

## تحلیل اجزای محدود مکانیک شکست چرخ و ریل

سید یوسف احمدی بروغنی<sup>۱</sup> و سید رسول سجادی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b>            ترک سطحی،            چرخ و ریل،            ضرایب شدت تنش،            روش اجزای محدود.</p>	<p>در مقاله حاضر، مسئله تماس چرخ و ریل با وجود ترک سطحی در ریل بررسی شده است. دلیل بررسی این مسئله تأثیر قابل توجه تماس چرخ و ریل بر ضرایب شدت تنش می باشد. در این تحقیق، با استفاده از روش اجزای محدود و به کمک یک نرم افزار تجاری، چرخ و ریل ترکدار تحت شرایط غلتش همراه با لغزش جزئی مدل سازی شده است. برای مدل کردن اثر متقابل بین چرخ و ریل و همچنین سطوح ترک، از المان های تماسی استفاده شده است. ضرایب شدت تنش با روش عددی برون یابی جایابی محاسبه گردیده است. تأثیر فاکتورهای همچون زاویه استقرار ترک، طول ترک، ضریب اصطکاک و موقعیت چرخ نسبت به ترک بر ضرایب شدت تنش مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ضریب <math>K_{II}</math> دارای مقادیری بزرگتر از <math>K_I</math> می باشد. از این رو، به نظر می رسد در این مسئله تماس چرخ و ریل، مد برشی بر رفتار نوک ترک غالب است. تغییر شکل پیچیده لبه ترک هنگام عبور چرخ، جهت تنش برشی را در سطوح ترک تغییر می دهد و این باعث نوسان در مقادیر <math>K_{II}</math> می شود. نوسان در مقادیر <math>K_{II}</math> مهم ترین عامل رشد ترک خستگی در مسئله تماس چرخ و ریل است.</p>

### ۱- مقدمه

ریل قطار نیز به واسطه تماس غلتشی به دسته دوم مطالعات تعلق دارد.

علی رغم اینکه کارهای مختلف زیادی روی اثر حضور ترک در مسئله تماس انجام شده است اما اطلاعات کمی راجع به مورد خاص ترک مایل سطحی با وجوه دارای اصطکاک در مسئله تماس چرخ و ریل همراه با نیروی کششی وجود دارد. در تحلیل الاستیک خطی، ضرایب شدت تنش نشان دهنده وضعیت میدان تنش و تغییر مکان در نوک ترک می باشد. از این رو در این مقاله اثر متقابل بین نیروی کششی و ضرایب شدت تنش در مسئله تماس چرخ و ریل ترکدار مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که حل های تحلیلی دقیقی برای مسئله تماس چرخ و ریل وجود ندارد [۲]، محققین مختلفی اظهار

ترک خستگی را می توان یکی از مهم ترین آفت هایی دانست که تمامی ماشین آلات را تهدید می کند [۱]. انجام مطالعات و تحقیقات متعدد در این زمینه می تواند گواهی بر این ادعا باشد. عمده تحقیقات موجود در مورد بررسی رفتار ترک خستگی با استفاده از مکانیک شکست روی مد I بارگذاری متمرکز شده است. در حالی که بیشتر قطعات و سازه ها تحت هر دو نوع بارگذاری نرمال و برشی یعنی مد های I و II می باشند. بررسی رفتار ترک های موجود در

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: srasajjadi82@gmail.com

۱. استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

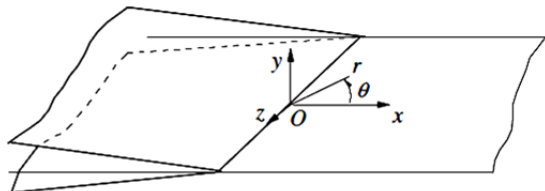
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند

با در نظر گرفتن شرایط بارگذاری مد ترکیبی با مدهای I و II، میدان تنش نوک ترک بر حسب مختصات  $r$  و  $\theta$  به صورت شکل ۲ می‌باشد [۷]. همانطور که مشاهده می‌شود میدان تنش نوک ترک با عاملی مناسب به نام ضریب شدت تنش  $K$  تشریح شده است و میدان تنش نوک ترک با  $1/\sqrt{r}$  متناسب است که این باعث تکینگی تنش در نوک ترک می‌گردد:

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ \frac{K_I}{4} \left( 5\cos\frac{\theta}{2} - \cos\frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left( -5\sin\frac{\theta}{2} + 3\sin\frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ \frac{K_I}{4} \left( 3\cos\frac{\theta}{2} + \cos\frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left( -3\sin\frac{\theta}{2} - 3\sin\frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[ \frac{K_I}{4} \left( \sin\frac{\theta}{2} + \sin\frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left( \cos\frac{\theta}{2} + 3\cos\frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (3)$$



شکل ۲- مختصات در نوک ترک [۷]

### ۳- روش برونابی جابجایی

در اینجا از روش برونابی جابجایی برای محاسبه ضرایب شدت تنش استفاده شده است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$K_I = \frac{E}{3(1+\nu)(1+\kappa)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \left[ 4(v'_b - v'_d) - \frac{(v'_c - v'_e)}{2} \right] \quad (4)$$

$$K_{II} = \frac{E}{3(1+\nu)(1+\kappa)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} \left[ 4(u'_b - u'_d) - \frac{(u'_c - u'_e)}{2} \right] \quad (5)$$

کرده‌اند که استفاده از روش المان محدود برای کاوش روی این مسئله خاص تماس مناسب است [۳-۵].

