

# تأثیر وجود تراورس آویزان در رفتار دینامیکی خط آهن با ریل موجدار در راه آهن شمال شرق

جبارعلی ذاکری، استادیار، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
امیرعلی صادقی، دستیار پژوهشی، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
Email: [zakeri@iust.ac.ir](mailto:zakeri@iust.ac.ir)

## چکیده

در شرایط عادی، بررسی رفتار دینامیکی اجزای خط آهن با مدلسازی ریل به صورت تیر ممتد بر روی تکیه گاههای گسسته ارتجاعی صورت می گیرد. در عمل، گاهی به دلیل مشکلات بستر یا لایه بالاست، تکیه گاههای تراورس به خوبی عمل نکرده و اصطلاحاً تراورس به حالت آزاد باقی می ماند. در این مقاله، مدل ریاضی خط آهن با داشتن تعدادی تراورس آویزان توسعه داده شده است. بر اساس این مدل، معادلات حرکت سیستم خط - قطار با در نظر گرفتن غیرخطی بودن تماس چرخ - ریل تشکیل و با استفاده از روش انتگرال گیری عددی در حوزه زمانی حل شده اند. واکنش دینامیکی اجزاء خط با منبع تحریک ناهمواری های موجی شکل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان داده اند که ارتعاشات بالا در تراورس های آویزان، افزایشی در نیروهای تماسی چرخ - ریل به وجود آورده، به طوری که برای ناهمواری های موجی شکل با دامنه  $0.4$  و طول موج  $240$  میلی متر در روی ریل (اندازه گیری شده در راه آهن ناحیه شمال شرق) در قسمت تراورس های آویزان، افزایشی در حدود  $25/5\%$  در نیروی تماسی (برای قطارهای با سرعت  $160 \text{ km/h}$ ) و  $74\%$  در تغییر مکان قائم ریل ایجاد می کند. همچنین نتایج محاسبات نشان دادند که عدم وجود یک تراورس در خط به صورت یک منبع تحریک برای تعامل دینامیکی خط قطار عمل کرده و باعث نامنظمی در ارتعاشات (شتاب ارتعاشی، سرعت ارتعاشی) اجزا روسازی خط آهن می شود.

واژه های کلیدی: اندرکنش خط - قطار، تئوری تماسی هرتز، ناهمواری موجی شکل

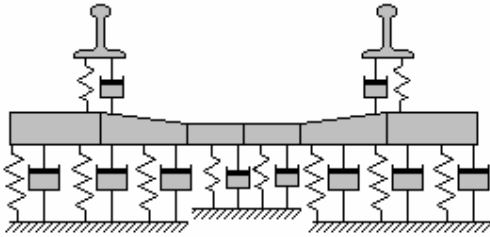
## ۱. مقدمه

تنش ها و تغییر شکل های ایجاد شده در اجزای خط را می توان با مدل سازی واقعی سیستم خط آهن - قطار به دست آورد. زمانی که بالاست در وضعیت نامطلوبی قرار دارد، تکیه گاه کوچکی برای تراورس ها فراهم می شود. در خطوط راه آهن، به طور معمول چنین قسمتهائی دیده می شود. هنگامی که بالاست این قسمت رو به زوال می گذارد، تراورس یا تراورس های آن در حالت معلق و آویزان از ریل قرار می گیرند. چنین وضعیتی معمولاً باعث تسریع در زوال خط می شود. به عنوان مثال می توان به ایجاد موج های

حرکت قطارها بر روی سازه خط آهن باعث به وجود آمدن بارهای دینامیکی و ضربه به خط آهن، تنش ها و تغییر شکل در اجزای مختلف خط، ارتعاشات و ... می شود. آشکار است که معایب سازه خط و اجزاء تشکیل دهنده آن مستقیماً به واکنش های دینامیکی، تنش ها و تغییر شکل های اجزای خط ارتباط داشته و طبیعتاً باعث افزایش آنها می شود.

مهم ترین نوع خرابی بالاست، نشست، خرد شدن و سفت شدگی لایه بالاست است. اثر زوال بالاست در واکنش های دینامیکی،

وسیله نقلیه با ده درجه آزادی شامل جرم بدنه و ممان اینرسی آن، دو جرم بوژی‌ها و ممان اینرسی آنها و چهار جرم غیر معلق چرخ - محور مدل‌سازی می‌شود.



