

# پدیده‌های موثر در سایش چرخ و ریل

نام محور مقاله: اثرات متقابل ناوگان و زیربنا

یعقوب محمدی<sup>۱</sup>

نادر شکوهی<sup>۲</sup>

## چکیده

راه آهن یکی از مهمترین وسایل حمل و نقل در تمامی جهان به شمار رفته و حجم بسیار زیادی از مسافر و کالاها توسط این سیستم حمل و نقل در جهان جابجا می شود. علاوه بر آن مزایای بدون تردید این سیستم حمل و نقل هر روزه بر محبوبیت و توسعه آن می افزاید. حجم ترافیک ناهمگون خطوط ریلی مختلف که در بیشتر آنها ترن های باری و مسافری با وزن های متفاوت، چینش و سیستم محرکه های گوناگون در حال حرکت می باشد باعث خرابی زیر ساخت های راه آهن و از جمله خطوط ریلی گردیده و این موضوع هزینه های بسیار زیادی را متوجه راه آهن ها می کند.

در این مقاله روابط بین چرخ و ریل و پارامترهای موثر در تماس آن از یک سو و سایش و خستگی از سوی دیگر در شبیه سازی ها و بررسی های انجام پذیرفته تا کنون معرفی می گردند. در این راستا مکانیزم های سایش، اثرات متقابل چرخ و ریل و مفهوم خرابی در دیدگاه های مختلف بررسی شده است.

## کلمات کلیدی

چرخ، ریل، سایش، خستگی تماس غلطشی

## ۱- مقدمه

مکانیزم های خرابی نظیر ترک های سطحی، تغییر شکل پلاستیک و سایش می تواند به نحو قابل ملاحظه ای طول عمر خط و ناوگان را کاهش داده و بر روی پارامترهای دیگری نظیر راحتی سفر، پایداری، ایمنی و افزایش سطح صوت تاثیر گذار می باشند. بعلاوه شناخت و درک صحیح از این مکانیزم ها نیازمند کسب دانش در خصوص پدیده تماس چرخ و ریل می باشد. هدف از این گزارش ارائه دید کلی مهندسی از پدیده خرابی چرخ و ریل و همچنین معرفی مدل های پیش بینی خرابی خطوط ریلی مختلف با کاربردهای مختلف می باشد.

برای درک پدیده خرابی خط شناخت ارتباط بین مشخصات ترن ها و برهمکنش نیروها در مقاطع مختلف خطوط ریلی ضروری می باشد. با وجود اینکه فاکتورهای دیگری نیز نظیر مرور زمان، شرایط محیطی و ... بر روی خطوط ریلی تاثیر گذار می باشند اما بی شک مهمترین عامل در این میان میزان ترافیک و بار محوری ترن ها می باشد.

خرابی ریل بستگی به شرایطی نظیر بار محوری، طراحی بوژی، سرعت و جرم تعلیق نشده در ترن دارد. همچنین عوامل دیگری نظیر ساختار خط، میزان شعاع قوس ها، شرایط محیطی و سیاست های تعمیراتی خط نیز موثر می باشد.

---

۱ ریس تحقیق و توسعه محصولات جدید - شرکت توسعه صنایع ریلی ایرانیان (ایریکو) - آدرس: تهران، فلکه دوم صادقیه، خیابان آیت ا... کاشانی، پلاک ۹۱ - تلفن: ۰۲۱-۴۴۰۳۳۶۷۷ پست الکترونیکی: mohammadi.y@iri.co.ir

۲ مدیر تحقیق و توسعه و مهندسی تولید - شرکت توسعه صنایع ریلی ایرانیان (ایریکو) - آدرس: تهران، فلکه دوم صادقیه، خیابان آیت ا... کاشانی، پلاک ۹۱ - تلفن: ۰۲۱-۴۴۰۳۳۶۷۷ پست الکترونیکی: shokouhi@iri.co.ir

در اینجا باید به این موضوع اشاره نمود که مبنای هزینه دسترسی اپراتورهای ریلی به خطوط راه‌آهن در کشورهای مختلف متفاوت بوده و در بیشتر کشورها صرفنظر از نوع و کیفیت ترن محاسبه می‌گردد و فقط تابع تن بار حمل شده از خطوط ریلی می‌باشد.

این موضوع با توجه به وسعت و اهمیت حمل و نقل ریلی در جهان اهمیت بسزایی داشته و دانشمندان زیادی تحقیقات فراوانی را بر روی پدیده خرابی خطوط ریلی و شناسایی این پدیده از دیدگاه مهندسی انجام داده و مدل‌های زیاد و متنوعی را برای پیش بینی خرابی خطوط ریلی پیشنهاد نموده‌اند.

بیشتر این تحقیقات فقط بر روی یک و یا چند مکانیزم خرابی تمرکز دارند. به عنوان نمونه برخی از این مدل‌ها نظیر *Power law models, Hoshino and Satoh's model, Sugiyama' model* و یا *TU Munchen model* بر روی نشست بستر تمرکز داشته، مدل‌هایی نظیر *Archard's wear model, The ITDM wear model, Fries and Davila* و *rail surface damage model* بر روی سایش و خستگی تماسی تمرکز داشته و مدل‌هایی نظیر *Damage Exponent Heavy Axle Load Analysis* و *ORE model, DeCo track* است که تمامی گروه‌های خرابی را مد نظر قرار می‌دهند. این تنوع ناشی از پیچیدگی مساله خرابی خطوط ریلی می‌باشد.

