاتای ژاپن به بزرگی  $6/8$  ریشتر رخ داد، بیشترین خرابی‌ها و خسارات به راه آهن شرق ژاپن<sup>۲</sup> از ابتدای زمان تأسیس آن وارد آمد. در اثر این زلزله بود که اولین خروج از خط برای قطارهای خطوط شینکانسن اتفاق افتاد. همچنین این زلزله موجب آسیب دیدن پنج خط<sup>۳</sup> از خطوط راه آهن بالاستی نیز شد. این زلزله بر خطوط ریلی ژاپن هزینه‌ای بالغ بر ۶۰/۳ میلیارد ین وارد کرد که این هزینه‌ها از یک طرف ناشی از هزینه‌های بازسازی خرابی‌های ایجاد شده در خطوط، ایستگاه‌ها و تجهیزات وابسته، مانند منابع برق و... بود و از سوی دیگر به‌علت زیان‌هایی بود که در اثر عدم امکان بهره‌برداری و مسدود بودن خط و جایگزینی سیستم‌های دیگر مانند اتوبوس‌های برقی در مدت مسدودی بر شرکت راه آهن شرق ژاپن وارد شد (East Japan Railway Company, 2005). در زلزله کوبه یا زلزله عظیم هانشین<sup>۴</sup> نیز که

ایجاد تغییر شکل‌های طولی و جانبی در خط می‌باشد که امکان بهره‌برداری از خط پس از وقوع زلزله را با مشکل همراه می‌سازد و از سوی دیگر حتی به‌لحاظ سازه‌ای اجزای خط به‌خصوص ریل‌ها کارایی خود را از دست داده و گاه دچار شکستگی شده‌اند. بنابراین، با توجه به اهمیت موضوع، انجام مطالعات در این زمینه بیش از پیش احساس می‌شود.

از این رو در این مقاله ابتدا سعی بر این بوده تا مدلی سه بعدی از خط را که بتواند ویژگی‌های مقاومت طولی و جانبی خطوط بالاستی در مقابل زلزله را دارا باشد، ارائه گردد. برای این منظور مدل سه بعدی با در نظر گرفتن المان‌های ریل و تراورس به‌صورت المان تیر، فرض کردن بالاست و زیر بالاست به‌صورت توده جرم‌هایی که مشخصات آنها با استفاده از روش هرمی (Zhai et al., 2004) مشخص می‌شود و فرض کردن صفحه لاستیکی زیر ریل و بستر به‌صورت مجموعه‌ای از فنرها و میراگرها مدل شد. برای وارد کردن مقاومت‌های طولی و جانبی خط، بین بلوک‌های بالاست و زیر بالاست در جهات طولی و عرضی و نیز بین تراورس‌ها در جهت طولی و همچنین در دو سمت انتهایی تراورس‌ها در جهت عرضی خط، از المان‌های شامل فنر و میراگر که بیانگر این مقاومت‌ها باشند، استفاده شد.

در مرحله بعدی با توجه به تأثیر طول خط در نیروها و تغییر شکل‌های ایجاد شده بر خط در اثر زلزله، سعی شد با اعمال زلزله کوبه بر خط و تغییر طول خط، طولی را که در آن در اثر اعمال زلزله بیشترین مقادیر نیرو و تغییر شکل در اجزای خط ایجاد می‌گردد، مشخص شود. مشاهده شد که برای زلزله کوبه در یک طول حدود ۴۰ متری از خط، بیشترین نیروها و تغییر شکل‌ها در خط ایجاد می‌گردد و در انتها روی خطوط با سختی مختلف خط تحلیل حساسیت انجام شد تا مشخص شود مقادیر نیروها و تغییر شکل‌های حداکثر ایجاد شده در خط با تغییر سطح سختی خط چه تغییری می‌کند. نتایج بیانگر این موضوع بود که با افزایش صلبیت خط در اثر اعمال زلزله، مقادیر نیروها و تغییر شکل کاهش می‌یابد اما در نیروهای ایجاد شده در اجزای خط تغییر محسوسی ایجاد نمی‌شود.

## ۲- پیشنهاد مدل تحلیل مناسب تحلیل لرزه‌ای

برای تحلیل دینامیکی خط آهن مدل‌های بسیاری پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به مدل توده‌های

را در خطوط بالاستی مورد بررسی قرار دادند. آنها تغییر شکل‌های ایجاد شده در خط را با تغییر مشخصات دانه‌های بالاست ارزیابی کردند. فومیکا و همکاران (Fumiaki and Kimiro, 2005) تحریکات لرزه‌ای را روی پل‌های بالاستی خطوط ریلی مطالعه کردند.

در سال ۲۰۰۷ ژیانگ و همکاران (Jiang et al., 2007) اثر وقوع زلزله در یک خاکریز از راه آهن سریع‌السیر بیجینگ-شانگهای<sup>۱</sup> که روی یک بستر سیلتی اشباع قرار گرفته بود را به‌وسیله 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، آنها اثر استفاده از شمع‌های شامل شن متراکم و شمع‌های شامل شن همراه با خاکستر بادی و سیمان را در کاهش وقوع روانگرایی و کاهش تغییر مکان‌های برشی و نشست‌های بستر مطالعه کردند.

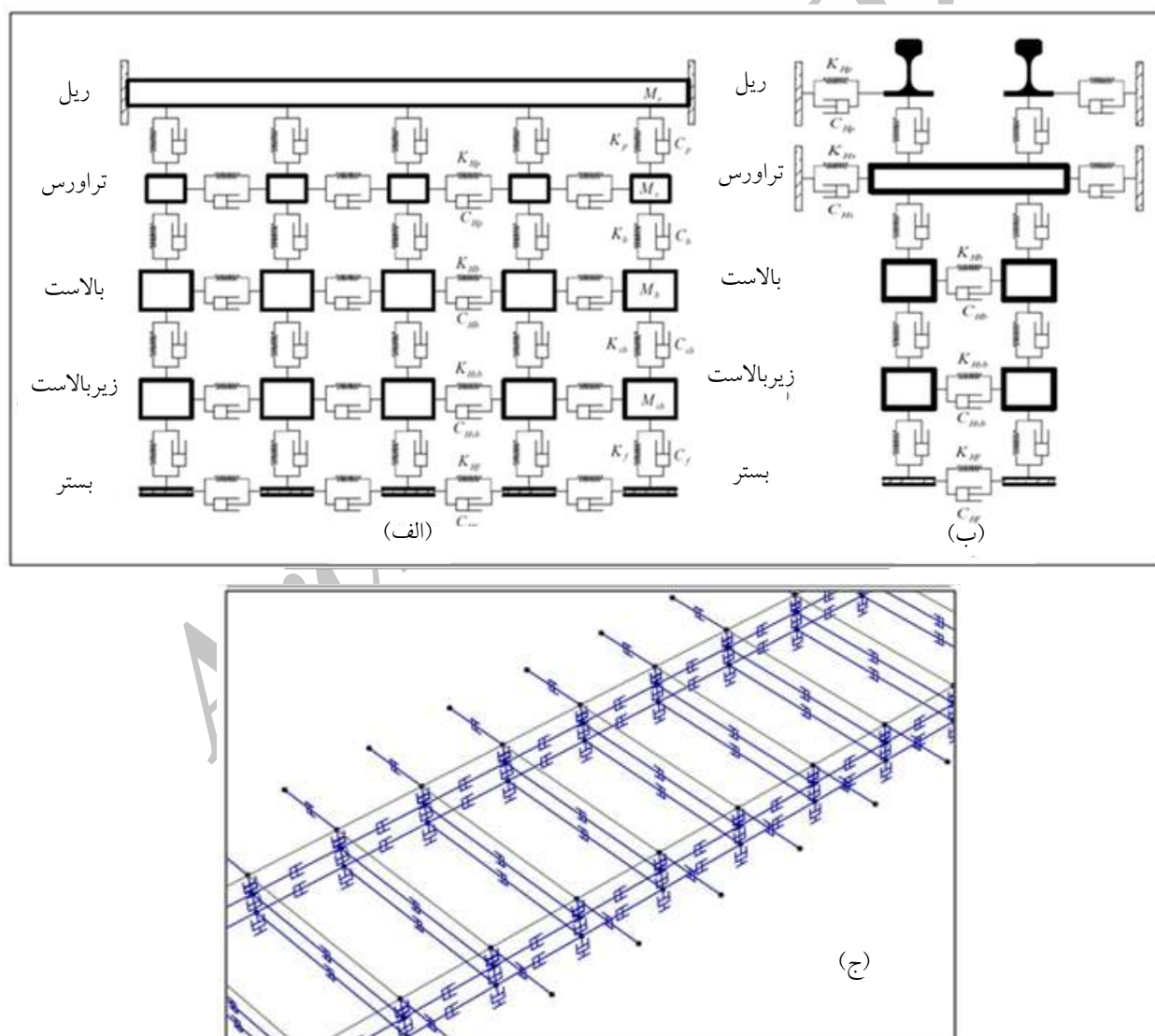
در سال ۲۰۱۰ ناکامورا و همکاران (Nakamura et al., 2010)، عملکرد لرزه‌ای خطوط بالاستی را با ساختن یک مدل تمام مقیاس و انجام آزمایش میز لرزه بررسی کردند. برای این منظور مقاومت جانبی خط در مقابل زلزله با در نظر گرفتن حالت‌های مختلفی از خط مورد بررسی قرار گرفت. افزایش سطح تماس اصطکاک بالاست و بستر، استفاده از موانع ایجاد حرکت جانبی در انتهای شانه خط و استفاده از صفحات گیردار در بالاست در دو سر انتهایی تراورس‌ها، راه‌کارهایی بودند که برای افزایش مقاومت جانبی خط در برابر زلزله مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند.

