



تحلیل تنش قطعه تکه مرکزی سوزن ریلی با کاربرد روش مدل سازی المان محدود و تخمین عمر با معیارهای خستگی چندوجهی

مصطفی صباغی^۱، محمدعلی صائمی صدیق^{۱*}، موسی ساجد^۱، صادق عبادی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران
 ۲- مرکز تحقیق و توسعه، شرکت گسترش صنایع ریلی ایران، تبریز، ایران
 * ایمیل نویسنده مسئول: saeimi.sadigh@azaruniv.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲ مهر ۱۴۰۳
 پذیرش: ۳ دی ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

قطار
 قطعه تکه مرکزی
 ریل
 عمر خستگی
 تئوری صفحه بحرانی

در سیستم ریلی قطعه تکه مرکزی به عنوان یکی از اجزای مهم سوزن به دلیل تماس‌های شدید خود با چرخ قطار مستعد رشد ترک‌های خستگی و شکست می‌باشد. این تماس‌های شدید که در حین گذر چرخ از روی سوزن سبب ایجاد تنش‌های قابل ملاحظه‌ای در سطح ریل می‌شود، به دلیل ماهیت تکرار شونده و مقادیر قابل ملاحظه خود در نهایت سبب ایجاد تخریب خستگی در سطح ریل می‌گردد. هدف از این پژوهش، انجام مطالعه عددی به روش المان محدود بر روی تکه مرکزی منوبلوک آر ۳۰۰ (UIC60 R300)، تراورس‌ها و چرخ منوبلوک آر هفت تی (R7T) با پروفیل استاندارد ۹۲۰ میلی‌متر اس ۱۰۰۲ (ORE S1002)، به منظور ارزیابی تنش‌ها، کرنش‌ها و نیروهای تماسی می‌باشد. در این پژوهش از مدل چرخ و ریل به همراه المان‌های فنر به منظور شبیه‌سازی مجموعه ریل، تراورس‌ها و چرخ قطار استفاده شده است. به منظور به دست آوردن منطقه بحرانی در مسیر تکه مرکزی، تحلیل دینامیکی سیر چرخ روی ریل شبیه‌سازی شده است. سپس در مدلی اصلاح شده که فقط شامل منطقه بحرانی از تکه مرکزی بوده از روش زیر-مدلسازی جهت تحلیل تنش دقیق استفاده شده است. جهت به دست آوردن خواص مکانیکی و خستگی تکه مرکزی نمونه‌های استاندارد تهیه شده از جنس ریل و تراورس‌ها تحت آزمون‌های کششی، فشاری و خستگی قرار گرفته‌اند. در نهایت از سه مدل پیش‌بینی عمر بر پایه تئوری صفحه بحرانی جهت تخمین عمر استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، قطعه تکه مرکزی در جهت عمق ریل و در صفحاتی که تنش‌های برشی ماکزیمم است مستعد به رشد ترک خستگی می‌باشد.

Stress analysis of the railway turnout crossing using finite element method and life estimation with multi-axial fatigue criteria

Mostafa Sabbaghi¹, Mohammad Ali Saeimi-Sadigh^{1*}, Moosa Sajed¹, Sadegh Ebadi²

1- Mechanical Engineering Department, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

2- R&D Center, Iran Rail Industries Development Co. (IRID), Tabriz, Iran

* Corresponding Author's Email: saeimi.sadigh@azaruniv.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 23 September 2024

Accepted: 23 December 2024

Keywords:

Train
 Turnout Crossing
 Rail
 Fatigue Life
 Critical Plane Theory

Abstract

In the rail system, the turnout crossing is prone to the growth of fatigue cracks and failure due to its strong contact with the train wheel. The intense contacts during the passage of the wheel cause significant stresses on the rail surface which cause fatigue damage. This is a numerical study using the finite element method on the central piece of the UIC60 R300 mono-block, the traverses, and the R7T mono-block wheel with the ORE S1002 920 mm standard profile, in order to evaluate the stresses, strains, and contact forces. In this research, the wheel and rail model along with the spring elements have been used in order to simulate the set of rails, traverses, and train wheels. To obtain the critical zone in the path, the dynamic analysis of the wheel pass on the rail has been simulated. Then, in a modified model that only included the critical region, the sub-modeling technique was used for accurate stress analysis. In order to acquire the mechanical properties, the standard samples made of rail and traverses have been subjected to tensile, compressive and fatigue tests. Finally, three life prediction models based on critical plane theory have been used to estimate life. The results of this research show that the turnout crossing is prone to fatigue crack growth in the direction of rail depth and in the plates where the shear stresses are maximum.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sabbaghi M, Saeimi-Sadigh MA, Sajed M, Ebadi S. Stress analysis of the railway turnout crossing using finite element method and life estimation with multi-axial fatigue criteria. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jan 20;11(11):52-66. doi: 10.22034/ijme.2024.480010.2012 [In Persian]

۱- مقدمه

حمل و نقل ریلی، یکی از اصلی ترین روش های حمل و نقل در جهان است و برای حمل مسافران و بارها از آن استفاده می شود. این سیستم حمل و نقل بر اساس استفاده از ریل ها (معمولاً شامل دو ریل موازی) و واگن ها بر روی آن ها برای حرکت بین مبدأ و مقصد استوار است. موضوع طراحی و ساخت سوزن ها، به عنوان یکی از بخش های حیاتی در حمل و نقل ریلی، که وظیفه تغییر مسیر در ریل ها را برعهده دارند از اهمیت بسیاری در بین پژوهشگران و مهندسين برخوردار است. در حقیقت، انواع مختلفی از نقص ها می توانند بر سوزن ها تأثیرگذار باشند [۱]. برخی از این نقص ها شامل سایش، تغییر شکل پلاستیکی، خستگی تماس غلتشی، رشد ترک، موجی شدن ریل و غیره است. این نقص ها می توانند باعث آسیب رساندن به سوزن ها شوند. علت اصلی این نقص ها معمولاً به دلیل شرایطی خاص است. به طور مثال، نیروهای مماسی تماس چرخ ریل در بالای سوزن ها و خزش در تیغه سوزن می توانند نیروهای ناگهانی در ریل ایجاد کنند. همچنین، تغییرات در پروفیل ریل، تغییرات ناگهانی در انحنا چرخ، در نوک سوزن، عدم پیوستگی در پروفیل ریل در زمان گذر قطار از بالای سوزن و نیشدلی می توانند باعث ایجاد نیروهای برخورد شدید شوند؛ به عبارت دیگر، بالاترین نرخ خرابی ها در سوزن ها در مقایسه با سایر اجزای خط و واگن ها در سیستم حمل و نقل ریلی رخ می دهد [۲]. در خطوط ریلی ایران، بررسی سوابق خسارت های ناشی از خرابی سوزن ها نشان می دهد، وقوع خرابی در سوزن ها علاوه بر تحمیل هزینه های مالی قابل توجه سبب بروز هزینه های جانی برای مسافران و خدمه قطارها می شود. بررسی سالنامه آماری حمل و نقل ریلی نشان می دهد، در سال ۱۳۸۹، بیش از سی و سه هزار عملیات تعمیر و نگهداری روی شش هزار و ششصد سوزن در سامانه ریلی انجام یافته که بیانگر به طور میانگین پنج عملیات در هر سوزن موجود است. این عدد در سال ۱۳۹۳ به بیش از نه عملیات افزایش یافته است که در بازه زمانی چهار ساله تقریباً افزایش دو برابری داشته است. ایجاد و رشد ترک در سوزن ها از جمله دلایل اصلی بروز خرابی بوده و سبب شده است که چندین مطالعه پژوهشی برای پی بردن به مسائل و مشکلات سوزن توسط محققین انجام پذیرد [۱].

مطالعات گسترده ای که توسط پژوهشگران در حوزه حمل و نقل ریلی انجام شده است، نشان دهنده پیشرفت های عمیق در فهم مکانیزم های خستگی و رشد ترک در مواد و سازه های مرتبط با سیستم های ریلی است. با استفاده از مدل سازی دقیق المان محدود چشم اندازی جدید برای ارزیابی بقا و طول عمر اجزای راه آهن مثل چرخ ها و ریل ها ارائه می شود. با بررسی های انجام شده روی تأثیر قطر چرخ، بار عمودی و خواص خستگی مواد، مهندسين قادر به شناسایی عوامل کلیدی تعیین کننده در پیش بینی شروع خستگی هستند.