این مقاله، روش برونابی جابجایی را برای محاسبه ضرایب شدت تنش مد ترکیبی به کار می‌برد. المان‌های مربعی با وضعیت کرنش صفحه‌ای به همراه المان‌های تماسی برای شبیه سازی توزیع تنش‌های تماسی بین چرخ و ریل و ضرایب شدت تنش در نوک ترک استفاده می‌شوند. برای تحقیق روی رفتار نوک ترک، تأثیر فاکتورهایی همچون زاویه استقرار ترک، طول ترک، موقعیت چرخ نسبت به آن و ضریب اصطکاک روی ضرایب شدت تنش در نظر گرفته می‌شود.

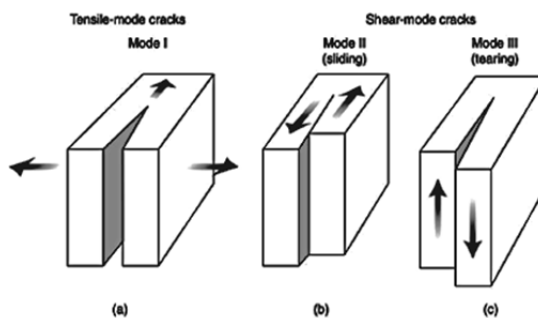
### ۲- میدان تنش نوک ترک

برای ورود به مبحث مکانیک شکست، نخست ترک‌ها و توزیع تنش در نوک آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در حالت کلی، سه مود بارگذاری برای ترک‌ها وجود دارد (شکل ۱):

مد I: مد بازشوندگی یا کششی: در این نوع، سطوح ترک در اثر نیروی کششی از هم دور می‌شوند.

مد II: مد لغزشی یا برشی به طرف جلو: در این نوع، سطوح ترک روی همدیگر در جهتی عمود بر جبهه ترک می‌لغزند.

مد III: مد پارگی یا برشی عرضی: در این نوع، سطوح ترک نسبت به همدیگر در یک امتداد و به موازات جبهه ترک حرکت می‌کنند [۶].



شکل ۱- انواع مد بارگذاری ترک

در آغاز تحلیل و در ارتباط با مدل سازی تنش های تماسی بین چرخ و ریل، دو انتخاب پیش رو قرار داشت. یک گزینه آنکه در غیاب چرخ، سطح تماس با فشار هرتزی و تنش برشی متناسب با آن بارگذاری شود. گزینه دیگر مدل سازی چرخ و ریل است، به طوری که بار اعمالی روی مرکز چرخ در نظر گرفته شود. علی رغم حجم وسیعتر عملیات مورد نیاز در گزینه دوم به دلیل دقیق تر بودن (به-ویژه در بازتاب تماس اصطکاکی)، این روش مبنای تحلیل قرار گرفت. برای مدل کردن تماس بین سطوح ریل و چرخ و نیز سطوح ترک از المان های تماسی استفاده شده است. المان های تماسی از نوع سطح به سطح<sup>۱</sup> می باشد. همانطور که از نام این المان ها پیداست، جهت برقراری تماس بین دو سطح المان می باشند و جهت ایجاد تماس نیازی به تطابق گره های متقابل در دو سطح ندارند. پوشش دادن المان های مرتبه بالا و پایین روی جفت سطح تماسی (تماس<sup>۲</sup> و هدف<sup>۳</sup>)، نداشتن محدودیت در شکل جفت تماسی و سرعت تحلیل بالا از مزایای المان های تماسی نوع سطح به سطح می باشد. در اینجا، المان CONTA172 برای تماس و المان TARGE169 برای هدف انتخاب شده است. نیروی عمودی معادل ۸۸kN -  $F_y =$  و گشتاور محرک  $M = -180 \text{ kN.m}$  بر مرکز چرخ اعمال گردیده است.

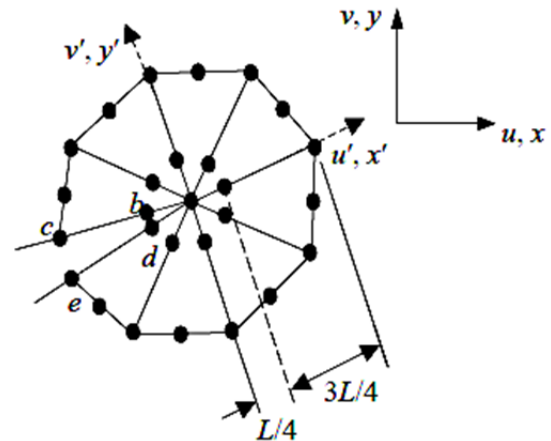
مبدأ مختصات در وسط ریل و روی سطح آن قرار گرفته است. با آنکه در تحلیل به بررسی مواضع مختلف ترک پرداخته می شود، با این حال یک وضعیت پایه با مشخصات زیر برای ترک مبنا در نظر گرفته شده است.