در ارزیابی لرزه‌ای دیگری نیز که در سال ۲۰۱۰ روی خطوط بالاستی با استفاده از میز لرزه توسط کوماکورا و همکاران (Kumakura et al., 2010) انجام گرفت سعی شد میزان مقاومت جانبی و رفتار بالاست در شتاب‌ها و فرکانس‌های ارتعاشی مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

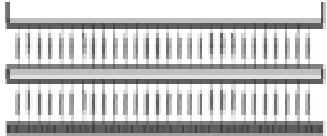
کارهای اندکی که تاکنون صورت گرفته است بیشتر با استفاده از آزمایش میز لرزه و در یک طول محدود از خط انجام شده است و تاکنون هیچ‌گونه کار تحلیلی مشخصی روی اثر زلزله در خطوط ریلی صورت نگرفته است و از سوی دیگر عملکرد سازه‌ای و بهره‌برداری اجزای خط شامل ریل‌ها، تراورس‌ها و بالاست و بستر به‌طور مشخص مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. در حالی که می‌دانیم زلزله نه تنها به‌صورت عرضی بلکه به‌صورت طولی بر خط وارد می‌شود و مشاهدات اثر زلزله‌های واقعی بر خط بیانگر

بررسی حرکت دینامیکی قطار در شرایط مختلف مناسب می‌باشد و برای تحلیل لرزه‌ای نمی‌توان از این مدل‌ها استفاده کرد. از آنجایی که در اثر حرکت قطار به‌طور غالب ارتعاشات قائم بر خط وارد می‌شود و به‌خصوص در خطوط مستقیم ارتعاشات طولی و جانبی محسوسی به‌وجود نمی‌آید، می‌توان از ارتعاشات طولی و جانبی صرف‌نظر کرد و مقاومت‌های طولی و جانبی خط را در محاسبات وارد نکرد. اما در اثر اعمال زلزله، ارتعاشات عرضی و طولی نیز در خط به‌وجود می‌آید که بایستی مدل تحلیل لرزه‌ای جواب‌گوی این نقص مدل‌های موجود باشد. برای رفع این نقص مدلی سه بعدی با در نظر گرفتن مقاومت‌های طولی و عرضی به‌صورت شکل ۱ پیشنهاد شده است.

جرمی (Ahlbeck et al., 1978)، مدل تیر روی بستر ارتجاعی و (Frderick and Newton, 1977)، (Jenkins et al., 1974) مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته (Frderick and Newton, 1977)، مدل تیر روی تکیه‌گاه گسسته با توده جرم‌های بالاست (و زیربلاست) (Sato et al., 1988)، استفاده از دو المان تیر طولی برای مدل‌سازی ریل و تراورس (Grassie et al., 1982)، مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته روی نیم فضای الاستیک (Vostroukhov and Metrikinie, 2003) و مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته با در نظر گرفتن قفل و بست‌های بین دانه‌ای در راستای قائم (Sun and Dhanasekar, 2002) اشاره کرد که در جدول ۱ به‌طور خلاصه آورده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است مدل‌های تحلیل دینامیکی یاد شده در جدول ۱ همگی برای



شکل ۱. مدل پیشنهادی سه بعدی مناسب برای انجام تحلیل لرزه‌ای خطوط ریلی: الف) نمای طولی، ب) نمای عرضی، ج) نمای سه بعدی

مدل توده‌های جرمی (Ahlbeck, Meacham and Prause, 1986)	
<p>در این مدل خط به صورت ساده به عنوان جرمی که روی فنری که سختی کلی خط را نشان می‌دهد، مدل‌سازی شده است. این مدل تنها می‌تواند رفتار خط را در فرکانس‌های پایین بیان کند و برای شبیه‌سازی ریل و چرخ با فرکانس بالا مناسب نیست.</p>	
مدل تیر روی بستر ارتجاعی (Jenkins et al., 1974), (Frderick and Newton, 1977)	
<p>در این مدل ریل توسط یک تیر بی‌نهایت اوپلر-برنولی (یا تیموشنکو) روی یک بستر الاستیک پیوسته شبیه‌سازی و تحلیل می‌گردد. جرم تراورس به صورت یکنواخت پخش و به جرم ریل اضافه شده است تا جرم تیر را ایجاد کند و بالاست نیز به عنوان یک بستر الاستیک با فنر و تیر نشان داده شده است تا خاصیت ارتجاعی و میراگری آن بیان شود.</p>	
مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته (Fredrick and Newton, 1977)	
<p>در این مدل، ریل به عنوان یک تیر ساده عمل می‌کند و روی تراورس با تکیه‌گاه مجزا با پدهای میانی قرار گرفته است، به این ترتیب این مدل نسبت به مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های پیوسته مدلی واقعی‌تر برای بررسی رفتار خط آهن تحت اثر بار دینامیکی خواهد بود و برای بررسی اثر وجود کاریوگشن ریل با موج کوتاه در پاسخ خط نیز قابل استفاده است.</p>	
مدل تیر روی تکیه‌گاه گسسته با توده جرم‌های بالاست (و زیربلاست) (Sato et al., 1988)	
<p>این مدل سیستم خط شامل سه لایه از اجرام و سه لایه فنر و میراگر است که هر لایه با استفاده از فنر و میراگرهایی که نشان‌دهنده خاصیت ارتجاعی و میراگری ریل پد، بالاست و بستر هستند به یکدیگر متصل شده‌اند. این مدل برای شبیه‌سازی ارتعاشی خط در سرعت‌ها و فرکانس‌های بالا پیشنهاد گردید.</p>	
استفاده از دو المان تیر طولی برای مدل‌سازی ریل و تراورس (Grassie et al., 1982)	
<p>در این مدل تراورس شبیه ریل به صورت یک المان تیری مدل می‌شود که می‌توان آن را تیر تیموشنکو یا برنولی فرض کرد و پد و بالاست به صورت لایه‌های پیوسته با خاصیت الاستیک با میرایی در نظر گرفته می‌شوند.</p>	
مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته روی نیم فضای الاستیک (Vostroukhov and Metrikinie, 2003)	
<p>در این مدل ریل به صورت تیری روی تکیه‌گاه‌های گسسته (تراورس و پد) قرار می‌گیرند و بالاست و بستر به صورت لایه الاستیک در نظر گرفته شده و معادلات حاکم بر فضای نیم الاستیک برای آنها نوشته می‌شود. از این مدل می‌توان برای تحلیل دینامیکی خطوط سریع‌السیر راه آهن استفاده کرد.</p>	
مدل تیر روی تکیه‌گاه‌های گسسته با در نظر گرفتن قفل و بست‌های بین دانه‌ای در راستای قائم (Sun and Dhanasekar, 2002)	
<p>در این مدل برای در نظر گرفتن قفل و بست‌های بین دانه‌های توده جرم‌های بالاست مجاور هم، بین بلوک‌های بالاست المان‌های شامل سختی و میرایی در راستای قائم، در نظر گرفته می‌شود که برای بررسی ارتعاشات قائم خط و واگن می‌توان از این مدل استفاده کرد.</p>	

اتصال توانایی تحمل بارهای لرزه‌ای را خواهند داشت یا خیر؟ نکته دیگر تغییر شکل‌های ایجاد شده در خط پس از اعمال زلزله می‌باشد. از آنجا که هندسه تغییر یافته خط بر بهره‌برداری اثر مستقیم خواهد داشت، مسئله دیگر آن است که این هندسه امکان بهره‌برداری ایمن به‌دور از مسایلی همچون واژگونی و خروج از خط را فراهم خواهد کرد یا خیر؟ بنابراین، در مجموع می‌توان گفت استفاده از چنین مدلی می‌تواند پاسخ به دو سؤال اساسی یاد شده را فراهم آورد.

- در خصوص یک خط موجود در حال بهره‌برداری با توجه به تغییر هندسه و مشخصات مکانیکی خط در روند عبور ترافیک، دوباره دو سؤال اصلی مطرح شده در بند یک قابل تکرار خواهند بود. ولی تفاوت در حالت جدید تغییر در شرایط اولیه مدل، اعم از هندسه و مشخصات مکانیکی اجزا می‌باشد. بنابراین، دوباره وجود مدلی تحلیلی برای ارزیابی لرزه‌ای خط در این شرایط الزامی خواهد بود.

### ۳- تعیین مشخصات مکانیکی اجزای خط

با توجه به نقش و تأثیر هر یک از اجزای خط بالاستی بر رفتار لرزه‌ای آن، در این قسمت روش انتخاب پارامترهای مکانیکی مناسب برای هر یک از این اجزا بیان می‌شود.

#### ۳-۱- روش هرمی برای تعیین مشخصات بالاست و زیربلاست

برای انجام تحلیل لرزه‌ای مدل پیشنهادی لازم است پارامترهای جرم، سختی و میرایی اجزای خط مشخص شود. برای تعیین مشخصات بالاست، زیربلاست و بستر می‌توان از مدل هرمی استفاده کرد. مدل هرمی از جمله مدل‌هایی است که برای توزیع بار در بالاست زیر تراورس توسط آلبک و همکاران (Ahlbeck et al., 1978) پیشنهاد شده است. ژای و همکاران (Zhai et al., 2004) از این روش برای تعیین مشخصات ارتعاشی بالاست استفاده نمودند. آنها فرض کردند جرم مؤثر ارتعاشی بالاست، جرم بالاست ناحیه هرمی است که مطابق شکل ۲- الف و شکل ۲- ب در زیر تراورس در نظر گرفته می‌شود. بسته به آن که ضخامت لایه بالاست، فاصله بین تراورس‌ها و زاویه توزیع تنش در بالاست چقدر باشد، بلوک‌های بالاست مجاور هم می‌توانند با یکدیگر همپوشانی داشته باشند و

در این مدل سعی شده است از آنجایی که زلزله در راستای طولی و عرضی خط موجب ارتعاش خط می‌شود، مقاومت‌های طولی و عرضی خط به‌نحو مناسبی در مدل وارد گردد. مقاومت طولی خط بیشتر تحت تأثیر سختی محوری ریل، گیرداری پابند و ریل، سختی بالاست ناحیه آخوری (بالاست بین تراورس‌ها) و اندرکنش بین دانه‌های بالاست و زیر بالاست موجود در زیر تراورس و نیز اصطکاک آنها با تراورس و بستر می‌باشد. برای در نظر گرفتن این اثرات، بین تراورس‌ها و نیز بین بلوک‌های بالاست و زیربلاست 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 دانه‌های بالاست با تراورس، اصطکاک دانه‌های زیر بالاست با بستر، گیرداری پابند و ریل و اندرکنش بین دانه‌های بالاست و زیر بالاست می‌باشد.

جزئیات قرار گرفتن این مقاومت‌ها در شکل ۱ آمده است. همان‌طور که از این شکل پیداست، بین بلوک‌های بالاست چپ و راست و نیز بین بلوک‌های زیربلاست چپ و راست در راستای طولی و عرضی، بین تراورس‌ها در جهت طولی، در دو سر انتهای تراورس‌ها در جهت عرضی و همچنین در محل پابندها در جهت عرضی، فنر و میراگرهایی که بیانگر مقاومت‌های طولی و جانبی هر یک از بخش‌ها می‌باشد، اعمال شده است.

یادآوری می‌شود که در این مدل اجزای محدود سه بعدی، ریل‌ها و تراورس‌ها با استفاده از المان‌های تیر خمشی به‌عنوان روسازه، و لایه‌های بالاست و زیربلاست به‌صورت مجموعه‌ای از توده‌های جرم - فنر - میراگر به‌عنوان زیرسازه مدل شده‌اند و شرایط مرزی مسئله به همان صورتی که در شکل ۱ نشان داده شده است و با فرض گیرداری ریل‌ها در دو سمت انتهایی در نظر گرفته شده است.