کیم و همکاران [۳] رفتار رشد ترک خستگی فولاد ریل تحت بارگذاری حالت I و حالت ترکیبی را بررسی کردند. برای این منظور، تجزیه و تحلیل تنش برای بررسی شکست استاتیک و رفتار خستگی تحت بارگذاری حالت ترکیبی انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل تنش نشان می دهند که ضریب شدت تنش KI/KII در حالتی که ترک عرضی زیر سطح پخش می شود، به تدریج افزایش می یابد. صادقی و اکبری [۴] مطالعه ای در مورد خستگی تماس غلتک ها و ریل ها در حین تماس و بار حرارتی؛ مکانیسم ها، روش های پیش بینی، پارامترهای تأثیرگذار و روش های جلوگیری از خستگی تماس انجام دادند. همچنین ایشان، خرابی های ناپیوسته ناشی از خستگی تماس و تأثیر بارگذاری حرارتی را نیز مورد بررسی قرار دادند. رینگسبرگ و لیندباک [۵] در مطالعه ای، تحلیل خستگی تماس غلتکی ریل ها، شامل شبیه سازی های عددی فرایند تولید ریل و بارهای تماس تکراری بین چرخ و ریل را مورد بررسی قرار دادند. ابتدا از روش المان محدود برای تحلیل دوبعدی گرمایی-مکانیکی فرایند خنک شدن و تحریک رولر بر روی ریل استفاده شد. نتایج به دست آمده از این تحلیل ها به عنوان شرایط اولیه در مدل سه بعدی الاستوپلاستیک ریل استفاده شدند؛ این مدل جزء ابزار المان محدودی است که برای تحلیل خستگی تماس غلتکی ریل ها توسعه داده شده است. نتایج حاصل از این ابزار، برای بررسی خستگی به ازای هشت عبور چرخ، با استفاده از روشی که شامل یک رویکرد صفحه بحرانی است که خستگی را سیکل به سیکل ارزیابی می کند، تحلیل شدند. مسعودی نژاد و همکاران [۶] عمر رشد ترک خط ریل تحت تأثیر ترکیب بار مکانیکی و بار حرارتی را شبیه سازی و به بررسی جزئیات رشد ترک در یک چرخ مونوبلاک در حضور تنش های باقیمانده پرداختند. در این پژوهش، از تحلیل المان محدود الاستیک-پلاستیک سه بعدی با استفاده از نرم افزار انسیس برای برآورد میدان تنش باقیمانده و تنش های متقابل غلتشی در یک چرخ مونوبلاک استفاده شده است. وون و همکاران [۷] تحلیلی درباره ارزیابی آسیب پذیری نواحی تماس چرخ قطارهای سرعت بالا در برابر خستگی حرارتی ارائه دادند. تحقیقات انجام شده در این پژوهش به بررسی علل و مکانیسم های آسیب زایی در سطح تماس چرخ قطارها به دلیل افزایش

دما ناشی از اصطکاک بین سطح چرخ و سیستم ترمز می پردازد. بررسی ها شامل تحلیل تغییر شکل میکروسکوپی در سطح چرخ، تجزیه و تحلیل سختی و تجزیه و تحلیل تنش های باقیمانده در سطح چرخ در وضعیت جدید و پس از خستگی حرارتی است. لیو و همکاران [۸] در مطالعه ای درباره تحلیل گسترش ترک زیرسطحی در چرخ های ریلی تحت بارگذاری تماسی پیچشی، با استفاده از روش المان محدود سه بعدی الاستوپلاستیک، شاخص های شدت تنش در چرخ ها را محاسبه کردند. سپس با استفاده از مدل گسترش ترک خستگی ترکیبی، خسارت خستگی در چرخ ها تخمین زده شده است. این روش مزایایی از جمله نمایش دقیق تنش تماس اجزای مکانیکی پیچیده و در نظر گرفتن تأثیر غیر همسانگردی بارگذاری را دارا است.

مطالعه در مورد عمر خستگی فولادهای مورد استفاده در قسمت های مختلف خطوط ریلی در سال های اخیر همچنان در کانون توجه پژوهشگران قرار داشته است. گومز و همکاران [۹] رفتار خستگی در شرایط کنترل شده با کرنش را برای فولاد 51CrV4 که قابل استفاده در سوزن ریلی است، ارزیابی کرده اند. در این تحقیق، هر دو رویکرد کرنش-عمر و انرژی-عمر برای تحلیل پیش بینی خستگی در نظر گرفته شدند. ویژگی های مواد و پارامترهای مدل اجزای محدود ارائه شده در این کار می تواند در سایر قطعات مکانیکی ساخته شده از این فولاد نیز مورد استفاده قرار گیرد. ژانگ و همکاران [۱۰] رویکردهای موجود برای پیش بینی شروع ترک را بررسی کرده اند. آن ها منطقه شروع ترک را پیش بینی و با ترکیب نقشه لرزش با معیارهای مختلف شروع ترک و روش صفحه بحرانی، عمر شروع ترک را محاسبه کرده اند. این بررسی نشان می دهد که مشخصه دینامیکی چرخ/راه آهن، شرایط کاری پیچیده، عیوب سطحی و سایش، همگی بر شروع ترک تأثیرگذار هستند. کوچارسکی و همکاران [۱۱] به بررسی فولاد R260 پرداخته اند و آسیب خستگی در مناطق مختلف نزدیک به سطح ریل بر اساس زوال محلی مدول الاستیک و توسعه کار پلاستیک در آزمایش های ریز فرورفتگی چرخه ای را برآورد کرده اند. طبق نتایج، تفاوت واضحی در سختی و آسیب خستگی بین نواحی استفاده شده و نواحی بکر سر ریل وجود دارد. همچنین در این مطالعه، تغییر در خواص مواد به دلیل فرآیند ساخت ریل تأیید شده است. غضنفری و تهرانی [۱۲] یک مطالعه عددی برای تخمین عمر شروع ترک به منظور کاهش شکست در ریل با جوش لب به لب تحت بارهای وارده در حین کار را با استفاده از روش صفحه بحرانی انجام داده اند. در این کار برای افزایش عمر خستگی اتصال جوشی، با توجه به میزان شکستگی اتصالات جوش لب به لب در راه آهن شبکه ایران، متغیرهای مهم فرآیند جوشکاری بهینه شده است. ژائو و همکاران [۱۳] برای تشخیص عمر شروع ترک، مدل المان محدود صریح با اشاره به شرایط واقعی برای راه حل های تماس نورد اصطکاکی دقیق را توسعه داده اند و حساس ترین موقعیت از نظر ایجاد ترک و تعداد چرخه ها را پیش بینی کرده اند.

با توجه به اهمیت تخمین عمر خستگی سوزن در صنایع ریلی، در این پژوهش به مدل سازی عددی رفتار خستگی تکه مرکزی منوبلوک UIC60 R300 به کار رفته در خطوط راه آهن ایران پرداخته می شود. جهت تحلیل تنش در این بخش مدل سه بعدی چرخ قطار، تکه مرکزی و تراورس ها در نرم افزار آباکوس مدل سازی می شود. جهت تعریف رفتار مکانیکی فولاد ریل و تراورس ها، از آزمون کشش و فشار نمونه های استاندارد جهت به دست آوردن منحنی الاستیک-پلاستیک فولاد هادفیلد و بتن استفاده شده است. رفتار خستگی فولاد هادفیلد با استفاده از آزمایش خستگی چرخشی چهار نقطه روی نمونه های استاندارد خستگی به دست آمده است. به منظور تحلیل تنش در قطعه تکه مرکزی که شامل سطوح با انحنای شدید است از روش زیر مدل سازی استفاده شده است. در نهایت از تئوری های تخمین عمر موجود در پژوهش های پیشین جهت تخمین عمر خستگی تکه مرکزی استفاده شده است.

۲- مدل سازی رفتار مکانیکی مواد

فولاد بکار رفته در ساخت سوزن از نوع فولاد منگنز دار آستنیتی، معروف به فولاد هادفیلد با قابلیت عمر سایشی بالا مطابق مشخصات استاندارد ASTM A-128 می باشد. آزمون کشش برای فولاد، یکی از مهم ترین آزمایش ها برای مشخص کردن خواص مکانیکی این ماده است. با استفاده از این آزمایش می توان رفتار ماده را در محدوده الاستیک و پلاستیک به ازای مقادیر مختلف بارگذاری به دست آورده و مقاومت آن را در برابر نیروهای کششی ارزیابی نمود. استفاده از دستگاه آزمون کشش هیدرولیکی به دلیل دقت بالا و قابلیت کنترل بهتر نیرو در حین آزمون، انتخاب مطلوبی برای این آزمایش است. به این منظور نمونه ای مطابق با استاندارد ASTM E8 تهیه و آماده شد. نمونه در داخل دستگاه کشش هیدرولیکی قرار داده شده و به صورت ایمن مهار گردید. سرعت کشش بر اساس جنس ماده و استانداردهای مربوطه تنظیم می شود که برای فولاد معمولاً در حد ۵ میلی متر در دقیقه است. با استفاده از این آزمایش رفتار فولاد در

محدوده الاستیک و پلاستیک با به دست آوردن نمودار تنش- کرنش مهندسی قابل شبیه سازی خواهد بود. شکل ۲-الف نمودار تنش کرنش فولاد هادفیلد حاصل از آزمون کشش را نشان می دهد. تراورس های بکار رفته در صنایع ریلی ایران معمولاً از جنس بتن می باشند. برای به دست آوردن خواص مکانیکی تراورس نمونه استوانه ای از تراورس ها تهیه و در دستگاه آزمون فشار بتن مطابق استاندارد ASTM C39/C39M مورد آزمایش قرار گرفتند. با استفاده از این آزمایش رفتار الاستیک تراورس ها با به دست آوردن مدول الاستیسیته تراورس قابل شبیه سازی خواهد بود. ترک های خستگی معمولاً از سطح قطعات شروع می شوند، جایی که توزیع تنش به صورت تنش صفحه ای است، اما به دلیل وجود کرنش برون صفحه ای، توزیع کرنش سه محوری است. نظریه های خستگی چندوجهی به بررسی این شرایط می پردازند تا رفتار و مقاومت مواد تحت بارگذاری های پیچیده را بهتر درک کنند. این نظریه ها به مهندسان کمک می کنند تا بتوانند طراحی های بهتری برای جلوگیری از شکست های خستگی در قطعات مکانیکی ایجاد کنند. در این پژوهش آزمون های کشش تک محوره و خستگی چهار نقطه ای خمشی دوار به منظور به دست آوردن رفتار کششی و عمر خستگی فولاد هادفیلد، مطابق شکل ۱ انجام گرفته است. در آزمون کشش، نمونه استاندارد آزمایش کشش مطابق استاندارد ASTM E8-13a [۱۴] در دستگاه کشش ۲۵ تن (شکل ۱-الف) به منظور به دست آوردن نمودار تنش کرنش تحت آزمایش کشش تک محوره قرار گرفته است. جهت به دست آوردن رفتار خستگی مطابق شکل های ۱- (ب و ج) نمونه های آزمون خستگی تحت آزمایش خستگی چهار نقطه ای خمشی دوار مطابق استاندارد ASTM E466-15 [۱۵] قرار گرفته اند. قابل ذکر است سطح نمونه های آزمون خستگی با استفاده از سنباده و پولیش پرداخت شده اند. این نمونه ها در تنش های مختلف تحت آزمون خستگی قرار گرفته و تعداد سیکل هایی که منجر به شکست در آن تنش می گردد، ثبت شد. نتایج این آزمون در نموداری تحت عنوان نمودار S-N جهت به دست آوردن ثوابت مدل های رفتاری خستگی ارائه می شود.



