

شبیه سازی سه بعدی رشد ترک خستگی در ریل های راه آهن

رضا مسعودی نژاد^{۱*}، حسام سلیمانی^۲، امین صابر^۲، خلیل فرهنگ دوست^۳، محمود شریعتی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استاد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

خلاصه

قطار و ریل یکی از شیوه های متداول حمل و نقل در جهان می باشد که استفاده گسترده از آن، ضرورت مطالعه در این حوزه را نمایان می سازد. هدف از این مقاله، بررسی تاثیر جهت حرکت بار بر روی رشد ترک خستگی در ریل های راه آهن می باشد. بدین منظور از نمونه ریل موجود در سامانه ریلی ایران یعنی ریل UIC60 با هندسه دقیق پروفیل و روش اجزای محدود استفاده شده است. در این راستا ابتدا یک مدل المان محدود الاستیک-پلاستیک سه بعدی ارائه می شود و با استفاده از این مدل، محل تنش حداکثر ناشی از تماس چرخ و ریل بدست می آید. سپس با استفاده از کد المان مرزی ضمن انجام تحلیل تنش به ازاء موقعیت های مختلف استقرار چرخ، مقادیر مختلف ضریب شدت تنش بدست آمده است. دو مشخصه مربوط به انتشار ترک خستگی تماسی غلظتی یعنی رشد و امتداد توسعه ترک به کمک این ضرایب شدت تنش محاسبه گردیده است. در ادامه رشد ترک تحت بار خستگی و به صورت سه بعدی مدل گردیده است، در این ارتباط رابطه پاریس به عنوان معیار سرعت رشد و راستای تنش مماسی ماکزیمم به عنوان امتداد رشد ترک در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج بدست آمده نشان داد ترک در هر دو جهت رشد می کند اما ترک در جهت حرکت چرخ رشدی سریع تری نسبت به ترک در خلاف جهت حرکت دارد.

کلمات کلیدی: رشد ترک خستگی، ریل، مدل المان محدود الاستیک-پلاستیک، ضریب شدت تنش، تنش مماسی ماکزیمم.

۱. مقدمه

ریل های راه آهن از راه های مختلفی دچار از کارافتادگی می شوند. شکست بر اثر خستگی ممکن است شدیدتر و اثرات بیشتری داشته باشد. پیش بینی دقیق رشد ترک در ریل که از طریق مدلسازی در نرم افزار انجام می شود، می تواند هزینه های نگهداری را کاهش دهد. ونگ و همکارانش در پی تحقیقات خود در این حوزه به این نکته آگاهی پیدا نمودند که ترکهای کم عمق و زاویه دار سطحی تحت شرایطی تبدیل به پیتینگ و یا ترک عرضی می گردند و به دلیل خطرناک

* Corresponding author: R. Masoudi Nejad, PhD Candidate.

