

# بررسی نقش مشخصات سیستم حائل ریل در تحلیل روسازی راه آهن

جواد میرمحمد صادقی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه آهن

محمد وریا خورده‌بینان، دستیار تحقیقاتی، دانشگاه علم و صنعت ایران

E-mail: Javad\_Sdaeghi@iust.ac.ir

## چکیده

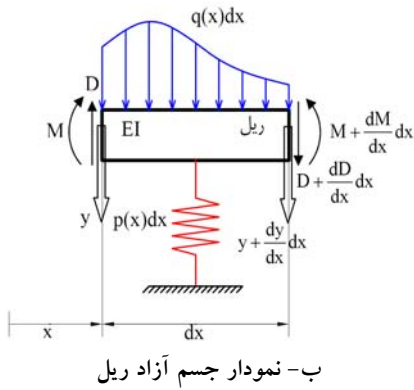
سیستم حائل ریل متأثر از شرایط تعمیر و نگهداری در بازه زمانی طول عمر خط بوده و می‌تواند در طول زمان بر اثر ضعف در سیستم تعمیر و نگهداری از رفتار خطی خارج شده و در اثر تکرار بارگذاری رفتار متفاوتی را از خود نشان دهد. این واقعیت نیاز به اهمیت توالی عملیات تعمیر (بخصوص پایدارسازی) خط را در راه آهن نشان می‌دهد. در این تحقیق، ابتدا روشهای رایج در تحلیل روسازی راه آهن بررسی شده و سپس تحلیل روسازی با فرض رفتار مکانیکی سیستم حائل ریل و با لحاظ کردن شیوه نگهداشت خط بحث گردیده است. نتایج حاصل شده در این تحقیق مبین افزایش مقادیر تنش خمشی و خیز ریل (دو معیار اصلی در طراحی ریل) در اثر رفتار غیر خطی سیستم حائل ریل می‌باشند. دو راهکار جهت جلوگیری از شکست ریل و کاهش ریسک در ایمنی سفر در این پژوهش ارائه شده است: (۱) افزایش ضرایب اطمینان در طراحی رایج ریل و (۲) حفظ شرایط سیستم حائل ریل در حوزه رفتار خطی در طول عمر روسازی راه آهن.

واژه‌های کلیدی: راه آهن، ریل، تعمیر و نگهداری، مدول خط

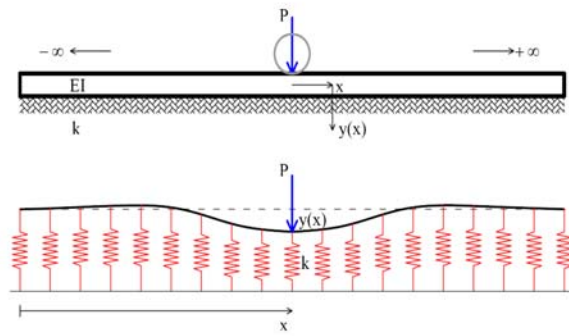
## ۱. مقدمه

علی‌رغم توانمندی‌های بسیار ایجاد شده در تحلیل راه آهن، روش‌های جاری آنالیز روسازی راه آهن بر اساس رفتار خطی سیستم حائل ریل استوار است [۳ و ۴]، این در حالی است که در طول زمان به علت بارگذاری دینامیکی و زیرکوبی‌های متوالی میزان تخلخل و نشست پلاستیک در سیستم حائل ریل افزایش یافته که در صورتیکه عملیات اصلاح ساختار مکانیکی سیستم حائل ریل (بطور مشخص زیرکوبی و پایدارسازی) صورت نپذیرد سیستم حائل از رفتار خطی دور می‌گردد [۵]. بدین ترتیب انجام عملیات مرتب تعمیر و نگهداری در خط از ضروریات و فرضیات اولیه تحلیل ریل می‌باشد. برای نشان دادن اهمیت این ضرورت و فرض در تحلیل ریل بر اساس رفتار خطی و رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل منتج شده از شرایط تعمیر و نگهداری ضعیف بررسی شده است. برای این منظور راه آهن به صورت تیر بر روی بستر گسسته خطی و غیرخطی در این تحقیق مدل گردیده است. با استفاده از تئوری

ریل اصلی‌ترین جزء روسازی راه آهن می‌باشد که در تماس مستقیم با چرخ وسایل نقلیه ریلی قرار داشته و تحت بارهای متعددی در جهات قائم، طولی و جانبی می‌باشد [۱]. اساس طراحی راه آهن بر مبنای پایداری ریل در زیر بارهای اعمالی از وسایل نقلیه استوار است. نتایج بیانگر آن است که یکی از عوامل اساسی خروج از خط‌ها حاصل از ضعف یا عدم پایداری مکانیکی در سیستم حائل ریل است. در طول عمر خط، روسازی راه آهن دچار زوال شده و در اثر ایجاد خلل و فرج و همچنین نشست‌های پلاستیک در لایه‌های بالاست، زیر بالاست و نیز ساب‌گرید، از حالت خطی خارج گشته و رفتار غیر خطی بخود می‌گیرد. تحقیقات انجام شده مویده آن است که عدم در نظر گرفتن شرایط خط در طول عمر آن باعث تفاوت بسیار بین نتایج تجربی و نتایج تئوری گردیده است [۲]. از اینرو حفظ شرایط خط در حوزه رفتار خطی از طریق انجام مرتب عملیات تعمیر و نگهداری صحیح لازم می‌نماید.



ب- نمودار جسم آزاد ریل



الف- مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته

شکل ۱. مدل تیر وینکلر [۹]

## ۱-۲ خطوط با سیستم حائل پیوسته

مدل تئوریکی تیر بر روی بستر ارتجاعی پیوسته نخستین بار توسط وینکلر در سال ۱۸۶۷ ارائه گردید [۷] و سپس در سال ۱۸۸۷ توسط زیمرمن توسعه یافت [۸]. همان گونه که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، مبنای بررسی رفتار ارتجاعی و محاسبه تغییر مکان قائم بر این فرض اساسی استوار است که میزان تغییر شکل در هر نقطه از ریل متناسب با میزان فشار زیر ریل در همان نقطه است. با این فرض می‌توان معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییر مکان چنین تیری را به دست آورد.

