

تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیرسطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران

جواد علیزاده کاکلر (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

علی اصغر جعفری، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

Email: j_alizadeh@dena.kntu.ac.ir

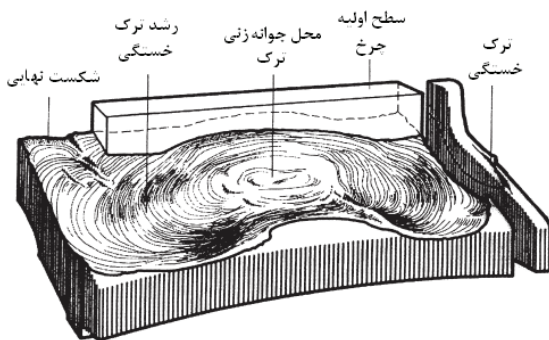
چکیده

در دهه اخیر، کاهش میزان سایش، افزایش بار محوری چرخ‌ها و سرعت سیر قطارها، آسیب اصلی چرخ‌های فولادی را از سایش به خستگی تماس غلتشی (RCF) تغییر داده است. RCF باعث ایجاد ترک‌های سطحی و زیرسطحی می‌شود. ترک‌های سطحی در تقابل با سایش عمدتاً از بین می‌روند اما ترک‌های زیرسطحی رشد کرده و منتج به شکست‌های عمیق‌تر و سانحه‌خیزتر می‌شوند. داشتن معیاری از طول ترک آستانه و بحرانی برای تعیین امکان رشد ترک‌های تشخیص داده شده در چرخ‌ها و نیز شرایط بحرانی ترک‌های زیرسطحی، امری حیاتی در فرایند نگهداری و تعمیرات سامانه‌های حمل و نقل ریلی به شمار می‌آید. در این مقاله، ابتدا با تحلیل اجزا محدود تماس چرخ منوبلوک گرید RYT و ریل UIC60 سامانه ریلی ایران در نرم‌افزار آباکوس به استخراج دامنه ضریب شدت تنش ترک زیرسطحی اقدام شده است. سپس با استفاده از روابط مکانیک شکست، روابط تقریبی ارائه شده در مقالات و خواص مکانیکی فولاد RYT، طول ترک آستانه و بحرانی در چرخ فولادی سامانه ریلی ایران تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترک زیرسطحی با طول تقریبی ۳ میلی‌متر در چرخ، قابلیت رشد تدریجی را دارا بوده و قبل از رسیدن به طول بحرانی و وقوع شکست بحرانی، به دلیل محدودیت‌های هندسی منجر به شکست چرخ خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: خستگی تماس غلتشی، ترک زیرسطحی، طول ترک آستانه، طول ترک بحرانی.

۱. مقدمه

زیرسطحی در کنار ترک‌های سطحی، بیشتر بودن سخت‌شوندگی ماده در سطح، وجود تنش‌های پسماند فشاری در سطح و وجود عیوب مادی زیرسطحی است. چگونگی رشد ترک زیرسطحی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل رشد محیطی ترک حدود ۳۰۰ میلی‌متر و بیشترین عمق آن زیر سطح غلتش ۱۴ میلی‌متر است [۳]. مباحث مربوط به خستگی تماس غلتشی به صورت جداگانه در مورد چرخ و ریل به طور مبسوط در مراجع [۴ و ۵] قابل دسترسی است.



شکل ۱. چگونگی رشد ترک خستگی ایجاد شده در عمق ۴ میلی‌متری [۳]

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بررسی رشد ترک‌های زیرسطحی در سیستم ریلی انجام شده است [۶ و ۷ و ۸]. بهترین راه برای تشخیص بحرانی بودن ترک پس از شناسایی، مقایسه طول آن با طول ترک بحرانی است. علاوه بر این در صنایعی که ایمنی نقش مهمی در آنها ایفا می‌نماید، تشخیص رشد یا عدم رشد ترک شناسایی شده نیز می‌تواند حائز اهمیت باشد. این تشخیص نیز از طریق مقایسه طول ترک شناسایی شده با طول ترک آستانه صورت می‌گیرد. در این مقاله با اعمال شرایط کاری سامانه ریلی ایران، ابتدا تماس غلتشی چرخ بدون ترک با ریل به صورت سه بعدی و با استفاده از روش اجزا محدود شبیه‌سازی و صحنه‌گذاری شده است. سپس با اضافه نمودن ترک زیرسطحی به چرخ تاریخچه ضرایب شدت تنش ترک زیرسطحی طی یک دور غلتش کامل چرخ روی ریل استخراج یافته است. نهایتاً با استفاده از روابط مکانیک شکست، روابط تقریبی ارائه شده در مقالات و خواص مکانیکی فولاد RVT، طول ترک آستانه و بحرانی در

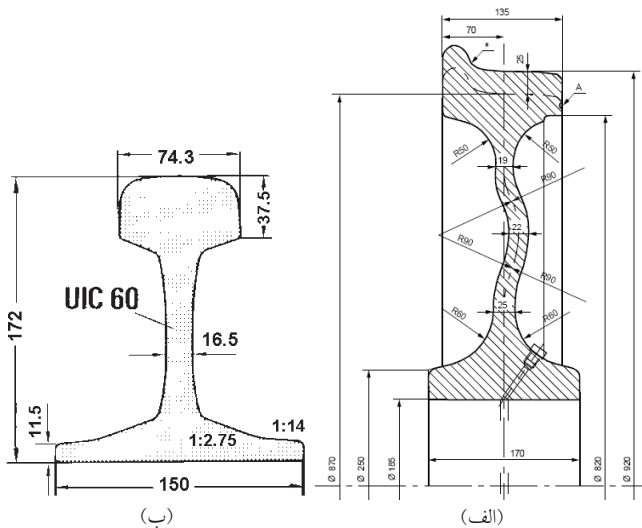
سایش و خستگی تماس غلتشی (RCF^۱) دو عیب عمده در چرخ‌های فولادی پرلیتیکی وسایط نقلیه ریلی به حساب می‌آیند. در سال‌های اخیر، پیدایش قطارهای سرعت بالا و افزایش بارهای محوری منجر به بزرگ‌تر شدن نیروهای تماسی چرخ و ریل شده است. لذا این مسئله باعث گردیده تا طراحی چرخ و ریل به سمت بهینه‌شدن پیش رفته و در نتیجه آسیب اصلی طوقه چرخ از سایش به خستگی تغییر یابد. برخلاف کندشدن فرآیند تخریب سایش، خستگی گسترش یافته و منجر به شکست‌های ناگهانی در چرخ‌ها یا جداشدن بخشی از ماده سطح غلتش^۲ شده است. این واماندگی‌ها می‌توانند موجب آسیب دیدن ریل‌ها، تراورس‌ها، یاتاقان‌ها، سیستم تعلیق قطارها و در بعضی موارد خروج از خط‌های خطرناک شود.