Email: reza.masoudinejad@gmail.com

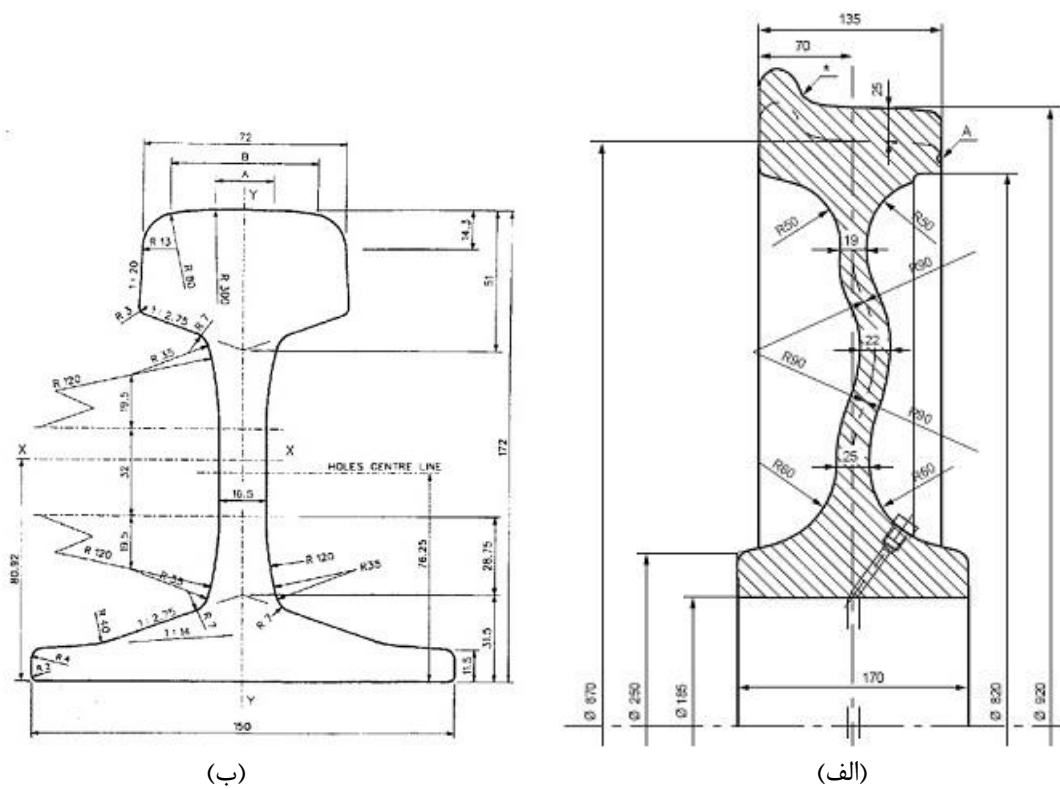
بودن ترک‌هایی که به سمت عمق پیش می‌روند. همچنین از عواملی مانند زاویه ترک اولیه و نوع بارگذاری را به عنوان عوامل موثر در تبدیل ترک به پیتینگ و یا ترک عرضی ارائه نمودند [۱].

کابو تغییر شکل خستگی در عیوب ریل و چرخ بر اثر تماس غلتشی با در نظر گرفتن پاسخ بار اضافه و تأثیر عیوب خوشه ای را مورد مطالعه قرار داد. وی در این تحقیق با بهره بردن از مدل اجزاء محدود به تحلیل تنش، کرنش و تغییر شکل خستگی در نزدیکی عیوب پرداخته است. از نتایج حاصل از این تحقیق می‌توان به این مورد اشاره نمود که بار اضافه، زیان آور بوده و باعث ایجاد تغییر شکل بزرگ در اطراف عیب می‌شود [۲]. برتا و همکارانش نشان دادند که ترک در ابتدا موازی با سطح ریل شروع به رشد می‌کند اما بعد از مدتی میل به رشد در جهت عمق را دارا می‌باشد. هدف از این پروژه آنالیز فرایند رشد ترک و تعیین مسیر رشد یعنی دو عامل مهم در تعیین فواصل زمانی بازرسی ریل می‌باشد. در ابتدا شکست نگاری مسئله وجود مود دوم شکست را آشکار می‌سازد و مشخص می‌شود که مود اول تنها بعد از انحراف نهائی ترک اتفاق می‌افتد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ترک اولیه میل به رشد در مسیری دارد که میل به بیشینه شدن دارد در حالیکه تأثیر کمتری دارد [۳]. اسکیتبل و همکارانش تنش‌های پسماند موجود در ریل ناشی از جوشکاری در رشد ترک خستگی را مورد بررسی قرار دادند. آنها با در نظر گرفتن اثر تنش‌های پسماند اثر عبور چرخ را بر روی رشد ترک بوسیله روش المان محدود بررسی کردند. همچنین اثر پارامترهای بار وارده بر محور، موقعیت ترک و ابعاد ترک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصلشان داده است که اثر تنش گرمائی بسیار مهم می‌باشد [۴].