بنابراین، با استفاده از مدل ارائه شده امکان تحلیل لرزه‌ای در دو مرحله طراحی و بهره‌برداری امکان‌پذیر خواهد بود که اهمیت این موضوع به‌طور مشروح در ادامه تبیین شده است:

- از جمله مسایل مطرح در روند طراحی روسازی خطوط ریلی بررسی ملاحظات لرزه‌ای منطبق با شرایط منطقه طرح می‌باشد. سؤال اصلی در این بخش از مطالعات طراحی آن است که آیا اجزای روسازی اعم از ریل، تراورس و ادوات

### ۳-۲- انتخاب پارامترهای جرم، سختی و میرایی سایر

#### اجزای خط

برای انجام تحلیل لرزه‌ای مدل پیشنهادی، لازم است مقادیری منطقی برای پارامترهای سختی، جرم و میرایی اجزای خط در نظر گرفته شود. با نگاهی به مطالعات انجام گرفته روی خطوط ریلی و مقادیری که در مقالات مختلف برای تحلیل‌های دینامیکی در نظر گرفته‌اند، متوجه می‌شویم که محققان مختلف با توجه به در نظر گرفتن تعداد جرم‌های مختلف در مدل‌سازی‌های خود، مقادیر مختلفی را ارائه داده‌اند. در این بررسی مشخصات اجزای خط برای بررسی اثر زلزله در مدل‌سازی به صورت جدول ۲ در نظر گرفته شده است (Zhai, Wang and Lin, 2004). مطالعات انجام گرفته روی سختی‌ها و میرایی‌های افقی قسمت‌های مختلف خط به ویژه سختی‌های طولی و جانبی اجزای خط بسیار اندک بوده است. تعیین دقیق این مقادیر نیاز به انجام مطالعات بیشتر و انجام تست‌های آزمایشگاهی و میدانی دارد. بنابراین، در این مقاله فرض شده است برای همه بخش‌هایی که سختی و میرایی افقی آنها به قفل و بست بین سنگدانه‌ها مربوط می‌شود، مقادیر سختی و میرایی که ژای و همکاران به منظور در نظر گرفتن قفل و بست دانه‌های سنگدانه‌ها در انجام ارزیابی رفتار ارتعاشی قائم بالاست در نظر گرفته‌اند، استفاده شود و چنین فرض شده است که سختی و میرایی بستر نیز در تمام جهات قائم و افقی یکسان است.

### ۳-۳- انتخاب زلزله وارد بر خط

برای انجام تحلیل لرزه‌ای، زلزله کوبه بر مدل ساخته شده از خط اعمال شد. این زلزله دارای عمق ۱۴ کیلومتر است که ارتعاشات ناشی از آن برای مدت ۲ دقیقه بر زمین وارد شده که در حدود ۲۰ ثانیه شدت زیادی داشته است. حداکثر شتاب زمین (PGA) زلزله کوبه در راستای افقی حدود (۸/۳۰ متر بر مجذور ثانیه) ۸۳۰ gal و در راستای قائم حدود (۳/۳۰ متر بر مجذور ثانیه) ۳۳۰ gal می‌باشد. در شکل ۳ نمودارهای شتاب نگاشت زلزله کوبه در جهات طولی و عرضی ترسیم شده است. به منظور بررسی اثر زلزله بر خط در راستای طولی و عرضی، زلزله کوبه در هر دو جهت بر مدل خط پیشنهادی اعمال شده و تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفته است.

یا این که فاقد همپوشانی باشند. با توجه به مشخصات هندسی خطوط بالاستی در اکثر خطوط بین بلوک‌های بالاست، همپوشانی رخ می‌دهد. بنابراین، از روابطی که در ادامه بیان می‌شود برای محاسبه مشخصات ارتعاشی بالاست و بستر استفاده شده است (Zhai et al., 2004).

جرم مؤثر بالاست را می‌توان به صورت ناحیه هاشور خورده در شکل ۲-ج نشان داد. بنابراین، عمق ناحیه همپوشانی دو مخروط از رابطه ۱ قابل محاسبه می‌باشد:

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

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

بنابراین، جرم ارتعاشی بالاست از رابطه زیر به دست خواهد آمد:

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

در این رابطه  $\rho_b$  چگالی سنگدانه‌های بالاست،  $h_b$  ضخامت لایه بالاست،  $h_b$  عمق ناحیه همپوشانی،  $l_e$  طول مؤثر ناحیه تکیه‌گاهی نصف تراورس،  $l_b$  عرض تراورس،  $\alpha$  زاویه توزیع تنش در بالاست و  $M_b$  جرم مؤثر ارتعاشی بالاست می‌باشد. سختی بالاست نیز از ترکیب سری سختی‌های دو ناحیه به صورت رابطه ۳ به دست می‌آید:

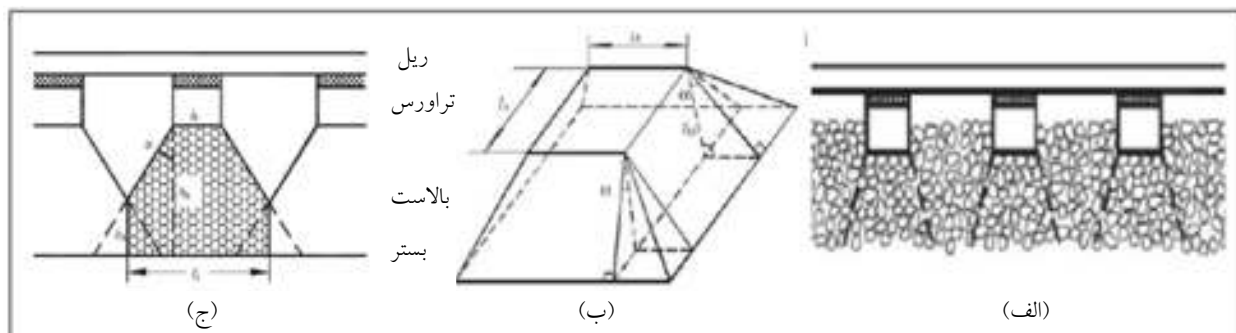
$$\begin{cases} K_{b1} = \frac{2(l_e - l_b) \tan \alpha}{\ln \left[ \frac{l_e l_s}{\ln(l_b(l_e + l_s - l_b))} \right]} E_b \\ K_{b2} = \frac{l_s(l_s - l_b + 2l_e + 2h_b \tan \alpha) \tan \alpha}{l_b - l_s + 2h_b \tan \alpha} E_b \end{cases} \quad (3)$$

$$\Rightarrow K_b = \frac{K_{b1} K_{b2}}{K_{b1} + K_{b2}}$$

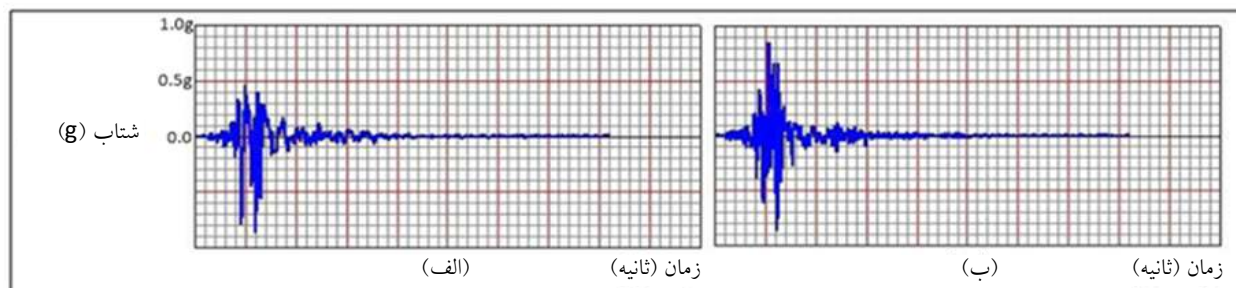
سختی بستر نیز باید به صورت رابطه ۴ محاسبه شود:

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

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



شکل ۲. فرض توده بالاست به صورت هرم: الف) ناحیه مؤثر بالاست در ارتعاش، ب) در صورت عدم همپوشانی، ج) در صورت همپوشانی



شکل ۳. نمودار شتاب نگاشت های زلزله کوبه: الف) در راستای طولی خط (Kobe1)، ب) راستای عرضی خط (Kobe2)

جدول ۲. مشخصات اجزای خط برای بررسی اثر زلزله در مدل سازی (Zhai et al., 2004)

مقدار	واحد	عنوان پارامتر	علامت اختصاری
-	-	نوع ریل	$UIC\ 60$
-	-	نوع تراورس	$B70$
۰/۶۰	متر (m)	فاصله بین تراورس ها	$S$
۶۰/۳۴	کیلوگرم بر متر (Kg/m)	جرم واحد طول ریل	$M_r$
۳۰۰	کیلوگرم (Kg)	جرم تراورس	$M_s$
۷۸/۴	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی طولی و عرضی بالاست بین تراورس ها	$K_{Hs}$
۸۰	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی طولی و عرضی بالاست بین تراورس ها	$C_{Hs}$
۲۴۰	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی صفحه لاستیکی زیر ریل	$K_p$
۲۴۸	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی صفحه لاستیکی زیر ریل	$C_p$
۷۸/۴	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی طولی و عرضی بالاست شانه	$K_{Hsh}$
۸۰	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی طولی و عرضی بالاست شانه	$C_{Hsh}$
۶۰۰	کیلوگرم (Kg)	جرم توده بالاست و زیر بالاست	$M_b \ \& \ M_{sb}$
۷۰	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی قائم بالاست و زیر بالاست	$K_b \ \& \ K_{sb}$
۱۸۰	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی قائم بالاست و زیر بالاست	$C_b \ \& \ C_{sb}$
۷۸/۴	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی های طولی و عرضی بین بلوک های بالاست و زیر بالاست	$K_{Hb} \ \& \ K_{Hsb}$
۸۰	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی های طولی و عرضی بین بلوک های بالاست و زیر بالاست	$C_{Hb} \ \& \ C_{Hsb}$
۱۳۰	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی قائم بستر	$K_f$
۶۲/۳	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی قائم بستر	$C_f$
۱۳۰	مگانیوتن بر متر (MN/m)	سختی های طولی و عرضی بستر	$K_{Hf}$
۶۲/۳	کیلونیوتن ثانیه بر متر (KN.s/m)	میرایی های طولی و عرضی بستر	$C_{Hf}$



به دست آمده از مدل و آزمایش میز لرزه اختلاف اندکی با یکدیگر داشته که به معنای مناسب بودن مدل برای تحلیل لرزه‌ای می‌باشد.