در صورتی که مطابق با شکل (۱-ب) المان کوچکی به طول  $dx$  از ریل در نظر گرفته و معادلات تعادل نیروها در راستای قائم و همچنین تعادل لنگرها برای این المان کوچک نوشته شود، معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییر مکان ریل به دست می‌آید:

$$qdx + \frac{dD}{dx}dx = p(x)dx \quad (1)$$

$$D = -EI \frac{d^3y}{dx^3} \quad \text{از آنجا که:}$$

بنابراین:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} + p(x) = q(x) \quad (2)$$

در روابط فوق،  $y(x)$  تغییر مکان قائم در نقطه  $x$ ،  $q(x)$  بار گسترده قائم،  $EI$  صلبیت خمشی ریل،  $p(x)$  نیروی گسترده تماسی پیوسته بین تراورس و بالاست،  $M$  لنگر خمشی داخلی المان و  $D$  نیروی برشی داخلی المان می‌باشد. براساس فرض وینکلر تغییر شکل زیر ریل متناسب با فشار اعمالی به ریل است [۹] به عبارتی دیگر:

$$p(x) = k.y(x) \quad (3)$$

روش اجزا محدود (FEM) و به کمک نرم افزار SAP2000 ابتدا مدل‌های خطی پیوسته و گسسته بررسی شده است و سپس نتایج حاصل از تحلیل ریل با لحاظ کردن رفتار خطی و غیرخطی سیستم حائل تحت بارهای مختلف با هم مقایسه شده و مورد استفاده قرار گرفته است. تأثیر عملیات تعمیر و نگهداری بر رفتار مکانیکی سیستم حائل ریل و مقادیر تغییر شکل‌ها و لنگرهای ایجاد شده در ریل بررسی گردیده و از این مسیر اهمیت و شیوه در نظر گرفتن معیارهای تعمیر و نگهداری صحیح و متوالی خطوط راه‌آهن معلوم می‌گردد.

## ۲. بررسی تأثیر پیوستگی سیستم حائل در

### تحلیل ریل

شاید بتوان نخستین گام را در زمینه تحلیل سیستم حائل ریل انتخاب مدل مناسبی دانست که قادر باشد با دقت مناسب شرایط تکیه‌گاهی و مرزی را شبیه‌سازی کند. از میان تمامی مدل‌های تحلیل ریل، دو مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی و تیر بر روی بستر گسسته خطی جهت تحلیل استاتیکی و دینامیکی ریل بطور رایج بکار می‌روند. یکی از بحث‌های اساسی در تحلیل ریل میزان دقت در فرض سیستم حائل پیوسته در زیر ریل است. برای نشان دادن میزان تأثیر این فرض در نتایج تحلیل ریل، سیستم روسازی با فرض سیستم حائل پیوسته و گسسته برای ریل مقایسه و از این رهگذر میزان دقت فرض پیوستگی سیستم حائل ریل نشان داده می‌شود. برای بررسی رفتار سیستم حائل ریل ابتدا مدل‌های تحلیل ریل بررسی شده و سپس دو روش تحلیل بر روی یک نمونه خط، برای انواع سختی تکیه‌گاهی مقایسه می‌گردد.

گاهی اوقات تغییرات شرایط تکیه گاهی ریل به قدری است که در فاصله بین دو تراورس متوالی مقادیر متفاوتی برای پارامترهایی همچون نیروی عکس العمل، سختی خط و مدول بستر ریل حاصل می شود. مدل تیر بر روی تکیه گاه های مجزا را می توان به لحاظ این که قادر به شبیه سازی شرایط مذکور می باشد، یکی از منطقی ترین و پرکاربردترین مدل های تحلیل ریل به حساب آورد.

مطابق با شکل (۳) از نظر ریاضی، مدل تیر بر روی تکیه گاه های مجزا به گونه ای است که در محل هر یک از تراورس ها یک تکیه گاه ارتجاعی (فنر) قرار داده می شود، سختی هر یک از فنرها معادل با سختی خط در زیر تراورس متناظر با آن فنر می باشد. در صورتی که سرعت عبوری وسایل نقلیه ریلی کم باشد، از فنرهای خطی در مدل استفاده می گردد و در مدل سازی خطوط آهن سریع السیر از فنرهای ارتجاعی لزج استفاده می شود تا بتوان اثرات میرایی خط آهن را لحاظ نمود [۱۰].

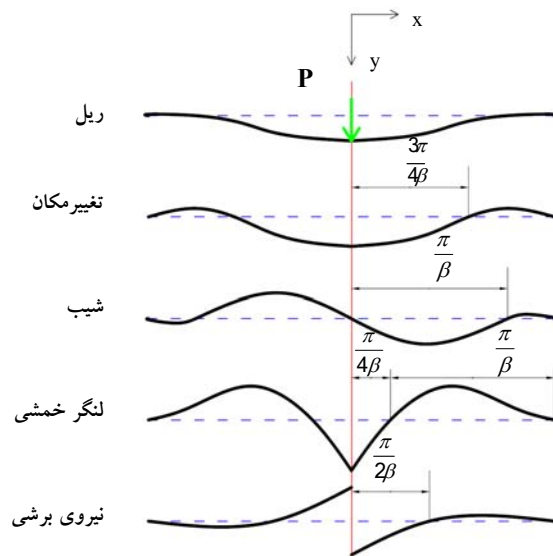
که در آن  $k$  مدول خط سیستم حائل ریل می باشد. با استفاده از معادله (۳)، حل معادله دیفرانسیل تغییر شکل ریل با اعمال شرایط سرحدی و فرض تیر بر روی بستر ارتجاعی به صورت ذیل در خواهد آمد:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad \text{و} \quad y(x) = \frac{P\beta e^{-\beta x}}{2k} (\cos \beta x + \sin \beta x) \quad (۴)$$

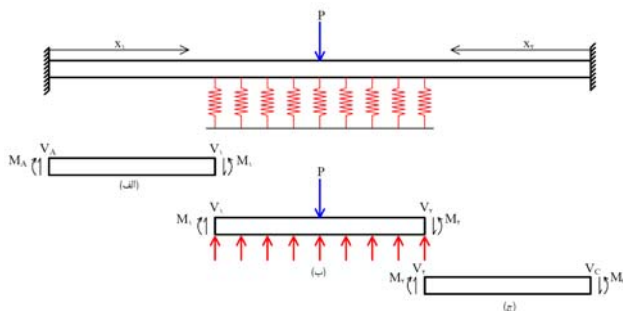
با اعمال مشتق اول، دوم و سوم از معادله فوق، معادلات شیب، لنگر خمشی و نیروی برشی در ریل قابل محاسبه خواهد بود. منحنی تغییرات توابع فوق بر حسب  $x$  در شکل (۲) نشان داده شده است.