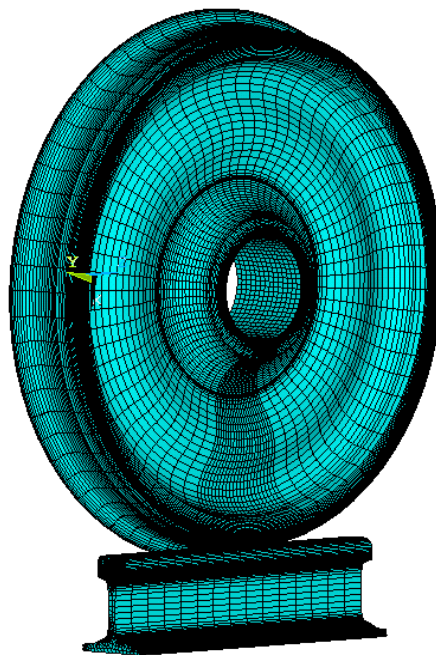
بیشتر تلاش‌های صورت گرفته در زمینه رشد ترک در زمینه پیش بینی شروع ترک می‌باشند. در برخی از کارهای صورت گرفته نیز انتشار ترک صورت گرفته است. اما رشد ترک به صورت سه بعدی و در سامانه ریلی ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله با در نظرگیری پارامترهای موجود در سامانه ریلی ایران، ابتدا محل بیشینه تنش وارد شده بر ریل در طی تماس با چرخ شبیه سازی شده است و سپس نتایج حاصل بعنوان ورودی برای رشد ترک خستگی و برای دو ترک متفاوت در جهت حرکت و در خلاف حرکت چرخ به روش المان مرزی مورد استفاده قرار گرفت.

۲. تحلیل تنش ناشی از تماس چرخ و ریل

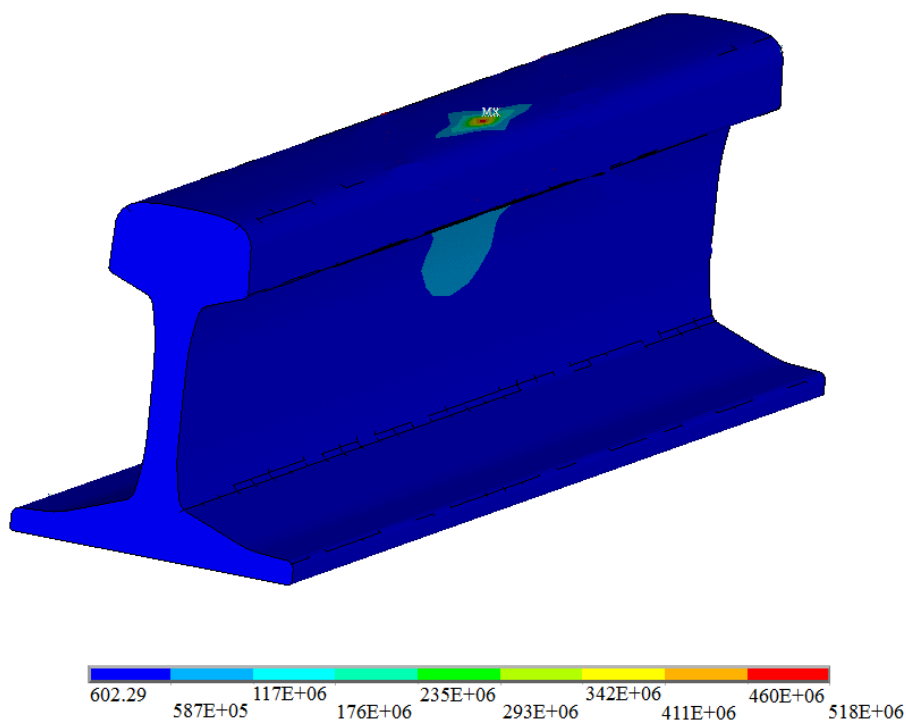
از آنجایی که در این مطالعه خستگی و شکست ناشی از بارگذاری مورد مطالعه قرار گرفته است لذا برای تعیین محل شروع جوانه زنی ترک از مدل سازی تماس چرخ و ریل در نرم افزارهای المان محدود استفاده شده است. بدین منظور از نرم افزار المان محدود Ansys برای تحلیل تنش ناشی از تماس چرخ و ریل استفاده شده است. برای مدلسازی از چرخ با پروفیل S1002 که در حال حاضر پروفیل مورد استفاده در تراش چرخ‌های سامانه ریلی ایران است و برای مدل سازی ریل، پروفیل UIC60 [۵] مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). طول ریل مدل شده، طولی از ریل است که بین دو تراورس قرار دارد که برابر با ۶۰۰ میلیمتر می‌باشد. نحوه تماس چرخ و ریل در شکل ۲ نشان داده شده است. از آنجایی که در حال حاضر عمده خرید های ریل در سامانه ریلی ایران از نوع فولاد گرید R7T می‌باشد لذا برای این مطالعه جنس چرخ از این نوع در نظر گرفته شده است. باری که در حالت دینامیکی توسط هر چرخ تحمل می‌شود $9/5$ تن یا معادل ۹۲ کیلونیوتن خواهد بود. درجه آزادی چرخ در راستایی که نیرو وارد می‌شود آزاد گذاشته شده و در دو راستای دیگر کاملاً مقید شده است. همچنین در دو طرف ریل نیز شرایط مرزی کاملاً گیردار اعمال گردیده است.