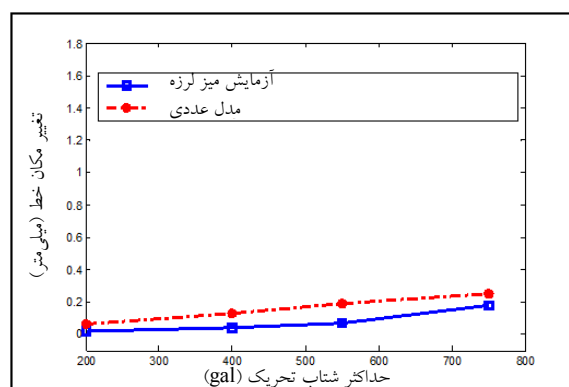
#### ۴-۲- اثر طول مدل خط بر نتایج تحلیل لرزه‌ای

مشاهده وضعیت خطوط ریلی پس از وقوع زلزله بیانگر این موضوع است که در اثر یک زلزله معین و در یک خط مشخص وضعیت خط به لحاظ سطح بهره‌برداری و میزان آسیب‌دیدگی در طول خط متفاوت می‌باشد. از آنجا که خط ریلی یک شبکه حمل و نقل یک بعدی است، بدین معنا که با آسیب‌دیدگی یک قسمت از خط، کل خط غیرقابل بهره‌برداری خواهد بود، باید طراحی سازه خط ریلی در برابر زلزله برای بحرانی‌ترین اثری که زلزله می‌تواند بر خط داشته باشد، صورت گیرد. بنابراین، در این بخش سعی شده است طولی از خط را که موجب ایجاد بحرانی‌ترین شرایط سازه‌ای و بهره‌برداری در خط می‌گردد مشخص شود. در واقع هنگامی که زلزله به خط وارد می‌شود، انتظار می‌رود که یکی از فرکانس‌های زلزله با فرکانس خط برابر شده و بیشترین اثرات را در خط ایجاد کند. از آنجا که سازه خط یک سازه طویل خطی است، این‌که در چه طولی از خط بحرانی‌ترین شرایط رخ می‌دهد، محل سؤال است. چرا که طول‌های مختلف خط دارای جرم و سختی‌های متفاوت می‌باشند و یا به عبارت دقیق‌تر در هر طول یکی از فرکانس‌های غالب زلزله با فرکانس طبیعی خط همخوانی داشته و بیشترین اثرات را به وجود می‌آورد. از این رو در طول‌های مختلف با توجه به این‌که فرکانس طبیعی خط چقدر بوده و با کدام یک از فرکانس‌های غالب زلزله برابر است، اثرات متفاوتی در مقادیر تغییرشکل‌ها و نیروهای حداکثر ایجاد شده در خط به وجود می‌آید. بنابراین، در این مقاله برای یافتن این طول بحرانی مدل‌های خط با طول‌های ۳، ۶، ۱۲، ۱۸، ۳۶، ۴۲، ۴۸، ۵۴، ۶۰، ۶۶، ۷۲، ۱۰۲، ۱۴۴ و ۲۰۴ متر در تحلیل لرزه‌ای مورد استفاده قرار گرفته و برای بررسی خط به لحاظ سازه‌ای و بهره‌برداری، مقادیر حداکثر زیر ملاک ارزیابی وضعیت خط بعد از زلزله قرار گرفته است:

– مقادیر تغییرشکل‌های حداکثر خط (تغییر مکان‌های طولی V1، تغییر مکان‌های جانبی V2 و دوران خط حول محور قائم R)،

#### ۴- نتایج تحلیل دینامیکی خط در شرایط زلزله

در این قسمت سعی شده است عملکرد خطوط ریلی در مقابل زلزله با استفاده از مدل پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. برای این کار در مرحله نخست تأثیر طول خط بر مقادیر نیروها و تغییر شکل‌های ایجاد شده در خط در اثر اعمال زلزله بررسی گردیده و در مرحله بعدی برای بحرانی‌ترین طول خط مرحله نخست، تأثیر تفاوت در سختی‌های اجزای خط بر نتایج تحلیل لرزه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۴. مقایسه تغییر مکان‌های جانبی آزمایش میز لرزه و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی آزمایش

#### ۴-۱- اعتبارسنجی مدل

برای اعتبارسنجی مدل سعی شد نتایج به دست آمده از مدل تحت شرایط زلزله با نتایج حاصل از یک آزمایش عملی مقایسه شود. در سال ۲۰۱۰ ناکامورا و همکاران (Nakamura et al., 2010)، عملکرد لرزه‌ای 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 که دارای ریل از نوع UIC60 و تراورس نوع B70 بود تحت تحریک زلزله شبیه‌سازی شده کوشیرو-اکی (Koshiro-Oki) قرار گرفت. برای اعتبارسنجی مدل ارایه شده، خطی با مشخصات خط آزمایش میز لرزه نام‌برده مدل‌سازی گردید و تحت تحریک زلزله کوشیرو-اکی قرار گرفت. نتایج دامنه تغییر مکان‌های باقی‌مانده خط برای مدل و آزمایش میز لرزه در مقابل تغییرات شتاب حداکثر زمین در نمودار شکل ۴ ارایه و با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است، نتایج

- روند کلی تغییرات تغییرشکل‌های حداکثر خط در مقابل تغییرات طول مدل خط در شرایط زلزله به این صورت بوده است که با افزایش طول مدل خط این مقادیر افزایش یافته تا این‌که در طول‌هایی مشخص به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس کاهش یافته است. با رسیدن به این مقدار مشخص که شیب تغییرات بسیار کاهش یافته، به‌طوری‌که می‌توان گفت ثابت شده است.
- می‌توان مهم‌ترین اثر زلزله در تغییرشکل‌های ایجاد شده در خط راه، تغییر مکان‌های جانبی نسبتاً زیادی دانست که باید برای مقابله با آن راه‌کاری اندیشید.

#### ۴-۲-۲- اثر طول مدل خط بر مقادیر نیروهای حداکثر ریل

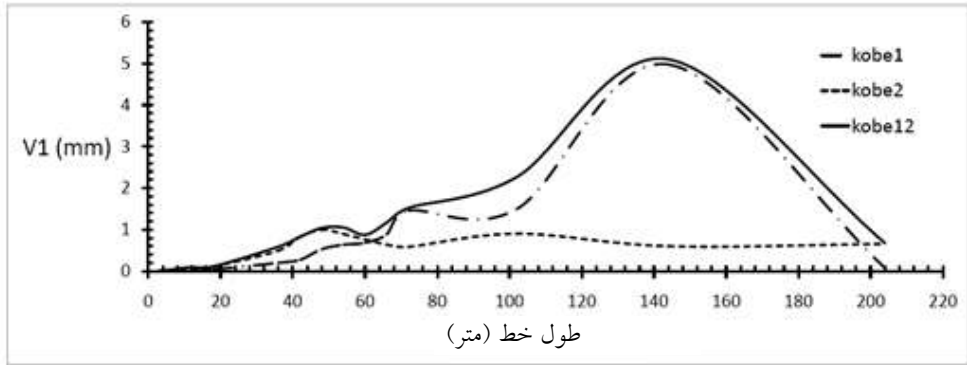
- در اشکال ۸، ۹ و ۱۰ نمودار تغییرات نیروهای حداکثر ایجاد شده در ریل (نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی) برای مدل‌هایی با طول خط‌های مختلف ترسیم شده است. با دقت در این نمودارها، نکات زیر را برداشت می‌شود:
- نیروهای حداکثر ایجاد شده در ریل، بیشتر تحت تأثیر مؤلفه جانبی زلزله هستند. تأثیر مؤلفه طولی زلزله به‌خصوص در مقادیر حداکثر نیروهای برشی و لنگر ایجاد شده در ریل قابل چشم‌پوشی است ولی تأثیر آن در مقادیر نیروهای محوری ایجاد شده در ریل باید در نظر گرفته شود و قابل چشم‌پوشی نیست.
  - مقادیر نیروهای محوری ایجاد شده در ریل در یک طول حدود ۴۸ متری و مقادیر نیروهای برشی و لنگر ایجاد شده در ریل در یک طول حدود ۴۲ متری بحرانی‌ترین شرایط را برای خط ایجاد کرده‌اند.
  - روند کلی تغییرات نیروهای حداکثر ایجاد شده در ریل در مقابل تغییرات طول مدل خط در شرایط زلزله به این صورت بوده است که با افزایش طول مدل خط این مقادیر افزایش یافته تا این‌که در یک طول حدود ۴۰-۵۰ متری به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس کاهش یافته است و با رسیدن به یک مقدار مشخص، شیب تغییرات بسیار کم شده، به‌طوری‌که می‌توان گفت ثابت شده است.

- مقادیر حداکثر نیروهای محوری (P) در ریل‌ها و تراورس‌ها،
- مقادیر حداکثر نیروهای برشی (V) در ریل‌ها و تراورس‌ها،
- مقادیر حداکثر لنگرهای خمشی (M) در ریل‌ها و تراورس‌ها.
- برای تعیین طولی از خط که باعث ایجاد بحرانی‌ترین شرایط در خط می‌گردد، زلزله کوبه را در سه حالت زیر اعمال می‌کنیم:
- اعمال زلزله تنها در جهت طولی بر مدل خط (Kobe1)،
- اعمال زلزله تنها در جهت جانبی بر مدل خط (Kobe2)،
- تأثیر همزمان زلزله در راستای طولی و جانبی بر مدل خط (Kobe12).