ترک مبنا از نوع سطحی در وسط ریل و طول ۴/۳mm با امتداد ۶۰ درجه نسبت به افق مطابق شکل ۴ قرار دارد؛ یعنی:

$$a = 4/3 \text{ mm}, \beta = 60^\circ, f = 0/4 \quad (۷)$$

که  $a$  مانند شکل ۴ طول ترک،  $\beta$  زاویه ترک،  $f$  ضریب اصطکاک و  $l$  نیز موقعیت چرخ نسبت به ترک می باشد.

که  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $\kappa$  پارامتر الاستیک  $\kappa = 3 - 4\nu$  برای تنش صفحه ای و  $\kappa = \frac{3-\nu}{1+\nu}$  برای کرنش صفحه ای)،  $L$  طول المان با گره های در موقعیت یک چهارم و  $u'$  و  $v'$  به ترتیب مؤلفه های جابجایی در جهات  $x'$  و  $y'$  هستند. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، زیر نویس ها موقعیت گره ها را نشان می دهد [۸].



شکل ۳- شماتیک سیستم مختصات نوک ترک و سیستم مختصات کلی [۸]

#### ۴- مدل سازی المان محدود

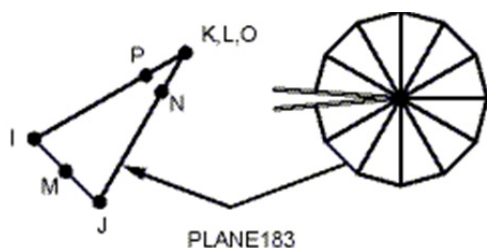
در این تحقیق، مبنای مطالعه شامل مدل سازی المان محدود دو بعدی برای تکه ریل دارای ترک فرضی می باشد. در تحلیل، استقرار چرخ واگن در مواضع مختلف روی ریل نسبت به موقعیت ترک مورد توجه است. طول ریل مساوی با فاصله بین دو پایه بتنی و برابر با ۶۰۰mm در نظر گرفته شده است. برای تعیین ارتفاع از ریل مدل UIC60 استفاده شده که ارتفاع آن برابر  $H = 172 \text{ mm}$  می باشد. شعاع چرخ واگن نیز برابر  $R_w = 425 \text{ mm}$  یعنی برابر با شعاع چرخ مورد استفاده برای ریل UIC60 در نظر گرفته می شود. ریل و چرخ از جنس فولاد Grade 900A می باشند. رفتار مصالح در ناحیه کشسان به صورت همسانگرد بوده و توسط مقادیر زیر مشخص می شود:

$$\sigma_y = 500 \text{ MPa}, E = 210 \text{ MPa}, \nu = 0/3 \quad (۶)$$

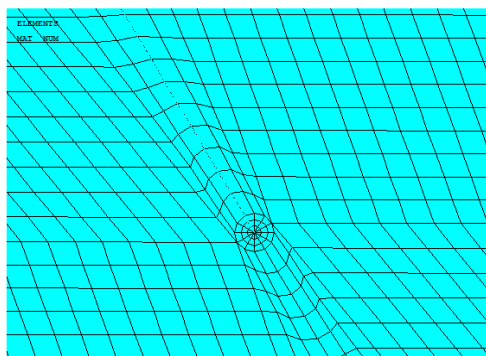
<sup>1</sup> Surface-to-surface

<sup>2</sup> Contact

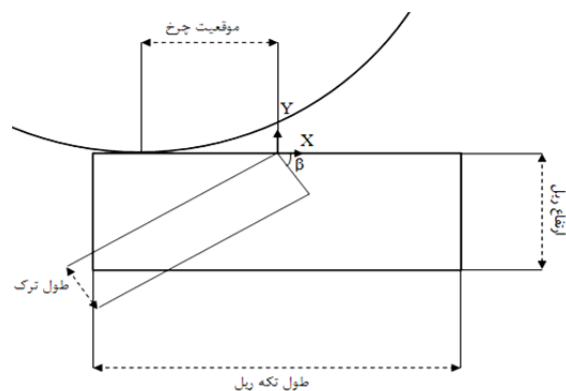
<sup>3</sup> Target



شکل ۵- نحوه قرار گیری المان‌های تکین در نوک ترک [۹]



شکل ۶- وضعیت شبکه بندی در مجاورت ترک



شکل ۴- وضعیت قرارگیری ترک در ریل

## ۵- شبکه بندی

با توجه به وجود ترک در مدل هندسی، در نوک ترک وضعیت تکین تنش روی می‌دهد. لذا در مرحله شبکه بندی بایستی در اطراف ترک از المان‌های مناسب استفاده شود. از سویی با توجه به استفاده از نرم‌افزار ANSYS و بنا به راهنمایی دستورالعمل این نرم‌افزار [۹]، به دلیل وجود وضعیت تکین  $1/\sqrt{r}$  برای تنش، در تحلیل الاستیک خطی از المان‌های تکین استفاده می‌گردد. المان‌های تکین، المان‌های مربعی‌ای هستند که گره‌های میانی آنها در موقعیت‌های یک چهارم<sup>۱</sup> قرار گرفته‌اند. در این وضعیت حلقه‌ای از المان‌های تکین در مجاورت نوک ترک قرار می‌گیرند. شکل ۵ نحوه قرارگیری المان‌های تکین را در نوک ترک نشان می‌دهد. در چرخ و ریل از المان‌های استاندارد مرتبه دوم مربعی و از خانواده کرنش صفحه‌ای (PLANE183) استفاده شده است. با توجه به اینکه تمرکز تحقیق روی نوک ترک است، نمونه‌ای از شبکه بندی اطراف نوک ترک در شکل ۶ نشان داده شده است.