شکل ۱: الف) سطح مقطع چرخ منوبلوک ب) سطح مقطع ریل UIC60



شکل ۲: مدل المان محدود تماس چرخ و ریل



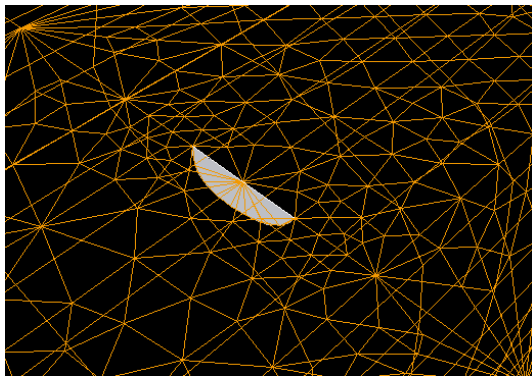
شکل ۳: توزیع تنش ناشی از تماس چرخ و ریل

براساس نتایج تحلیل اجزا محدود، ماکزیمم تنش وان میسر برابر ۵۱۸ مگاپاسکال می باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

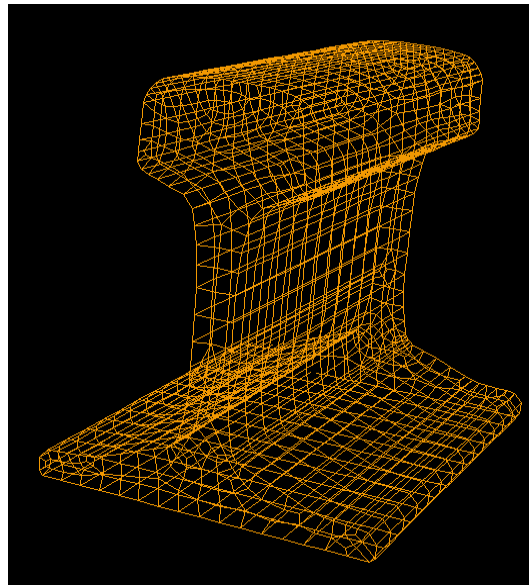
۳. رشد ترک خستگی و تخمین عمر ریل راه آهن

ترکهای سطحی، در سطح ریل قرار داشته و بعد از رشد می توانند بنا به نوع پارامترهای تأثیر گذار از قبیل: بار گذاری، اصطکاک و زاویه ترک اولیه تبدیل به ترک عرضی گردند. ترکهای عرضی از خطرناک ترین عیوب موجود در ریلها می باشند.

جهت شبیه سازی رشد ترک از نرم افزار FRANC3D که توسط محققان دانشگاه کرنل نوشته شده، استفاده شده است [۶]. برای مدلسازی، قسمتی از ریل که بین دو تراورس واقع شده، در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن ریل تنها نیمی از این فاصله مدلسازی شده است. در شکل ۴ مدل المان محدود و ترک موجود در آن نشان داده شده است که برای حصول بهتر نتایج در اطراف ترک و محل اعمال بار تماسی از المانهای بیشتری استفاده شده است. در این مطالعه هندسه ترک به صورت نیم بیضی و در صفحه ای که در تحلیل تنش در قسمت قبل بدست آمد، قرار داده شده است. دلیل انتخاب این شکل از ترک، جامعیت و نمونه های دیده شده در ریل های راه آهن می باشد. طول اولیه ترک مورد بررسی با ابعاد $a=1\text{mm}$ و $b=2\text{mm}$ می باشد که به عنوان ترک اولیه در نظر گرفته شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۴: الف) هندسه المان بندی شده ریل (ب) هندسه ترک اولیه در نرم افزار Franc3D