تمامی اشکال واماندگی فلزات که مربوط به سیکل‌های تنش تماسی تکرار شونده است، خستگی تماس غلتشی نامیده می‌شود [۱]. خستگی تماس غلتشی جزء دسته‌ای از آسیب‌هاست که در سطح چرخ (ویا ریل) و یا زیر سطح آن ظاهر می‌شود. مشکل RCF در راه‌آهن از سال ۱۹۹۰ رشد کرده و در سال ۲۰۰۰ با افزایش موارد خروج از خط مورد توجه جهانی قرار گرفت. بر طبق آمارهای FRA^۳ طی هشت سال یعنی از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۲، RCF عامل اصلی ۱۲۲ مورد خروج از خط بوده و در بیش از ۱۶۰ مورد به خروج از خط کمک کرده است. علاوه بر این، سالانه ۳۰۰ میلیون یورو هزینه تحمیلی RCF به سامانه ریلی اروپاست [۲].

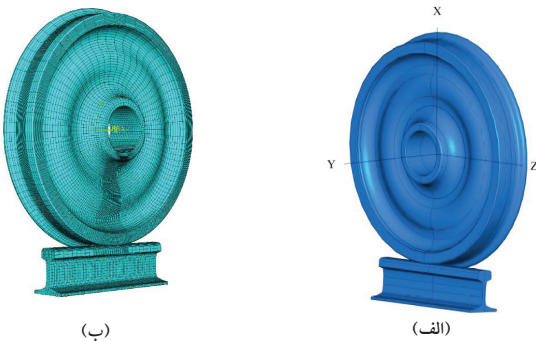
دو فرآیند اصلی حاکم بر RCF هستند: جوانه‌زنی ترک و رشد آن. رشد ترک‌های RCF به دو شکل سطحی و زیرسطحی مطرح است. ترک‌های سطحی در تقابل با سایش عمدتاً از بین می‌روند اما ترک‌های زیرسطحی رشد کرده و منتج به شکست‌های عمیق‌تر و سانحه‌خیزتر می‌شوند. خطرناک‌ترین نوع واماندگی خستگی چرخ‌های راه‌آهن ناشی از رشد ترک‌های ایجاد شده در زیر سطح است. ترک‌های زیرسطحی در چرخ‌های فولادی می‌تواند از ۴ تا بعضاً ۲۰ میلی‌متر زیر سطح ایجاد شوند. علت ایجاد ترک‌های

تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیرسطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران

میلی متر (از $y = 50 \text{ mm}$ تا $y = 100 \text{ mm}$) به عنوان یک جزء جدید تعریف شده است. با این تعریف می توان در این ناحیه از المان ریز و در سایر قسمت های چرخ که به دلیل دوری از منطقه تماس و صفر بودن تقریبی تنش در آن نواحی، تأثیری بر جواب ها نخواهند داشت از المان های درشت تر استفاده نمود.



شکل ۲. (الف) نقشه سطح مقطع چرخ منوبلوك با قطر ۹۲۰ میلی متر، (ب) نقشه سطح مقطع ریل UIC ۶۰ [۱۱۰].



شکل ۳. (الف) چرخ و ریل اسمبل شده و موقعیت محورها نسبت به آن، (ب) المان بندی هدفمند چرخ و ریل

برای مدل سازی هندسی ریل، پروفیل UIC ۶۰ مورد استفاده قرار گرفت که پروفیل غالب ریل های سامانه ریلی ایران به حساب می آید. نقشه سطح مقطع این ریل در شکل ۲ ب آورده شده است. طول ریل مدل شده، طولی از ریل است که بین دو تراورس قرار دارد که برابر ۶۰۰ میلی متر می باشد. مدل چرخ و ریل هر دو از نوع سه بعدی شکل پذیر انتخاب شدند.

چرخ فولادی سامانه ریلی ایران تعیین شده است. برای طول ترک بحرانی، با توجه به شرایط خاص بارگذاری چرخ، از معیار مود ترکیبی استفاده شده است.

۲. تحلیل اجزای محدود تماس چرخ بدون ترک با ریل

در این مطالعه، ابتدا تماس چرخ بدون ترک با ریل مدل سازی و حل شده تا بتوان نتایج آن را با استفاده از تئوری تحلیلی هرتر صحه گذاری نمود و سپس اقدام به تحلیل این تماس در حضور ترک زیرسطحی نمود. علاوه بر این، دامنه تنش روی صفحه ترک زیرسطحی در مدل بدون ترک برای تعیین طول ترک بحرانی و آستانه نیاز می باشد. مراحل مختلف تحلیل اجزای محدود تماس چرخ و ریل (دارای ترک یا بدون ترک) در نرم افزار اجزای محدود آباکوس نسخه ۶٫۷ انجام شده است. برای مدل سازی هندسی چرخ، از پروفیل ORE-S1002 [۹] که در حال حاضر پروفیل مورد استفاده در تراش چرخ های سامانه ریلی ایران است، استفاده گردید. سایر قسمت های هندسه سطح مقطع چرخ نیز با استفاده از استاندارد UIC ۵۱۵-۱۰ [۱۰] (شکل ۲ الف) مدل شد. نوع چرخ انتخابی برای این مطالعه، منوبلوك با قطر ۹۲۰ میلی متر است که قطر چرخ نو مورد استفاده در سامانه ریلی ایران می باشد. مبدأ دستگاه مختصات مرجع، روی محور چرخ و در محل سطح داخلی قرار داده شده است. موقعیت محورهای مختصات در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به غیرخطی بودن تحلیل تماس، لازم است تا برای به دست آوردن جواب های دقیق تر، در ناحیه تماس چرخ و ریل از المان های ریز (اندازه حدودی ۳ میلی متر) استفاده شود. در صورتی که این اندازه المان برای کل چرخ انتخاب شود، بیش از یک میلیون المان خواهیم داشت در حالی که نرم افزار آباکوس قادر به حل مسئله ای با ماکزیمم تعداد المان ششصد هزار است. حتی در صورت توانایی نرم افزاری، امکان سخت افزاری حل چنین مسئله ای وجود ندارد. بنابراین در قسمت مدل سازی هندسی، قطعی از سطح چرخ و حول ناحیه تماس با اندازه محیطی ۳۰ درجه، اندازه شعاعی ۱۴ میلی متر و اندازه محوری ۵۰