(ب)

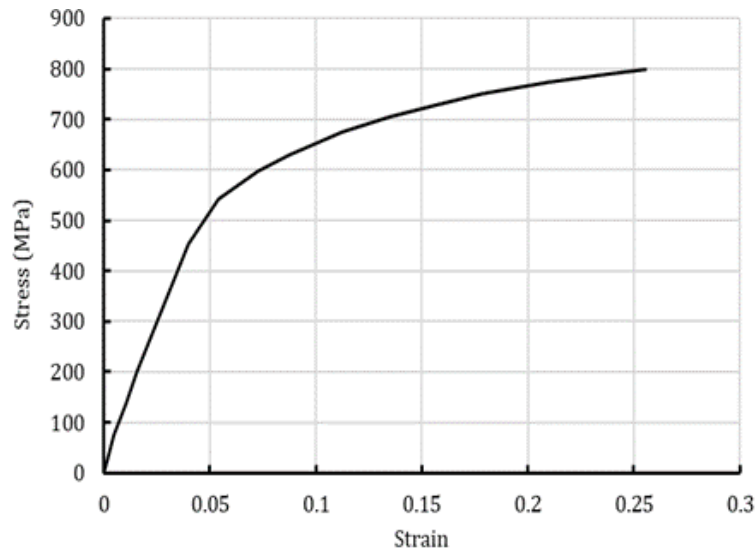


(ج)

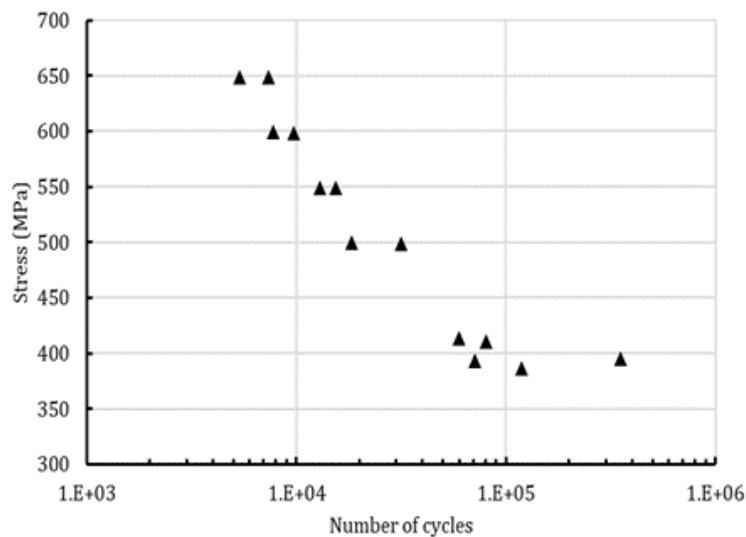


(الف)

شکل ۱ خواص مکانیکی فولاد هادفیلد، الف) دستگاه آزمون کشش نمونه استاندارد کشش، ب) دستگاه آزمون خستگی چهار نقطه ای خمشی دوار، ج) نمونه های آزمون خستگی مورد آزمایش



(الف)



(ب)

شکل ۲ خواص مکانیکی فولاد هادفیلد، (الف) نمودار تنش کرنش، (ب) نمودار S-N

در این تحقیق، برای پیش بینی عمر خستگی در قطعه تکه مرکزی، سه معیار خستگی چندوجهی شامل کی بی ام^۱، گلینکا^۲ و کراسلند^۳ مورد استفاده و نتایج آن مقایسه شده است. این معیارها در ادامه ارائه شده و به اختصار در این قسمت توضیح داده می شود. مدل های خستگی چندوجهی بر اساس تفسیر فیزیکی مکانیسم رشد ترک خستگی بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی شکل گرفته اند. در مدل کی بی ام، صفحه بحرانی، صفحه ای است که حداکثر کرنش برشی $\Delta\gamma_{max}$ در آن رخ داده است [۱۶].

$$\frac{\Delta\gamma_{max}}{2} + S_k \Delta\epsilon_n = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^{2b} + \epsilon'_f (2N_f)^c, \quad \frac{\Delta\gamma}{2} = \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2}\right), \quad \frac{\Delta\epsilon_n}{2} = \left(\frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2}\right) \quad (۱) \quad \text{کی بی ام}$$

$$\frac{\Delta\gamma}{2} \frac{\Delta\tau}{2} + \frac{\Delta\epsilon_n}{2} \frac{\Delta\sigma_n}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{2E} (2N_f)^{2b} + \frac{\epsilon'_f E}{2} (2N_f)^{b+c}, \quad \frac{\Delta\tau}{2} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right), \quad \frac{\Delta\sigma_n}{2} = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \quad (۲) \quad \text{گلینکا}$$

$$\sqrt{J_{2,a}} + k\sigma_{H,max} = \sigma'_f (2N_f)^b, \quad \sqrt{J_{2,a}} = \frac{1}{2\sqrt{6}} [(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_2)^2 + (\Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_3)^2 + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)^2]^{1/2} \quad (۳) \quad \text{کراسلند}$$

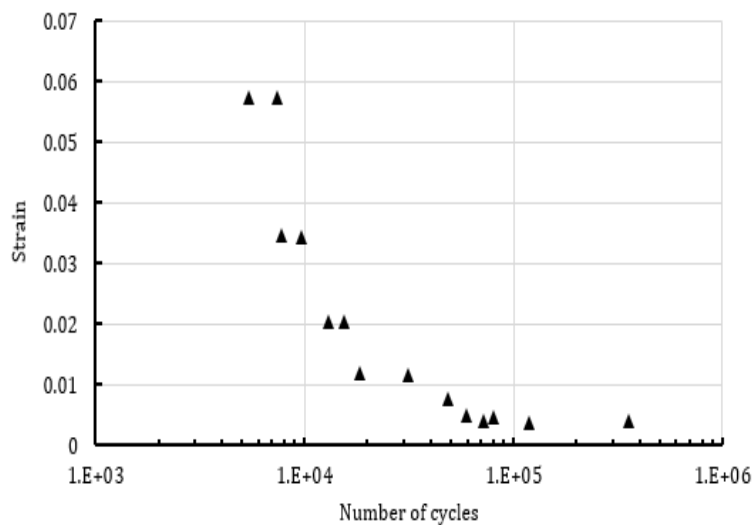
در این رابطه $\Delta\epsilon_n$ کرنش نرمال در صفحه بحرانی است و S_k پارامتر وابسته به جنس است که مقدار آن برابر $0/3$ لحاظ شده است. این مقادیر را می توان با تنش ها و کرنش های اصلی به دست آمده از تجزیه و تحلیل اجزای محدود در نقطه بحرانی تعیین کرد. گلینکا

¹ Kandil, Brown and Miller (KBM)