## ۶- تحلیل پارامتریک مکانیک شکست به

### کمک ضرایب شدت تنش

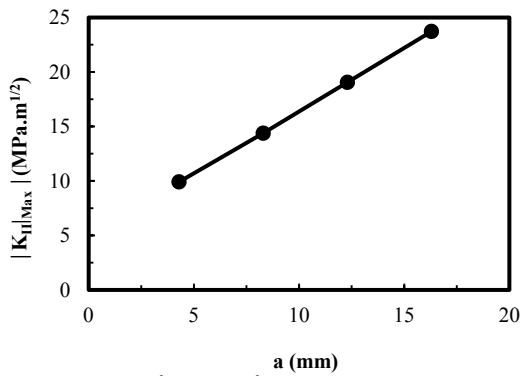
در این بخش از پژوهش، تأثیر سه عامل طول ترک، زاویه استقرار ترک و ضریب اصطکاک روی مکانیک شکست ریل مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به وجود یک میدان تنش دو بعدی شامل مؤلفه‌های تکین تنش برشی و نرمال در رأس ترک داخل ریل، بیان شرایط مکانیک شکست بر اساس ضرایب شدت تنش مستلزم ارائه دو ضریب مختلف برای مدهای اول و دوم شکست می‌باشد.

در حین عبور یک مرتبه چرخ از روی ریل، ضمن حفظ مقدار تمامی پارامترها در مدل مبنای معرفی شده در شکل ۴ و رابطه (۷)، برای بررسی اثر طول ترک مقادیر مختلف طول ترک مطابق رابطه (۸) در نظر گرفته شده است که مقادیر ضرایب شدت تنش در موقعیت‌های مختلف چرخ مطابق شکل‌های ۷ و ۸ برای نوک ترک حاصل می‌گردد:

$$a = 4/3, 8/3, 12/3, 16/3 \text{ (mm)} \quad (8)$$

در شکل ۷، در حین حرکت از چپ به راست چرخ از روی ریل، در ابتدا مقادیر  $K_{I1}$  مثبت بوده که مربوط به باز شدن

<sup>1</sup> Quarter Point

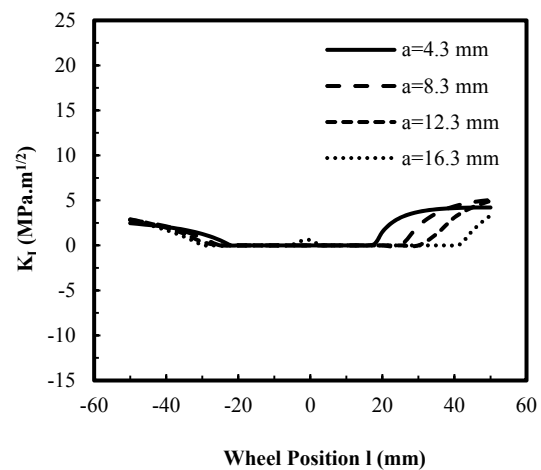


شکل ۱۱- روند تغییرات ضریب  $|K_{II}|_{Max}$  به ازای طول‌های مختلف ترک

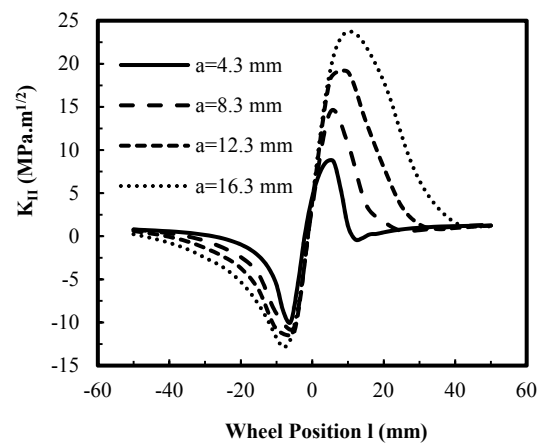
با ادامه حرکت چرخ، به تدریج تأثیر بار عمودی بر گشتاور غالب می‌شود، که در نتیجه جهت لغزش سطوح ترک عوض شده و  $K_{II}$  تغییر علامت می‌دهد. با نزدیکتر شدن به ترک، مقدار  $K_{II}$  تا یک اندازه حداکثر (با علامت منفی) افزایش می‌یابد. با برقرار شدن تماس چرخ با لبه دیگر ترک، اندازه  $K_{II}$  کاهش می‌یابد، تا اینکه در حدود ۸ mm  $l=0$  به صفر می‌رسد. با بیشتر شدن تماس چرخ و لبه دیگر ترک، جهت لغزش سطوح ترک دوباره عوض شده و  $K_{II}$  مثبت می‌شود (توجه شود که معنی مثبت یا منفی بودن  $K_{II}$ ، لغزش یک لبه نسبت به دیگری است). دو نکته از شکل‌های ۸ و ۹ قابل ذکر می‌باشد: یکی افزایش مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  و دیگری جابجایی موقعیت مکانی  $|K_{II}|_{Max}$  به سمت راست با افزایش طول ترک می‌باشد. مورد اول ناشی از کاهش مقاومت ماده در برش بر اثر افزایش طول ترک می‌باشد و مورد دوم بدین علت است که چون ترک دارای زاویه نسبت به سطح می‌باشد و با توجه به اینکه فاصله افقی نوک ترک از مبدأ مختصات متناسب با طول ترک است، لذا زمانی که چرخ تقریباً در موقعیت افقی نوک ترک قرار می‌گیرد، بیشینه مقدار  $|K_{II}|$  اتفاق می‌افتد. با تغییر جهت لغزش وجوه ترک هنگام عبور چرخ، علامت  $K_{II}$  تغییر کرده و باعث رفتار سیکلی آن می‌شود. در چندین مرجع [۱۰، ۱۱] نیز اشاره شده است که رشد ترک با رفتار سیکلی  $K_{II}$  قابل توصیف است و این پدیده را به عنوان مهمترین دلیل رشد ترک