نیروهایی که به مقطع ریل وارد می شوند، نیروی عمودی ناشی از وزن قطار که از طریق چرخ به ریل وارد می شود و دیگری نیروی مقاومت غلتشی که در اثر عبور قطار از طریق چرخها به ریل وارد می شود، می باشند. این نیرو همان نیروی ناشی از اصطکاک غلتشی می باشد که به صفحات ترک وارد شده و باعث لغزش آنها روی یکدیگر می شود. پس از اعمال بارگذاری قطعه مش بندی می شود و از طریق نرم افزار BES تحلیل تنش صورت می گیرد. سپس مقادیر ضریب شدت تنش برای هر سه مود محاسبه می شود.

با در اختیار داشتن مقادیر ضریب شدت تنش، جهت رشد ترک نیز مشخص می شود. برای رشد ترک در نرم افزار FRANC3D دو نوع رشد ترک امکان پذیر می باشد: رشد ترک به صورت دستی و رشد ترک به صورت اتوماتیک. در رشد ترک به صورت دستی میزان رشد ترک دلخواه است، اما باید به این نکته توجه داشت که رشد ترک نباید بیش از ۳۰٪ مجموع طول ترک های قبلی باشد. پس از مشخص شدن جهت رشد ترک می توان منحنی نوک ترک را فیت کرد و ترک را برای یک مرحله رشد داد. بعد از رشد ترک قطعه دوباره مش زده می شود و برای حل آماده می شود، این کار برای هر مرحله از رشد ترک باید تکرار شود. در ادامه نیز پس از ورود اطلاعات لازم و پس از محاسبه مقادیر ضریب شدت تنش، عمر خستگی برای چرخ موردنظر محاسبه می شود. برای بدست آوردن نرخ رشد ترک و عمر خستگی نمونه از رابطه اصلاح شده پاریس استفاده می شود که اثرات ناشی از بسته شدن نوک ترک را نیز لحاظ می کند. نرخ رشد بر اساس این رابطه به شکل زیر تعریف می شود [۷]:

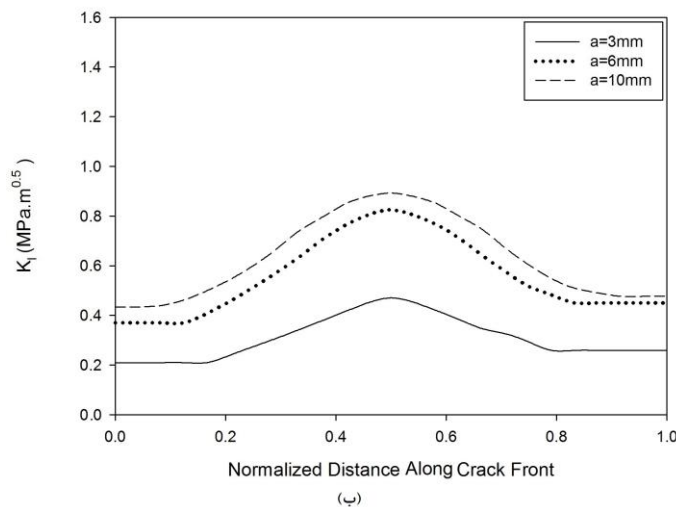
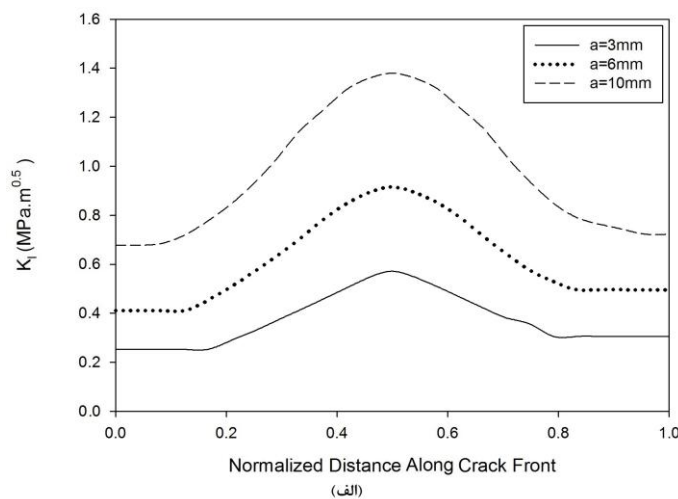
$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_{eff})^n = C (K_{max} - K_{op})^n \quad (1)$$