² Glinka

³ Crossland

رابطه تخمین عمر خستگی را با استفاده از تجمیع چگالی انرژی الاستیک و پلاستیک در صفحه برشی بحرانی پیشنهاد داده است. در این رابطه $\Delta\epsilon$ ، $\Delta\gamma$ به ترتیب دامنه کرنش برشی و کرنش نرمال هستند که از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه بوده و $\Delta\sigma_n$ و $\Delta\epsilon_n$ به ترتیب مقادیر تنش نرمال و کرنش نرمال در صفحه بحرانی هستند. در این مدل صفحه بحرانی، صفحه‌ای است که در آن سمت چپ رابطه مقدار ماکزیمم باشد. جهت به دست آوردن مقدار ماکزیمم، مقادیر سمت چپ این معادله با استفاده از پاسخ به دست آمده از تحلیل المان محدود و کاربرد دایره مور برای صفحات با زوایای مختلف در نرم افزارهای محاسباتی همچون متلب محاسبه می‌گردد تا مقدار آن حاصل شود. کراسلند معیار خستگی چند وجهی بر پایه تنش که از نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی و حداکثر تنش هیدرواستاتیکی در معادله خود استفاده می‌کند را ارائه می‌دهد. در این رابطه J_{2a} و σ_{Hmax} به ترتیب دامنه متغیر دوم تانسور تنش انحرافی و حداکثر مقدار تنش هیدرواستاتیکی است. همچنین k ، ثابت وابسته به جنس بوده که در این پژوهش برابر یک فرض شده است [۱۶]. در این روابط ϵ_f ، σ_f ، b و c ثوابت مرتبط با جنس هستند که از نمودار خستگی کرنش محور بدست می‌آیند. در این پژوهش آزمایش خستگی تنش محور جهت بدست آوردن رفتار خستگی انجام شده است. حال به منظور به دست آوردن نمودار خستگی کرنش محور می‌توان با محاسبه مقدار کرنش در نمونه‌هایی که تحت آزمایش تنش محور قرار گرفته‌اند، نمودار کرنش محور را رسم و مورد استفاده قرار داد. شایان ذکر است با توجه به اینکه در آزمون خستگی تنش محور، نمونه تحت خمش خالص قرار داشته است، لذا تنش ایجاد شده در آن از نوع تنش تک محوره بوده در نتیجه از نمودار تنش-کرنش ارائه شده در شکل ۲-الف می‌توان کرنش ایجاد شده در نمونه را بدست آورد. شکل ۳ نمودار کرنش-عمر بدست آمده را نشان می‌دهد. با استفاده از برازش منحنی روی نمودار مذکور می‌توان مقادیر ثوابت ϵ_f ، σ_f ، b و c را بدست آورد. جدول ۱ خواص مکانیکی و خستگی فولاد که از نمودار تنش-کرنش و کرنش-عمر بدست آمده‌اند را نشان می‌دهد.



شکل ۳ نمودار کرنش عمر فولاد هادفیلد

جدول ۱ خواص مکانیکی و ثوابت مربوط به فولاد هادفیلد

E(GPa)	ν	σ_f (MPa)	ϵ_f	b	c
190	0.3	4036.02	0.01	-0.19415	-0.43671

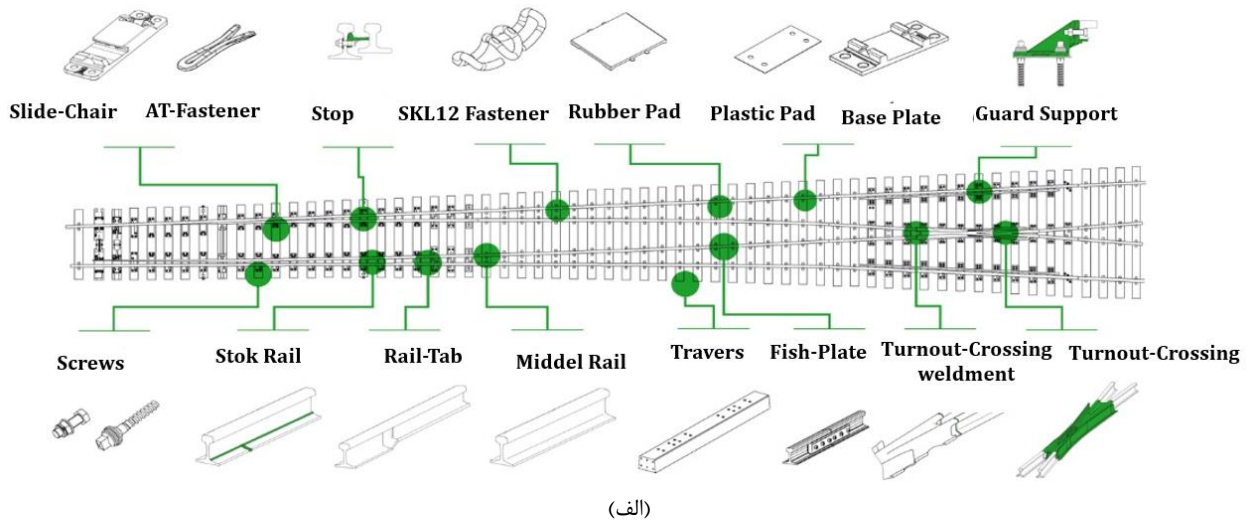
۳- مدل سازی چرخ و ریل

دستگاه سوزن از اجزای مختلف مانند ساپورت گارد ریل، بیس پلیت، پدهای لاستیکی و پلاستیکی، بست‌های SKL12، استوپ‌ها، اسلایدچیر، فیش پلیت، تراورس، ریل میانی، استوک ریل و انواع مختلف پیچ‌ها تشکیل شده است (شکل ۴-الف). قسمت سوئیچ سوزن شامل دو ریل اصلی (استوک) و دو ریل زبانه می‌باشد که ریل‌های زبانه، دو ریل داخلی از مجموع چهار ریل سوزن را تشکیل می‌دهند و متحرک هستند. ریل‌های اصلی، دو ریل خارجی از مجموع چهار ریل سوزن را تشکیل می‌دهند و بر خلاف زبانه، ثابت هستند.

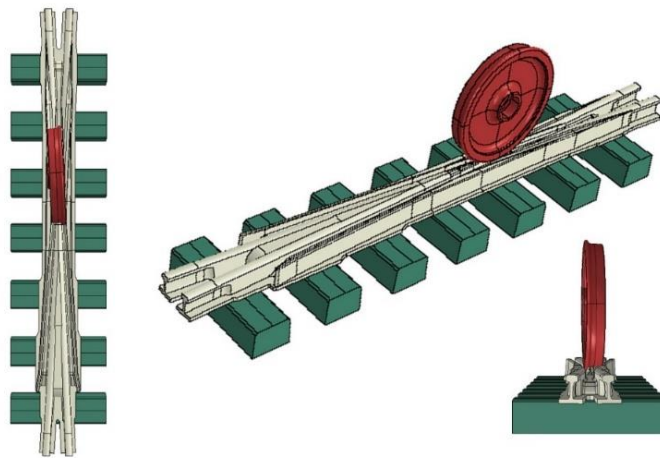
قسمت میانی در حد فاصل ریل های سوزن و تکه مرکزی قرار دارد تا امکان انتقال تدریجی وسیله نقلیه ریلی را از مسیر اصلی به مسیر انشعابی فراهم کند. ابتدای این ریل ها به پاشنه ریل زبانه و انتهای آنها به ریل های بالی شکل متصل است. در محل جداسدن کامل دو مسیر راه آهن از یکدیگر تکه مرکزی یا فراگ قرار داده می شود تا امکان عبور چرخ وسیله نقلیه ریلی از محل تقاطع خطوط فراهم شود.

به منظور تحلیل دقیق رفتار خستگی سوزن در سیستم های ریلی، از مدل سازی پیشرفته و تکنیک های المان محدود استفاده شده است. شکل ۴-ب مدل چرخ، قطعه تکه مرکزی و تراورس با پروفیل ریل پرمصرف در صنایع ریلی کشور را نمایش می دهد. در وهله اول، هندسه چرخ، تکه مرکزی و تراورس ها مدل شدند. به منظور مدل سازی چرخ از پروفیل چرخ استاندارد منوبلوک ORE S1002 با قطر ۹۲۰ میلی متر که پروفیل مورد استفاده در ساخت چرخ های سیستم حمل و نقل ریلی ایران می باشد، استفاده شده است. برای مدل کردن این پروفیل مختصات ۱۹۵ نقطه ارائه شده در استاندارد UIC 510-2 و UIC 515-1 مدل شده اند برای دستیابی به نتایج دقیق، این پروفیل کاملاً مطابق با ابعاد واقعی آن مدل سازی شده است. برای تکه مرکزی، از مدل تکه مرکزی UIC60 R300 استفاده گردیده است. در این پژوهش به منظور در نظر گرفتن اثرات وجود صفحات زیر فراگ، پدهای لاستیکی و پدهای پلاستیکی، کل این مجموعه را به همراه تراورس بتنی مورد آزمایش فشار قرار داده شد تا مدول الاستیکی معادل مجموعه زیرین تکه مرکزی به دست آید. در این آزمایش نمودار تنش- کرنش در محدوده الاستیک به دست آمده است. با محاسبه ریب زاویه نمودار تنش کرنش، مدول الاستیسیته تراورس ها برابر $73/6$ گیگاپاسکال بدست آمده است. در مدل المان محدود، با توجه به پیچیدگی ساختاری ریل و چرخ، فرآیند المان بندی با دقت ویژه ای انجام گرفته است. در حالی که برای ساختارهای منظم، مش بندی شش وجهی دقت بالاتری نسبت به مش بندی چهار وجهی ارائه می دهد. پیچیدگی هندسی مدل حاضر، چالش های خاصی را در فرآیند مش بندی ایجاد کرده است. در مدل های پیچیده، تولید مش شش وجهی معمولاً زمان بیشتری از فرآیند توسعه مدل را به خود اختصاص می دهد. برای مدل سازی چرخ قطار، از المان های نوع C3D8R با ابعاد $16 \times 16 \times 16$ میلی متر استفاده شده است (شکل ۵-الف). این نوع المان، که از خانواده المان های مکعبی ۸ گرهی است، برای تحلیل های سه بعدی پیچیده مناسب می باشد. در مجموع، ۱۱۲۰۰ المان در مدل سازی چرخ به کار رفته است، با تمرکز بیشتر در ناحیه تماس که حساسیت بالاتری دارد. این رویکرد امکان محاسبه دقیق تر تنش ها و کرنش ها در نواحی بحرانی را فراهم می آورد. برای مدل سازی تکه مرکزی، از المان های نوع C3D4 استفاده شده است. این المان ها که از نوع چهاروجهی هستند، انعطاف پذیری بیشتری در مش بندی اشکال پیچیده ارائه می دهند. کوچک ترین اندازه المان در ناحیه زیر چرخ، ۶ میلی متر در نظر گرفته شده است، که این امر دقت محاسبات را در این ناحیه حساس افزایش می دهد. در مجموع، ۲۸۵۰۰ المان در مدل سازی ریل به کار رفته است (شکل ۵-ب). سپس به منظور افزایش دقت تحلیل تنش در قطعه تکه مرکزی از روش زیر مدل سازی در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. در این روش پس از تحلیل تنش مدل اولیه، صرفاً قسمتی از مدل که منطقه بحرانی در آن قرار دارد حفظ شده بقیه قسمت های مدل پاک می شوند. اما تأثیر قسمت های حذف شده به شکل شرایط مرزی یا بارهای منتقل شده از تحلیل اولیه به مدل زیر مدل سازی شده تعریف می گردد. در حقیقت روش زیر مدل سازی برای تحلیل بخش محلی از یک مدل با مش ریز شده بر اساس تحلیل درون یابی از یک مدل اولیه (تغییر شکل نیافته)، با المان های نسبتاً بزرگ استفاده می شود. این روش زمانی که نیاز به دستیابی به یک راه حل دقیق و جزئی می باشد، بیشترین کاربرد را دارد. برای مثال در تحلیل تنش در مناطقی با انحنای شدید از یک مدل بزرگ، کاربرد روش زیر مدل سازی امکان به کارگیری المان های بسیار ریز را در محدوده انحنای به منظور محاسبه تمرکز تنش فراهم می سازد.