ترک در اثر بار عمودی و گشتاور وارده از سمت چرخ است؛ سپس در اثر حرکت انباشت ماده ریل جلوی چرخ، ترک به تدریج بسته شده و مقدار  $K_I$  به صفر نزدیک می‌شود. بسته ماندن ترک ادامه می‌یابد تا اینکه میدان تنش تماسی در محل تماس چرخ و ریل به وضعیتی برسد که بتواند نوک ترک را باز کند. چون این وضعیت میدان تنش تماسی برای ترک با طول کوچکتر زودتر ایجاد می‌شود، بازشدگی نوک آن در فاصله کمتری از مبدأ اتفاق می‌افتد و با افزایش طول ترک این فاصله زیاد می‌شود.

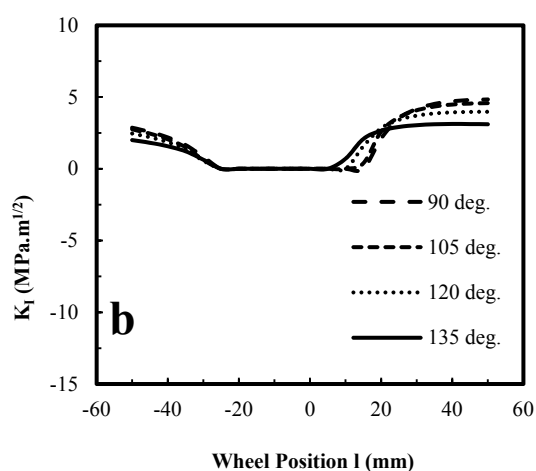
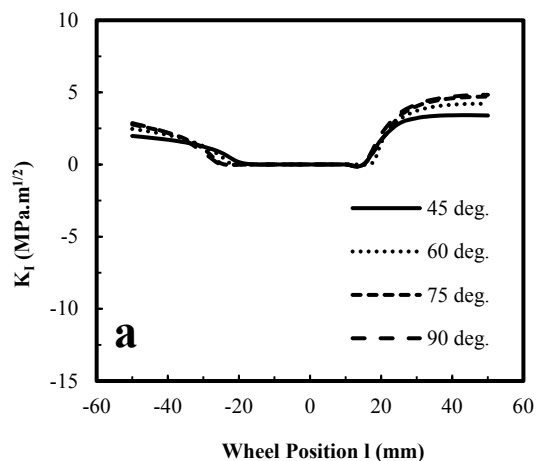
از روند تغییر مقادیر  $K_{II}$  در شکل ۸ مشهود است که در ابتدای حرکت چرخ، مقادیر  $K_{II}$  مثبت است که به دلیل گشتاور اعمالی به چرخ می‌باشد.



شکل ۹- روند تغییرات  $K_I$  به ازای طول‌های مختلف ترک



شکل ۱۰- روند تغییرات ضریب  $K_{II}$  به ازای طول‌های مختلف ترک



شکل ۱۲- روند تغییرات ضریب  $K_I$  به ازای زوایای مختلف استقرار ترک (a) ۴۵-۹۰ و (b) ۹۰-۱۳۵ درجه

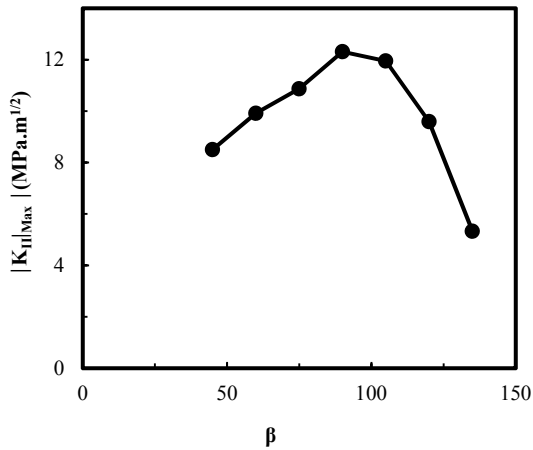
روند تغییرات  $K_{II}$  برحسب موقعیت چرخ برای زوایای مختلف در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل (a-۱۱) مشاهده می‌شود، در زوایای بیشتر از ۹۰ درجه یک بیشینه نسبی در موقعیت  $l \cong -12$  mm وجود دارد. این بیشینه نسبی بدین دلیل است که لبه ترک در اثر نیروی عمودی و گشتاور تغییر شکلی مانند شکل ۱۲ دارد. همین توجیه را می‌توان برای زوایای کمتر از ۹۰ درجه بیان کرد که یک کمینه نسبی در موقعیت  $l \cong 10$  mm دارند.