عموماً دو متد برای بررسی تماس چرخ و ریل مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش اول روش تحلیلی هرتز و روش دوم روش ساده شده عددی بر اساس المان مرزی. این متدها به فرض رفتار خطی مواد استوار بوده و برای رفع این محدودیت‌ها ابزارهای شبیه‌سازی تماس چرخ ریل بر اساس روش المان محدود توسعه یافته و ماژول‌هایی برای شبیه‌سازی تماس چرخ و ریل و حتی سایش در نرم‌افزارهای تجاری قدرتمندی چون *SIMPAK* قرار گرفته است.

## ۲- انواع سایش و مکانیزم‌های آن

سایش چرخ و ریل بر اساس کیفیت تنش‌های ناشی از اندرکنش آن‌ها، کیفیت سطوح تماس، نوع و کیفیت روانکار، مقاومت آلیاژ چرخ و ریل در برابر تغییر شکل پلاستیک و نحوه بهره‌برداری می‌تواند به صورت ترکیبی از مکانیزم‌های مختلف سایش ظاهر شود.

مودهای مختلف سایش شامل سایش خراشان، چسبان، ورقه‌ای، تریبوشیمی، نوسانی، خستگی سطحی و خوردگی می‌باشند که در ادامه توضیحاتی در خصوص این موارد ارائه خواهد گردید.

اصولاً خرابی خطوط ریلی را می‌توان به چهار بخش عمده تقسیم بندی نمود که شامل خرابی ژئومتریک خطوط ریلی بر اثر نشست، سایش ریل، خستگی اجزاء خطوط ریلی و خستگی تماس غلطش ریل می‌باشد.

بر اساس مطالعات صورت پذیرفته بیش از ۲۱ مدل برای پیش بینی میزان خرابی خطوط ریلی استخراج گردیده است که می‌توان این مدل‌ها را به سه بخش عمده تقسیم‌بندی کرد. در میان این مدل‌ها تعداد معدودی تلاش نموده‌اند پارامترهای گسترده‌تری را در مدل خود درگیر نمایند. در نتیجه ارائه این مدل‌ها توانایی تخمین خرابی برای انواع مختلف ترن و انواع مختلف خرابی مانند خرابی ژئومتریک خطوط ریلی بر اثر نشست، سایش ریل، خستگی اجزاء خطوط ریلی و خستگی تماس غلطشی ایجاد گردیده است. با این حال در بیشتر مدل‌ها پخش فشار در ناحیه تماس نیز عموماً با تکیه بر تئوری هرتز محاسبه می‌گردد. علاوه بر این اغلب مدل‌های از بارهای دینامیک فرکانس بالا و ضریب سایش به عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌کنند که نیروهای دینامیک وارد بر خط بر اساس آیین نامه *UIC 518* استخراج گردیده و به همراه اطلاعات تکمیلی به عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌شوند.

با ورود اطلاعات و در نظر گرفتن فرض‌هایی برای حجم ترافیک و هزینه‌های خرابی خطوط، می‌توان خرابی خط برای ترن‌های گوناگون را پیش‌بینی نمود.

علاوه بر این، مجموعه بسیار گسترده‌ای از شبیه‌سازی توسط نرم افزارهای المان محدود صورت پذیرفته است که نتایج بسیار مفیدی را در خصوص نیروهای شبه تعادلی جانبی، نیروهای جلوبرنده و تلفات انرژی اصطکاکی که ضریب سایش یا شاخص

سایش نامیده می‌شود، برای خودروهای ریلی متفاوت با فاصله‌های محوری گوناگون، ضریب اصطکاک بین چرخ و ریل مختلف و *Stiffness in wheelset guidance* و بوژی‌های با تعداد محور مختلف ارائه نموده است، که این اطلاعات می‌تواند نمونه‌هایی از اطلاعات ورودی برای بدست آوردن ضریب سایش و تلفات انرژی اصطکاکی مدل‌ها باشد.

### ۳- پدیده خرابی خطوط ریلی

خرابی خطوط ریلی اصولاً بر اثر ترافیک و بار محوری بالا ایجاد شده و این پدیده را می‌توان به مکانیزم‌های مختلفی نظیر موارد زیر تقسیم نمود:

-خرابی کیفیت ژئومتریک خط بر اثر نشست عمودی و جابجایی عرض

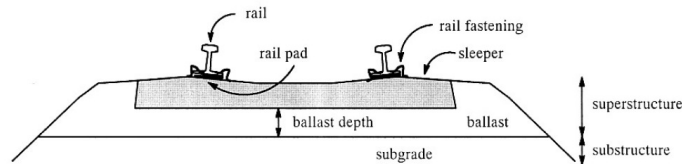
-خستگی اجزای خط، سایش و خستگی تماس غلطی

خطوط ریلی در معرض نیروهای بسیار بزرگی از جانب ترن‌های عبوری بوده که طبیعتاً این موضوع موجب جابجایی عمودی و عرضی بستر شده که این موضوع خود باعث بوجود آمدن نقاط ناپیوستگی در خطوط می‌گردد. با این حال در صورتیکه کل بستر در تمام نقاط به یک اندازه نشست داشته باشد احتمال بدتر شدن کیفیت خط کاهش خواهد یافت. نیروهای حاصل از حرکت ترن‌ها علاوه بر سایش و خستگی ریل باعث تسریع در امر نشست ریل نیز خواهد شد. علاوه بر این جابجایی عرضی خط نیز بر اثر نیروهای عرضی منته‌جه از ترن و تنش‌های داخلی ریل بوجود می‌آید.