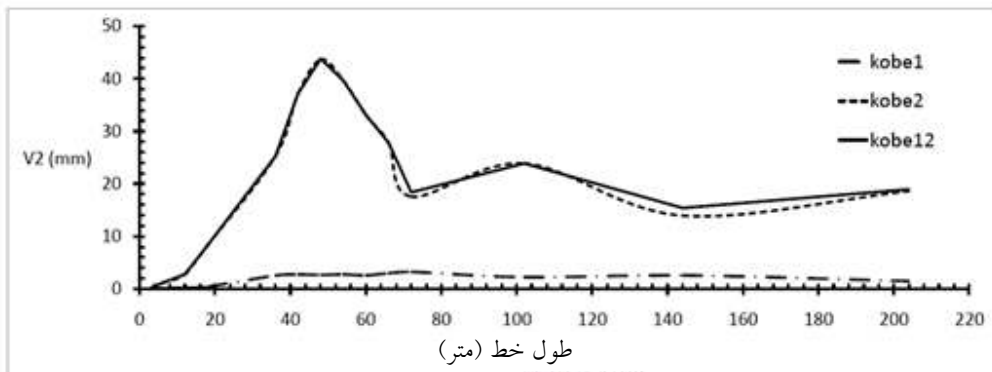
#### ۴-۲-۱- اثر طول خط بر مقادیر تغییرشکل‌های حداکثر

- تغییرات تغییرشکل‌های حداکثر خط با تغییر طول مدل خط در اثر اعمال زلزله در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ارایه شده است. از بررسی اشکال نام‌برده می‌توان نکات زیر را به دست آورد:
- تغییر مکان‌های حداکثر خط در راستای طولی خط به‌طور قابل توجهی تنها تحت تأثیر مؤلفه طولی زلزله قرار می‌گیرد و تأثیر مؤلفه جانبی زلزله بر تغییر مکان‌های طولی خط ناچیز می‌باشد.
  - تغییر مکان‌های حداکثر خط در راستای عرضی خط تحت تأثیر مؤلفه جانبی زلزله قرار دارد و اثر مؤلفه طولی زلزله بر تغییر مکان‌های جانبی خط قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
  - دوران‌های ایجاد شده در خط به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر مؤلفه جانبی زلزله قرار دارند و تأثیر مؤلفه طولی زلزله در دوران‌های ایجاد شده در خط قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
  - طول خط بر مقادیر تغییرشکل‌های حداکثر خط (تغییر مکان‌ها و دوران‌ها) مؤثر می‌باشد و برای مدل‌های با طول‌های مختلف، در مقادیر تغییر مکان‌های حداکثر طولی، تغییر مکان‌های حداکثر جانبی و دوران خط حول محور قائم، تغییر محسوسی ایجاد می‌شود.
  - تغییر مکان‌های طولی خط در یک طول در حدود ۱۴۰ متری از خط و مقادیر تغییر مکان‌های حداکثر جانبی و دوران حداکثر خط در یک طول ۴۰-۵۰ متری از خط بحرانی‌ترین حالت را برای خط ایجاد کرده‌اند.

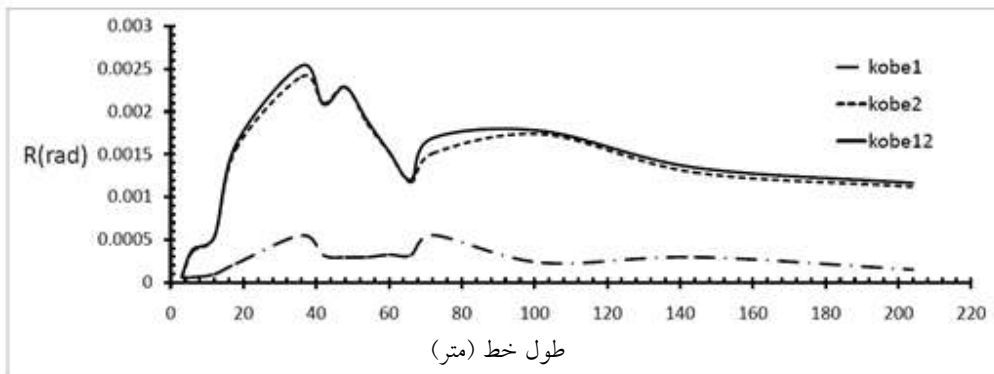
ارزیابی سه بعدی رفتار خطوط ریلی به روش عددی در تحریک زلزله



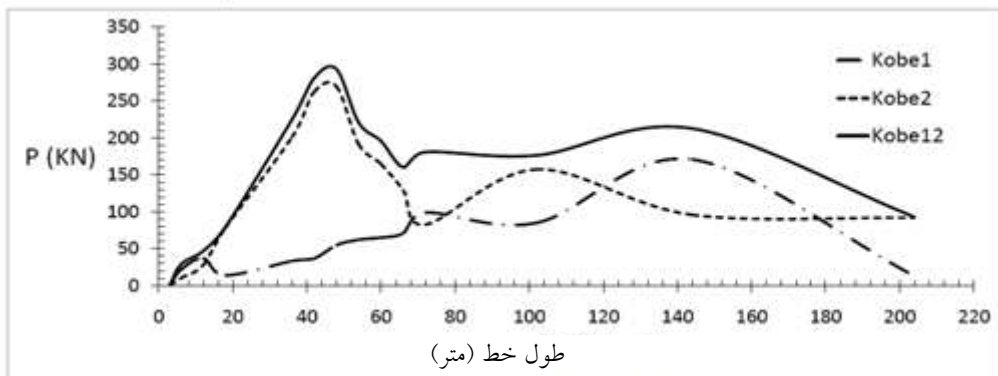
شکل ۵. اثر طول خط بر مقادیر حداکثر تغییر مکان‌های طولی خط



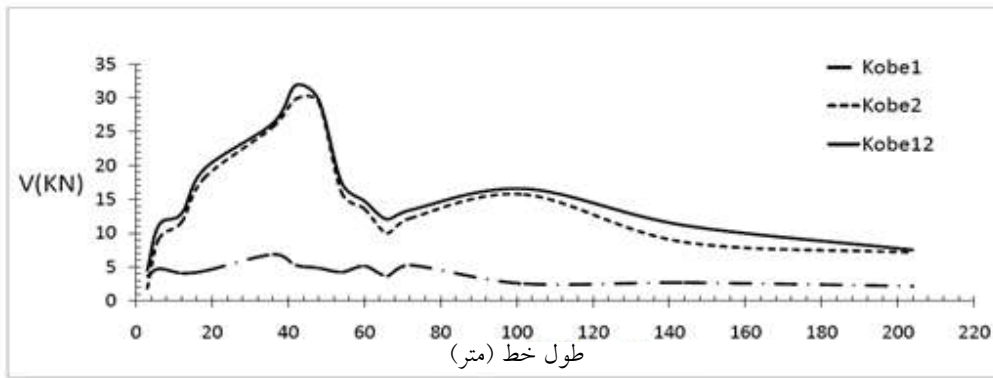
شکل ۶. اثر طول خط بر مقادیر حداکثر تغییر مکان‌های جانبی خط



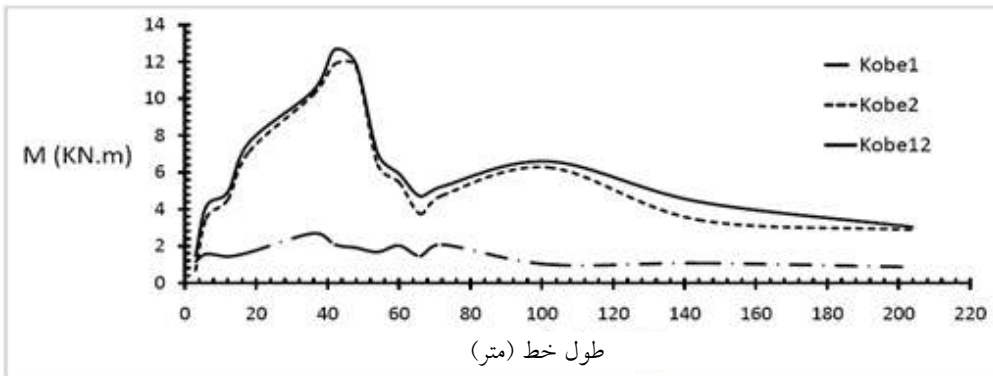
شکل ۷. اثر طول خط بر مقادیر حداکثر دوران خط حول محور قائم



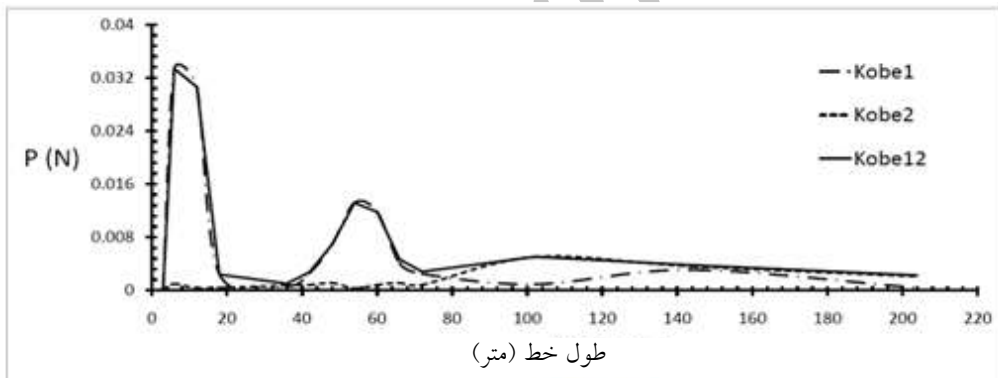
شکل ۸. اثر طول خط بر مقادیر نیروهای محوری حداکثر ایجاد شده در ریل‌ها



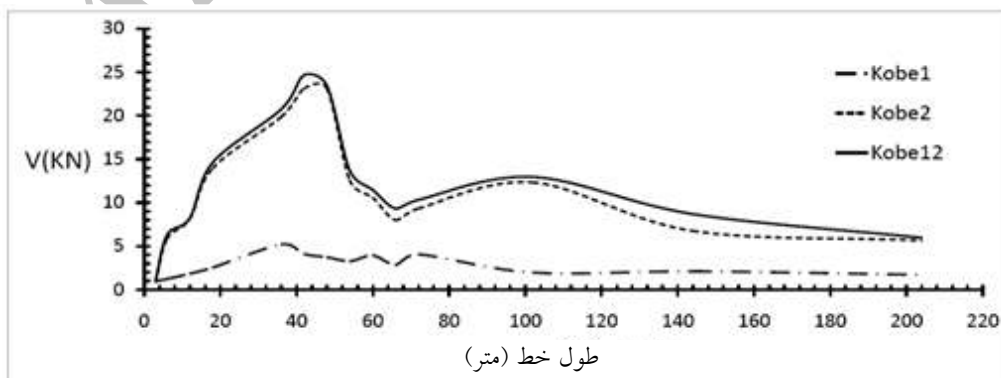
شکل ۹. اثر طول خط بر مقادیر نیروهای برشی حداکثر ایجاد شده در ریل‌ها



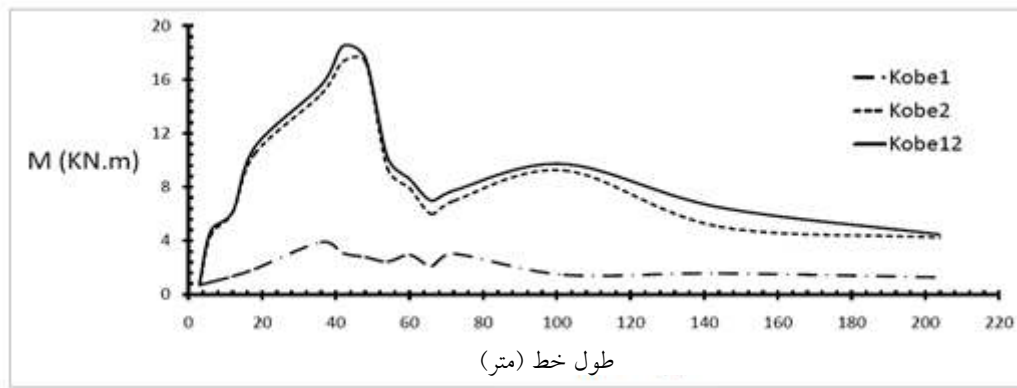
شکل ۱۰. اثر طول خط بر مقادیر لنگرهای خمشی حداکثر ایجاد شده در ریل‌ها



شکل ۱۱. اثر طول خط بر مقادیر نیروهای محوری حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها



شکل ۱۲. اثر طول خط بر مقادیر نیروهای برشی حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها



شکل ۱۳. اثر طول خط بر مقادیر لنگرهای خمشی حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها

از آن تغییرات روند نزولی پیدا کرده تا این که با رسیدن به یک مقدار معین روند تغییرات ثابت شده است.