خستگی در مسئله تماس چرخ و ریل بیان کرده‌اند. از سوی دیگر مشهود است که مقادیر  $K_{II}$  بزرگتر از مقادیر  $K_I$  است. بنابراین در این مسئله تماس چرخ و ریل، مد برشی بر رفتار نوک ترک غالب است.

برای بررسی اثر زاویه ترک، مقادیر مختلف زوایای ترک (با حفظ بقیه پارامترهای رابطه ۷) مطابق رابطه (۹) در نظر گرفته شده است. نتایج ضرایب شدت تنش در شکل-های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

$$\beta = 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135 \text{ (}^\circ\text{)} \quad (9)$$

همانطور که در شکل‌های (a-۱۰) و (b-۱۰) مشاهده می‌شود، روند تغییر  $K_I$  در زوایای کمتر از ۹۰ درجه با زوایای بیشتر از ۹۰ درجه متفاوت است. در زوایای کمتر از ۹۰ درجه در موقعیت‌های قبل از مبدأ ( $l < 0$ ) لبه‌های ترک با افزایش زاویه ترک در موقعیت چرخ ( $l$ ) کمتری بسته می‌شود. یا به عبارتی ضریب  $K_I$  به صفر میل می‌کند. دلیلی که به نظر می‌رسد می‌توان برای این مسئله بیان کرد این است که در زوایای کوچکتر، نوک ترک از محل استقرار چرخ فاصله بیشتری دارد و بنابراین تأثیر نیروی فشاری بر آن کمتر خواهد بود. این مسئله در زوایای بیشتر از ۹۰ درجه به دلیل اینکه لبه بالایی ترک همواره در موقعیت-های  $l < 0$  زیر چرخ قرار می‌گیرد، بنابراین همواره تا رسیدن به محل ترک و گذر از آن بسته است. همین مسئله زمانی که چرخ از روی ترک می‌گذرد در مورد زوایای کوچکتر از ۹۰ درجه اتفاق می‌افتد. سپس دهانه ترک در یک موقعیت مشخصی باز می‌شود ( $l \cong 15$  mm). اما ترک‌های با زاویه بیش از ۹۰ درجه در موقعیت‌های متفاوتی از حدود  $l = 9$  mm تا  $l = 18$  mm باز می‌شوند؛ چون بار عمودی چرخ تمایل به باز شدگی را در ترک ایجاد می‌کند.

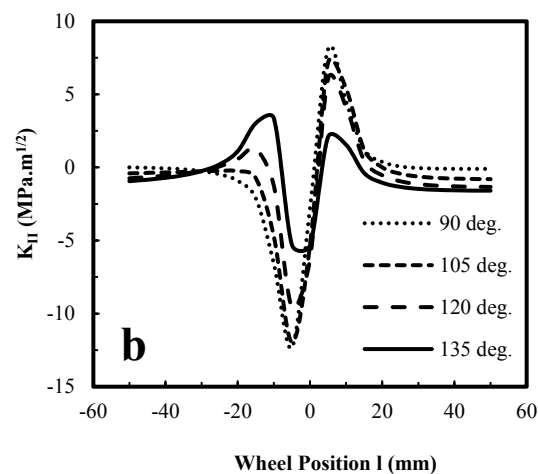
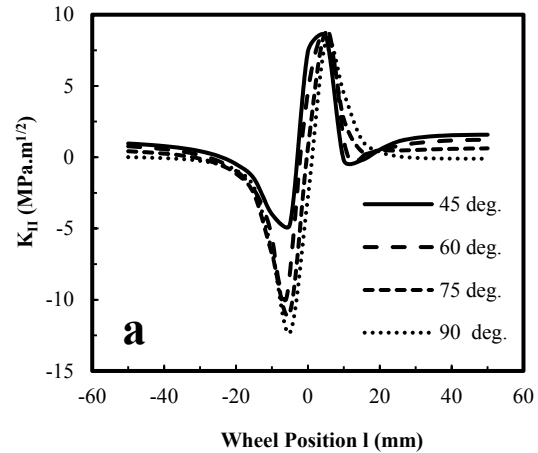