### ۴- اثر متقابل چرخ و ریل و مفهوم خرابی خط

#### خط و تجهیزات خط

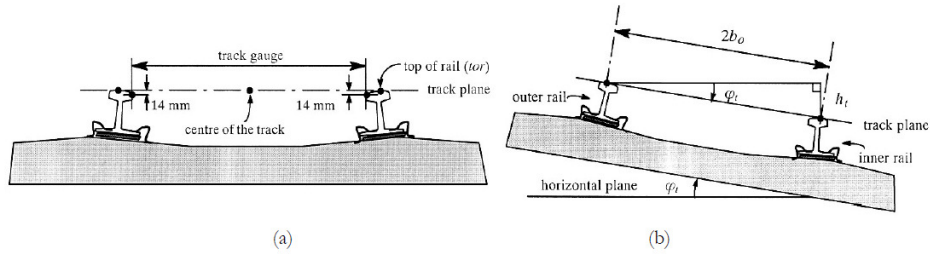
خطوط ریلی را می‌توان به دو بخش عمده روساخت یا *Superstructure* و زیرساخت یا *Substructure* تقسیم بندی کرد. هدف از ساخت خطوط ریلی پخش بارهای حاصل از ترافیک ریلی و هدایت ترن‌ها می‌باشد. تصویر شماره ۱ طرح کلی از یک خط ریلی بالاست دار را نشان می‌دهد که در آن اجزای خط مشخص گردیده‌اند.



تصویر شماره ۱ - طرح کلی از یک خط ریلی بالاست دار متداول.

روساخت خط شامل بالاست، اسلیپر، ریل و ریل پد و اتصالات می‌باشد و زیر ساخت شامل بستر، پل .

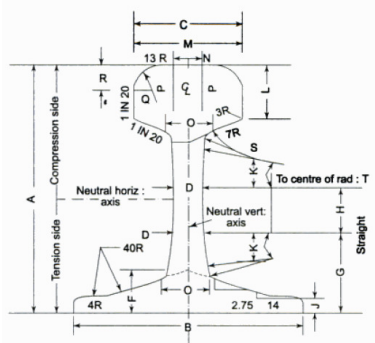
گیج خط فاصله بین داخل به داخل ریل‌ها در فاصله ۱۴ میلیمتر پایین‌تر از سطح ریل و دور یا *Cant* یا *Superelevation* از مهمترین خصوصیات ریل می‌باشند که به صورت شماتیک در تصویر شماره ۲ نشان داده شده است. دور، زاویه  $\theta$  که در قوس‌ها بین بین دو ریل به منظور کاهش شتاب عرضی ایجاد می‌گردد. همچنین دور  $h_e$  و فاصله بین نقاط تماس چرخ و ریل  $2b_0$  در این تصویر نشان داده شده است که از مشخصات مهم خط می‌باشد.



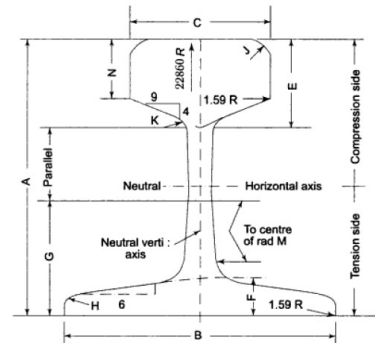
تصویر شماره ۲ - مشخصات مهم خطوط ریلی [2]

### مفهوم خرابی ریل

ریل‌های راه‌آهن از تیرهای  $T$  شکل که در یک فرآیند نورد شکل می‌گیرند تشکیل می‌شوند. با توجه به قدمت راه‌آهن در جهان تعداد پروفیل‌های طراحی و ساخته شده نیز بسیار فراوان بوده و این پروفیل‌ها در خلال سالها توسعه و بهبود یافته‌اند. امروزه پروفیل و مشخصات متالورژیکی ریل‌ها استانداردسازی شده و در اختیار راه‌آهن‌ها می‌باشند. تصاویر شماره ۳ و ۴ پروفیل دو نوع ریل پرکاربرد را نشان می‌دهند که مشخصات هندسی آنها در تصاویر مشخص گردیده است.



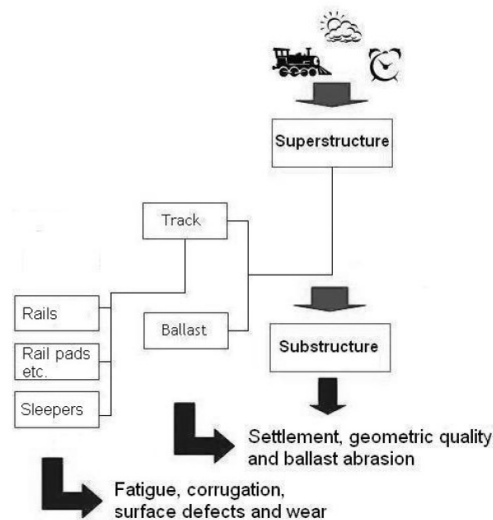
تصویر شماره ۴ - پروفیل ریل UIC 60



تصویر شماره ۳ - پروفیل ریل F.F استاندارد انگلستان

برخی از مفاهیم مربوط به خرابی ریل به لحاظ پیچیدگی به راحتی قابل توضیح نبوده و تفسیر بعضی پدیده‌ها نیز بسیار پیچیده می‌باشد. به عنوان مثال موضوع خرابی خط یک مفهوم کلی بوده و می‌تواند شامل محدوده بسیار وسیعی از انواع خرابی با علل مختلف و پیچیده باشد، به عنوان نمونه عیوب سطحی ریل، خستگی ریل و یا محل اتصال ریل و یا حتی خستگی اجزاء. عیوب سطحی ناشی از خستگی معمولاً ناشی از خستگی تماس غلطی یا *Rolling contact fatigue (RCF)* می‌باشد. این عیوب می‌توانند انحراف ژئومتریکی خط باشد که به آن *Geometrical Defects* می‌گویند. با این حال تمرکز این مقاله بر روی سایش چرخ و ریل بوده و سایش عموماً به برداشت نامطلوب مواد از سطح دو قطعه درگیر تحت حرکت نسبی اطلاق می‌گردد. این پدیده در قطعات صنعتی بعنوان معطلی جدی به شمار رفته به نحوی که در طراحی اینگونه قطعات هزینه بالایی برای تعویض قطعات ساییده شده پیش‌بینی می‌گردد. سایش در قطعات وسایل نقلیه ریلی نیز از این امر مستثنی نبوده و سایش ریل و چرخ علاوه بر بحث هزینه موارد دیگری نظیر راحتی سفر، پایداری، ایمنی و سر و صدا را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