شکل ۱- مدل اندرکنش دینامیکی خط‌آهن - قطار با یک تراورس آویزان

قاب بوژی از طریق سیستم تعلیق به چرخ‌ها و سپس از طریق سیستم تعلیق ثانویه به بدنه وسیله نقلیه متصل می‌شود. معادله حرکت وسیله نقلیه با استفاده از اصل دالامبر به دست می‌آید که معمولاً معادلات دیفرانسیل مرتبه دوم‌اند.

در این مطالعه، طول محدودی از خط انتخاب شده و ریل به صورت یک تیر ممتد که به قطعات محدودی تقسیم شده مدل‌سازی شده است. به این ترتیب ریل به صورت سازه متناوب (سازه زنجیری) در نظر گرفته شده و در دو انتهای ریل دو المان نیمه بی‌نهایت مرزی برای واقعی‌سازی شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفته است.

کامل‌ترین مدل تراورس، تیر تیموشنکو با مقطع متغیر است که با استفاده از المان‌های محدود قابل تحلیل است. نصف تراورس به وسیله سه المان تیر یکنواخت بر روی بستر ویسکو الاستیک مدل‌سازی شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است.

این مدل دارای توده جرم‌های بالاست در زیر تراورس بتنی است که به وسیله فنرها و میراگرهای برشی به یکدیگر متصل شده‌اند. جذابیت چنین مدلی این است که امکان به دست آوردن رابطه صحیحی بین واکنش‌های اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را فراهم می‌سازد. در این مطالعه همچنین جرم‌های مستقل بالاست با قفل و بند‌های برشی دانه‌های آن در نظر گرفته می‌شوند.

معادله حرکت خط‌آهن شامل ریل، جرم‌های بالاست و تراورس است. این معادلات با جزئیات بیشتر در مرجع [۵] تشریح شده و در ادامه به اختصار تشریح می‌شود.

سطحی در روی ریل، آسیب‌دیدگی یا شکست پاندهای ریل، از دست دادن خاصیت ارتجاعی صفحه لاستیکی زیر ریل، ایجاد ترک در تراورس‌ها و غیر مؤثر شدن لایه بالاست اشاره کرد.

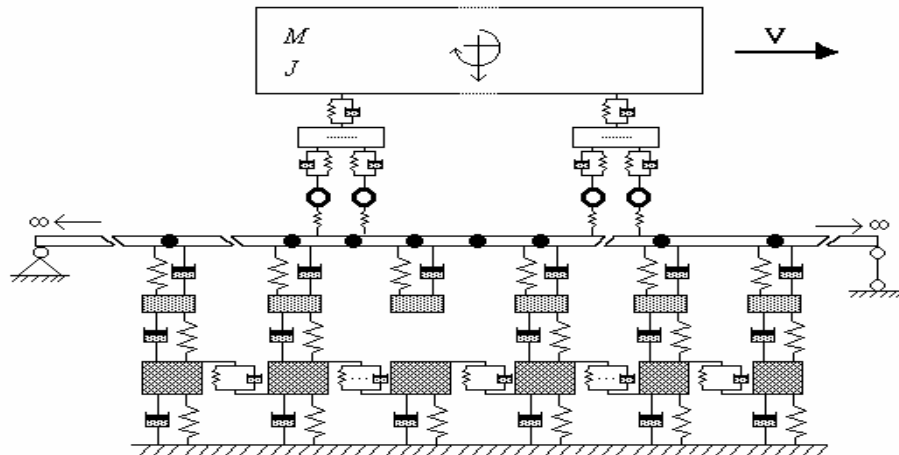
گراسی [۱] روش تیر پیوسته بر روی بستر ارتجاعی را با در نظر گرفتن ۱۵۰ سانتیمتر تراورس آویزان مورد تجزیه و تحلیل قرار داده است. همچنین مطالعات تکمیلی توسط دالبرگ [۲] در خصوص اثرات آن بر رفتار دینامیکی اجزاء خط‌آهن ارائه شده است. نامبرده تأثیر فاصله خالی بین تراورس و بالاست را در مدل دینامیکی خود منظور و افزایش نیروهای اندرکنش را بررسی کرده است. همچنین گائولیانگ [۳] اثرات تعویض تراورس در خطوط سریع را بررسی و از مدل دینامیکی خط - قطار استفاده کرده است. به این ترتیب هنگام تعویض تراورس فرسوده با تراورس سالم، اگر خط‌آهن زیرکوبی نشده باشد، عملاً تراورس تعویض شده، به صورت آویزان قرار خواهد گرفت. در این مقاله سعی شده است که اثرات چنین تراورس‌هایی در رفتار دینامیکی کل مجموعه بررسی شود.