در این روش زیر مدل به عنوان یک تحلیل مجزا از تحلیل مدل کامل اجرا می شود. تنها پیوند بین زیر مدل و مدل اولیه، انتقال مقادیر متغیرهای وابسته به زمان ذخیره شده در تجزیه و تحلیل انجام شده در مدل اولیه به گره های مرزی مربوطه به زیر مدل یا به سطوح مرزی مربوطه می باشد. برای این برای منظور در تحلیل تنش، نتایج مدل اولیه در فایل پایگاه داده خروجی ذخیره می شود سپس با فراخوان نتایج، این مقادیر به عنوان شرایط مرزی روی سطوح زیر مدل تعریف می گردد. از آنجایی که زیر مدل یک تجزیه و تحلیل جداگانه است، زیر مدل سازی را می توان در هر تعداد از سطوح استفاده کرد. یک زیر مدل می تواند به عنوان مدل اولیه برای زیر مدل بعدی استفاده شود. شکل ۵-ج مدل به کار رفته در تحلیل زیر-مدل را نشان می دهد، کوچکترین المان به کار رفته در این مدل $0/2$ میلی متر می باشد.

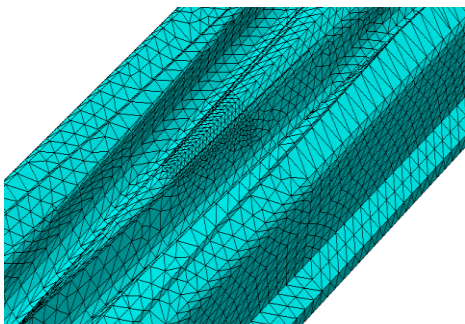


(الف)

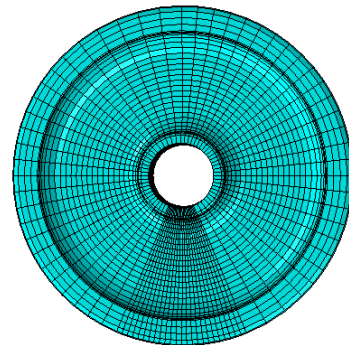


(ب)

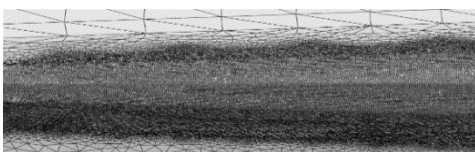
شکل ۴ الف) شماتیک سوزن به همراه اجزای تشکیل دهنده، ب) مونتاژ مجموعه تکه مرکزی و چرخ و تراورسها



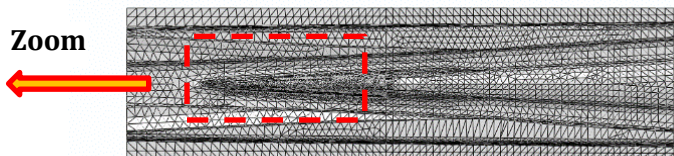
(ب)



(الف)



(د)

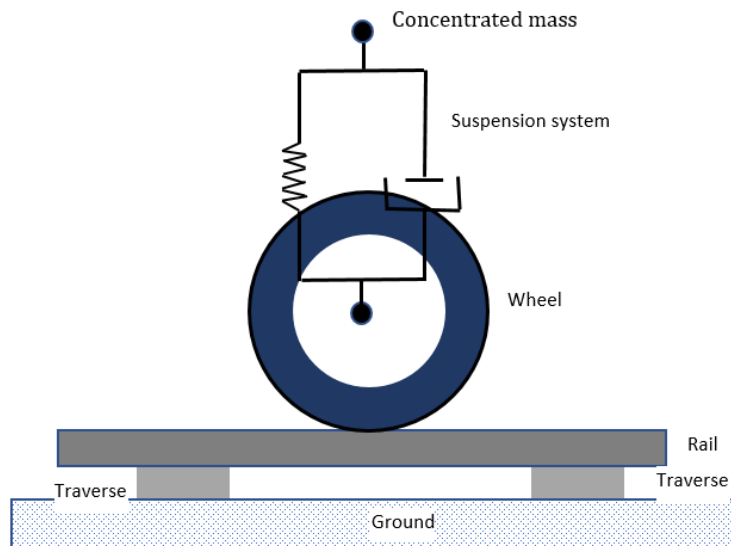


Zoom

(ج)

شکل ۵ مدل المان محدود، الف) چرخ قطار، ب) مدل اولیه قطعه تکه مرکزی با المان درشت، ج) زیرمدل، د) بزرگنمایی المانهای بسیار ریز در زیرمدل

جهت شبیه سازی تأثیر وزن واگن و محور چرخ در تنش های حاصل از عبور چرخ از ریل باله به نیشدلی جرم واگن و محور به صورت جرم متمرکز مطابق شکل ۶ شبیه سازی شده است که با استفاده از فنر و کمک فنر به چرخ متصل شده اند. وزن واگن ۱۰۰ تن فرض شده است که با سرعت ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت از قطعه تکه مرکزی عبور داده می شود. مقدار این سرعت به صورت سرعت زاویه ای به چرخ تعریف شده و با فرض ضریب اصطکاک ۰/۳ حرکت چرخ روی ریل به صورت غلتش محض شبیه سازی شده است. سطح زیرین تراورس ها در تمام جهات حرکتی مقید شده است. همچنین سطح مشترک تراورس ها و تکه مرکزی با استفاده از دستور اتصال^۱ به هم متصل شده اند تا از هرگونه حرکت ریل و تراورس ها پیشگیری شود.