چنانچه پیشتر گفته شد عوامل بسیار زیادی نظیر ترافیک عبوری (تناژ، سرعت، بار محوری و سایر مشخصات ترن)، شرایط محیطی (دما، رطوبت و ...) و زمان در خرابی ریل موثر می‌باشد. تمامی این پارامترها کل زیر ساخت و رو ساخت را تحت تاثیر قرار می‌دهد. تصویر شماره ۵ رابطه بین ساختار خط و پارامترهای خارجی در فرآیند خرابی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



تصویر شماره ۵ - تاثیر پارامترهای مختلف خرابی بر روی ساختار خطوط ریلی

## ۵- نیروهای بین چرخ و ریل

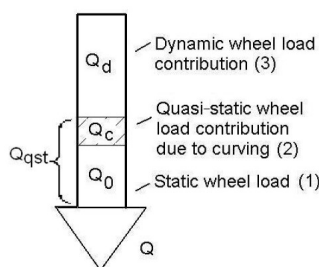
افزایش بار محوری و سرعت حرکت وسایل نقلیه ریلی باعث بروز مشکلات زیادی از نظر سایش، خستگی و اندرکنش دینامیکی چرخ و ریل می‌گردد و نیروهای اعمال شده از ترن به خط مهمترین عامل خرابی خطوط ریلی به شمار می‌رود که در راحتی سفر و ایمنی تاثیر گذار می‌باشد.

در این رابطه شناسایی پارامترهای موثر و میزان تاثیر آنها بر پایه شناخت صحیح از مکانیزم تماس چرخ و ریل استوار بوده و به طور قابل توجهی به نیروهای اندرکنش چرخ و ریل وابسته می‌باشد. بطور کلی پدیده‌های مکانیکی ناشی از اندرکنش چرخ و ریل شامل مواردی نظیر سایش، تغییر شکل پلاستیک، خستگی تماس غلطشی می‌باشد.

اولین قدم در بررسی هر یک از این پدیده‌ها شناخت دقیق از تئوری‌های مکانیک تماس و آشنایی با نیروهای ناشی از اندرکنش چرخ و ریل می‌باشد. در اثر تماس چرخ با ریل ترکیبی از خزش و لغزش در سطح تماس اتفاق می‌افتد. نیروهای حاصل از این اندرکنش را می‌توان به چهار گروه نیروهای طولی، نیروهای جانبی، نیروهای قائم و نیروهای خزشی تقسیم نمود.

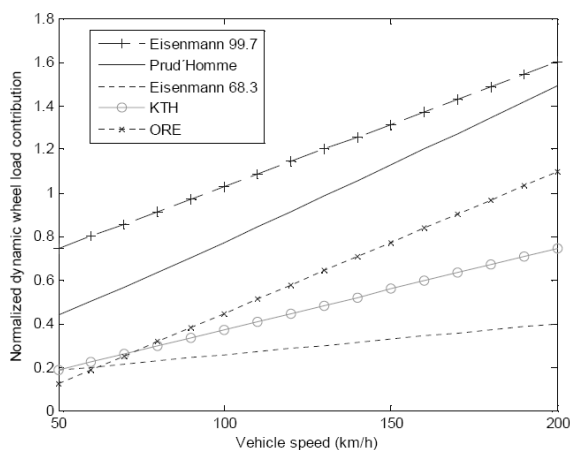
نیروهای خط را می‌توان به طور کلی به سه بخش نیروهای استاتیک، شبه استاتیک و نیروهای دینامیک تقسیم بندی نمود. نیروهای استاتیک نیروهای ناشی از ترن در حال سکون روی خط بدون شیب و ایده ال می‌باشد. هنگامی که یک ترن در حال حرکت با سرعت ثابت در یک خط صاف یا خطی با قوس و دور ثابت می‌باشد نیروهای شبه تعادلی به نیروهای استاتیک اضافه می‌گردند و هنگامی که ترن در معرض حرکت‌های دینامیک می‌باشد نظیر هنگامی که ترن روی یک خط که دارای بی نظمی‌های هندسی و عیوب ریل می‌باشد حرکت می‌کند نیروهای دینامیک بوجود می‌آید. در اینجا باید اشاره کرد که هنگامی که از نیروهای اینرسی صرف نظر می‌گردد تئوری شبه استاتیک قابل استفاده می‌باشد اما اثرات اینرسی در تماس غلطشی برای سرعت‌های بالاتر از ۳۰۰ کیلومتر در ساعت قابل توجه بوده و غیر قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

نیروهای دینامیک می‌توانند در محدوده بسیار وسیعی از فرکانس‌ها از ترن به ریل وارد گردند. با در نظر گرفتن بار عمودی ریل تصویر شماره ۶ ترکیب اصلی نیروهای وارده به ریل را نشان می‌دهد. مجموع نیروهای استاتیک و شبه استاتیک را معمولا بار شبه استاتیک چرخ می‌نامند. چنانچه اشاره گردید بخش نیروی دینامیک گاهی اوقات می‌تواند بزرگتر از نیروی استاتیک باشد. محدوده بالای فرکانس نیروهای دینامیک حدود ۱۰۰ هرتز خواهد بود. بی نظمی‌های ژئومتریکی خط، جرم‌های تعلیق شده و نشده ترن، *Suspention stiffness, damping variations in track flexibility, wheel flats* و موج دار بودن سطح ریل باعث ایجاد نیروهای دینامیک می‌گردد. علاوه بر این سرعت نیز از پارامترهای بسیار مهم به شمار می‌رود.