شکل ۱۵- روند تغییرات ضریب  $|K_{II}|_{Max}$  به ازای زوایای مختلف ترک

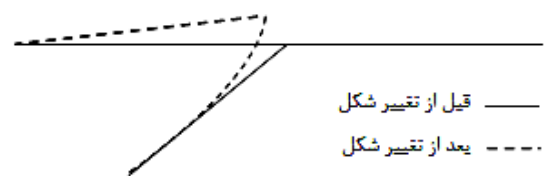
برای بررسی اثر ضریب اصطکاک با تغییر ضریب اصطکاک طبق مقادیر داده شده در رابطه (۱۰) (با ثابت ماندن دیگر پارامترهای رابطه ۷)، در حین عبور یک مرتبه چرخ از روی ریل، شکل‌های ۱۴ و ۱۵ برای ضرایب شدت تنش به دست می‌آیند:

$$f = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \quad (10)$$

همانطور که در شکل (۱۴-ا) مشاهده می‌شود، افزایش ضریب اصطکاک تأثیری بر ضریب  $K_I$  ندارد. چرا که ضریب شدت تنش مربوط به بازشوندگی مستقل از اصطکاک است و در صورت باز شدن ترک، اثر نیروی اصطکاک حذف می‌شود. از شکل‌های (۱۴-ب) و ۱۵ مشهود است که ترک با ضریب اصطکاک ۰/۲ دارای  $|K_{II}|_{Max}$  بزرگتری نسبت به سایر مقادیر ضریب اصطکاک است. با افزایش ضریب اصطکاک از ۰/۲ تا ۰/۸، مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  افت می‌کند که البته این افت از ۰/۴ تا ۰/۸ خیلی کمتر و در حد نامحسوس است. توجه این پدیده بدین صورت است که متناسب با افزایش ضریب اصطکاک، نیروی اصطکاک بین وجوه افزایش می‌یابد. این امر لغزش بین سطوح ترک را کاهش داده و به تبع آن  $K_{II}$  نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- روند تغییرات  $K_{II}$  به ازای زوایای مختلف استقرار ترک (a) ۴۵-۹۰ درجه و (b) ۹۰-۱۳۵ درجه



شکل ۱۴- نحوه تغییر شکل لبه ترک در اثر نیروی عمودی و گشتاور

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که بیشترین مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  مربوط به زاویه ۹۰ درجه است، که در آن بار عمودی فقط باعث لغزش دو سطح ترک نسبت به هم می‌شود. اما در دیگر زوایا، بار عمودی را می‌توان در امتداد ترک و عمود بر ترک تجزیه کرد؛ در نتیجه بار عمودی باعث بازشدگی یا فشار دو سطح روی همدیگر نیز خواهد شد.

## ۷- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، مسئله ترک سطحی ریل در تماس چرخ و ریل مورد مطالعه قرار گرفت. تغییرات ضرایب شدت تنش  $K_I$  و  $K_{II}$  در تماس چرخ و ریل به وسیله روش مدل المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر فاکتورهای همچون زاویه استقرار ترک، طول ترک، ضریب اصطکاک و موقعیت چرخ نسبت به ترک بر ضرایب شدت تنش مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج زیر از مدل سازی حاضر به دست آمد:

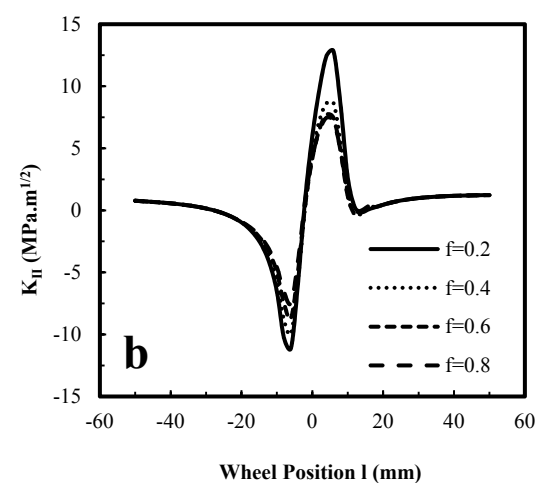
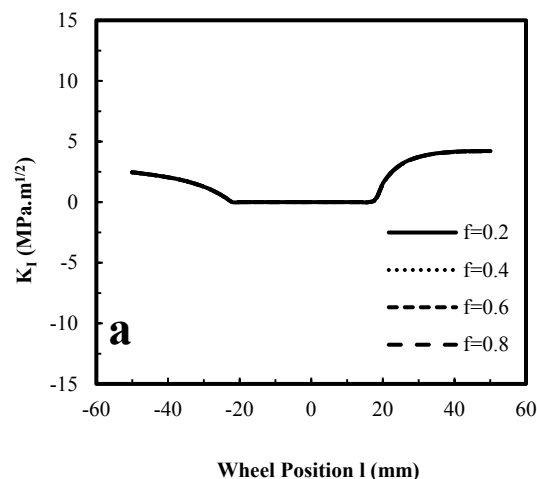
(۱) مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  با افزایش طول ترک افزایش می یابد و موقعیت مکانی چرخ که در آن  $|K_{II}|_{Max}$  اتفاق می افتد نیز به سمت راست جابجا می شود.

(۲) تغییر شکل پیچیده لبه ترک هنگام عبور چرخ، جهت تنش برشی را در سطوح ترک تغییر می دهد. این تغییر باعث نوسان در مقادیر  $K_{II}$  می شود.