که در رابطه فوق ΔK_{eff} ضریب شدت تنش موثر بوده و برابر اختلاف حداکثر ضریب شدت تنش K_{max} و سطح تنش مورد نیاز برای بازشدگی نوک ترک، K_{op} ، می باشد. ضرایب C و n در این رابطه ثابتهای مادی هستند که در این مطالعه، $n=3.14$ و $C = 4.25 \times 10^{-9} \text{ m/cycle}$ می باشند.

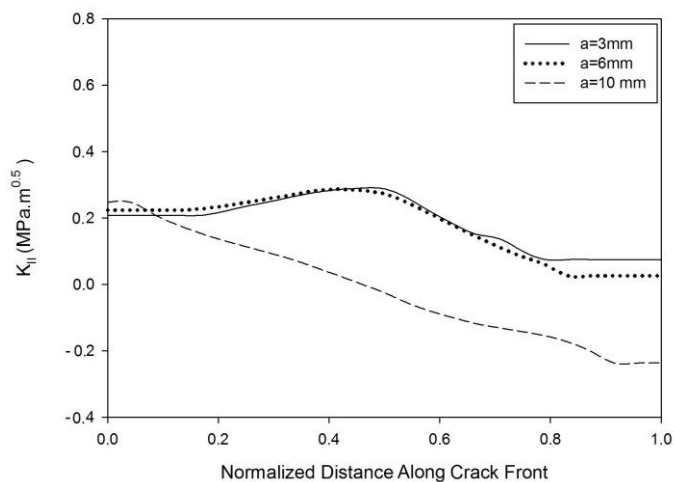
۴. نتایج

شکل های ۵، ۶ و ۷ ضرایب شدت تنش در نوک هر دو نوع ترک به ازاء طولهای اولیه مختلف ترک را نشان داده است بر اساس این شکل ها بیشینه ضرایب شدت تنش متعلق به ترک با طول بلندتر می باشد. همچنین هر آنچه که طول ترک بیشتر می شود، تفاوت در مقادیر ضرایب شدت تنش برای دو نوع ترک با طول یکسان افزایش می یابد. بنابراین می توان نتیجه گرفت در بارگذاری چرخه ای با افزایش طول ترک، شدت رشد ترک در جهت حرکت نسبت به ترک در خلاف حرکت افزایش می یابد.

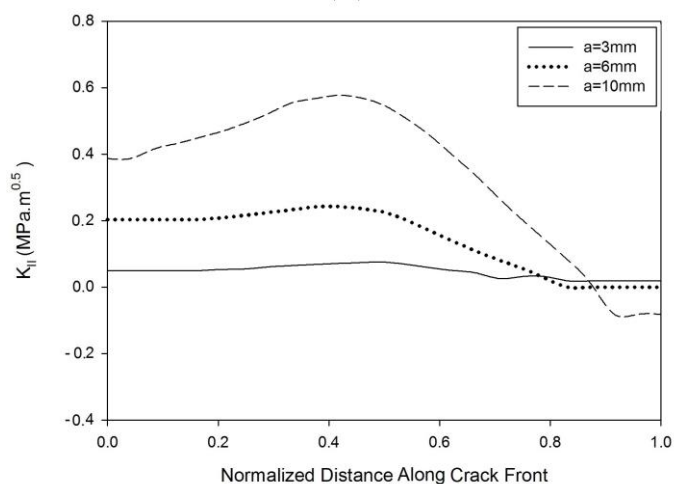
شکل ۸ عمر خستگی بدست آمده بر حسب طول ترک به ازاء مقادیر مختلف طول اولیه ترک برای دو نوع ترک را نشان داده است. برای این مطالعه مقدار ضریب اصطکاک بین چرخ و ریل ۰٫۳ و زاویه ترک با سطح افقی 60° در نظر گرفته شده است. با افزایش طول ترک، عمر خستگی نیز کاهش می یابد. در شکل ۸ مشاهده می شود که نسبت تغییرات عمر خستگی در ترک در جهت حرکت بیشتر از ترک در خلاف حرکت می باشد.