با توجه به این که در راه‌آهن ایران به ویژه در نواحی شمال، لرستان و شمال شرق، مشکل ناهمواری‌های سطحی (ریل موجدار) و وجود تراورس یا تراورس‌های آویزان به دلیل قدمت زیاد خط یا تعویض تراورس‌ها، فرسودگی ریل و زوال بالاست وجود دارد، بنابراین در این مقاله، مطالعه موردی برای راه‌آهن ناحیه شمال شرق با در نظر گرفتن وضعیت روسازی با ریل UIC60 و بالاست مرغوب و نامرغوب (در بخشی از خطوط) و تراورس‌های بتنی و چوبی و نهایتاً سیر قطارهای سریع‌السیر ۱۶۰ km/h انجام شده است. به همین منظور، مدل‌سازی مناسبی از خط‌آهن با در نظر گرفتن وجود تراورس‌های بدون تکیه‌گاه (آویزان) صورت گرفته و تغییرات نیروهای تماس چرخ - ریل شتاب ارتعاش و تغییر مکان ریل تراورس و بالاست مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل انتخاب شده به صورت مدل با تکیه‌گاه‌های گسسته با یک تراورس آویزان است. مدل ریاضی خط با تعمیم مدل قبلی [۵ و ۵] جهت امکان اعمال آویزان بودن تراورس یا تراورس‌هایی صورت گرفته است.

## ۲. مدل خط‌آهن - قطار

مدل تحلیلی اندرکنش دینامیکی خط‌آهن - قطار که در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۲. مدل تراورس بر روی بستر ویسکوالاستیک

### ۳. روش حل معادلات

معادلات کلی حرکت برای یک سیستم ناپویسته با  $(10+2Nj+5Ns)$  درجه آزادی به صورت:

$$[M]\{\ddot{v}\} + [C]\{\dot{v}\} + [K]\{v\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

نوشته می شود که در آن  $\{F(t)\}$  نیروهای خارجی وارده بر سیستم،  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  به ترتیب ماتریسهای جرم، میرایی، سختی،  $Nj$  تعداد گره های ریل و  $Ns$  تعداد تکیه گاه های ریل است. در مرجع [۵] کلیه ماتریسهای فوق با جزئیات بیشتر تشریح شده اند.

به منظور حل معادله دیفرانسیل مرتبه دوم (۴) با تعداد درجات آزادی بیشتر و داشتن رابطه غیرخطی در تماس چرخ - ریل، روش انتگرال گیری زمانی مستقیم برای به دست آوردن نتایج عددی در حوزه زمانی استفاده شده است. تاریخچه زمانی تغییر مکان، سرعت های ارتعاش، شتابهای کل سیستم و نیروهای دینامیکی بین چرخها و ریل قابل محاسبه است [۶].

### ۴. نتایج عددی

مدل خط با ۵۴ تراورس و دو المان نیمه بی نهایت مرزی در هر دو انتها انتخاب شده است. قبلاً در مرجع [۵] کافی بودن ۵۰ تراورس برای حذف شرایط مرزی نتیجه گیری شده بود. در این مدل تراورس میانی به صورت آویزان از ریل منظور شده است.

در بررسی اندرکنش دینامیکی خط آهن - قطار، نیروها از طریق تماس چرخ - ریل از وسیله نقلیه به خط آهن منتقل می شوند. برای منظور کردن اثر تماس بین چرخ و ریل، رابطه بین نیرو و تغییر مکان آنها، از فنر تماسی هرتز که یک فنر غیر خطی است، استفاده شده است. رابطه بین نیروی  $F$  و تغییر مکان  $y$  در سطح تماس به شرح زیر بیان می شود که در آن  $C_H$  سختی فنر هرتز بر حسب  $(N \cdot m^{3/2})$  است.

$$F = C_H y^{3/2} \quad (1)$$

اندازه سختی خطی شده با استفاده از ارتباط بین افزایش تغییر مکان و نیرو به دست می آید. به این ترتیب  $k_H$  سختی خطی شده فنر هرتز به شرح زیر محاسبه می شود.