## ۲-۲ خطوط با سیستم حائل گسسته

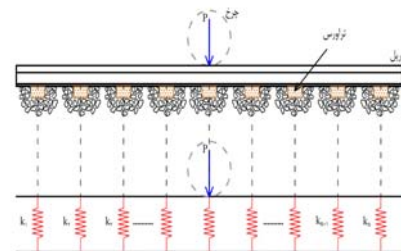
شرایط واقعی تکیه گاه ریل در خطوط آهن به عوامل مختلفی بستگی دارد. این امر سبب می گردد که نتوان وضعیت یکسانی را در مورد تکیه گاه های ریل در طول یک خط آهن متصور شد.



شکل ۲. منحنی تغییرات توابع جابجایی، شیب، لنگر خمشی و نیروی برشی ریل



شکل ۴. مدل تحلیلی و نمودار جسم آزاد تیر بر روی تکیه گاه های مجزا

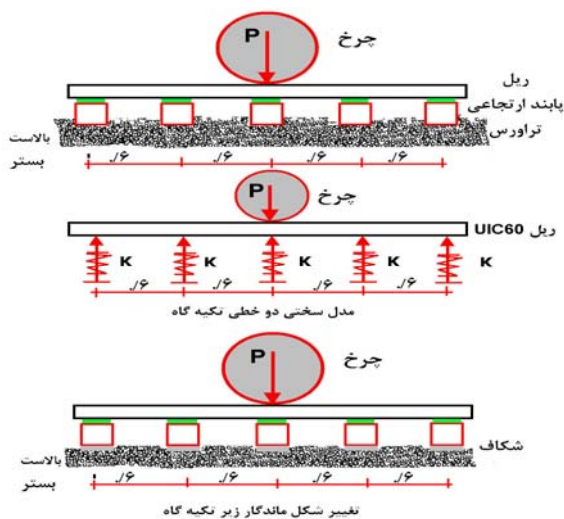


شکل ۳. مدل تیر بر روی تکیه گاه های مجزا

مدلهای خطی پیوسته و گسسته مورد تحلیل قرار گرفته و سپس نتایج حاصل از تحلیل سیستم حائل با هم مقایسه شده است. در تحلیل اجزا محدود، سازه بعنوان یک ترکیب از اجزای ناپیوسته که توسط یک رشته نقاط به هم متصلند در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از تئوری تغییر شکل مجازی، تغییرشکل ریل به دست می‌آید. در این تحقیق، برای نمایش ریل از مدل اجزا محدود با ۶۰ المان تیری که توسط فنرها نگاهداشته شده‌اند استفاده شده است. برای بررسی اثر شرایط مختلف خط، چهار نوع سطح سختی فنر شامل سختی خیلی ضعیف، حالت سختی ضعیف، سختی متوسط و سختی زیاد در تحلیل مدل در نظر گرفته شده است. در مدلسازی از نوع ریل رایج در ایران (UIC<sub>۶۰</sub>) که سختی خمشی آن  $EI = 6/415 \times 10^3 \text{ kNm}^2$  می‌باشد استفاده گردید. فاصله تراورس‌ها نیز برابر ۰/۶ متر فرض شده است. سختی فنر تکیه‌گاه‌های غیرپیوسته باید به ترتیب شامل سختی پابندها، تراورس‌ها، بستر و درزه‌های بین این اعضا باشد. تکیه‌گاه‌های فنی به ریل در محل تراورسها فرض شده‌اند (شکل ۵). مشخصه‌های ایده‌آل فنر خطی  $k$ ، برای تکیه‌گاه‌های غیرپیوسته ریل از طریق ثابت فنری پابندهای الاستیک  $k_f$  و ثابت فنری بستر  $k_s$  بدست می‌آیند.

$$k = \frac{k_f \cdot k_s}{k_f + k_s} \quad (6)$$

بر اساس آزمایشات انجام شده [۱۴]، بر روی پدهای موجود از نوع Vossloh ثابت فنر  $k_f$  برابر  $4 \times 10^8 \text{ Nm}^{-1}$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۵. مدل اجزای محدود ریل روی تکیه‌گاه‌ها

در سال ۲۰۰۳، بورسی و شمیت [۱۱] با استفاده از اصول انرژی پتانسیل و قضایای کاستیگلیانو، مدل تیر بر روی تکیه‌گاه‌های مجزا را تحلیل کردند. مراحل تحلیل عبارت از انتخاب مدل ریاضی مناسب، محاسبه نیروهای عکس‌العمل و پس از آن به دست آوردن تغییر مکان هر یک از فنرهای تکیه‌گاهی است. بدین ترتیب مقادیر تغییر مکان ریل نیز در محل تک تک تراورس‌ها حاصل می‌گردد. جهت ساده‌سازی تحلیل، در مدل انتخابی تنها تعداد محدودی از تراورس‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین فرض می‌گردد که دو انتهای ریل در فاصله بسیار دوری از تراورس‌های انتهایی به تکیه‌گاه‌های گیردار متصل است. چنین مدلی مدت زمان انجام عملیات تحلیل را کاهش می‌دهد. به منظور این که عملیات تحلیل امکان‌پذیر باشد، فرض می‌گردد که رفتار فنرها خطی و تغییر مکان‌ها کوچک است. تعداد معادلات مورد نیاز جهت تعیین نیروی هر یک از فنرها برابر با تعداد آن‌ها است. شکل (۴) مدلی را که به منظور تحلیل تیر بر روی تکیه‌گاه‌های مجزا به کار می‌رود، نشان می‌دهد. به طور کلی بین مدل تیر بر روی تکیه‌گاه‌های مجزا و مدل تیر بر روی تکیه‌گاه‌های پیوسته شباهت زیادی وجود دارد. زیرا چنانچه فاصله بین تراورس‌ها برابر، سختی تمامی آن‌ها به یک اندازه و طول ریل بسیار زیاد باشد، می‌توان این دو مدل را یکسان تلقی نمود.

اگر معادلات تعادل نیرو و لنگر در مورد قسمت‌های (الف) و (ج) از شکل (۴) نوشته شود، مقادیر نیروی برشی و لنگر خمشی در تیرهای یک سرگیردار در طرفین مدل تحلیلی به دست خواهد آمد. بدین ترتیب می‌توان نوشت:

$$M_1 = M_A + V_A \cdot x_1 \quad , \quad V_1 = V_A \quad (5)$$

$$M_2 = M_C + V_C \cdot x_2 \quad , \quad V_2 = V_C$$

حل معادلات تعادل فوق منتج به تحلیل ماتریسی می‌گردد که خمش و برش ریل را در مقاطع مختلف بدست می‌دهد.