جدول ۳. خواص مکانیکی فولاد ریل UIC۶۰ در دمای ۲۴ C [۱۳]

تنش تسلیم، (MPa) S _y	مدول الاستیسیته (GPa) E ،	مدول پلاستیک، (GPa) E _p	ضریب پواسون، ν
۴۸۳	۲۰۶٫۹	۲۲٫۷	۰٫۲۹۵

روش حل مسئله به صورت استاتیکی انتخاب شد. در این روش از اثرات اینرسی و نیز تغییرات مادی متغیر با زمان (مانند خزش و ویسکوالاستیسیته) صرف نظر می‌شود. اندرکش چرخ و ریل، از نوع تماس سطح به سطح تعریف شده است. سطح طوقه چرخ به عنوان سطح اصلی^۷ و سطح تاج ریل، سطح فرعی^۸ انتخاب گردید. برای تحلیل اصطکاک تماس چرخ و ریل از فرمولاسیون پنالتی استفاده شده و ضریب اصطکاک ماده در تمام جهات برابر ۰٫۳ تعریف شده است. بارگذاری و شرایط مرزی چرخ، از طریق تعریف یک نقطه مرجع به مختصات (۰،۷۰،۰) و اتصال صلب آن با سطح داخلی چرخ یعنی جایی که محل اتصال با محور است، صورت پذیرفت.

واگن‌های آلمان شرقی به عنوان نمونه واگن مورد نظر در این مطالعه از سری واگن‌های موجود در سامانه مسافری ایران، در حالت مسافرگیری شده دارای وزنی معادل با ۵۱ تن می‌باشند [۱۴]. لذا با فرض مساوی بودن بار تحمل شده توسط هر یک از چرخ‌ها، بار اعمالی به هر چرخ در حالت استاتیکی $6375 \div 8 = 796.875$ تن می‌باشد. به جای احتساب نیروی اینرسی به طور مستقیم، از ضریب ۱/۵ توصیه شده توسط مرجع [۱۵] برای وزن واگن استفاده شده است. بنابراین، نهایتاً باری که در حالت دینامیکی توسط هر چرخ تحمل می‌شود ۹/۵۶۲۵ تن یا معادل ۹۳/۸۰۸ کیلونیوتن خواهد بود. این بار در مدل حاضر به نقطه مرجع تعریف شده و در جهت منفی محور X اعمال شده است. علاوه بر این با فرض سرعت ثابت، گشتاور محرکی برابر ۹۳/۸۰۸ نیوتن متر محاسبه و در جهت +Y به نقطه مرجع اعمال شده است. درجه آزادی چرخ در دو راستای X و Z کاملاً مقید شده و راستای Y آزاد گذاشته شده تا بتواند در اثر وزن واگن پایین بیاید. در دو طرف ریل نیز شرایط مرزی کاملاً گیردار اعمال گردیده است.

مهم‌ترین مرحله مدل‌سازی اجزای محدود المان‌بندی است. پس از

برای مطالعه حاضر، جنس چرخ از فولاد گرید RVT در نظر گرفته شده است چراکه در حال حاضر عمده خریدهای چرخ در سامانه ریلی ایران از این جنس صورت می‌گیرد. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این گرید فولاد به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. جنس ریل نیز از فولاد گرید UIC۶۰ بوده که خواص مکانیکی آن در جدول ۳ ارائه گردیده است. مدل مادی چرخ و ریل الاستوپلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیک خطی انتخاب شد. سخت‌شوندگی سینماتیک در واقع بیانگر انتقال سطح تسلیم در فضای تنش بوده که اثرات باشینگر و تعدیل پلاستیک^۶ را لحاظ می‌نماید. همچنین جنس چرخ و ریل، همگن و ایزوتروپیک تعریف شده است.

پس از تعیین خواص و مدل مادی، چرخ و ریل مدل شده در موقعیت مناسبی نسبت به هم قرار داده شدند. فرض بر این است که محل تماس چرخ روی ریل نقطه‌ای به فاصله ۷۰ میلی‌متر از لبه داخلی فلنج باشد. یکی از مسائل مهم به هنگام نصب ریل، شیبی است که به زیر ریل و به سمت مرکز دو ریل داده می‌شود. این شیب معمولاً دو مقدار ۱:۲۰ یا ۱:۴۰ را داراست که در ایران بیشتر از شیب ۱:۲۰ استفاده می‌شود. لذا برای قرار گرفتن چرخ و ریل در موقعیت نسبی مناسب، ابتدا به میزان $\text{Arctan}(1/20) = 2/86$ ریل را حول محور Z دوران داده و سپس نقطه وسط تاج ریل را در امتداد نقطه غلتان چرخ قرار داده و نهایتاً ریل در راستای X به اندازه‌ای جابه‌جا شده که در تماس با چرخ قرار گیرد. نقطه تماس چرخ و ریل در وسط طول ریل یعنی به فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از سر ریل است.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی فولاد RVT (برحسب ماکزیمم درصد وزنی) [۱۲]