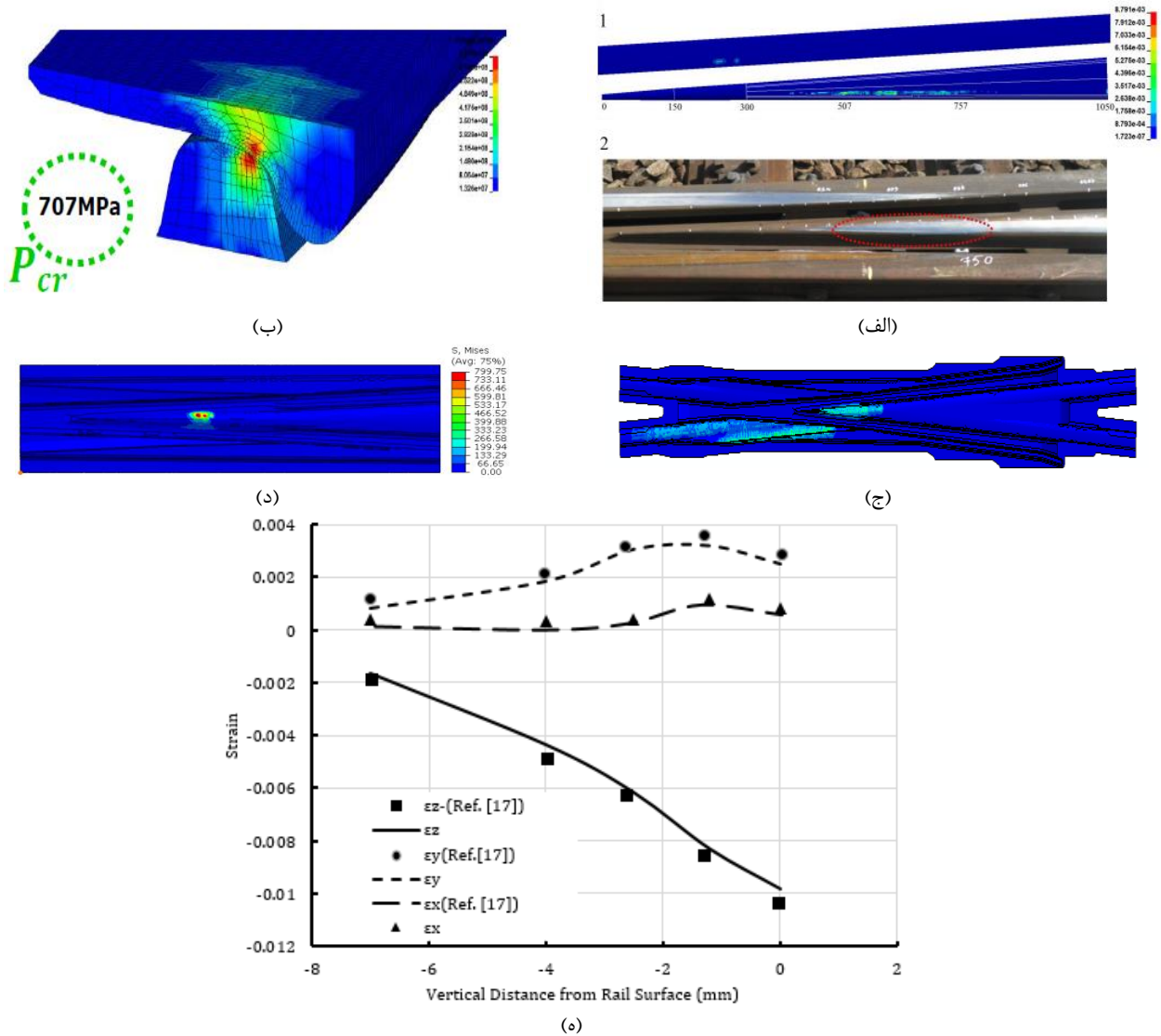


شکل ۶ شماتیک مدل سازی چرخ قطار و تکه مرکزی در نرم افزار

۴- نتایج و بحث

در این پژوهش تحلیل دینامیکی حرکت چرخ روی قطعه تکه مرکزی در نرم افزار آباکوس شبیه سازی شده است. شرایط مرزی در مدل المان محدود جهت صحت سنجی نتایج مطابق مرجع [۱۷] تعریف شده است. در این مرجع تحلیل تنش و عمر خستگی در سوزن های UIC60 متداول در خطوط ریلی با استفاده از تحلیل المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از مدل استاتیکی چرخ و ریل به منظور تحلیل تنش در ریل استفاده شده است. مقادیر نیروهای اعمالی در این مرجع از تحلیل جداگانه دینامیکی چرخ و ریل استخراج و به مدل المان محدود تعریف شده است. در تحلیل دینامیکی انجام گرفته به مرکز چرخ سرعت زاویه ای معادل با ایجاد سرعت خطی ۱۳۰ کیلومتر بر ساعت تعریف شده است. نهایتاً با کاربرد دیدگاه صفحه بحرانی عمر خستگی در سوزن محاسبه شده است. شکل ۷ مقایسه تنش وون-میسز بدست آمده در این پژوهش و نتایج حاصل از آزمایش ها و تحلیل المان محدود در مرجع [۱۷] را نشان می دهد. در شکل ۷-الف نتایج المان محدود و همچنین مشاهدات تجربی حاکی از تغییر فرم پلاستیک در سطح نیشدلی می باشد. مقایسه نتایج شکل های ۷-الف و ج مشاهده می گردد، مدل المان محدود حاضر به خوبی می تواند منطقه ای از ریل را که تحت بارهای اعمالی دچار تغییر فرم پلاستیک ناشی از ضربات حاصله از چرخ به ریل شده را به خوبی پیش بینی کند. همچنین مقایسه نتایج المان محدود مرجع [۱۷] و تحلیل حاضر در شکل های ۷-ب و د حاکی از وجود تطابق خوب بین نتایج عددی تنش وون-میسز ماکزیمم در سطح نیشدلی می باشد. شایان ذکر است در پژوهش حاضر کاربرد روش زیرمدل سازی امکان ریزتر کردن المان ها در منطقه بحرانی را فراهم ساخته که این امر دقت نتایج را در آن منطقه بالاتر می برد. همچنین به منظور بررسی نتایج عددی تحلیل المان محدود، مقادیر کرنش در جهت های مختلف (ϵ_x ، ϵ_y و ϵ_z) در عمق ریل در لحظه عبور چرخ از سطح نیشدلی، با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۷] مورد مقایسه قرار گرفته است. مقایسه نتایج نشان می دهد، مقادیر بدست آمده در این پژوهش قرابت قابل قبولی با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۷] دارد.

¹ Tie

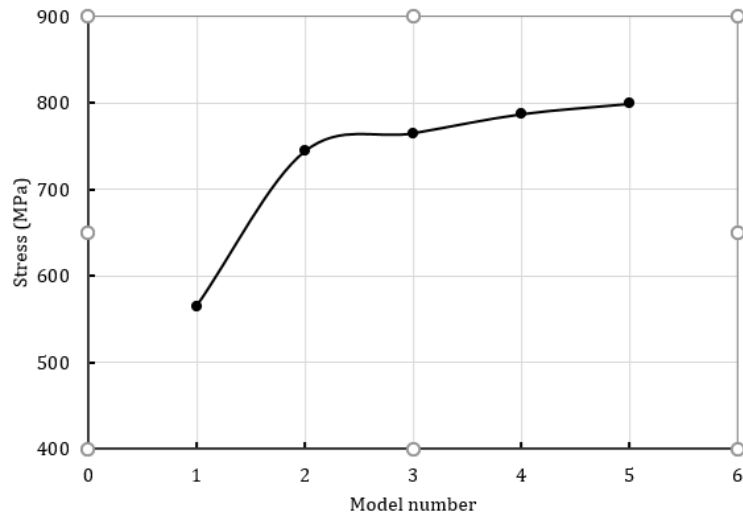


شکل ۷ مقایسه تحلیل تنش در سوزن. الف) و ب) نتایج مرجع [۱۷]، ج) نتیجه المان محدود مدل دینامیکی، د) نتایج تحلیل تنش در زیرمدل، ه) مقایسه کرنش در جهت‌های مختلف (ϵ_z و ϵ_y ، ϵ_x) در عمق ریل با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۷]

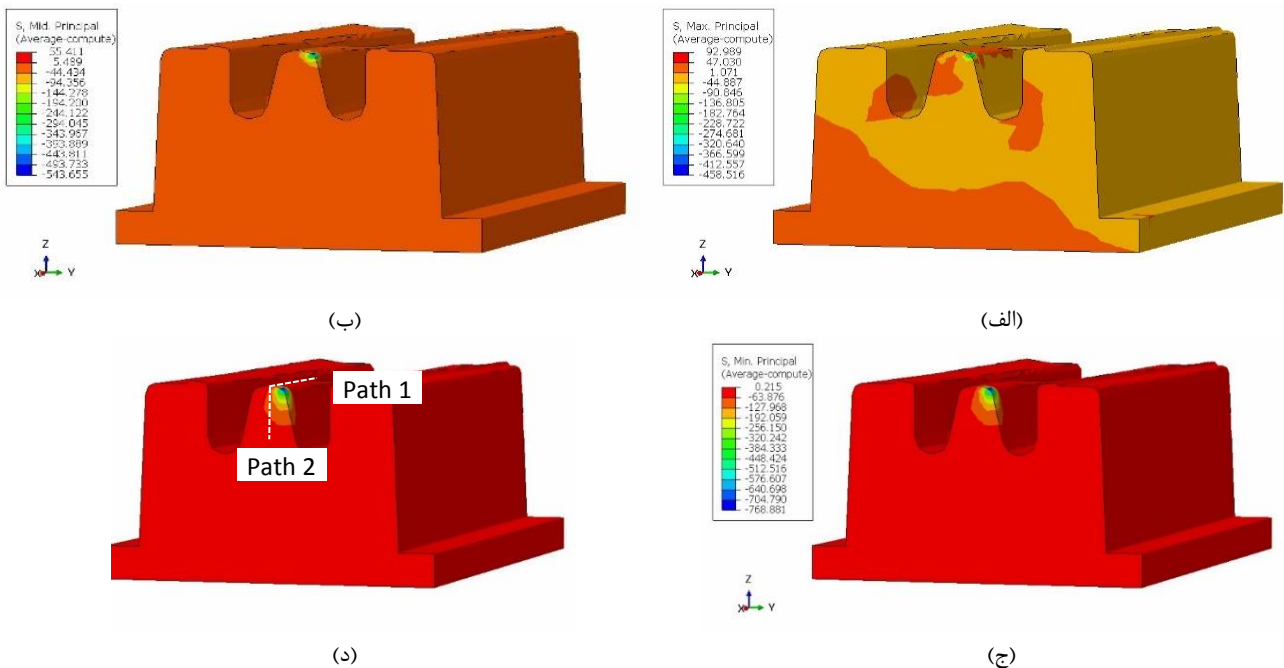
به طوری که در بخش قبل توضیح داده شده است، در این پژوهش از روش زیرمدل سازی به منظور تحلیل تنش در سوزن استفاده شده است. در این روش پس از تحلیل اولیه، المان‌ها در منطقه بحرانی در چند مرحله ریزتر شده و استقلال نتایج از اندازه المان‌ها بررسی شده است. شکل ۸ تأثیر کاربرد زیرمدل سازی و همچنین اندازه المان‌ها در مقدار ماکزیمم تنش ون-مایسز را نشان می‌دهد. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار ماکزیمم تنش در صورت عدم کاربرد زیرمدل سازی (مدل شماره ۱) برابر ۵۶۴ مگاپاسکال بدست آمده اما با کاربرد روش مذکور و ریزتر کردن المان‌ها در ناحیه بحرانی مقدار تنش (مدل شماره ۵) به مقدار ۷۹۹ مگاپاسکال همگرا شده است. قابل ذکر است اندازه کوچکترین المان در مدل شماره ۲ الی ۵ به ترتیب برابر ۱/۴، ۱، ۱/۶ و ۰/۲ میلی‌متر مدل سازی شده است.