۳-۲ تأثیر فرض گسستگی سیستم حائل در نتایج تحلیل برای بررسی تأثیر فرض گسستگی سیستم حائل، راه‌آهن به صورت تیر بر روی بستر گسسته در این تحقیق مدل گردیده است. با استفاده از تئوری روش اجزا محدود (FEM) ابتدا

همانگونه که در شکل (۶) نشان داده شده است، مقایسه نتایج تحلیل خطی تحت بار متمرکز  $p = 1 \text{ kN}$  برای دو روش تحلیل نمایانگر آن است که در حالیکه میزان خیز ریل در روش تکیه‌گاه گسسته بیشتر از مقدار خیز در تکیه‌گاه پیوسته است، لیکن میزان لنگر خمشی در حالت تکیه‌گاه پیوسته مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بطور متوسط مقدار خیز در تحلیل ریل با فرض تکیه‌گاه گسسته  $1/6\%$  بیشتر از ریل با فرض تکیه‌گاه پیوسته است. از طرف دیگر میزان لنگر خمشی با فرض تکیه‌گاه پیوسته بطور متوسط  $7/75\%$  بیشتر از ریل با فرض تکیه‌گاه گسسته است. نتایج حاصله مویده آن است این اختلاف برای لنگر خمشی ریل با افزایش سختی خط بیشتر می‌گردد ولیکن برای خیز ریل کاهش می‌یابد. نتایج مویده آن است که اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج حاصل از روش تحلیل ریل با سیستم حائل گسسته و تحلیل ریل با سیستم پیوسته (مدل وینکلر) وجود ندارد. به عبارت دیگر مدل DSM و مدل WM نتایج نسبتاً یکسانی را بدست می‌دهند.

شکل (۷) نمودار تغییرات لنگر خمشی و خیز ریل را در طول ریل بر اساس تحلیل ریل با فرض تکیه‌گاه گسسته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که مقدار شیب منحنی خیز ریل در مقابل سختی بستر در بسترهای با سختی ضعیف‌تر به مراتب بیشتر از مقدار شیب فوق در بستر با سختی زیاد می‌باشد (بیش از دو برابر)، همچنین میزان درصد تغییرات لنگر خمشی ریل در مقابل سختی بستر با افزایش سطح سختی کمتر می‌شود.

## ۲. بررسی تأثیر رفتار غیرخطی سیستم حائل در نتایج تحلیل ریل

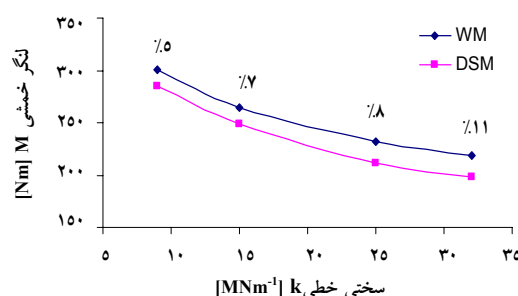
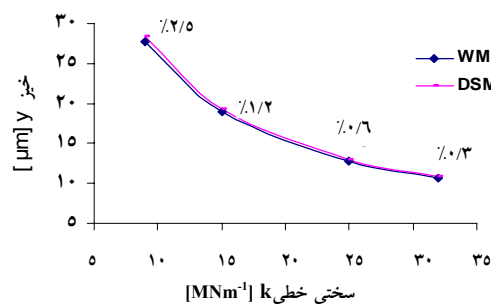
همانگونه که در ابتدا بحث گردید، علی‌رغم توانمندی‌های بسیار ایجاد شده در تحلیل راه آهن، روش‌های جاری آنالیز روسازی راه آهن بر اساس رفتار خطی سیستم حائل ریل استوار است [۳ و ۴]، این در حالی است که در طول زمان بعلت بارگذاری دینامیکی و زیرکوبی‌های متوالی میزان تخلخل و نشست پلاستیک در سیستم حائل ریل افزایش یافته که در صورتیکه عملیات اصلاح ساختار مکانیکی سیستم حائل ریل (بطور مشخص زیرکوبی و پایدارسازی) صورت نپذیرد سیستم حائل از رفتار خطی دور می‌گردد [۸]. بدین ترتیب انجام عملیات مرتب تعمیر و نگهداری در خط از ضروریات و

بنابراین با منظور کردن سختی خطی لایه‌های زیر تراورس در دامنه تغییرات ممکنه [۱۲] چهار سختی برای  $k$  سیستم حائل ریل تعریف گردید که در جدول (۱) ارائه شده است. مقدار مدول خط در معادله وینکلر با فرض فاصله  $600$  میلیمتر بین تراورس‌ها در سطر آخر جدول زیر آمده است.

جدول ۱. مشخصه‌های سختی تکیه‌گاه‌های ریل

سطح سختی	۱	۲	۳	۴
نوع بستر	خیلی ضعیف	ضعیف	متوسط	زیاد
ثابت فنر $[\text{MNm}^{-1}]$	۸/۵	۱۴/۵	۲۴	۳۲/۵
مدول خط در معادله وینکلر $[\text{Mpa}]$	۱۵	۲۵	۴۱/۷	۵۳/۳

برای بررسی اهمیت در نظر گرفتن اهمیت تکیه‌گاه گسسته در زیر ریل، مدل تیر بر روی بستر پیوسته و تکیه‌گاه گسسته ارتجاعی بعنوان مدل‌های رایج ریل، تحت بار متمرکز  $p = 1 \text{ kN}$  مورد تحلیل قرار گرفت. اختلاف خیز حداکثر محاسبه شده ریل  $y(x)$  و لنگرهای خمشی  $M(x)$ ، برای مدل تکیه‌گاهی پیوسته وینکلر (WM) و برای مدل تکیه‌گاه‌های ریل غیرپیوسته (DSM) در محل اعمال بار محاسبه شد. نتایج حاصله برای چهار سطح مشخصه سختی مندرج در جدول (۱) در دیاگرام‌های شکل (۶) ارائه شده است.