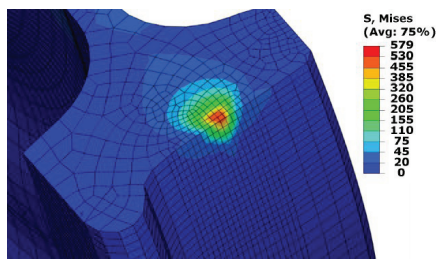
٪ ۰/۵۲	C	٪ ۰/۴۰	Si	٪ ۰/۰۸	Mn
٪ ۰/۰۴	P	٪ ۰/۰۴	S	٪ ۰/۰۳	Cr
٪ ۰/۰۳	Cu	٪ ۰/۰۸	Mo	٪ ۰/۰۳	Ni
٪ ۰/۰۵	V	٪ ۰/۰۶	Cr+Mo+Ni		

جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد RVT [۱۲]

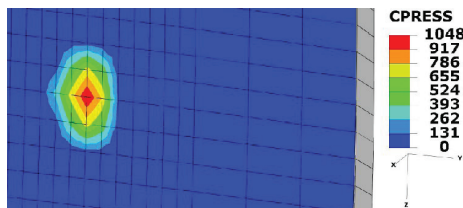
استحکام نهایی (MPa)	مینیمم درصد کشیدگی (%)	مینیمم مقدار ضربه شارپی در ۲۰°C (J)	محدوده سختی برینل (HB)
۸۲۰ تا ۹۴۰	۱۴	۱۵	۲۴۱ تا ۲۷۷

تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیر سطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران

اجزای محدود نشان داد که تحت این شرایط بارگذاری و هندسه و ماده، سطح چرخ در محل تماس اندکی دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود. با لحاظ نمودن تغییر شکل پلاستیک، با توجه به نمودار تنش- کرنش و به دلیل کم‌تر بودن مدول پلاستیک (E_p) نسبت به مدول الاستیک (E)، مقدار ماکزیم تنش عمودی فشاری کاهش و کرنش کل افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. افزایش کرنش در حالت تحلیل الاستوپلاستیک منجر به افزایش تغییر شکل و نهایتاً افزایش مساحت ناحیه تماس بین چرخ و ریل می‌شود. همچنین با توجه به برابر بودن بار وارده به چرخ در دو تحلیل الاستیک هر تریز و الاستوپلاستیک اجزا محدود و نیز استاتیک بودن مسئله، طبیعی است که در صورت کاهش یکی از دو پارامتر ماکزیم تنش عمودی فشاری و مساحت سطح ناحیه تماس، دیگری افزایش یابد. افزایش مساحت سطح ناحیه تماس و کاهش ماکزیم تنش عمودی فشاری در تحلیل الاستوپلاستیک نسبت به تحلیل الاستیک هر تریز در مراجع مختلفی از جمله [۱۸] نیز گزارش شده است. بنابراین نهایتاً با مقایسه نتایج این دو روش حل و مطالب بیان شده، علاوه بر صحه‌گذاری نتایج حل اجزای محدود می‌توان ادعا نمود که دقت آن بیشتر از حل مسئله به کمک تئوری هر تریز می‌باشد.



(الف)

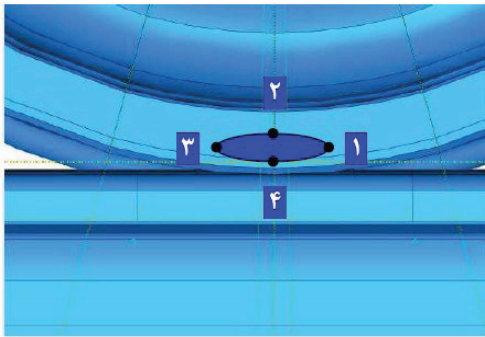
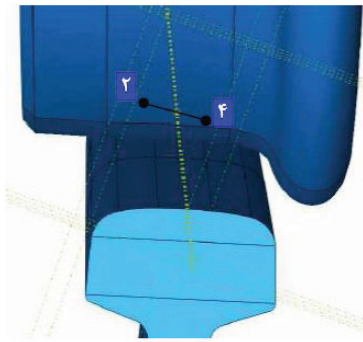


(ب)

شکل ۴. (الف) تغییرات شعاعی تنش وان میسز در ناحیه تماس، (ب). بیضی هر تریز و تنش عمودی فشاری چرخ در محل تماس آن با ریل.

بررسی همگرایی جواب، از اندازه المان تقریبی ۳ میلی‌متر برای قطاع محل تماس چرخ و ناحیه تماس ریل، و اندازه تقریبی ۶ و ۱۰ میلی‌متر به ترتیب برای سایر نقاط ریل و چرخ استفاده شده است. این اندازه‌ها در انطباق با نتیجه مرجع [۱۶] نیز می‌باشند. همچنین برای المان‌های چرخ در جهت محیطی از ضریب رشد استفاده شد. المان مورد استفاده برای المان‌بندی مدل چرخ و ریل، المان سه‌بعدی شش‌وجهی ۸ گره‌ای خطی (C_3D_8R) است. تحلیل‌های انجام شده در این مقاله با استفاده از کامپیوتر شخصی با مشخصات CPU با سرعت پردازش ۲/۴ گیگاهرتز، حافظه RAM ۲ مگابایت صورت گرفته است.

میدان تنش وان میسز در ناحیه تماس چرخ در شکل ۴الف نشان داده شده است. همان‌طور مشاهده می‌شود، ماکزیم تنش وان میسز مقداری برابر ۵۷۹ مگاپاسکال و محل وقوع آن ۳ میلی‌متر زیر سطح غلتان چرخ است. این اندازه تنش نشان دهنده تغییر شکل پلاستیک ماده چرخ در محل تماس می‌باشد. یکی از بهترین راه‌های صحه‌گذاری حل اجزای محدود در این مورد استفاده از تئوری تماس هر تریز می‌باشد. خروجی‌های این تئوری اقطار ناحیه تماس با فرض بیضی بودن آن و نیز ماکزیم تنش فشاری عمودی در سطح تماس است. براساس نتایج حل اجزای محدود (شکل ۴ب)، قطر کوچک و بزرگ بیضی منطقه تماس تقریباً برابر به ترتیب ۱۲/۸ و ۱۸/۰ میلی‌متر، مساحت بیضی تقریباً ۱۷۷ میلی‌متر مربع و ماکزیم تنش فشاری عمودی ۱۰۴۸ مگاپاسکال می‌باشد. محاسبات تئوری هر تریز [۱۷] برای مسئله حاضر، ماکزیم تنش عمودی، قطر کوچک و بزرگ بیضی تماس هر تریز را به ترتیب ۱۰۸۷ مگاپاسکال، ۱۲/۸۲ و ۱۲/۸۶ میلی‌متر نتیجه می‌دهد. مقایسه نتایج اجزای محدود با تئوری تحلیلی هر تریز، به ترتیب ۳/۷ درصد و ۲۷ درصد خطا در مورد ماکزیم فشار عمودی و مساحت بیضی تماس نشان می‌دهد. درصد عمده‌ای از خطای موجود بین نتایج ناشی از فرض تئوری هر تریز مبنی بر الاستیک باقی‌ماندن ماده در پدیده تماس است. به عبارت دیگر تئوری هر تریز فرض می‌کند که در نتیجه تماس بین دو جسم، تغییر شکل پلاستیک نداریم در حالی که نتایج تحلیل