شکل ۹ کانتورهای تنش‌های اصلی در منطقه بحرانی نیشدلی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه شده در این شکل، هر سه تنش اصلی در منطقه از نوع فشاری است. در صورت رسم دایره مور در سه بعد مشاهده می‌گردد تنش‌های نرمال در این منطقه فشاری بوده، لذا هر گونه ایجاد و رشد ترک در صفحات ماکزیمم تنش برشی رخ می‌دهد. لذا پیش‌بینی می‌گردد، کاربرد معیار خستگی مبتنی بر تئوری صفحه بحرانی می‌تواند نتایج دقیقی را ارائه دهد. در این تئوری، محاسبات عمر خستگی در صفحه‌ای که از بیشترین احتمال رخداد ترک را دارد، انجام می‌گیرد. جهت محاسبه عمر خستگی در منطقه بحرانی تکه مرکزی، صفحه‌ای در سطح داخلی

تکه مرکزی زیر چرخ قطار تعریف شده و مقادیر تنش‌ها در جهات اصلی در گره‌های موجود در این صفحه استخراج شده است. مقدار تنش‌های اصلی در هر نقطه جهت محاسبه صفحه بحرانی و سپس محاسبه مقادیر پارامترهای روابط تخمین عمر خستگی مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت با استفاده از حل معادلات تخمین عمر، مقدار عمر خستگی در این نقاط محاسبه شده است.



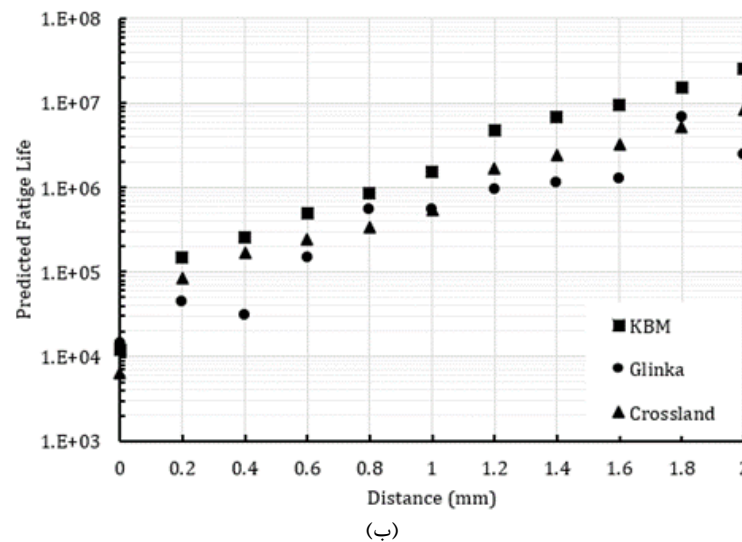
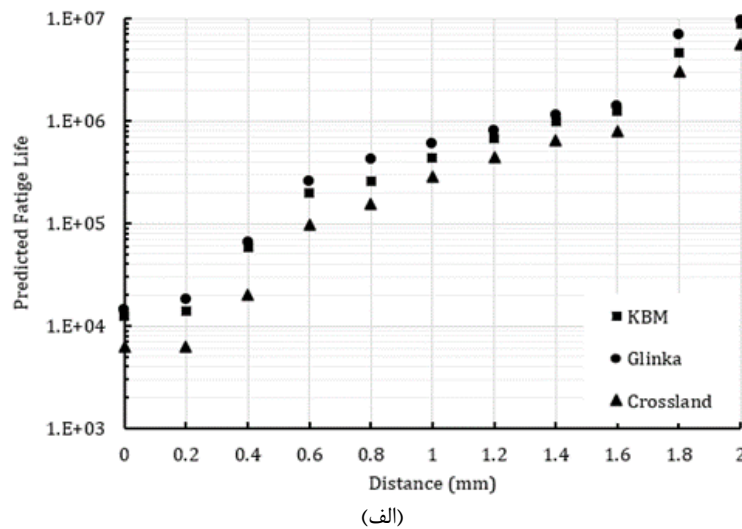
شکل ۸ بررسی تأثیر زیرمدل سازی و استقلال از مش



شکل ۹ کانتورهای تنش اصلی، (الف) تنش σ_I ، (ب) تنش σ_{II} ، (ج) تنش σ_{III} ، (د) نمایش مسیر تخمین عمر

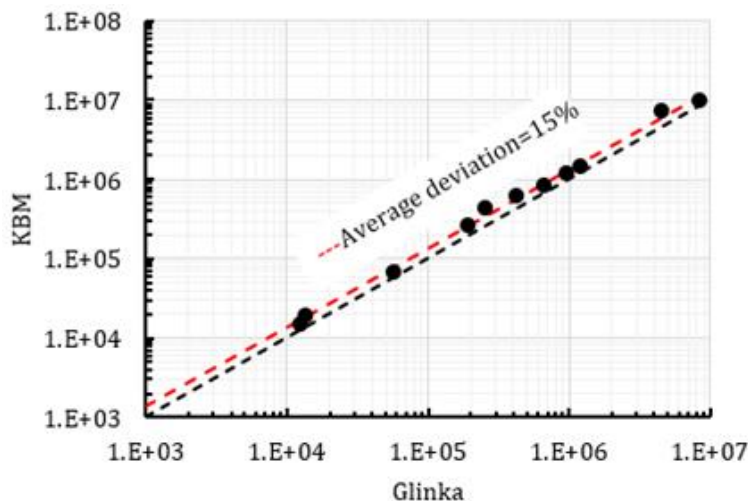
شکل ۱۰ نمودارهای عمر خستگی پیش‌بینی شده در مسیر ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل ۹-د را نشان می‌دهد. در این نمودارها مقادیر عمر خستگی در راستای سطح ریل و عمود بر سطح ریل در جهتی که بیشترین مقدار تنش را دارد با استفاده از روابط ۱ تا ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها، کمترین عمر پیش‌بینی شده در ریل مربوط به نقاط واقع در سطح ریل است. این امر ناشی از وقوع تنش‌های بالا در زمان گذر قطار از بالای سوزن و نیشدلی و ایجاد نیروهای برخورد شدید بین چرخ و سطح ریل است. به طوریکه در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، مقدار کمترین عمر پیش‌بینی شده توسط سه روش تخمین عمر مختلف در این نقطه بین ۶۲۷۷ تا ۱۲۵۵۵ سیکل بدست آمده است. مقدار کمترین عمر گزارش شده در مراجع [۱] و [۱۷] به ترتیب برابر ۱۳۸۵۰ سیکل و

۲۱۰۰۴ سیکل است. شایان ذکر است، در مرجع [۱] از روش المان محدود به همراه تئوری صفحه بحرانی برای خستگی کم چرخه که توسط جیانگ و سهیت‌اغلو جهت [۱۸] پیشنهاد شده جهت پیش‌بینی عمر خستگی استفاده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد، معیارهای کی‌بی‌ام و گلینکا اختلاف کمتر از ۱۰ درصد با نتایج ارائه شده در مرجع [۱] در پیش‌بینی کمترین عمر خستگی در نقطه بحرانی نیشدلی دارد. دلیل اختلاف عمر پیش‌بینی شده در این پژوهش و مرجع [۱۷] ناشی از کاربرد معیارهای تنش محور در مرجع اخیر در پیش‌بینی عمر می‌باشد. معیارهای تنش محور در خستگی کم چرخه به دلیل حضور کرنش‌های پلاستیک از دقت پایین‌تری در پیش‌بینی عمر برخوردار است. مقایسه نمودار تخمین عمر در هر دو مسیر نشان می‌دهد مسیر ۲ که در جهت عمق ریل است وضعیت بحرانی‌تری نسبت به مسیر ۱ دارد. این امر ناشی از وقوع تنش‌های فشاری بیشتر در عمق ریل می‌باشد. شایان ذکر است با توجه به ایجاد تنش‌های فشاری در عمق ریل هرگونه ایجاد و رشد ترک در صفحات برشی خواهد بود.