شکل ۵- ضریب شدت تنش مود I (الف) در راستا حرکت (ب) در خلاف حرکت

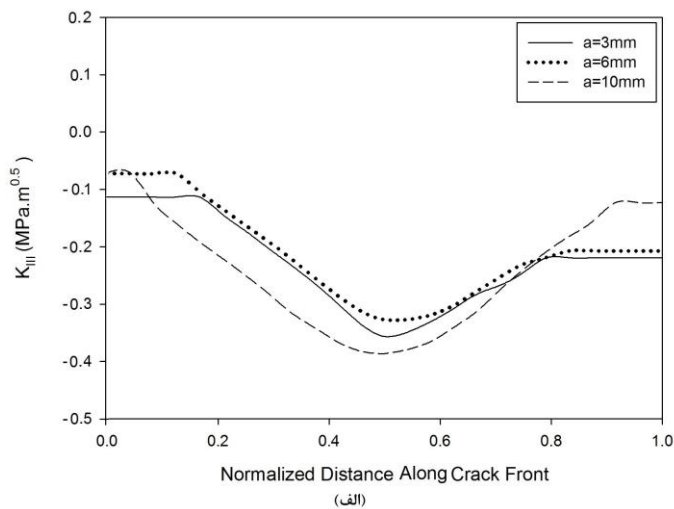


(الف)

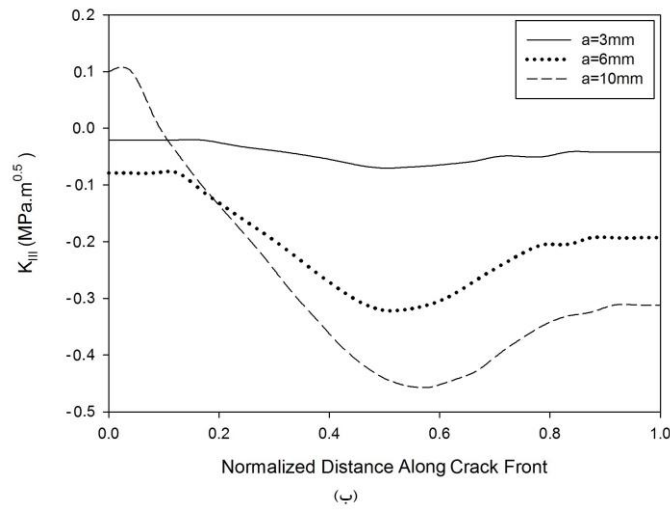


(ب)