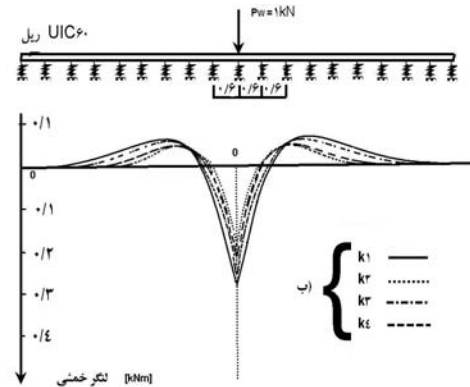
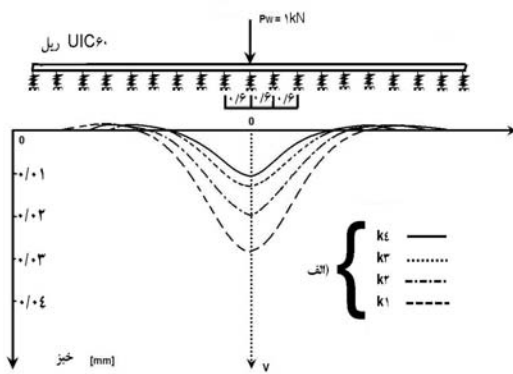


شکل ۶. مطالعه پارامتریک برای چهار سطح مشخصه - تحلیل خطی (درصد رشد)

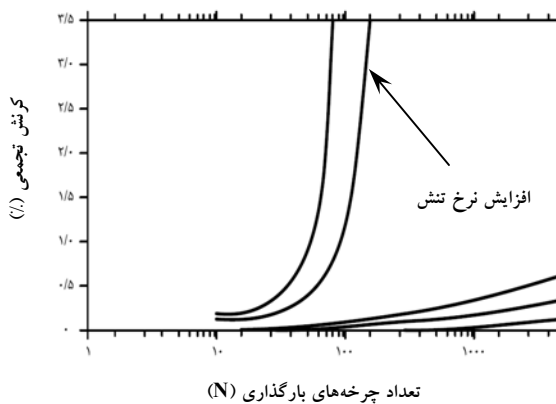
که تعداد بارگذاری و به همراه عدم نگهداشت صحیح خط باعث ایجاد کرنش تجمعی می‌گردد. این پدیده لزوم زیرکوبی و پایدارسازی منظم را جهت جلوگیری از ضعف خط نمایان می‌کند. همان‌طور که اشاره شد، یکی از موارد پراهمیت در مطالعات سیستم حائل ریل، تأثیر چگالی و رفتار مکانیکی لایه‌های بالاست و بستر در اثر تکرار بارگذاری زیاد و عدم نگهداری صحیح و مرتب خط می‌باشد. نمونه‌ای از نتایج به دست آمده بر روی مصالح بالاست از جنس سنگ آهک، در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. همچنین شکل (۱۰) نمونه‌ای از نتایج آزمایش سه محوری دینامیکی و تأثیر آن را بر روی کرنش ایجاد شده در مصالح بالاست نشان می‌دهد. تفاوت این آزمایش با آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است، در تکرار مراحل آزمایش به ازای انتخاب مقادیر متفاوتی برای تنش انحرافی است.

فرضیات اولیه تحلیل ریل می‌باشد. برای نشان دادن اهمیت این ضرورت و فرض در تحلیل ریل بر اساس رفتار خطی و رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل منتج شده از شرایط تعمیر و نگهداری ضعیف بررسی شده است. در این بخش سعی گردیده است تأثیر منظور نمودن رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل (حاصل از ضعف در نگهداری خط) در تغییر شکل‌ها و لنگرهای ایجاد شده در ریل بررسی گردد. برای این منظور با استفاده از تئوری روش اجزا محدود (FEM) تحلیل ریل با لحاظ کردن رفتار غیرخطی سیستم حائل بحث گردیده است. در پایان نتایج حاصل از تحلیل ریل بر اساس رفتار خطی و غیرخطی سیستم حائل مقایسه شده است.

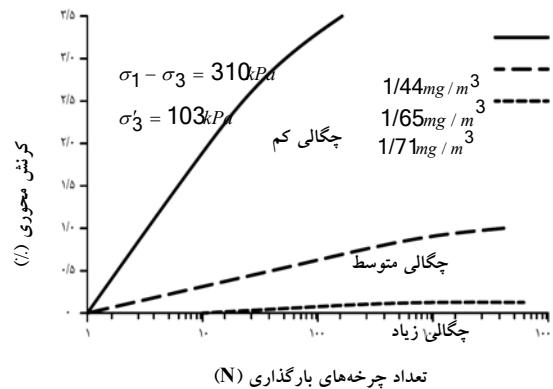
تحقیقات زیادی بر روی رفتار دینامیکی مصالح بالاست انجام شده که از آن جمله می‌توان به تحقیقات مؤلف در این زمینه اشاره کرد. نتایج آزمایش بر روی مصالح بالاست نشان می‌دهد



شکل ۷. تحلیل پاسخ خطی برای تکیه‌گاه‌های با سختی ثابت هر چهار سطح سختی فرض شده



شکل ۹. تأثیر مقدار تنش بر تغییر شکل دائم مصالح بالاست [۱۴]



شکل ۱۰. تأثیر چگالی مصالح بالاست بر مقدار کرنش پلاستیک تجمعی

بالاست معمولاً با پارامتر تخلخل بیان می‌گردد. (۴) کرنش دایمی مصالح بالاست با تنش انحرافی اعمال شده متناسب است. در دهه‌های اخیر تلاش‌های بسیاری صورت گرفته است تا رابطه‌ای بین کرنش پلاستیک و پارامترهای مؤثر در آن به دست آید. تحقیقات گسترده آزمایشگاهی بر روی مصالح بالاست منجر به پیشنهاد رابطه زیر برای محاسبه کرنش پلاستیک در لایه بالاست شده است. رابطه فوق برای انواع مختلف خاک‌های بستر و بالاست کاربرد دارد.

(۷)