#### ۴-۳- تأثیر زلزله بر خطوط با سختی مختلف

در این بخش سعی شده است تأثیر نوع و شرایط خط به لحاظ سختی اجزای آن روی نتایج تغییرشکل‌ها و نیروهای حداکثر به وجود آمده در اجزای مختلف خط مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور از مدل ۴۲ متری که بحرانی‌ترین شرایط را برای خط ایجاد می‌نماید، استفاده شده است. روشن است که خطوط ریلی به لحاظ سختی‌های طولی، عرضی و قائم اجزا می‌توانند دارای شرایط مختلفی باشند که این امر باعث ایجاد صلبیت‌های مختلف در خط می‌گردد. بنابراین، با توجه به محدوده‌ای که مشخصات اجزای مختلف خط می‌توانند به لحاظ منطقی در آن محدوده متغیر باشند (جدول ۳) خطوط ریلی به ۵ دسته (جدول ۴) تقسیم شده‌اند. در این تقسیم‌بندی که از دید میزان صلبیت خطوط انجام گرفته است، اولین دسته، نماینده خط بسیار نرم و دسته‌های بالاتر نماینده خطوط سخت‌تر می‌باشند. سعی شده است مشخصات اجزای خط دو محدوده‌های منطقی که متناسب با شرایط واقعی و اجرایی خطوط هستند، انتخاب شود. (Sun and Dhanasekar, 2002)، (Ishida et al., 2005)، (Grassie et al., 1982)، (Zhai et al., 2004). بنابراین، به هر یک از مدل‌های ساخته شده منطبق با شرایط خطوط جدول ۴، زلزله کوبه اعمال و تحلیل لرزه‌ای انجام شد که در ادامه نتایج به دست آمده بیان می‌گردد.

#### ۴-۲- تأثیر طول مدل خط بر مقادیر نیروهای حداکثر تراورس

روند تغییرات نیروهای حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها (نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی) برای مدل‌های با طول خط‌های مختلف تا حدودی شبیه تغییرات یادشده در ریل می‌باشد. با بررسی نمودارهای اشکال ۱۱، ۱۲ و ۱۳ که مربوط به تغییرات نیروهای حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها در مقابل طول مدل‌های مختلف است، نتایج زیر به دست می‌آید:

- نیروهای محوری حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها در اثر اعمال زلزله، بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی می‌باشند.
- نیروهای حداکثر برشی و لنگرهای خمشی حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها بیشتر تحت تأثیر مؤلفه جانبی زلزله هستند و تأثیر مؤلفه طولی زلزله در این مقادیر قابل صرف‌نظر کردن است.
- مقادیر نیروهای محوری ایجاد شده در تراورس با تغییر طول مدل خط، تغییر چندانی نمی‌کنند و قابل چشم‌پوشی هستند، اما مقادیر حداکثر نیروهای برشی و لنگرهای ایجاد شده در تراورس در یک طول حدود ۴۲ متری بحرانی‌ترین شرایط را برای خط ایجاد می‌کنند.
- روند کلی تغییرات نیروهای حداکثر ایجاد شده در تراورس‌ها در مقابل تغییرات طول مدل خط در شرایط زلزله مشابه آن‌چه در ریل‌ها به وجود می‌آید، می‌باشد، به این صورت که با افزایش طول مدل خط این مقادیر افزایش یافته و در یک طول حدود ۴۲ متری به مقدار بیشینه خود رسیده است. پس

- تغییرات تغییر مکان‌های طولی و جانبی خط با تغییر صلبیت خط را می‌توان تقریباً خطی فرض کرد.

#### ۴-۳-۲- اثر زلزله بر نیروهای حداکثر خطوط

تأثیر زلزله بر نیروهای حداکثر به وجود آمده در خطوط با سختی‌های مختلف در نمودارهای اشکال ۱۶ و ۱۷ ترسیم شده است. از این نمودارها می‌توان دریافت که:

- سختی خطوط روی نیروهای حداکثر محوری، برشی و لنگر خمشی به وجود آمده در قسمت‌های مختلف خط (ریل و تراورس) تأثیر محسوسی ندارد.
- به لحاظ کمی هر چند با افزایش سختی خطوط و صلب‌تر شدن آنها نیروهای ایجاد شده در اجزای خط تا حدودی افزایش می‌یابد اما این میزان تغییر، قابل ملاحظه نیست.

#### ۴-۳-۱- اثر زلزله بر تغییر شکل‌های حداکثر خطوط

نتایج حاصل از تحلیل لرزه‌ای نشان می‌دهد که سختی خطوط روی تغییر مکان‌های حداکثر ایجاد شده در خط مؤثر می‌باشد. در اشکال ۱۴ و ۱۵ نمودار تغییرات تغییر مکان‌های طولی و جانبی خط در خطوط با سختی مختلف در اثر اعمال زلزله در جهات طولی، عرضی و هر دو جهت بر خط آورده شده است که مهم‌ترین نتایج به دست آمده در ادامه بیان می‌شود:

- با بالا رفتن درجه سختی خط تغییر مکان‌های حداکثر طولی و جانبی در اثر اعمال زلزله در جهات طولی، عرضی و هر دو جهت بر خط کاهش می‌یابد.
- روند تغییر مکان‌های طولی با سختی خط، از تغییر مکان‌های جانبی خط کمتر است که ناشی از بالا بودن مقاومت‌های طولی خط نسبت به مقاومت‌های عرضی خط می‌باشد.

جدول ۳. محدوده تغییرات مشخصات اجزای خط (Sun and Dhanasekar, 2002),

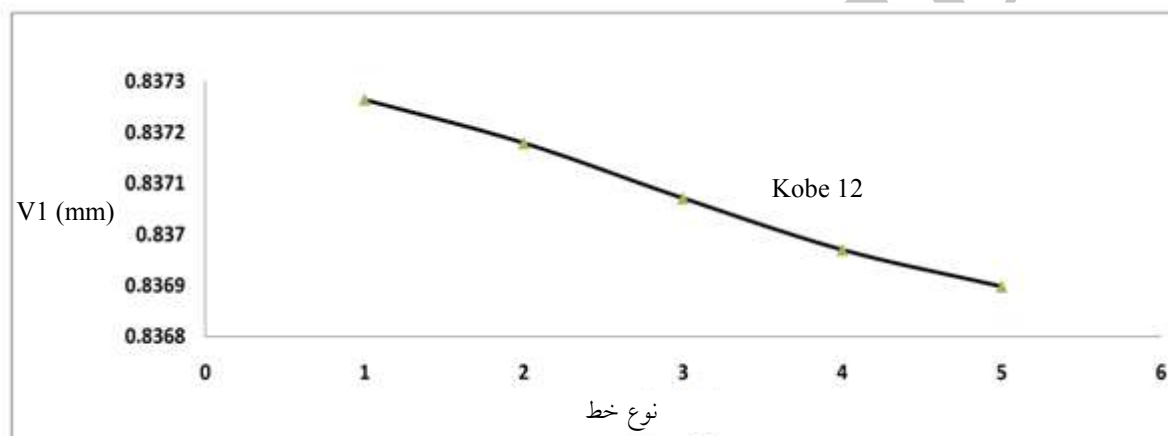
(Ishida et al., 2005), (Grassie et al., 1982), (Zhai et al., 2004)

واحد	محدوده تغییرات	عنوان پارامتر	علامت اختصاری
کیلوگرم بر متر ( $kg/m$ )	۶۰	جرم واحد طول ریل	$M_r$
کیلوگرم ( $kg$ )	۳۰۰	جرم تراورس	$M_s$
مگانیوتن بر متر ( $MN/m$ )	۶۰-۲۴۰	سختی ریل پد	$K_p$
کیلونیوتن ثانیه بر متر ( $KNs/m$ )	۴۰-۲۵۰	میرایی ریل پد	$C_p$
متر ( $m$ )	۰/۳-۰/۶	ضخامت بالاست	$h_b$
مگاپاسکال ( $MPa$ )	۱۰۰-۱۵۰	مدول الاستیسیته بالاست	$E_b$
کیلونیوتن ثانیه بر متر ( $KNs/m$ )	۵۰-۲۰۰	میرایی بالاست	$C_b$
مگاپاسکال ( $MPa$ )	۶۰-۱۰۰	مدول الاستیسیته بستر	$E_f$
کیلونیوتن ثانیه بر متر ( $KNs/m$ )	۳۰-۱۰۰	میرایی بستر	$C_f$
مگانیوتن بر متر ( $MN/m$ )	۷۸/۴	سختی افقی اجزا (در راستای طولی یا عرضی)	$K_H$
کیلونیوتن ثانیه بر متر ( $KNs/m$ )	۸۰	میرایی افقی اجزا (در راستای طولی یا عرضی)	$C_H$