تصویر شماره ۶- اجزاء نیروهای عمودی ریل: کل نیروی عمودی ریل  $Q$  شامل نیروهای استاتیک، نیروهای شبه استاتیک و نیروهای دینامیک می‌باشد.

رویکردهای زیادی برای تعیین و تخمین نیروهای دینامیک بین چرخ و ریل وجود دارد. که یکی از آنها اندازه‌گیری نیرو توسط تجهیزات نصب شده بر روی ریل می‌باشد ولی امروزه روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری با استفاده از مدل‌های مناسبی از چرخ و ریل نیز پاسخ‌های مناسبی را ارائه می‌کنند. تفاوت میزان نیروهای بدست آمده برای لوکوموتیو  $RC$  راه‌آهن سوئد توسط مدل‌های مختلف را می‌توان به صورت شماتیک و در نمودار زیر مشاهده نمود [2].



تصویر شماره ۷- میزان نیروهای بدست آمده برای لوکوموتیو  $RC$  راه‌آهن سوئد

این نمودار تفاوت میزان نیروهای دینامیک محاسبه شده توسط مدل‌های مختلف نظیر *Eisenmann 99.7*, *Prud'Homme*, *Eisenmann 68.3*, *KTH*, *ORE* بر روی یک خط بدون شیب و با کیفیت خوب نشان داده شده است. این محاسبات برای لوکوموتیو  $RC$  راه‌آهن سوئد انجام شده و در آن محور افقی سرعت و محور عمودی نسبت نیروی دینامیک به بار محوری نامی ترن را نشان می‌دهد. چنانچه در این نمودار می‌توان مشاهده نمود اختلاف زیادی بین مدل‌های موجود وجود داشته و مدل‌های *Prud'Homme* و *Eisenmann 99.7* نیروی دینامیک بالاتری را نسبت به سایر مدل‌ها نشان می‌دهند.

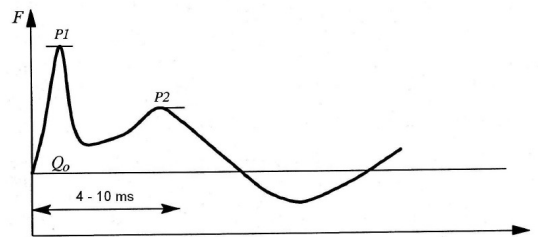
### تئوری‌های شبه استاتیکی تماس چرخ و ریل

تئوری‌های هرترز، کارتر، تئوری خطی کالکر، جانسون ورمولن، تئوری غیر خطی، شن و تئوری پلاخ جزء تئوری‌های شبه استاتیکی برای محاسبه اندرکنش چرخ و ریل می‌باشند.

### نیروهای $P1$ و $P2$

نیروهای دینامیک می‌تواند محدود به فرکانس‌های پایین مطابق آنچه در آیین نامه *UIC 518* (محدود به فرکانس‌های پایین تا ۲۰ هرتز) دانسته شده است و یا فرکانس‌های بالاتر باشد. این موضوع را می‌توان در نیروهای دینامیک که به نام‌های  $P1$  و  $P2$  نامیده می‌شود مشاهده نمود. نیروهای عمودی بین چرخ و ریل بوده و اثرات جرم‌های بدون تعلیق، سرعت و *Track stiffness*

و پارامترهای دیگر را در بر می‌گیرد. هنگام حرکت چرخ از روی گودی و فرورفتگی موجود روی ریل نظیر محل اتصال ریل‌ها دو پیک نیروی قابل مشاهده می‌شود. نیروی اول  $P1$  فرکانس بالایی داشته و در مدت زمان محدودی اعمال می‌گردد. این نیرو هنگامی اعمال می‌گردد که چرخ مجبور به تغییر جهت به دلیل وجود فرورفتگی روی ریل می‌گردد. چرخ و ریل به دلیل جرم‌های بالا روی هم اثر گذاشته و نیروی  $P1$ ، ریل را تحت تاثیر تنش‌های تماسی قرار می‌دهد. نیروی دینامیکی دیگری که پس از پیک اول اعمال می‌گردد یعنی نیروی  $P2$  هنگامی رخ می‌دهد که چرخ با ریل با جرم بالاتر برخورد کرده و به دلیل صلبیت بالاتر خط این پیک نیرو رخ می‌دهد. این نیرو بیشتر بالاست و ژنومتری خط را تحت تاثیر قرار داده و به آنها آسیب می‌رساند. همانطور که در نمودار تصویر شماره ۸ مشاهده می‌شود  $P1$  بزرگتر از  $P2$  بوده اما در زمان بسیار کوتاهی نسبت به  $P2$  اعمال می‌گردد.



تصویر شماره ۸- نمودار نیروهای دینامیکی  $P1$  و  $P2$  هنگامی که چرخ از روی فرورفتگی ریل عبور می‌کند

### خزش و لغزش

در تماس چرخ و ریل لغزش چرخ روی ریل را خزش می‌نامند. وقتی به چرخ که دارای حرکت غلطی است نیروی کششی اعمال می‌گردد، چرخش آن نسبت به حرکت طولی بیشتر می‌شود. این موضوع به خاطر رفتار الاستیک چرخ و ریل و ایجاد حرکت نسبی دو جسم در سطح تماس آنها می‌باشد. این حرکت نسبی را خزش می‌گویند که با افزایش نیروی کشش، افزایش می‌یابد.