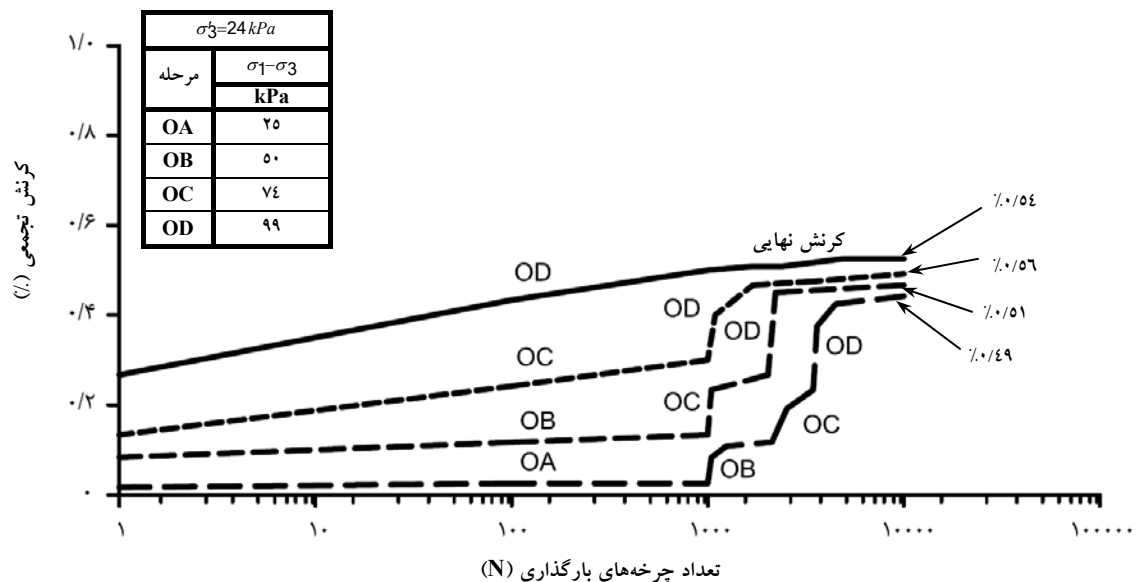
$$\varepsilon_p = k_1 \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} \right)^{k_2} [A \times (\log N)^2 + 0.18(\log N) + 1]$$

که در آن، A پارامتر ثابتی است که با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A = k_3 \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3} - 1 \right) \quad (۸)$$

در دو رابطه فوق،  $k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  ضرایب ثابتی است که به مشخصات مصالح بستگی داشته دارد.

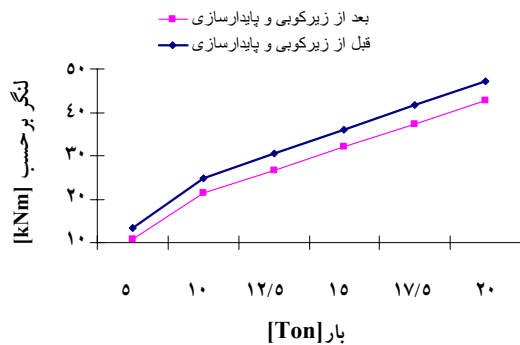
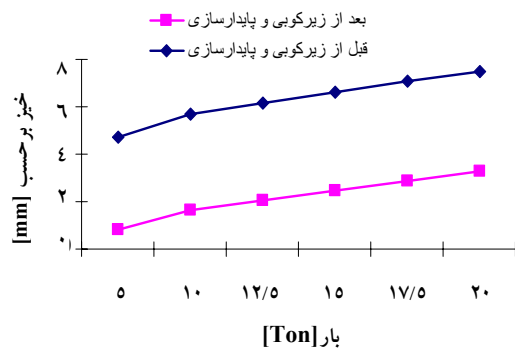
نتایج به دست آمده از آزمایش سه محوری دینامیکی با مقادیر مختلف تنش انحرافی نشان می‌دهد که (۱) زمانی که مقدار تنش انحرافی به اندازه‌ای بزرگ شود که از مقادیر این تنش در مراحل قبلی آزمایش تجاوز نماید، مقدار کرنش‌های دایمی ایجاد شده در مصالح نیز افزایش می‌یابد. (۲) زمانی که مقدار تنش انحرافی به اندازه‌ای کوچک‌تر از مقادیر این تنش در مراحل قبلی آزمایش کاهش یابد، با اعمال چرخه‌های بارگذاری اضافی، تغییرات بسیار کوچکی در مقدار کرنش مشاهده خواهد شد. (۳) در صورت اعمال باربرداری ناقص، کرنش‌های ناشی از اعمال چرخه‌های اضافی بارگذاری، افزایش بسیار کمی خواهد داشت. (۴) در صورتی که مقدار فشار محصور کننده ثابت نگهداشته شود و تعداد چرخه‌های بارگذاری یکسان باشد، ترتیب اعمال تنش‌ها بر روی مقدار کرنش نهایی تأثیری نخواهد داشت. نتایجی که با توجه شکل (۱۰) دریافت می‌شود، (۱) نرخ افزایش کرنش‌های دایمی مصالح بالاست (نسبت کرنش به چرخه بارگذاری) با افزایش تعداد چرخه‌های بارگذاری، به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. (۲) نخستین چرخه بارگذاری، منجر به پیدایش کرنش دایمی قابل توجهی در مصالح بالاست می‌گردد. (۳) کرنش دایمی به شدت به تراکم اولیه مصالح بالاست وابسته است. تراکم اولیه مصالح



شکل ۱۰. کرنش تجمعی ناشی از آزمایش سه محوری دینامیکی به ازای مقادیر متفاوت تنش انحرافی [۱۴]

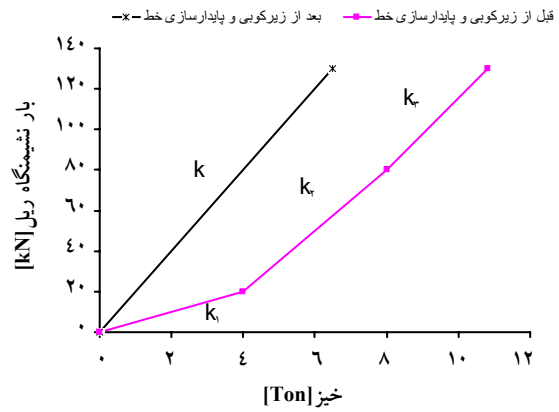
تکیه‌گاه‌های غیرخطی ناپیوسته و تحت بار عمودی چرخ  $P$  محاسبه گردید. تحلیل پاسخ ریل با تعیین جابجایی‌های قائم  $y(x)$  و لنگرهای خمشی  $M(x)$  مورد توجه است. تحلیل غیرخطی در این مطالعه برای دو حالت فوق (قبل از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی و بعد از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی) انجام گرفت.

تغییر شکل  $y(x)$  و لنگرهای خمشی  $M(x)$ ، زیر بارهای مختلف برای دو حالت مختلف، حالت اول قبل از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی و حالت دوم بعد از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی خط مطابق با جدول (۳) بدست آمده است. نتایج حاصل از تحلیل ریل برای یافتن خیز و لنگر خمشی بطور مقایسه‌ای در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل ۱۲. اثر افزایش بار روی رفتار ریل

نتایج آزمایش‌های میدانی برای دو حالت، شرایط مطلوب خط (بلافاصله بعد از پایدارسازی خط) و شرایط خط بعد از بارگذاری طولانی نشان می‌دهد [۱۶، ۱۴] رفتار خط در حالت اول به صورت خطی و در حالت دوم یک رفتار خطی سه گانه (سه سویه) می‌باشد [شکل (۱۱)].