$$k_H = C_H [y_w - y_r - y_0]^{0.5} \quad (2)$$

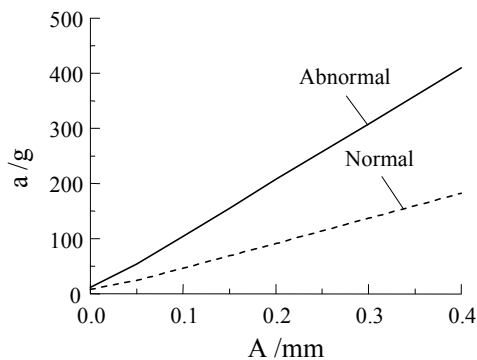
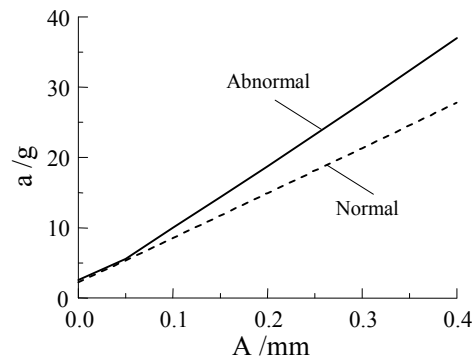
ارتباط بین نیروهای اندرکنش  $F_H$  و تغییر طول فنر هرتز به وسیله رابطه (۳) تعیین می شود.

$$F_H = k_H [y_w - y_r - y_0] \quad (3)$$

که در آن  $y_w$  تغییر مکان قائم چرخ،  $y_r$  تغییر مکان قائم ریل تحت اثر  $F_H$ ،  $y_0$  اثر ناهمواری سطح ریل،  $k_H$  سختی خطی شده فنر هرتز و  $F_H$  جزء دینامیکی نیروی چرخ - ریل است.

همچنین این مدل خط برای مطالعه اثرات تکیه گاه های نامناسب در طول مشخصی مورد استفاده قرار می گیرد که برای بررسی اثرات هرگونه تغییرات در تکیه گاه خط آهن قابل استفاده است.

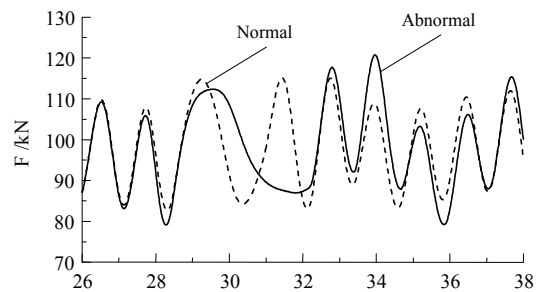
اثرات ناهمواری‌های سطحی روی ریل در واکنش‌های اجزاء خط نظیر تغییر مکان‌های ریل و شتاب ریل مورد بررسی قرار گرفته است. همان گونه که در بخش ۳ بیان شد، ناهمواری‌های سطحی اندازه‌گیری شده در راه آهن ایران در ناحیه شمال شرق و لرستان [۷] مشهود بوده، ولی به جهت این که در ناحیه لرستان محدودیت سرعت وجود دارد، مشخصات ناهمواری اندازه‌گیری شده در ناحیه شمال شرق با طول موج  $240\text{ mm}$  و دامنه  $0/4\text{ mm} - 0/0$  برای سرعت  $160\text{ km/h}$  انتخاب شده است. شکل (۴) و (۵) تغییرات شتاب‌ها و تغییر مکانهای بیشینه اجزاء خط (تراورس و ریل) تحت اثر ناهمواریهای سطحی فوق نشان داده شده است. در این شکل‌ها  $a$  و  $A$  و  $I$  به ترتیب نشان‌دهنده شتاب، دامنه ناهمواری‌های سطحی و درصد افزایش تغییر مکان هستند.