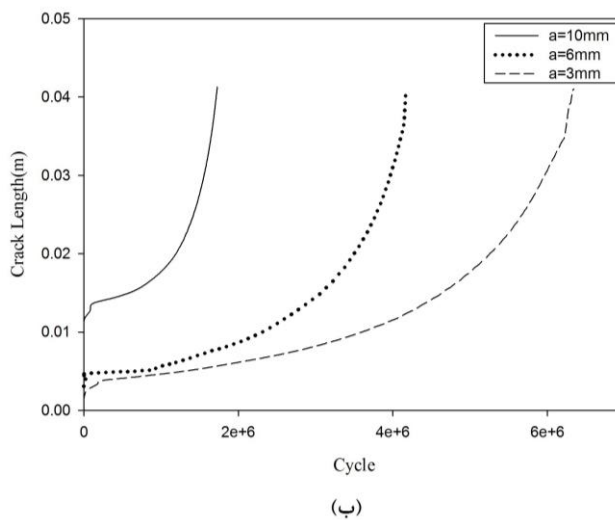
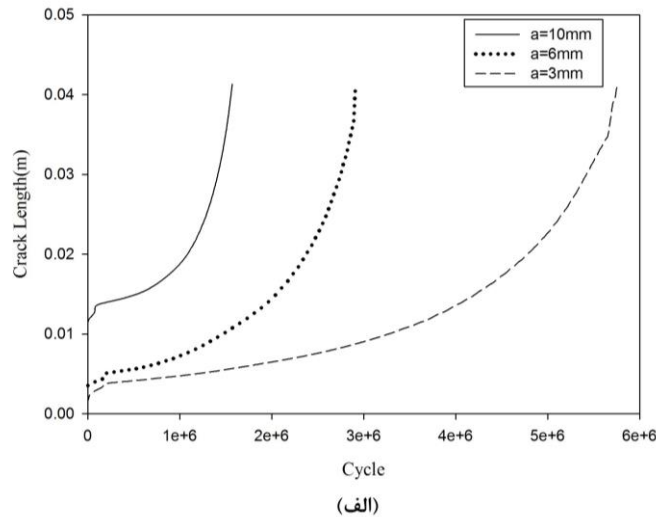
شکل ۶- ضریب شدت تنش مود II (الف) در راستا حرکت (ب) در خلاف حرکت



(الف)



شکل ۷- ضریب شدت تنش مود III الف) در راستا حرکت ب) در خلاف حرکت



شکل ۸- عمر خستگی بر حسب طول ترک به ازاء مقادیر مختلف طول اولیه ترک الف) در راستا حرکت ب) در خلاف حرکت

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک مدل سه بعدی برای رشد ترک خستگی و تخمین عمر ریل UIC60 ارائه شد. تحلیل پارامتریک شکست در این مقاله با استفاده از مکانیک شکست خطی و با تعریف عوامل تاثیر گذاری بر رشد ترک برای دو نوع ترک سطحی بر شکست انجام شده است. طول ترک اولیه تاثیر بسزایی در عمر خستگی دارد به گونه ای هر چه طول اولیه کمتر باشد عمر خستگی افزایش بیشتری می یابد. با توجه به اینکه ترک اولیه عموماً از فرایندهای ساخت و تماس چرخ و ریل (بهره برداری) ناشی می شود، می توان با کنترل بیشتر در این دو زمینه سبب افزایش عمر خستگی شد. ضریب شدت تنش در نوک ترک در راستای حرکت نسبت به ترک در خلاف حرکت چرخ بیشتر می باشد که نشان دهنده اهمیت بیشتر ترک های در راستای حرکت می باشد. بعبارت دیگر عمر خستگی برای ترک در راستای حرکت چرخ قطار کمتر از ترک در خلاف حرکت آن می باشد.

۶. مراجع

- 1.Wong, S.L., Bold, P.E. and Brown, M.W. (1996), "A branch criterion for shallow angled rolling contact fatigue cracks in rails," *Wear*, **191**, pp 45-53.
- 2.Kabo, E. (2002), "Material defects in rolling contact fatigue-influence of overloads and defect clusters," *International Journal of Fatigue*, **24**, pp 887-894.
- 3.Beretta, S., Boniardi, M., Carboni, M. and Desimone, H. (2004), "Mode II fatigue failures at rail butt-welds," *Engineering Failure Analysis*, **12**, pp 157-165.
- 4.Skyttebol, A., Josefson, B.L. and Ringsberg, J. W. (2005), "Fatigue crack growth in a welded rail under the influence of residual stresses," *Engineering fracture mechanics*, **72**, pp 271-285.
- 5.UIC 505-2 OR, May 2007. "Technical approval of mono-block wheel-Application document for standard EN 13979-1". 2nd edition.
- 6.Cornell Fracture Group, Cornell University, www.cfg.cornell.edu
- 7.Anderson, T.L. (1994), "Fracture Mechanics, fundamentals and applications", second edition, CRC press, USA.