شکل ۱۱. مشخصات فنر سه خطی معادل

بدین ترتیب مطابق شکل (۱۱)، رابطه غیرخطی بین بار چرخ ( $P$ ) و جابجایی قائم ریل ( $y$ )، بوسیله منحنی‌های خطی تکه‌ای تقریب زده می‌شود. به عبارت دیگر یک تقریب سه گانه از تغییر رفتار منحنی بار-خیز در این مقاله مدنظر گرفته شده است، مشخصه‌های سختی سه خطه در هر سطح با سه مقدار  $k_1$ ،  $k_2$  و  $k_3$  نشان داده می‌شود (شکل (۱۱)). همانگونه که در قسمتهای قبل اشاره شد در این تحقیق سعی می‌گردد تأثیر منظور نمودن رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل در تغییر شکل‌ها و لنگرهای ایجاد شده در مقایسه با تحلیل خطی ریل بررسی شود تا از این مسیر اهمیت عملیات تعمیر و نگهداری در شرایط سیستم حائل ریل در خیز و لنگر خمشی ریل بعنوان دو معیار اصلی در طراحی ریل [۳، ۱۳] مشخص گردد. برای این منظور، پاسخ شبه‌دینامیکی ریل بر اساس

جدول ۳. مشخصه‌های سختی تکیه‌گاه‌ها در تحلیل

وضعیت‌های غیرخطی سیستم حائل ریل			حالت (۲) بعد از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی	سطح مشخصه
حالت (۱) قبل از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی		k		
$k_3$	$k_2$		$k_1$	
$1/7 \times 10^7$	$1/5 \times 10^7$	$0/5 \times 10^7$	$2 \times 10^7$	ثابت فنر [ $Nm^{-1}$ ]
۲۸/۳	۲۵	۸/۳	۳۳/۳	مدول خط در معادله وینکلر [Mpa]



به معیارهای نگهداری روسازی راه‌آهن و انجام بارگذاری متوالی زیاد خط موجب ایجاد لنگر خمشی قابل توجه و متعاقب آن تنش خمشی بسیار زیاد در ریل گردیده که می‌تواند منجر به شکست در پاشنه ریل گردد.

### ۳. نتیجه‌گیری

عملیات تعمیر و نگهداری خط باعث حفظ شرایط استاندارد رفتار مکانیکی خط می‌شود. زیر کوبی و پایدارسازی صحیح و متوالی شرایط رفتار طراحی سیستم حائل ریل را در طول عمر خط ثابت نگه می‌دارد. تحلیل و طراحی ریل در روسازی راه‌آهن در روشهای رایج طراحی براساس فرض رفتار خطی سیستم حائل ریل استوار است. این در حالی است، که نتایج تجربی به روشنی رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل را در زیر عبور چرخهای واگن‌ها در صورت عدم تعمیر و نگهداری مرتب خط نشان می‌دهد. پدیده غیرخطی بودن رفتار مکانیکی سیستم حائل ریل که اساسا منتج از بارگذاری متوالی زیاد و همچنین زیرکوبی‌های متواتر می‌باشد، می‌تواند تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در بالا بردن ریسک خطر در عبور ناوگان ریلی داشته باشد. در این تحقیق ابتدا درستی فرض پیوسته بودن سیستم حائل ریل در روشهای رایج تحلیل و طراحی ریل مطالعه شده و سپس اهمیت حفظ شرایط خط در حوزه رفتار خطی با انجام مرتب عملیات پایدارسازی سیستم حائل ریل بررسی گردیده است. نتایج حاصله از تحلیل روسازی با دو روش مدل‌سازی ریل با تکیه‌گاه‌های پیوسته و گسسته نشان می‌دهد که در حالی که میزان خیز ریل با لحاظ کردن تکیه‌گاه گسسته بیشتر از مقدار خیز ریل با تکیه‌گاه پیوسته است، میزان لنگر خمشی در حالت تکیه‌گاه پیوسته مقادیر بیشتری را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر بطور متوسط مقدار خیز در تحلیل ریل با فرض تکیه‌گاه گسسته ۱/۶٪ بیشتر از ریل با فرض تکیه‌گاه پیوسته است. از طرف دیگر میزان لنگر خمشی با فرض تکیه‌گاه پیوسته بطور متوسط ۷/۷۵٪ بیشتر از ریل با فرض تکیه‌گاه گسسته است. نتایج حاصله موبد آن است این اختلاف (برای خیز و لنگر خمشی ریل) با افزایش سختی خط بیشتر می‌گردد. نتایج حاصله مؤید آن است که نتایج حاصل از تحلیل خط با فرض سیستم حائل پیوسته و سیستم حائل گسسته دارای اختلاف قابل ملاحظه‌ای نمی‌باشد. شرایط ضعف

در تحلیل غیر خطی برای بار چرخ متفاوت در مقایسه با حالت قبل و بعد از عملیات تعمیر و نگهداری با عبور پایدارساز میزان رشد قابل ملاحظه‌ای در خیز حداکثر ریل در زیر بار (Y)، لنگرهای خمشی (M) مشاهده می‌گردد. درصد افزایش میزان خیز و لنگر خمشی ریل در اثر منظور نمودن رفتار غیرخطی ریل برای هر یک از دو حالت فوق در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴: درصد تفاوت نتایج تحلیل غیرخطی و خطی در عملیات تعمیر و نگهداری خط راه‌آهن

میزان بار (Ton)	میزان درصد تفاوت خیز و لنگر بعد از زیرکوبی و پایدارسازی خط	
	M	Y
۵	۲۵/۲	۴۸۲/۹
۱۰	۱۶/۲	۲۴۷/۴
۱۲/۵	۱۳/۸	۱۹۹/۹
۱۵	۱۲/۳	۱۶۹/۱
۱۷	۱۱/۵۷	۱۴۷/۳
۲۰	۱۰/۷	۱۲۷/۵