شکل ۴. شتاب ارتعاشی ریل و تراورس

منحنی‌های فوق، افزایش قابل توجه در ارتعاشات ریل را در هنگام عبور قطار از روی تراورس آویزان با وجود ناهمواریهای موجی شکل نشان می‌دهند. برای پارامترهای انتخاب شده شتاب ریل حدوداً  $2/51$  برابر شتاب ریل در خط با تکیه‌گاه پیوسته است. اثر

به این ترتیب در مدل مورد نظر بالاست زیر تراورس حذف شده و اثرات آن در رفتار دینامیکی اجزای خط بررسی شده است. به دلیل سادگی محاسبات، ناهمواری‌های سطحی روی ریل به صورت سینوسی با دامنه تغییرات  $0/4\text{ mm}$  و طول موج  $240\text{ mm}$  که در ناحیه شمال شرق راه آهن ج.ا.ا. اندازه‌گیری شده و سرعت قطار  $160\text{ km/h}$  انتخاب شده است. نقطه شروع حرکت قطار از گره چهارم منظور شده و پس از عبور از محدوده مورد نظر، نیروهای تماسی چرخ-ریل، تغییر مکانها، سرعتهای ارتعاش و شتابهای اجرای خط محاسبه شده‌اند. منحنی تغییرات نیروهای تماسی چرخ-ریل در حالت عادی و حالت تراورس آویزان در شکل (۳) نشان داده شده است. بار استاتیکی چرخ برابر  $98\text{ kN}$  است. در منحنی‌های ترسیم شده، خط آهن با تکیه‌گاه کامل خط عادی و خط آهن دارای یک تراورس آویزان خط ویژه نام‌گذاری شده‌اند.



شکل ۳. نیروهای تماسی چرخ - ریل در خط عادی و ویژه

این منحنی‌ها نشان می‌دهند که پاسخ سیستم متناوب بوده و طول موج غالب آن برابر فاصله بین تراورس‌هاست. اندازه نیروی تماسی بیشینه، بستگی به سرعت قطار و فاصله تراورس‌ها دارد برای مدل انتخابی بیشینه نیروی تماسی چرخ ریل در روی تراورس‌ها اتفاق افتاده و نوسان نیروها در فرکانس فاصله تراورس‌ها (بدون در نظر گرفتن ناهمواریهای سطحی ریل) به صورت واکنش پایدار با بیشینه مقدار  $112\%$  بار استاتیکی خواهد بود که اگر اثر یکی از تراورس‌های آویزان به آن اعمال شود، این مقدار به  $125/5\%$  خواهد رسید (برای قطار با سرعت  $160\text{ km/h}$ ). همچنین از منحنی‌های نوسانات نیروها، آشفتنگی در موقعیت تراورس آویزان به راحتی قابل رؤیت است. این در حالی است که در محاسبات و طراحی خطوط از چنین وضعیتی چشم‌پوشی می‌شود.

پابندهای مجاور و زوال بیشتر بالاست خواهد داشت. به این ترتیب هزینه‌های تعمیر و نگهداری خط به شدت افزایش پیدا خواهد کرد. برای پیشگیری از به وجود آمدن چنین وضعیتی لازم است ناهمواری‌های سطحی و بستر زوال یافته (بالاستی که خاصیت ارتجاعی خود را از دست داده) از خطوط اصلی حذف شده و روشهایی برای پیشگیری از ایجاد آنها تعریف شود.

### ۵. نتیجه‌گیری

روش تحلیلی اندرکنش خط - قطار برای بررسی واکنش‌های قائم خط آهن و اجزای آن در شرایطی که تراورس آویزان یا تراورس با تکیه‌گاه نامناسب (بالاستی که خاصیت ارتجاعی خود را از دست داده بکار می‌رود) ارائه شد. واکنش پایدار و واکنشهای دینامیکی اجزای خط (شامل ریل و تراورس) در محدوده تراورس آویزان محاسبه شد و نتایج محاسبات نشان داد که نیروهای تماس چرخ و ریل به سرعت با افزایش دامنه ناهمواریها افزایش پیدا کرد. شتاب ارتعاش نیز در خط آهن با تراورس آویزان ۲/۵۱ برابر خط عادی به دست آمد. همچنین این حالت باعث تشدید شتاب ارتعاشی در تراورس‌های مجاور تراورس آویزان شد که نشان دهنده آسیب دیدن تراورس‌های مجاور و تسریع در زوال تراورس‌های خط آهن و پابندهای آنهاست. با در نظر گرفتن ناهمواریهای موجی شکل اندازه گیری شده در راه آهن ناحیه شمال شرق، با دامنه ۰/۴ میلی‌متر و طول موج ۲۴۰ میلی‌متر، افزایشی در حدود ۲۵/۵٪ در نیروی تماسی (برای قطارهای با سرعت ۱۶۰ km/h) و ۷۴٪ در تغییر مکان قائم ریل به وجود آورد که این نیز باعث توسعه ناهمواری‌های سطحی ریل و تحریک بیشتر سیستم خط آهن - قطار خواهد شد.