### نیروهای حاصل از خزش و چرخش

در تماس چرخ و ریل سه نوع خزش را می‌توان مشاهده نمود که شامل خزش عرضی، طولی و سرخوردن چرخشی می‌باشد.

## ۶-مدلهای ارائه شده برای خرابی ریل

چنانچه پیشتر گفته شد مدل‌های ارائه شده برای خرابی خطوط ریلی را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود:

### ۱. مدل‌های ارائه شده برای نشست خط

این مدل‌ها بر روی نشست خط بر اثر بارهای عبوری تمرکز دارند. مدل‌هایی نظیر *Hoshino and Satoh's model* و *Sugiyama's model* و *Satoh's model* از این مدل‌ها می‌باشند.

### ۲. مدل‌های ارائه شده برای خرابی خط بر اثر سایش و خستگی

چنانچه گفته شد ریل‌ها در معرض فشارهای تماسی بسیار بالایی بوده که در نتیجه آن عیوب سطحی و عیوب ناشی از خستگی رخ می‌دهد. در قسمت بعد مدل‌های شناخته شده برای تخمین سایش و خستگی تماسی ارائه گردیده است.

### ۳. مدل‌های ترکیبی

این مدل‌ها ترکیبی از مدل‌های گروه اول و دوم می‌باشند. به این معنی که در آنها خرابی‌های ناشی از سایش، خستگی و نشست در نظر گرفته شده است. مدل‌هایی نظیر *The ORE model*, *Damage Exponent Heavy Axle* و *Load Analysis* از این گروه می‌باشند.

## ۷-مدل‌های ارائه شده برای خرابی خط بر اثر سایش و خستگی

اصولا در راه آهن به حذف تدریجی مواد در خلال چسبندگی چرخ و ریل و اثرات ساینده روی ریل سایش می‌گویند. به هر حال علیرغم اینکه مکانیزم اولیه و دلیل موج‌دار شدن ریل در قوس‌ها همان سایش می‌باشد (تصویر شماره ۹) و موج‌دار شدن ریل نوعی از سایش به شمار می‌رود، ولی موضوع اساسی در مدل‌های ارائه شده به شمار نمی‌رود.



تصویر شماره ۹ - موج‌دار شدن سطح ریل

- در مدل‌سازی سایش چرخ و ریل دو رویکرد دیدگاه مد نظر می‌باشد.
- مدل‌های کار اصطکاکی: در این مدل‌ها فرض بر این است که سایش وابسته به تلفات انرژی اصطکاکی در تماس می‌باشد. این مدل‌ها وابسته به میزان اتلاف انرژی (رژیم اصطکاک) می‌باشد.
  - مدل‌های سایش بر اساس تماس لغزشی بین سطوح: نیروهای عمودی، طول لغزش و سختی مواد از پارامترهای تاثیرگذار در این مدل‌ها هستند. سرعت لغزش و فشار تماسی مشخص کننده ضریب سایش در رژیم سایش می‌باشند. ضرایب سایش بوسیله آزمایش بدست می‌آید، همچنین شبیه‌سازی دینامیک سه بعدی واگن در یک نرم‌افزار شبیه‌ساز *Multibody system* و استخراج نیروهای مماسی (اصطکاکی) به عنوان تابعی از سرعت‌های لغزش (خزش) معمولا بر اساس تئوری‌های ساده‌ای نظیر تئوری ساده شده کالکر محاسبه می‌گردد.

### مدل سایش آرچارد [3]

این مدل اغلب پایه و اساس سایر مدل‌های سایش می‌باشد. در مدل آرچارد سایش متناسب با فشار تماسی است و بر این اساس محاسبه می‌گردد. معادله زیر محاسبه عمق سایش را توسط را توسط معادله آرچارد نشان می‌دهد [4].

$$\Delta \zeta = k_{Archard} \cdot \frac{P \cdot \Delta s}{H}$$

که در آن

$\Delta \zeta$  عمق سایش با واحد متر

$k_{Archard}$  ضریب سایش آرچارد (بدون واحد)

$P$  فشار تماسی چرخ‌ها

$\Delta s$  طول فاصله لغزش

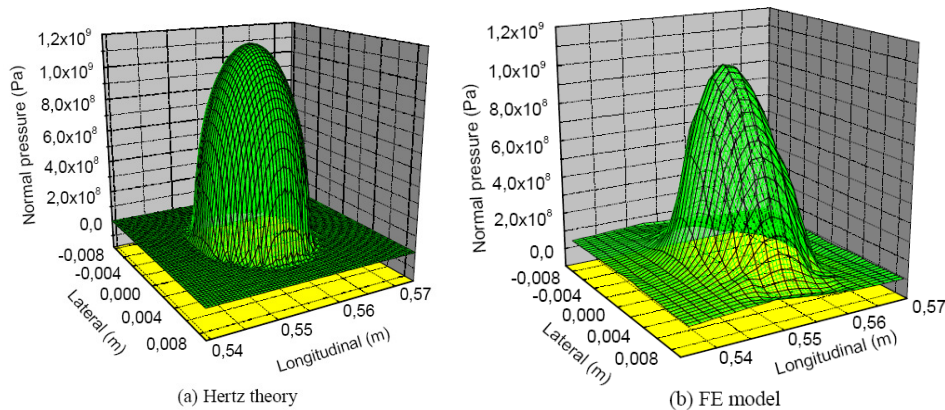
$H$  سختی سطحی نرم‌ترین ماده در تماس

با ضرب مقدار حاصل از معادله فوق در سطح تماس واقعی حجم سایش مطابق معادله زیر قابل محاسبه خواهد بود.