مقایسه نتایج حاصله نشان می‌دهد که میزان خیز بدست آمده برای رفتار سیستم حائل ریل در شرایط قبل از زیرکوبی و پایدارسازی به مراتب بیشتر از حالتی است که خط رفتار خطی از خود نشان می‌دهد بطوریکه برای میزان بار ۵ تن ۴۸۳٪ افزایش خیز نسبت به حالت رفتار بعد از عملیات زیرکوبی و پایدارسازی سیستم حائل ریل را نشان می‌دهد. در مورد لنگر خمشی ریل که دومین معیار اصلی در طراحی ریل منظور می‌گردد متأثر از شرایط خط است بطوریکه بعنوان مثال برای بارگذاری ۵ تن، ۲۵٪ افزایش در لنگر خمشی در مقایسه با نتایج حاصل از تحلیل خطی حاصل شده است. این موضوع نماینگر آن است که وجود تغییر شکل ماندگار در سیستم حائل ریل که حاصل از بارگذاری متوالی زیاد یا زیرکوبی متواتر بدون عبور پایدارساز می‌باشد، حالت بحرانی تری را در تحلیل و طراحی ریل حاصل می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که مهمترین معیار بهره‌برداری ریل (خیز) وابستگی شدیدی به شیب منحنی نیرو-تغییر شکل سیستم حائل زیر ریل دارد. مطابق نتایج بدست آمده رفتار غیرخطی با کاهش شیب منحنی نیرو در مقابل تغییر شکل سیستم حائل ریل می‌تواند تأثیر بسزایی در تغییر شکل یا نشست خط داشته باشد، از سوی دیگر عدم توجه

dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 316, pp. 211–233, April.

3- Manual for Railway Track Engineering, Vol.1, Chapter 1, part 2, (2006) "Roadway and Ballast-ballast", American Railway Engineering and maintenance of way Association.

4- UIC CODE, 719 R (1994) "Earthworks and trackbed construction for railway lines", International Union of Railways, 2nd Edition.

5- Sadeghi, J., Asgarinejad, H. (2008) "Development of Improved Railway Track Degradation Models", *International Journal of Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 3, Issue 4.

6- Esveld C. (2001) "Modern railway track". 2nd ed. The Netherlands: MRT Publication.

7- Winkler, E. (1867) "Die Lehre von der Elastisitat und Festigkeit (Elasticity and Strength)", in German, Verlag von H. Dominicus, Prague.

8- Zimmerman, H. (1887) "Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues (The Analysis of the Railroad Tracks)", in German, Verlag W., Ernst and Sohn, Barlin (Republished in 1930 as 2<sup>nd</sup> edition and in 1941 as 3<sup>rd</sup> edition).

9- Sadeghi, J., (2008), "Fundamentals of analysis and design of railway ballasted track," IUST publication Service, Tehran, Iran.

10- Kaewunruen, S., Remennikov, A.M. (2007) "Field trials for dynamic characteristics of railway track and its components using impact excitation technique", *NDT & E International*, Vol.40, pp 510-519.

11- Boresi, Arthur P., Schmidt, Richard J. (2003) "Advanced Mechanics of Materials", 6th Edition. John Wiley & Sons, New York, NY: Chap. 5, 10.

12- Sadeghi, J. (2000) "Modelling of Dynamic Behaviour of Ballast and Subgrade Materials Using Semi-empirical Methods," Second international conference on mechanics of structures, Materials and system, MSMS2000, Australia.

13- Sadeghi, J. & Yoldashkhan, M. (2005) "Investigation on the accuracy of current practices in analysis of railway track sleepers", *International Journal of Civil Engineering*, IUST, Vol. 3, No. 1.

14- Sadeghi, J. (2008) "Experimental Investigation on the accuracy of current practices in analysis and design of railway track sleepers", *Canadian Journal of Civil Engineering*. Vol. 35.

15- Sadeghi, J. (2008) "Fundamentals of analysis and design of railway ballasted track," IUST publication Service, Tehran, Iran.

16- Zekeri, J. Sadeghi, J. (2007) "Field Investigation on Load Distribution under Railway Track Sleepers", *Journal of Mechanical and Science and Technology*, Vol. 21, pp 1948-1956.

سیستم حائل ریل باعث تغییر شکل‌های ماندگار در سیستم و همچنین رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل می‌گردد. در حالتی که مقایسه نتایج حاصل از تحلیل ریل به دو روش خطی و غیرخطی (خطی سه گانه، الاستوپلاستیک) نشان می‌دهد که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی حاصل از عدم پایدارسازی مناسب خط نشانگر افزایش ۴۸۳ درصدی در میزان خیز ریل (که مهمترین معیار بهره برداری است) و حدود ۲۵ درصد افزایش لنگر خمش را در ریل برای بار عبوری پنج تن ایجاد می‌کند که با توجه به اهمیت خمش در ریل، بعنوان مهمترین معیار طراحی ریل، می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در شکست ریل داشته باشد. نتایج حاصله بیانگر آن است که تأثیر رفتار غیرخطی ریل می‌تواند به مراتب بیشتر از آن چیزی باشد که در ضرایب اطمینان طراحی ریل منظور شده و بیش از پیش‌بینی روشهای جاری موجب افزایش تنش‌ها در ریل میگردد.

نتایج حاصل در این تحقیق با توجه به اهمیت رفتار غیرخطی سیستم حائل ریل در افزایش مقادیر تنش خمشی و خیز ریل که دو معیار اصلی در طراحی ریل می‌باشند، دو راهکار جهت جلوگیری از شکست خط و کاهش ریسک در ایمنی سفر را در پیش روی ما می‌گذارد: (۱) افزایش ضرایب اطمینان در طراحی ریل و (۲) حفظ شرایط سیستم حائل ریل در حوزه رفتار خطی در طول عمر روسازی راه‌آهن. از میان این دو راهکار، حفظ شرایط خط راهکار اقتصادی تری بنظر می‌رسد. برای حفظ این شرط، نگهداشت بالاست و زیر بالاست در شرایط مطلوب از طریق زیرکوبی و عبور پایدارساز در دوره‌های مشخص بارگذاری و همچنین سرنند و اصلاح ساختار فیزیکی و مکانیکی مصالح بالاست در بازه‌های زمانی مشخص نگهداری ضروری است. عدم توجه به معیارهای فوق می‌تواند خط راه‌آهن را از رفتار خطی خارج ساخته و در نتیجه موجب افزایش میزان تنش خمشی و خیز ریل به مقدار بیش از آن چه در مراحل طراحی روسازی فرض شده است گردد بطوریکه متعاقباً موجب پدیده شکست در ریل و خروج از خط شود.

## ۴. مراجع

1- Selig E. T., Waters J. M., (1994), "Track geotechnology and substructure management", Chapter 2, University of Massachusetts, USA

2- Al Shaer, A., Duhamel, D., Saba, K., Foret, K., Schmitt, L. ( 2008) "Experimental settlement and