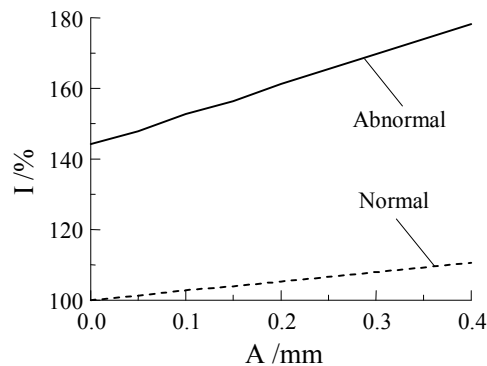
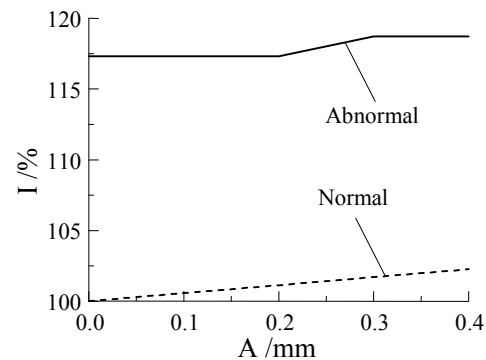
### ۶. مراجع

1. Grassie, S L. and Cox, S J. (1985) "The dynamic response of railway track with unsupported sleepers", Proceedings of Institution of Mechanical Engineers (Part D), 1985, 199(2), pp. 123-135.
2. Lundqvist, A. and Dahlberg, T. (2005) "Load impact on railway track due to unsupported sleepers", Proceedings of Institution of Mechanical Engineers (Part F), Journal of Rail & Rapid Transit, Number F2, 2005, pp. 67-77 (11).

این افزایش در شل شدن پابندها ظاهر می‌شود که خود زوال اجزای دیگر خط را تسریع می‌کند.

شتاب تراورس نیز به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این افزایش باعث آسیب دیدگی تراورس شده و عبور وسیله نقلیه بعدی باعث بدتر شدن این شرایط خواهد شد.

در عمل و در خط واقعی تراورس‌های مجاور، تراورس آویزان رو به زوال گذاشته و در مدت کوتاهی آسیب دید به این ترتیب زوال خط توسعه یافته و در مدت کوتاهی کیفیت هندسی خط رو به کاهش خواهد گذاشت.



شکل ۵. درصد افزایش تغییر مکان در ریل و تراورس

تغییر مکان ریل در خط ویژه ۷۴٪ بیشتر از خط عادی خواهد بود و برای تراورس مورد نظر این مقدار ۱۹٪ خواهد شد. به این ترتیب وابستگی نیروی تماسی چرخ - ریل و شتاب به دامنه ناهمواریهای سطحی در غیاب بالاست (تکیه‌گاه مناسب برای تراورس) تشریح شد. این نتایج توسط گائولیانگ [۳] نیز تأیید شده است.

همچنین وجود تراورس آویزان در خط با ناهمواریهای سطحی، اثر نامطلوبی در توسعه دامنه ناهمواریها و به دنبال آن آسیب دیدن

6. Xia, H., Zhang, M. and Wei, N. (1995) "Study of vibration effects of underground trains on surrounding environments", Proceedings of Advances in Structural Engineering, Beijing, pp. 116-122.
7. ذاکری، جبار علی. (۱۳۸۳) «شناسایی ناهمواریهای سطحی روی ریل در شبکه راه آهن ایران» گزارش فنی، اداره کل خط و ابنیه فنی، راه آهن جمهوری اسلامی ایران.
3. Liang, G. and Hua, P.(2001) "The dynamic effects of the modes of replacing sleepers on track structure in high-speed railway", International Symposium on Traffic Induced Vibrations & Controls, TIVC , pp. 259-265.
4. Zakeri, J. A., Xia. H. and Fan, J. J. (2000) "Effects of unsupported sleeper on dynamic responses of railway track", Journal of Northern Jiaotong University, 24 (1), pp. 50-55.
5. Zakeri, J. A. (2000) "Computer simulation for dynamics of railway track structures", Ph.D. Thesis, Northern Jiatong University.