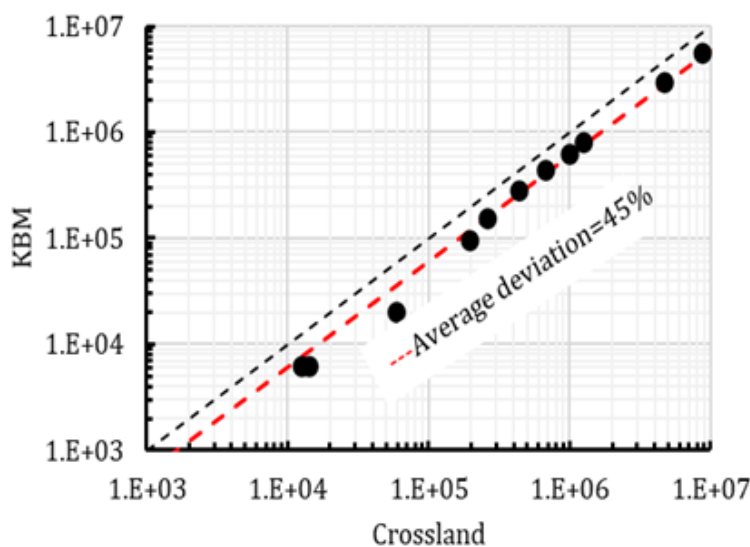


شکل ۱۰ نتایج پیش‌بینی عمر خستگی، الف) مسیر ۲ در عمق ریل، ب) مسیر ۱ در سطح ریل

شکل ۱۱ مقایسه نتایج سه معیار بکاربرده در تخمین عمر را نشان می‌دهد. هرچه قدر نتایج به خط ۴۵ درجه نزدیکتر باشد، نزدیکتر بودن نتایج به هم را نشان می‌دهد. به طوریکه در این شکل نشان داده شده است، دو معیار گلینکا و کی‌بی‌ام میانگین انحراف ۱۵ درصد از خط ۴۵ درجه داشته در حالی که معیار کی‌بی‌ام و کراسلند میانگین انحراف ۴۵ درصد دارند. با توجه به نزدیکتر بودن نتایج تخمین عمر این دو معیار به نتایج ارائه شده در مرجع [۱] می‌توان نتیجه گرفت معیارهای کی‌بی‌ام و گلینکا جهت تخمین عمر ریل قابل کاربرد می‌باشند.



(الف)



(ب)

شکل ۱۱ مقایسه نتایج معیارهای به کار برده در تخمین عمر (الف): گلینکا و کی بی ام (ب): کراسلند و کی بی ام

۵- نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف تخمین عمر خستگی تکه مرکزی سوزن های ریل های راه آهن ساخته شده از فولاد هادفیلد و با استفاده از تئوری صفحه بحرانی انجام شده است. با توجه به اهمیت بالای این قطعه در ایمنی و عملکرد سیستم حمل و نقل ریلی، تحلیل تنش و تخمین عمر خستگی این قطعه که تحت بارهای شدید حاصل از عبور قطار می باشد، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. جهت انجام تحلیل تنش، انجام آزمون های مکانیکی جهت بدست آوردن خواص مکانیکی قطعه تکه مرکزی و تراورس ها ضروری می باشد. در این پژوهش رفتار مکانیکی فولاد مورد استفاده در تکه مرکزی و همچنین رفتار الاستیک تراورس ها به ترتیب با انجام آزمون های کشش و فشار بدست آمده است. با استفاده از نتایج حاصل از این آزمون ها رفتار الاستیک-پلاستیک قطعه تکه مرکزی و رفتار الاستیک تراورس ها شبیه سازی شده است. جهت بدست آوردن رفتار خستگی فولاد، نمونه ها تحت آزمون خستگی قرار گرفته و نمودار کرنش عمر استخراج شده است. سپس نتایج نمودار کرنش عمر به همراه مدل های خستگی چند وجهی جهت و تئوری صفحه بحرانی تخمین عمر مورد استفاده قرار گرفته اند. در تحلیل تنش المان محدود از تکنیک زیرمدل سازی استفاده شده است. در این روش با ریزتر کردن المان ها در منطقه بحرانی مقادیر تنش با دقت بیشتری در زمان بسیار کمتری محاسبه می گردد.

نتایج تحلیل تنش نشان می دهد، کاربرد روش زیرمدل سازی در عین کاهش قابل توجه زمان تحلیل منجر به تحلیل دقیق تر تنش در موضع بحرانی علی الخصوص در قسمت هایی که تمرکز تنش بالا وجود دارد، می گردد. تحلیل تنش نشان می دهد در موضع بحرانی

مقادیر تنش اصلی فشاری بوده لذا با مد نظر قرار دادن اصول تئوری صفحه بحرانی در خستگی تحت بارهای چند وجهی هر گونه ایجاد و رشد ترک در صفحات برش ماکزیمم رخ می دهد. جهت تخمین عمر سه معیار مختلف تخمین عمر که قابلیت تخمین عمر خستگی در قطعات تحت بارگذاری چند وجهی دارد استفاده شده که نتایج نشان می دهد دو معیار کی بی ام و گلینکا نتایج نزدیک به هم داشته و مقدار کمترین عمر پیش بینی شده توسط این مدل ها نزدیک به نتایج گزارش در مراجع می باشد.

فهرست علائم

S_k	پارامتر وابسته به جنس
J_{2a}	دامنه نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی
k	ثابت وابسته به جنس
b	ثابت وابسته به جنس
c	ثابت وابسته به جنس

علائم یونانی

γ	کرنش برشی
ε_n	کرنش نرمال
σ_n	تنش نرمال در صفحه بحرانی
σ_H	تنش هیدرواستاتیک
$\hat{\sigma}_f$	ثابت وابسته به جنس
$\hat{\sigma}'_f$	ثابت وابسته به جنس

زیر نویس ها

max بیشینه

References

- [1] Shahravi M, Rezasefat M. Numerical Analysis of Rolling Contact Fatigue in Common Turnouts of Iran Railway Track. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2018 Dec 21;52(8):2029-44. doi: 10.22060/mej.2018.14651.5906 [In Persian]
- [2] Sadeghi J, Akbari B. Field investigation on effects of railway track geometric parameters on rail wear. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. 2006 Nov;7:1846-55. doi: 10.1631/jzus.2006.A1846
- [3] Kim JK, Kim CS. Fatigue crack growth behavior of rail steel under mode I and mixed mode loadings. Materials Science and Engineering: A. 2002 Dec 15;338(1-2):191-201. doi: 10.1016/S0921-5093(02)00052-7
- [4] Ekberg A, Kabo E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview. Wear. 2005 Mar 1;258(7-8):1288-300. doi: 10.1016/j.wear.2004.03.039
- [5] Ringsberg JW, Lindbäck T. Rolling contact fatigue analysis of rails including numerical simulations of the rail manufacturing process and repeated wheel-rail contact loads. International Journal of fatigue. 2003 Jun 1;25(6):547-58. doi: 10.1016/S0142-1123(02)00147-0
- [6] Masoudi Nejad R, Salehi SM, Farrahi GH. Simulation of railroad crack growth life under the influence of combination of mechanical contact and thermal loads. International Journal of Railway Research. 2015 Nov 10;2(2):19-28.
- [7] Kwon SJ, Seo JW, Jun HK, Lee DH. Damage evaluation regarding to contact zones of high-speed train wheel subjected to thermal fatigue. Engineering Failure Analysis. 2015 Sep 1;55:327-42. doi: 10.1016/j.engfailanal.2015.07.021
- [8] Liu Y, Liu L, Mahadevan S. Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM. Engineering fracture mechanics. 2007 Nov 1;74(17):2659-74. doi: 10.1016/j.engfracmech.2007.02.012
- [9] Gomes VM, Eck S, De Jesus AM. Cyclic hardening and fatigue damage features of 51CrV4 steel for the crossing nose design. Applied Sciences. 2023 Jul 18;13(14):8308. doi: 10.3390/app13148308

- [10] Zhang S, Liu Q, Spiriyagin M, Wu Q, Ding H, Wen Z, Wang W. Gaps, challenges and possible solution for prediction of wheel-rail rolling contact fatigue crack initiation. *Railway Engineering Science*. 2023 Sep;31(3):207-32. doi: [10.1007/s40534-023-00302-8](https://doi.org/10.1007/s40534-023-00302-8)
- [11] Kucharski S, Mackiewicz S, Katz T, Starzyński G, Ranachowski Z, Woźniacka S. Evaluation of fatigue damage of a railhead using an indentation test, acoustic methods and microstructural observations. *International Journal of Fatigue*. 2023 Feb 1;167:107346. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2022.107346](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107346)
- [12] Ghazanfari M, Tehrani PH. Increasing fatigue crack initiation life in butt-welded UIC60 rail by optimization of welding process parameters. *International Journal of Fatigue*. 2021 Oct 1;151:106367. doi: [10.1016/j.ijfatigue.2021.106367](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106367)
- [13] Gao Y, Wang S, Xu J, Liu Y, Dong Z, Wang P, Yang F. Numerical investigation of crack initiation on rail surfaces considering laminar plasma quenching technology. *Tribology International*. 2021 Feb 1;154:106755. doi: [10.1016/j.triboint.2020.106755](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106755)
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, ASTM E8-13a; 2013.
- [15] American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Fatigue Tests of Metallic Materials. ASTM E466-15; 2015.
- [16] Esmaeili F, Rahmani A, Barzegar S, Afkar A. Prediction of fatigue life for multi-spot welded joints with different arrangements using different multiaxial fatigue criteria. *Materials & Design*. 2015 May 5;72:21-30. doi: [10.1016/j.matdes.2015.02.008](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.02.008)
- [17] Xin L, Markine VL, Shevtsov IY. Numerical analysis of rolling contact fatigue crack initiation and fatigue life prediction of the railway crossing. In *CM2015: 10th International Conference on Contact Mechanics*, Colorado Springs, USA 2015 Aug (Vol. 30).
- [18] Jiang Y, Sehitoglu H. A model for rolling contact failure. *Wear*. 1999 Jan 1;224(1):38-49. doi: [10.1016/S0043-1648\(98\)00311-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(98)00311-1)