$$\Delta V_{wear} = k_{Archard} \cdot \frac{F_N \cdot \Delta s}{H}$$

که در آن  $\Delta V_{wear}$  حجم ساییش با واحد متر مکعب و  $F_N$  نیروی عمودی بر حسب نیوتن خواهد بود. ضریب ساییش آرچارد یا  $k_{Archard}$  یک عدد بی‌بعد بوده و بستگی به سرعت لغزش، فشار تماسی، دما و روانکاری دارد. فشار تماسی عموماً به دلیل سادگی تئوری هرگز توسط این تئوری می‌گردد [5]، اما روش‌های دقیق‌تری نیز برای محاسبه فشار تماسی وجود دارد. روش‌هایی نظیر روش‌های اندازه‌گیری آزمایشگاهی توسط اولتراسونیک و یا شبیه‌سازی المان محدود که در تصویر شماره ۱۰ نمونه‌ای از نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها نشان داده شده است که در آن می‌توان نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود را با روش هرگز مقایسه نمود.



تصویر شماره ۱۰ - نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود و تئوری هرگز

### مدل فرآیند و داویلاد [6]

در این مدل به منظور ساده‌سازی از لغزش در تئوری *Contact path work theory* صرف‌نظر گردیده است. همچنین بدون در نظر گرفتن مساحت کوچک مسیر تماس معادلات ساده زیر استخراج گردیده است.

$$\frac{\Delta V_{wear}}{L} = k_1 \cdot \bar{F}_v \cdot \bar{v}$$

$$\bar{F}_v \cdot \bar{v} = F_\xi \cdot v_\xi + F_\eta \cdot v_\eta$$

که در آن

$\Delta V_{wear}$  حجم ساییش با واحد متر مکعب

$L$  فاصله طی شده توسط ترن

$k_1$  ضریب تناسب (بدون واحد)

$k_1$  ضریب ساییش آرچارد (بدون واحد)

$\bar{F}_v$  \*  $\bar{v}$  ضریب ساییش

$F_\xi, F_\eta$  نیروهای خزشی طولی و عرضی

$v_\xi, v_\eta$  طول خزش طولی و عرضی

### مدل [7] Pearce and Sherratt

در این مدل مساحت تحت ساییش به ازای کیلومتر از طی شده توسط چرخ در مسیر مستقیم و قوس‌ها با فرض وابستگی ساییش به تلفات انرژی در ناحیه تماس محاسبه می‌گردد. در این مدل بسته به رژیم ساییش روابط متفاوتی برای محاسبه میزان ساییش ارائه گردیده است که در فرمول و نمودار زیر می‌توان مشاهده نمود.

$$A_{wear} = \begin{cases} 0.25 \cdot \bar{F}_v \cdot \bar{v} / D & \text{if } \bar{F}_v \cdot \bar{v} < 100 \text{ Nm/m} \\ 25.0 / D & \text{if } 100 \leq \bar{F}_v \cdot \bar{v} < 200 \text{ Nm/m} \\ (1.19 \cdot \bar{F}_v \cdot \bar{v} - 154) / D & \text{if } \bar{F}_v \cdot \bar{v} \geq 200 \text{ Nm/m} \end{cases}$$

که در آن

$A_{wear}$  مساحت تحت ساییش بر حسب میلیمتر مربع بر کیلومتر

$\bar{F}_v \cdot \bar{v}$  ضریب ساییش

$D$  قطر چرخ بر حسب میلیمتر

رژیم ساییش وابسته به کاهش مواد ریل بوده و  $A_{wear}$  تابعی از ضریب ساییش می‌باشد.

این مدل توسط *Enblom* مورد ارزیابی قرار گرفته و معتبر سازی شده است. مسیر تماس توسط تئوری هرتر محاسبه می‌شود و چنانچه در گذشته گفته شد تخمین ضریب ساییش فاکتور بسیار مهمی در مدل به شمار می‌رود.

### مدل تلفات انرژی کالج سلطنتی سوئد

این کالج مدلی را ارائه و توسعه داده است که در آن تلفات انرژی اصطکاکی به ازای تن بار به عنوانی تابعی از شعاع قوس محاسبه می‌گردد. براساس کار انجام شده در ناحیه تماس لغزشی، تلفات انرژی اصطکاکی مطابق معادله زیر محاسبه می‌گردد [8]. در این مدل تاثیر سرعت در میزان تلفات انرژی اصطکاکی به ازای مسافت طی شده در نظر گرفته شده است.

$$W_s = \frac{6500}{R - 55} \cdot \left( 1 - 0.9 \cdot \frac{R^2}{R^2 + 5000} \cdot k_b \right)$$

که در آن

$R$  شعاع قوس

$k_b$  درجه فرمانپذیری در قوس. این مقدار برای چند نمونه از واگن‌های راه‌آهن سوئد در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

درجه فرمانپذیری چند نوع واگن راه‌آهن سوئد در قوس. مقادیر کوچکتر به معنی قابلیت بالای ترن در گذر از قوس‌های با شعاع کم می‌باشد.