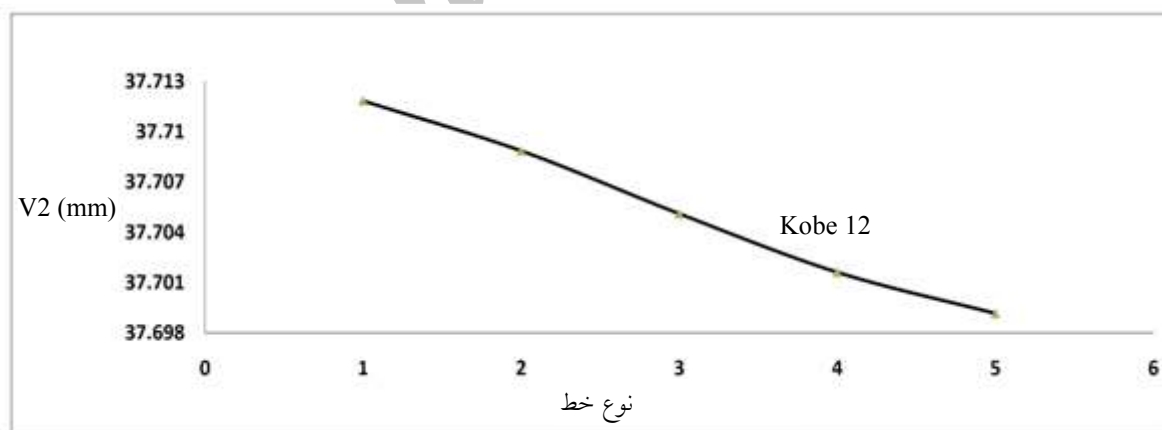
ارزیابی سه بعدی رفتار خطوط ریلی به روش عددی در تحریک زلزله

جدول ۴. دسته‌بندی خطوط با توجه به میزان سختی‌های اجزا

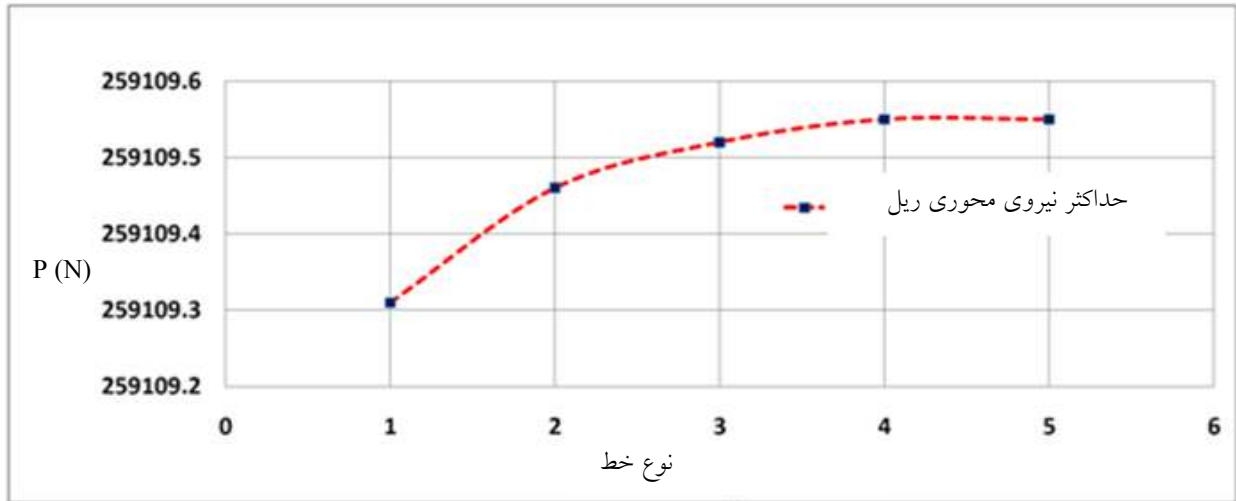
Ksh (M.N/m)	Ksg (M.N/m)	Ksb (M.N/m)	Kb (M.N/m)	Kp (M.N/m)	Msb (kg)	Mb (kg)	Ms (kg)	Mr (kg/m)	نوع خط
۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۶۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۶۰	I
۵۰	۵۰	۱۲۰	۱۲۰	۱۲۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۶۰	II
۹۰	۹۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۶۰	III
۱۳۰	۱۳۰	۲۸۰	۲۸۰	۲۴۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۶۰	IV
۱۶۰	۱۶۰	۳۶۰	۳۶۰	۳۰۰	۶۰۰	۶۰۰	۳۰۰	۶۰	V



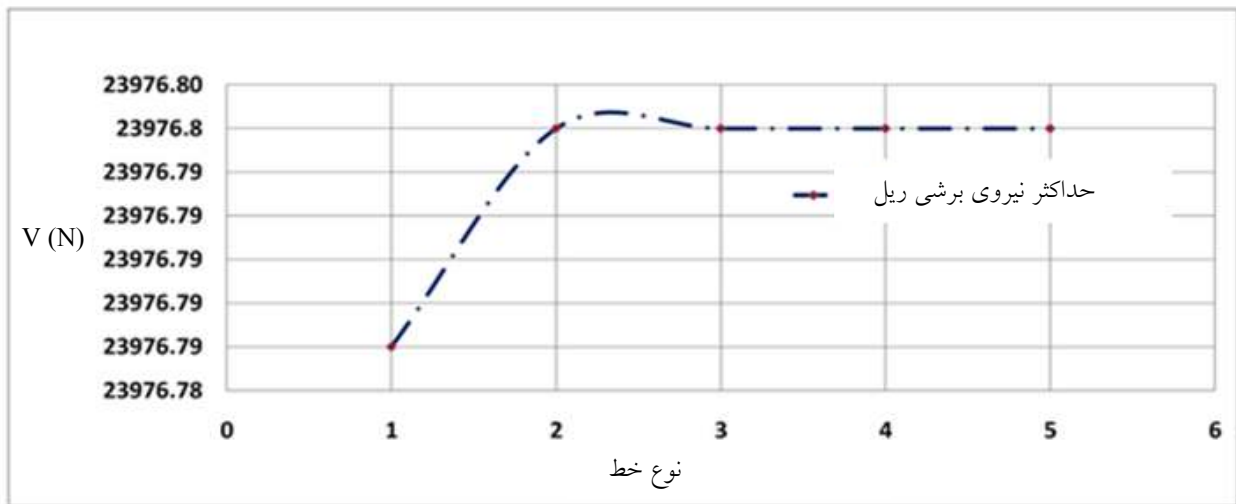
شکل ۱۴. اثر سختی خط بر حداکثر تغییر مکان‌های طولی خط ناشی از زلزله



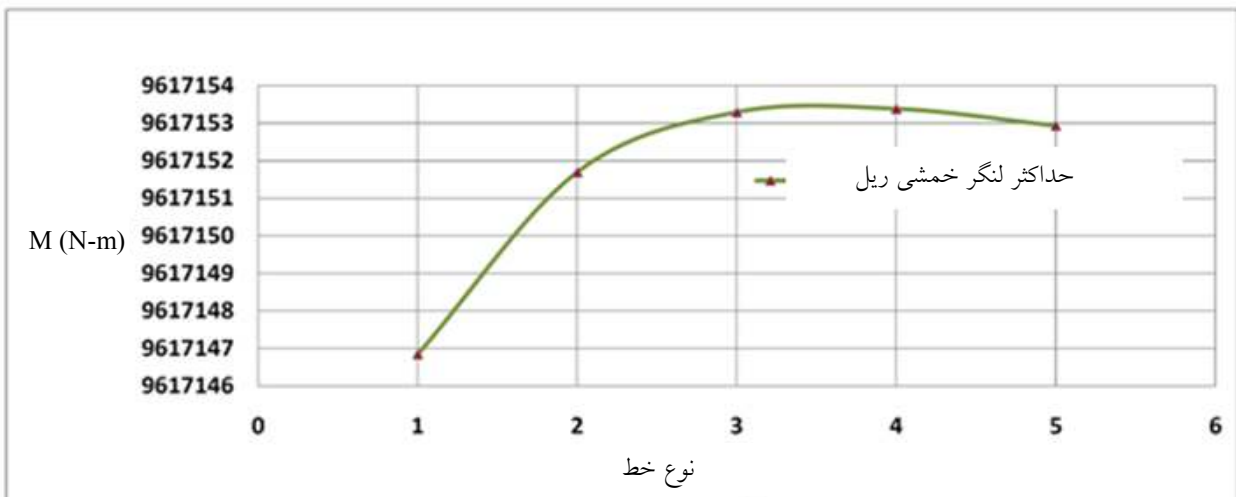
شکل ۱۵. اثر سختی خط بر حداکثر تغییر مکان‌های جانبی خط ناشی از زلزله



(الف)



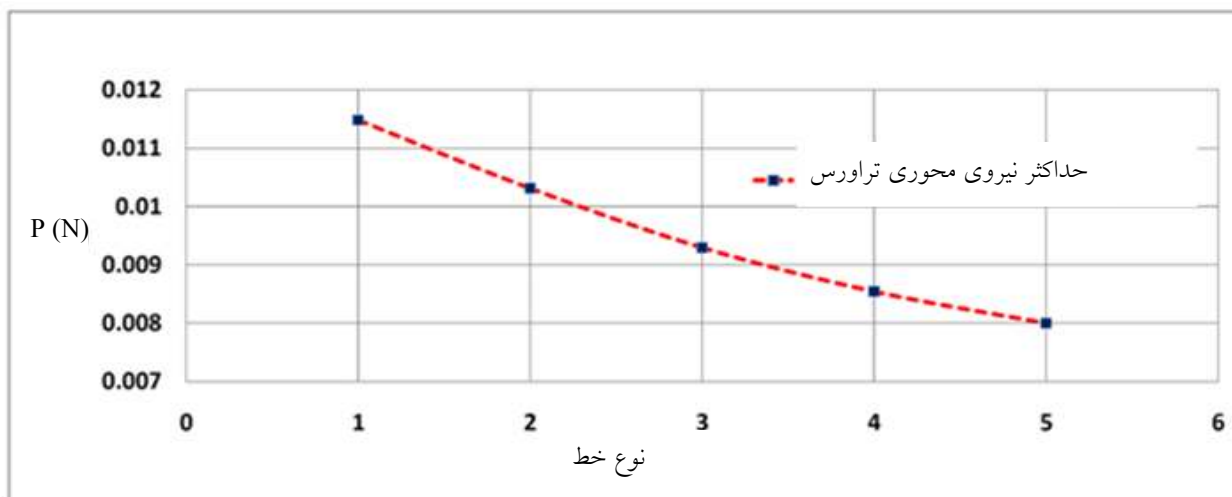
(ب)