شکل ۵. موقعیت ترک بیضوی نسبت به چرخ و رؤس آن، نمایش از (الف) جانب و (ب) روبرو.

برای تعریف سطح بیضی مدل شده به عنوان سطح ترک، روش تعیین شکاف ۹ که در نرم افزار آباکوس برای تعریف ترک تعبیه شده است مورد استفاده قرار گرفت. در واقع، با این تعریف نرم افزار روی سطح مورد نظر یک جفت گره روی هم می ریزد و به آنها امکان دور و جد شدن از هم را می دهد.

برای المان بندی ترک نیز، با تقسیم بندی مناسب، چهار ردیف المان هدفمند حول جبهه ترک برای محاسبه چهار انتگرال کانتوری ایجاد شد (شکل ۶). اندازه شعاعی المان های ردیف اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب 0.045 ، 0.08 ، 0.15 و 0.5 میلی متر و تعداد المان ها در جهت محیطی ۱۶ المان می باشد. در راستای جبهه ترک، ۷۲ المان تعبیه شده است. تعداد المان های قطاع حاوی ترک، چرخ و ریل به ترتیب 13478 ، 18098 و 22166 می باشد. همان طور که مشاهده می گردد، تعداد المان های ناحیه دارای ترک حدود یک چهارم تعداد کل المان ها است. برای المان بندی کانتور

۳. استخراج دامنه ضرایب شدت تنش ترک زیر سطحی

پس از تحلیل تماس چرخ و ریل، با تعبیه یک ترک زیر سطحی در مدل چرخ، تاریخچه و دامنه ضرایب شدت تنش رؤس ترک با استفاده از اجزای محدود محاسبه شده است. ترک مدل شده در این مطالعه بیضوی و زیر سطحی است. اقطار ترک بیضوی مورد مطالعه، 15×10 میلی متر انتخاب شده است. محور اصلی ترک در امتداد خط ریل و محور فرعی آن عمود بر خط ریل است. مطابق با داده های میدانی جمع آوری شده سامانه ریلی آمریکای جنوبی، ترک های زیر سطحی معمولاً در عمق ۵-۱۰ میلی متری و با شیب ۲۰ درجه ایجاد می شوند [۱۹]. بنابراین مرکز ترک مورد نظر، شش میلی متر زیر سطح غلتان چرخ و درست زیر نقطه غلتان منظور شده است. همچنین ترک به گونه ای در چرخ مدل شده است که بردار عمود بر سطح ترک با محور Xها (محور عمود بر سطح زمین) زاویه ۲۰ درجه می سازد. مدل ترک و موقعیت آن در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مطالعه، تمرکز بر چهار راس ترک واقع در انتهای محور اصلی و فرعی ترک بیضوی است که در شکل ۵ نشان داده و شماره گذاری شده است. برای بالابردن دقت جواب همراه با مناسب بودن زمان حل مسئله، از قطاع ۳۰ درجه ای جدا شده در سطح چرخ، قطاعی متقارن نسبت به خط تماس چرخ و به اندازه $2/54$ درجه جدا شد تا به عنوان ناحیه اطراف ترک در این ناحیه از اندازه المان ریزتری با اندازه یک میلی متر استفاده شود. پس از مونتاژ قطاع حاوی ترک و جزء مربوط به سایر قسمت چرخ از سطوح مربوطه روی هم، جابه جایی این سطوح با هم مقید شد. این کار باعث می شود تا بتوان در دو جزء همجوار دو المان بندی مختلف اعمال نمود و در نهایت گره های واقع بر این سطوح از دو جز همجوار جابه جایی های یکسانی خواهند داشت. یعنی امکان تبدیل المان بندی ریز به درشت فراهم می شود.

تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیرسطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران

مثبت و چه در جهت منفی، ترک به اندازه‌ای کافی از میدان تنش تماسی چرخ دور شده و ضرایب شدت تنش عملاً به مقدار صفر می‌رسند، لذا محاسبات نهایتاً تا زاویه دوران ۴- و ۴ درجه ادامه داده شد. به عبارت دیگر طی یک سیکل غلتش کامل چرخ روی ریل، هر نقطه از چرخ تنها در بازه‌ای ۸ درجه‌ای از کل ۳۶۰ درجه تحت بارگذاری بوده و در مابقی بازه تنش را تجربه نمی‌کند. حل مسئله در هر زاویه (مجموعاً ۱۵ زاویه) توسط نرم‌افزار Abaqus بین ۴ تا ۵ ساعت به طول انجامید. با توجه به تاریخچه‌های محاسبه شده، دامنه ضرایب شدت تنش چهار راس ترک تعیین و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. دامنه ضرایب شدت تنش محاسبه شده.