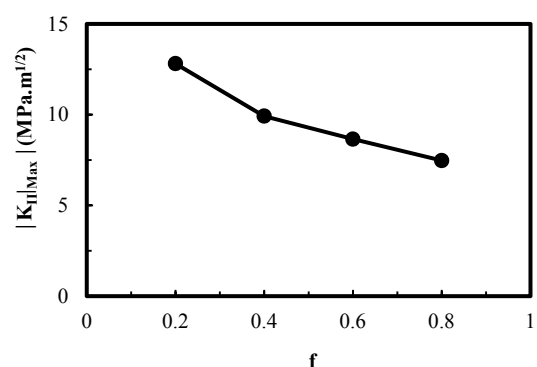
(۳) با افزایش زاویه استقرار ترک از ۴۵ تا ۹۰ درجه و کاهش آن از ۱۳۵ تا ۹۰، وضعیت نسبی مدهای شکست در حال تغییر است؛ بدین صورت که از مقدار  $K_I$  کاسته شده و بر مقدار  $K_{II}$  اضافه می شود. بیشترین مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  مربوط به زاویه ۹۰ درجه است.

(۴) با افزایش ضریب اصطکاک از ۰/۲ تا ۰/۸ مقدار  $|K_{II}|_{Max}$  کاهش می یابد که البته این نرخ کاهش برای ضریب اصطکاک از ۰/۴ تا ۰/۸ خیلی کمتر و در حد نامحسوس است.

(۵) تحلیل پارامتریک ضرایب شدت تنش نشان می دهد که ضریب  $K_{II}$  دارای رفتار سیکلی و مقادیری بزرگتر از  $K_I$  می باشد. از این رو به نظر می رسد در این مسئله تماس چرخ و ریل، مد برشی بر رفتار نوک ترک غالب است.



شکل ۱۶- روند تغییرات ضریب شدت تنش به ازای ضرایب اصطکاک مختلف  $K_I$  (a) و  $K_{II}$  (b)



شکل ۱۷- روند تغییرات ضریب  $|K_{II}|_{Max}$  به ازای ضرایب اصطکاک مختلف ترک

## مراجع

- [1] Seitzl, S., Knesl, Z. (2008), "Two parameter fracture mechanics: Fatigue crack behavior under mixed mode conditions". Engineering Fracture Mechanics, Vol. 75, pp. 857-865.



- [2] Yu, C. C., Keer, L. M. (1997), "Three-dimensional residual stress effects on the fatigue crack initiation in rails". ASME J. Tribol., Vol. 119, pp. 660-666.
- [3] Rinsberg, J. W., Loo-Morrey, M., Kapoor, A., Beynon, J. H. (2000), "Prediction of fatigue crack initiation for rolling contact fatigue". Int. J. Fatigue, Vol. 22, pp. 205\_215.
- [4] Kim, J. K., Kim, C. S. (2002), "Fatigue crack growth behavior of rail steel under mode I and mixed mode loadings". Mater. Sci. Eng., A, Vol. 338, pp. 191-201.
- [5] Ringsberg, J. W. (2001), "Life prediction of rolling contact fatigue crack initiation". Int. J. Fatigue, Vol. 23, pp. 575\_586.
- [۶] سجادی، س.ع.، (۱۳۸۴). رفتار مکانیکی مواد. چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.
- [7] Chang, J., Xu, J. Q., Mutoh, Y. (2006), "A general mixed-mode brittle fracture criterion for cracked materials". Eng. Fracture Mech., Vol. 73, pp. 1249-1263.
- [8] Souiyah, M., Alshoaibi, A., Muchtar, A., Ariffin, A. K. (2008), "Finite element model for linear-elastic mixed mode loading using adaptive mesh strategy". J. Zhejiang Univ. Sci., A., Vol. 9, No. 1, pp. 32-37.
- [9] ANSYS User's Manual Version 12, Inc.
- [10] Komvopoulos, K., Cho, S. S. (1997), "Finite element analysis of subsurface crack propagation in a half-space due to a moving asperity contact". Wear, Vol. 209, pp. 57-68.
- [11] Hills, D. A., Ashelby, D. W. (1979), "On the application of fracture mechanics to wear". Wear, Vol. 54, pp. 321-330.

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FRACTURE MECHANICS OF WHEEL-RAIL

**S.Y. Ahmadi Broughani<sup>1</sup> and S.R. Sajjadi<sup>2\*</sup>**

1. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

2. Graduate Student, Faculty of Engineering, Birjand University, Birjand, Iran

\*Corresponding Author: srasajjadi82@gmail.com

---

### ARTICLE INFO

---

Keywords:

Surface crack,  
Wheel and rail,  
SIFs,  
FEM.

---

### ABSTRACT

---

In this paper, wheel-rail contact problem in the presence of rail surface crack is investigated. The reason for investigating this problem is significant effect of wheel-rail contact on stress intensity factors. In this research, by using finite element method and a commercial software, wheel-rail is modeled under partial slip rolling condition. Contact elements are used to model the interactions between the wheel-rail contact surfaces and the crack surfaces. Stress intensity factors are calculated through a numerical displacement extrapolation method. The effects of crack orientation, crack length, friction coefficient and contact on the stress intensity factors are studied. The results indicate that KII has greater values than KI. Therefore, shear mode may dominate the tip behavior in this wheel-rail contact problem. As the wheel passes over, the complicated crack edge deformation changes the direction of interfacial shear stress and this causes variation in KII. Fluctuation in KII is the main factor of fatigue crack propagation in the wheel-rail contact problem.

---