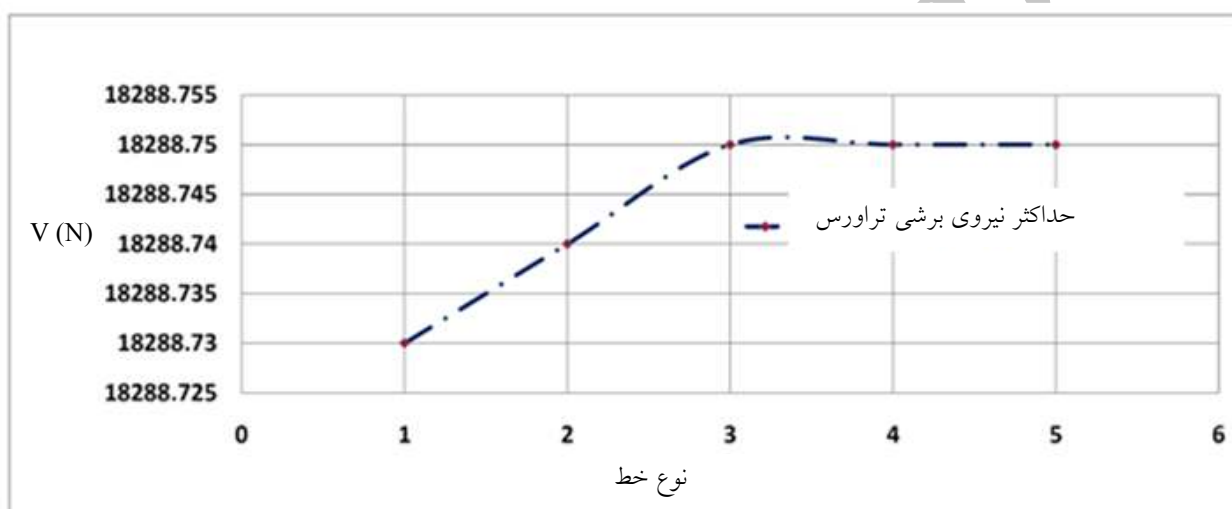
(ج)

شکل ۱۶. اثر زلزله بر نیروهای ایجاد شده در ریل در خطوط با سختی مختلف؛ الف) نیروی محوری، ب) نیروی برشی، ج) لنگر خمشی

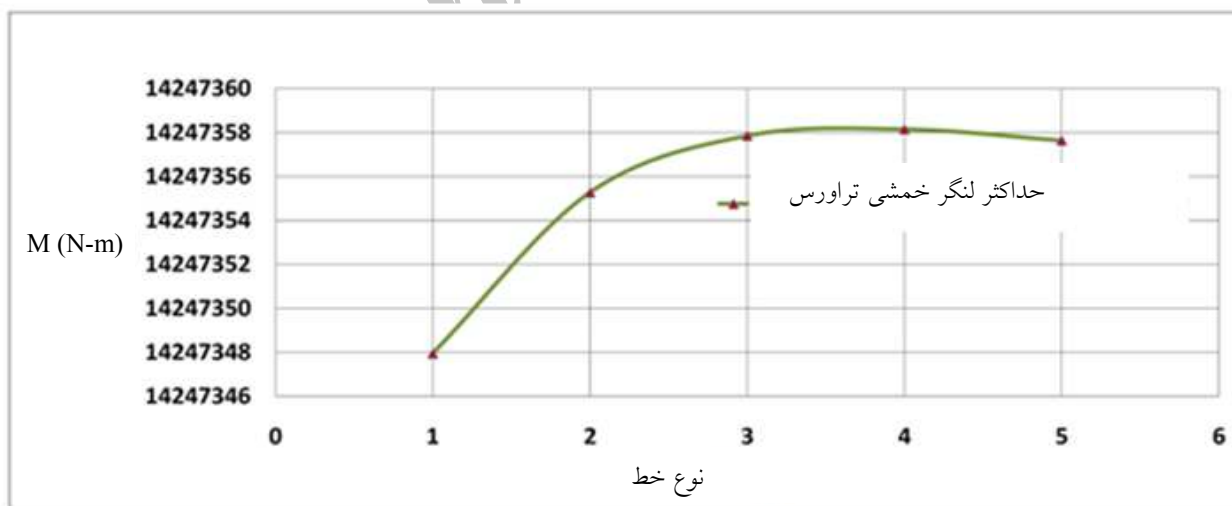




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۷. اثر زلزله بر نیروهای ایجاد شده در تراورس در خطوط با سختی مختلف؛ (الف) نیروی محوری، (ب) نیروی برشی، (ج) لنگر خمشی

## ۴- نتیجه گیری

هدف ارزیابی لرزه‌ای خطوط ریلی رسیدن به شبکه حمل و نقلی است که بتواند بعد از وقوع زلزله نیز قابل بهره‌برداری بوده و پاسخ‌گوی نیازهای استفاده‌کنندگان از آن باشد. بنابراین، در این مقاله سعی بر آن بوده است در گام اول با بررسی مدل‌های موجود تحلیل دینامیکی خطوط ریلی، مدلی معرفی شود که بتواند ارزیابی نزدیک به واقعی از رفتار خط در اثر وقوع زلزله را ارائه کند. از این رو به دلیل آن‌که در زلزله ارتعاشات طولی و جانبی خط بیشترین اثرات را در خرابی خط دارند، مدلی سه بعدی که بتواند مقاومت‌های طولی و جانبی خط را در نظر بگیرد، برای بررسی رفتار لرزه‌ای خط ریلی ارائه شد.

در گام بعدی، از آن‌جایی که رفتار اجزای خط در اثر اعمال زلزله به طولی از مدل خط که تحت تأثیر زلزله قرار می‌گیرد حساس می‌باشد، سعی شده طولی از خط که در اثر اعمال زلزله بحرانی‌ترین شرایط را برای اجزا به وجود می‌آورد، تعیین گردد و در گام آخر تأثیر زلزله روی خطوط با سختی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. اغلب نتایج به دست آمده از این مطالعه به صورت زیر می‌باشد:

- تغییر مکان‌های حداکثر خط در راستای طولی به‌طور قابل توجهی تنها تحت تأثیر مؤلفه طولی زلزله قرار می‌گیرد و تأثیر مؤلفه جانبی زلزله بر تغییر مکان‌های طولی خط ناچیز می‌باشد. از سوی دیگر تغییر مکان‌های حداکثر خط و دوران‌های ایجاد شده در خط تحت تأثیر مؤلفه جانبی زلزله قرار دارد و اثر مؤلفه طولی زلزله بر آنها قابل چشم‌پوشی می‌باشد.
- به جز در مقادیر نیروهای محوری ایجاد شده در ریل و تغییر مکان‌های طولی خط، می‌توان از اثر مؤلفه طولی زلزله صرف‌نظر نمود و تنها اثر مؤلفه جانبی زلزله را به‌منظور ارزیابی رفتار اجزای خط مد نظر قرار داد.
- طول خط بر مقادیر تغییر شکل‌های حداکثر خط (تغییر مکان‌ها و دوران‌ها) مؤثر می‌باشد و برای مدل‌های با طول‌های مختلف، تغییر مکان‌های طولی خط در یک طول حدوداً ۱۴۰ متری از خط، و مقادیر تغییر مکان‌های حداکثر جانبی و دوران حداکثر خط در یک طول ۴۰-۵۰ متری از خط، بحرانی‌ترین حالت را برای خط ایجاد کرده‌اند.

- نیروهای حداکثر ایجاد شده در ریل‌ها و تراورس‌ها (نیروهای محوری، نیروهای برشی و لنگرهای خمشی) به شدت به طول مدل خط وابسته می‌باشند و برای زلزله کوبه در یک طول ۴۰-۵۰ متری بحرانی‌ترین شرایط را دارد.
- روند کلی تغییرات نیروها و تغییر شکل‌های حداکثر ایجاد شده در اجزای خط در مقابل تغییرات طول مدل خط در شرایط زلزله به این صورت بوده است که با افزایش طول مدل خط این مقادیر افزایش یافته تا این‌که در یک طول حدود ۴۰-۵۰ متری به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس رو به کاهش رفته است و با رسیدن به یک مقدار مشخص شیب تغییرات بسیار کاهش یافته، به طوری که می‌توان گفت ثابت شده است.
- تغییر مکان‌های طولی و جانبی خط با افزایش سختی خط کاهش می‌یابد. این تغییرات را می‌توان خطی فرض کرد.
- سختی خطوط روی نیروهای حداکثر (نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی) به وجود آمده در قسمت‌های مختلف خط (ریل و تراورس) تأثیر محسوس ندارد، هر چند می‌توان اظهار داشت با افزایش سختی خطوط و صلب‌تر شدن آنها نیروهای ایجاد شده در اجزای خط تا حدودی افزایش می‌یابد.

## ۵- پی‌نوشت‌ها

1. Beiging-Shanhiguan, Tianjin-Pukou, Tongxian-Tuozitou, Tangshan-Zunhua
2. East Japan Railway
3. Joetsu, Shinetsu, Echigo, Liyama and Tadami Lines
4. The Great Hanshin Earthquake or Kobe Earthquake
5. Kobe-Osaka
6. Beijing-Shanghai

## ۶- مراجع

- 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, D.C.

- 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 Eng.J., Jan. Issue, 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.190-199.
- Kumakura, T., Ishii, H. and Konishi, T. (2010) "Seismic assessment of ballasted tracks in large-scale earthquakes", JR EAST Technical Review, Japan, No. 17, pp. 25-28.
- Reports of Railway Technical Research Institute (1988) Japan, Vol. 29(1), pp. 30-32.
- Sato, Y., Odaka, T. and Takai, H. (1988) "Theoretical analyses on vibration of ballasted track". Quarterly.
- Sekine, E. and Ishikawa, T. (2005) "Deformation characteristics of ballasted track during earthquake", RTRI Report, Japan.
- 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.
- 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.
- Nakamura, T., Sekine, E., Shirae, Y. (2010) "Assessment of aseismic performance of ballasted track for large-scale shaking table test", RTRI Report, 24(12), pp. 23-29.
- 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.
- 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.
- Bardet, J. P., Oka, F., Sugito, M. and Yashima, A. (1995) "The great Hanshin earthquake disaster South Hyogo prefecture earthquake", Department of Civil Engineering, University of Southern California with cooperation Gifu University (Japan), Preliminary Investigation Report.
- Cai, Z. (1992) "Modelling of rail track dynamics and Wheel/Rail Interaction", Thesis (PHD). Department of Civil Engineering, Queen's University.
- Chen, Y. H., Huang, Y. H. and Shih, C. T. (2001) "Response of an infinite Timoshenko beam on a viscoelastic foundation to a harmonic load", Journal of Sound and Vibration, 241(5), pp. 809-824.
- East Japan Railway Company (2005) "Annual Report 2005", Report on Niigata Chuetsu Earthquake.
- Frderick, 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.
- Fumiaki, U. and Kimiro, M. (2005) "Fundamental study on seismic response of railway viaduct with ballasted track", Journal of Railway Technical Research Institute, Japan, Vol. 19, No. 9, pp. 47-50.
- 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, Chapter1: 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.