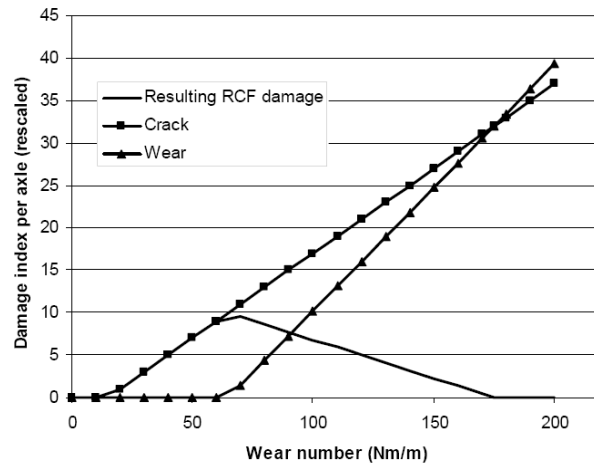
Vehicle type (examples)	$k_b$ value
Freight wagon, 2-axles	0.5
Freight wagon, bogie	0.7
RC-locomotive	0
InterCity - car (Minden Deutz bogie)	0
X2 - car	0.8
X10	1.0

جدول شماره ۱- درجه فرمانپذیری در قوس برای چند نمونه از واگن‌های راه‌آهن سوئد

این مدل قسمتی از مدل کلی این کالج که در سال ۱۹۹۹ ارائه شده می‌باشد. این مدل اصطکاک‌های مختلف را در نظر نگرفته و فقط برای ضرایب اصطکاک بالا صادق می‌باشد، همچنین شعاع قوس‌ها نیز باید بالاتر از ۳۰۰ متر باشد.

## مدل آسیب سطح ریل [9]

این مدل بر اساس ارزیابی ترک‌ها به دلیل خستگی تماس غلطشی و سایش ریل بوده و ارتباط آنها با ضریب سایش در نمودار زیر نشان داده شده است.



تصویر شماره ۱۱ - میزان سایش و ترک‌های ناشی از خستگی تماس غلطشی [9]

چنانچه در این نمودار به روشنی می‌توان مشاهده نمود هنگامی که ضریب سایش بین ۰ تا ۱۵ باشد هیچگونه سایش و یا ترکی حاصل از خستگی تماس غلطشی رخ نخواهد داد. با افزایش ضریب سایش و در محدوده بین ۱۵ تا ۶۵ ترک رخ داده ولی سایشی اتفاق نمی‌افتد که در این ناحیه احتمال رشد ترک و آسیب به ریل وجود خواهد داشت لذا در این ناحیه ضروری است ترک‌های سطحی توسط ماشین‌های ارزیابی ریل مورد بررسی قرار گرفته و سطح ریل سنگ زنی شود. در محدوده بالاتر ضریب سایش یعنی بین ۶۵ تا ۱۷۵ قسمتی از ترک‌های سطحی ناشی از خستگی تماس غلطشی بر اثر سایش چرخ و ریل از بین رفته و ریل در وضعیت نسبتاً مطلوبی قرار می‌گیرد. در محدوده بالاتر از ضریب سایش یعنی بالاتر از ۱۷۵ سایش تمامی ترک‌های ناشی از خستگی تماس غلطشی توسط سایش حذف خواهد گردید. این مدل برای ترن‌های مسافری مورد ارزیابی قرار گرفته و با انجام آزمایشاتی صحت‌گذاری شده است.

## ۸- نتیجه گیری

به منظور پیش بینی میزان خرابی خط برای دستیابی به هدف طراحی و سرمایه گذاری، ساخت و تعمیر و نگهداری خطوط مساله پیچیده پدیده خرابی خطوط باید مورد بررسی و درک موشکافانه قرار گیرد. دلیل دیگر این موضوع تعیین هزینه استفاده از خطوط ریلی بر اساس ترن‌های عبوری از خطوط ریلی بر اساس میزان آسیب آنها به خطوط می‌باشد. با توجه به این که مبنای هزینه دسترسی اپراتورهای ریلی به خطوط راه‌آهن در کشورهای مختلف متفاوت بوده و در بیشتر کشورها از جمله میهن عزیزمان ایران صرفنظر از نوع و کیفیت ترن محاسبه می‌گردد و فقط تابع تن بار حمل شده می‌باشد، لذا نحوه دریافت هزینه عادلانه به نظر نمی‌رسد و برخی ترن‌ها نسبت برخی دیگر آسیب بیشتری به خطوط وارد می‌نمایند. در نتیجه در این مقاله تلاش گردیده مدل‌های ارائه شده برای تخمین میزان سایش و تئوری‌های تماس، انواع آسیب‌های ریل و دلایل آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته و موارد کاربرد هر یک و سطح اهمیت آن‌ها بازگو گردد. خروجی حاصل از مدل‌ها نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد که قابلیت آسیب رسانی ترن‌های مختلف به خطوط ریلی بسیار متفاوت می‌باشد که این موضوع دور از ذهن نبوده و با واقعیت نیز همخوانی دارد لذا این مجموعه مقدمه ای بر بررسی‌های هر چه دقیق‌تر اثرات متقابل چرخ و ریل و آسیب‌های ریل خواهد بود.

- [1] Andersson, E. et al. (2005): *Railway vehicle dynamics. Division of Rail Vehicles, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.*
- [2] Huimin Wu and Nicholas Wilson: *Railway Vehicle Derailment and Prevention.*
- [3] Archard, J. F. (1953): *Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, vol. 24.*
- [4] Enblom, R. (2004): *Simulation of Wheel and Rail Profile Evolution – Wear Modelling and Validation. TRITA-AVE Report 2004:19, Division of Rail Vehicles, Department of Aeronautical and Vehicle Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.*
- [5] Hertz, H. (1882): *On the contact between two solid elastic bodies. Journal of Pure and Applied Mathematics.*
- [6] Fries, R. H. et Dávila, C. G. (1985): *Analytical methods for wheel and rail wear prediction. Proceedings 9th IAVSD symposium, Linköping.*
- [7] Pearce, T. G. et Sherratt, N. D. (1991): *Prediction of Wheel profile Wear. Wear, Vol. 144, 1991, Elsevier.*
- [8] Andersson, E. et Stichel, S. (1999): *Model for track deterioration; vehicle parameters and reference values, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden.*
- [9] Booz Allen & Hamilton. (2005): *Review of Variable Usage and Electrification Asset Usage Charges: Final Report.*