دامنه ضرایب شدت تنش			شماره راس ترک
براساس میانگین مقادیر کانتور ۳ و ۴ ($MPa\sqrt{m}$)			
ΔK_{III}	ΔK_{II}	ΔK_I	
۲/۸	۲/۱	-۳	۱
۲/۸	۲/۱	-۳/۱	۲
۴/۲	۳/۲	-۵/۸	۳
۲/۹	۲/۰	-۳	۴

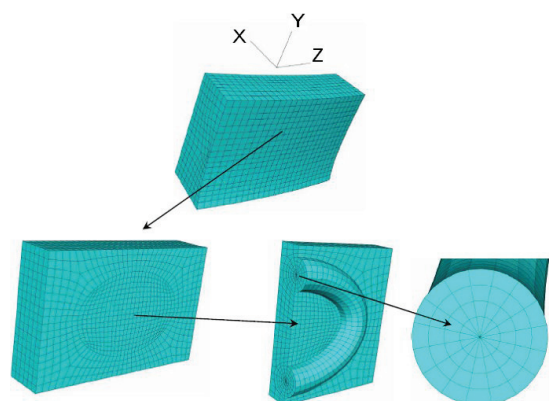
منفی بودن K_I حین غلتش چرخ روی ریل نشان می‌دهد که ترک زیرسطحی در طول غلتش چرخ روی ریل تحت مود کششی قرار نمی‌گیرد و به جای بازشدن جبهه ترک و دورشدن سطوح آن از یکدیگر، همواره این سطوح در شرایط RCF به هم فشرده می‌شوند. به عبارت دیگر، تحت شرایط RCF ترک زیرسطحی رشد مود I نداشته و مود رشد ترک موده‌های برشی II و III می‌باشند. این یافته منطبق با نتایج حاصله در مرجع [۸] نیز می‌باشد. در مود II و III، ضریب شدت تنش منفی تنها نشان‌دهنده عوض شدن جهت تنش برشی اعمالی است. لذا اثر ضریب شدت تنش مود II و III منفی همانند مقدار مثبت مخرب می‌باشد و این مسئله مشابه مود I نیست.

۴. طول ترک آستانه و بحرانی

بررسی رفتار ترک خستگی با استفاده از مکانیک شکست، عمدتاً روی بارگذاری مود I متمرکز بوده درحالی‌که قطعات یا سازه‌های

اول حول جبهه ترک از المان سه‌بعدی لبه‌ای ۱۵^۰ گره‌ای مرتبه ۲ (C³D¹⁵)، برای سایر کانتورها از المان سه‌بعدی شش‌وجهی ۲۰ گره‌ای مرتبه ۲ (C³D²⁰R) و برای سایر قسمت‌های مدل چرخ و ریل از المان سه‌بعدی شش‌وجهی ۸ گره‌ای خطی (C³D⁸R) استفاده شده است. ناکرانداری تنش در جبهه ترک در مدل‌سازی انجام شده با استفاده از المان‌های منفرد رفع گردیده است.

با توجه به کوچک بودن شعاع ناحیه پلاستیک حول جبهه ترک، از رهیافت مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) برای انجام تحلیل و محاسبه تاریخچه ضرایب شدت تنش ترک استفاده شده است. در این رهیافت لازم است که گره‌های واقع بر شعاع المان‌های منفرد لبه‌ای حول جبهه ترک به فاصله ۰/۲۵



شکل ۶. چگونگی المان‌بندی قطاع حاوی ترک و جبهه ترک.

پس از محاسبه ضرایب شدت تنش چهار راس ترک مشخص شده در شکل ۵ در حالتی که ترک دقیقاً زیر ناحیه تماس چرخ با ریل قرار دارد، با دوران چرخ روی ریل و حول محور Y+، به اندازه ۰/۵-، ۱-، ۱/۵-، ۲-، ۲/۵-، ۳-، ۴- و نیز ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۴ درجه دوران داده شد و در هر مورد ضرایب شدت تنش چهار راس ترک محاسبه و ثبت شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در محدوده‌ای که تغییرات ضرایب شدت تنش قابل ملاحظه بوده دوران‌های ۰/۵ درجه‌ای و در محدوده‌ای که دیگر ترک از میدان تنش ناحیه تماس چرخ دور شده است دوران‌های ۱ درجه‌ای صورت گرفته است. ضمناً با توجه به اینکه عملاً پس از دوران حدود ۴ درجه‌ای چرخ چه در جهت

با داشتن طول ترک و ضریب شدت تنش معادل برای هر راس ترک، می توان با توجه به رابطه (۲)، حاصل ضرب ضریب شکل در دامنه تنش اعمالی را تعیین نمود. این مقدار برای رئوس ۱ و ۳ به ترتیب ۳۵/۸ و ۵۲/۷ مگاپاسکال و برای رئوس ۲ و ۴ برابر ۴۳/۹ مگاپاسکال محاسبه می شود.

طول ترک آستانه و بحرانی با توجه به رابطه (۱)، از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۲۰]:

$$a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta S_{th} \alpha} \right)^2 \quad (4)$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{S_{max} \alpha} \right)^2$$

فرهمنند و نیکبین در سال ۲۰۰۸ [۲۲] با بررسی مقادیر چقرمگی آستانه بیش از صد آزمایش مربوط به آلیاژهای مختلف نشان دادند که مقدار K_{th} نسبت مستقیمی با چقرمگی شکست کرنش صفحه ای دارد، یعنی:

$$K_{Ic} = \zeta K_{th} \quad (5)$$

در آن مقدار ثابت ζ به صورت تابعی از درصد کشامد ماده (ε) قابل بیان است:

$$\zeta = 16.348 - 0.0685 \varepsilon \quad (6)$$

با جایگزینی درصد کشامد و چقرمگی شکست مربوط به فولاد RVT از مرجع [۲۳] خواهیم داشت:

$$\varepsilon = 9.6\%$$

$$K_{Ic} = 85 \text{ MPa}\sqrt{m} \quad (7)$$

$$\zeta|_{RVT} = 15.69$$

$$K_{th} = 5.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

نهایتاً، قرار دادن $K_{Ic} = 85 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ، $\Delta K_{th} = 5.4 \text{ MPa}\sqrt{m}$

و حداکثر مقدار $S \cdot \alpha$ در رابطه (۴)، حداقل طول ترک آستانه و بحرانی را به دست می دهد:

$$a_{th} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{5.5}{52.7} \right)^2 = 3.4 \text{ mm} \quad (8)$$

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{85}{52.7} \right)^2 = 828 \text{ mm}$$

مشاهده می شود که طول بحرانی ترک برای این مسئله با توجه

مهندسی اغلب تحت هر دو بارگذاری عمودی و برشی (مود II و مود III) قرار دارند. این دسته از مسائل خستگی معمولاً در تحلیل خستگی کلاسیک به عنوان مسائل خستگی چندمحوره و در بحث مکانیک شکست به عنوان مسائل ترک خستگی مود ترکیبی مطرح می شوند.

دامنه ضریب شدت تنش اعمالی، ΔK به صورت تابعی از دامنه تنش اعمالی، ΔS و طول ترک، a قابل بیان است [۲۰]:

$$\Delta K = \Delta S \sqrt{\pi a} \alpha \quad (1)$$

که در آن α ضریب شکل می باشد. از آنجاکه این رابطه مربوط به ترک مود I است، لذا بایستی ابتدا از فرم معادل آن به صورت زیر استفاده نمود:

$$\Delta K_{eq} = \Delta S_{eq} \sqrt{\pi a} \alpha \quad (2)$$

که در آن ΔS_{eq} دامنه تنش معادل وان میسز و ΔK_{eq} ضریب شدت تنش معادل در مود ترکیبی است. برای محاسبه ضریب شدت تنش معادل مدل های مختلفی ارائه شده است که یکی از ساده ترین آنها مدل تاناکا [۲۱] است. مدل تاناکا از دامنه ضریب شدت تنش هر سه مود استفاده کرده و به تعریف دامنه ضریب شدت تنش معادل می پردازد. این مدل تنها به ضریب پواسون ماده برای به دست آوردن ضریب شدت تنش معادل نیازمند بوده و از این نظر ساده و استفاده از آن راحت می باشد. رابطه ضریب شدت تنش معادل تاناکا به صورت زیر است:

$$\Delta K_{eq} = \left[\Delta K_I^4 + 8\Delta K_{II}^4 + \frac{8\Delta K_{III}^4}{(1-\nu)} \right]^{0.25} \quad (3)$$

بر اساس این مدل، دامنه ضریب شدت تنش معادل برای رئوس ترک زیرسطحی مورد مطالعه با توجه به مقادیر به دست آمده برای دامنه ضریب شدت تنش مود II و III (جدول ۴) و نیز قرار دادن $\Delta K_I = 0$ و $\nu = 0.3$ قابل محاسبه خواهد بود. مدل تاناکا، دامنه ضریب شدت تنش معادل رئوس ۱، ۲ و ۴ را تقریباً برابر ۵،۵ و رأس ۳ را برابر ۸،۱ $\sqrt{\text{MPa}\cdot\text{m}}$ نتیجه می دهد. مقایسه این مقادیر نشان می دهد که تأثیر عدم تقارن بارگذاری در قالب اعمال گشتاور محرک (مربوط به رأس ۳) حائز اهمیت است.

تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیرسطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران

چرخ و ریل و تحلیل این مسئله به کمک اجزای محدود، نتایج آن با استفاده از تئوری تحلیلی تماس هر ترمز مورد ارزیابی و صحت‌گذاری قرار گرفت. مقایسه نتایج حاصله با نتایج تئوری تماس هر ترمز نشان از دقت بالای این روش در تحلیل این پدیده داشت. همچنین مشاهده شد سطح چرخ با قطر ۹۲۰ میلی‌متر و جنس RVT در سطح خود دچار تغییر شکل پلاستیک نیز می‌شود. سپس با تعبیه ترک زیرسطحی بیضوی در مدل چرخ، دامنه ضرایب شدت تنش ترک ضمن استخراج تاریخچه ضرایب شدت تنش رئوس چهارگانه آن حین غلتش چرخ بر روی ریل، محاسبه گردید. مشاهده شد که مود رشد ترک زیرسطحی در سیستم ریلی، مود ترکیبی برشی II و III می‌باشد. یعنی مود I فشاری بوده و تأثیری بر رشد ترک زیرسطحی نخواهد داشت. ترک زیرسطحی عملاً در ۸ درجه از ۳۶۰ درجه غلتش چرخ روی ریل در میدان تنش قرار گرفته و دچار رشد می‌شود. سپس بر اساس مدل تاناکا، دامنه ضریب شدت معادل برای رئوس ترک زیرسطحی محاسبه شد. به کمک روابط مکانیک شکست و با استفاده از نتایج تحلیل عددی انجام شده، طول آستانه ترک زیرسطحی در چرخ سامانه ریلی ایران ۳/۴ میلی‌متر و طول بحرانی ترک زیرسطحی ۸۲۸ میلی‌متر تعیین گردید. محدودیت‌های هندسی چرخ عملاً اجازه رسیدن به طول بحرانی را نداده و شکست چرخ قبل از رسیدن ترک به طول بحرانی اتفاق خواهد افتاد. علاوه بر این، پس از شناسایی ترکیبی زیرسطحی به طول تقریبی ۳ میلی‌متر می‌توان انتظار رشد آن را داشت. در این حالت یا بایستی چرخ را از سیر خارج نمود یا برای لحاظ نمودن جنبه‌های اقتصادی در کنار جنبه ایمنی، اطلاعات دقیقی از چگونگی رشد و عمر رشد آن داشت تا بتوان تصمیم‌گیری نمود.

نهایتاً می‌توان بیان نمود که کاهش هزینه‌های سامانه ریلی ایران در رابطه با چرخ‌های خود نیازمند بهینه‌سازی فرایند نگهداری و تعمیرات آن‌هاست. جلوگیری از واماندگی چرخ‌ها در کنار بهینه‌سازی فرایند نگهداری و تعمیرات آن‌ها تحقیقات مفصل در زمینه خستگی تماس غلتشی منطبق با سامانه ریلی ایران را می‌طلبد.

به شرایط حاکم بر آن مقدار قابل توجهی بوده و ترک قبل از رسیدن طول بحرانی خود به اندازه کافی امکان رشد را دارا خواهد بود. مشاهدات تجربی (شکل ۷) نیز نشان می‌دهد که ترک‌های زیرسطحی بیش از اینکه با محدودیت طول بحرانی روبرو باشند با محدودیت هندسی روبرو هستند. بدین معنی که قبل از اینکه ترک به طول بحرانی خود رسیده و چرخ دچار شکست شود، رسیدن محدوده جبهه ترک به سطح یا لبه چرخ باعث شکست چرخ می‌گردد. در صورتی که ترکیبی زیرسطحی در ۶ میلی‌متری زیر نقطه غلتان با زاویه ۲۰ درجه نسبت به محور چرخ ایجاد شود (شرایط ترک مدل شده)، محدوده مجاز آن برای رشد از نظر هندسی در راستای محور چرخ (رئوس ۲ و ۴) حداکثر ۲۲/۹ میلی‌متر و در راستای عمود بر محور چرخ حداکثر ۷۳ میلی‌متر می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که عملاً ترک مهلتی برای رسیدن به طول بحرانی خود را ندارد.

75 mm



شکل ۷. دو نمونه از چرخ‌های وامانده در اثر رشد ترک زیرسطحی [۲۴]

۵. نتیجه‌گیری

خستگی تماس غلتشی با تحمیل هزینه‌های مالی و جانی قابل توجه در دهه اخیر به سیستم حمل و نقل ریلی، مطالعات محققان را متوجه خود نموده است. شناخت دقیق از فرایندهای پیدایش این آسیب، کمی و قابل اندازه‌گیری نمودن آن و شناسایی و کنترل عوامل مؤثر بر آن از الزامات بخش نگهداری و تعمیرات سیستم‌های ریلی به حساب می‌آید.

در این مطالعه، ضمن بیان مراحل مختلف مدل‌سازی تماس

72, pp. 255–69.

[8] Lansler, E. And Kabo, E. (2005)., “Subsurface crack face displacements in railway wheels”, *Wear*, Vol. 258, pp. 1038–47.

[9] UIC 510-2 Leaflet (2004), International Union of Railways, 4th ed..

[10] UIC 515-1 Leaflet (2003) International Union of Railways, 2nd ed..

[11] UIC 861-3 Leaflet (1991), International Union of Railways, 3rd ed..

[12] BS 5892 (1992), Railway rolling stock materials, Specification for monobloc wheels for traction and trailing stock, BRITISH STANDARD, Part 3.

[13] Gordon, B. And Perlman, A. B. (2004)., “Finite element estimation of the residual stresses in roller-straightened rail UIC60 proper”, *Proceedings of the IMECE04, Anaheim, CA USA*.

۱۴- اسدی لاری، علی، علیزاده کاکلر، جواد (۱۳۸۸) «تأثیر بهبود رفتار سایشی چرخ‌های فولادی بر ایمنی سیر قطار، مطالعه موردی: واگن مسافری مسیر تهران-میانه»، فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل، شماره ۱، پاییز ۱۳۸۸، ص. ۱-۹.

[15] UIC 505-2 Leaflet (2007), International Union of Railways, 2nd ed..

۱۶- آشفته، رویا (۱۳۸۶) «تخمین عمر چرخ فولادی در راه آهن ایران با فرض مدل الاستوپلاستیک»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، اسفند ۱۳۸۶.

[17] Sebesan, I., Tudorache, C., Dumitriu, M. And Spiroiu, M. (2008)., “The study of the wheel diameter influence over the loading capacity of a railway vehicle”, XVIII International Scientific Conference Transport.

[18] Yan, W. And Fischer, F. D. (2000)., “Applicability of the Hertz contact theory to rail-

۶. پانویس‌ها

1. rolling contact fatigue
2. tread surface
3. Federal Railroad Administration
4. Abaqus
5. part
6. plastic shakedown
7. master
8. slave
9. seem
10. wedge
11. linear elastic fracture mechanic

۷. مراجع

[1] Zerbst, U., Madler, K. And Hintze, H. (2005)., “Fracture mechanics in railway applications—an overview”, *Engng Fract Mech*, Vol. 72, pp. 163-194.

[2] Magel, E., Sroba, P., Sawley, K. And Kalousek, J. (2005)., “Control of rolling contact fatigue of rails”, Center for Surface Transportation Technology, National Research Council Canada.

[3] Ekberg, A. And Sotkovszki, P. (2001)., “Anisotropy and rolling contact fatigue of railway wheels”, *Int. J Fatigue*, Vol. 23, pp. 29–43.

۴- علیزاده کاکلر، جواد، فرهنگیان، امید (۱۳۸۶) «بررسی پدیده خستگی تماس غلتشی در چرخ‌های فولادی راه آهن»، مجله فنی و تخصصی رجاء، شماره ۲۴، اسفند ۱۳۸۶، ص. ۸-۱۲.

۵- قاجار، رحمت‌ا...، علیزاده کاکلر، جواد (۱۳۸۷) «بررسی پدیده خستگی تماس غلتشی در ریل‌های راه آهن»، فصل‌نامه علمی ترویجی جاده، شماره ۶۲، تابستان ۱۳۸۷، ص. ۸۷-۹۶.

[6] Glodez, S. And Ren, Z. (1998)., “Modelling of crack growth under cyclic contact loading”, *Theor Appl Fract Mech*, Vol. 30, pp. 159–73.

[7] Guagliano, M. And Vergani, L. (2005)., “Experimental and numerical analysis of sub-surface cracks in railway wheels”, *Engng Fract Mech*, Vol.

wheel contact problems”, Applied Mechanics, Vol. 70, pp. 255–268.

[19] Liu, Y., Liu, L. And Mahadevan, S. (2007)., “Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM”, Engng Fract Mech, Vol. 74, pp. 2659–2674.

[20] Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. And Fuchs, H. O. (2001)., “Metal Fatigue in Engineering”, John Wiley & Sons, Canada.

[21] Tanaka, K. (1974)., “Fatigue propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis”, Engng Fract Mech, Vol. 6, pp. 493-507.

[22] Farahmand, B. And Nikbin, K. (2008) “Predicting fracture and fatigue crack growth properties using tensile properties”, Engng Fract Mech, Vol. 75, pp. 2144-2155.

[23] Strnadel., B. And Hausild, P. (2008)., “Statistical scatter in the fracture toughness and Charpy impact energy of pearlitic steel”, Material science and engineering A, Vol. 486, pp. 208-214.

[24] Liu, Y. And Mahadevan, S. (2005)., “Multiaxial high-cycle fatigue criterion and life prediction for metals”, Int J Fatigue, Vol. 7, pp. 790–800.