

شبیه‌سازی سه‌بعدی رشد ترک خستگی در ریل‌های راه‌آهن

حسام سلیمانی ۱، رضا مسعودی نژاد ۲، خلیل فرهنگ دوست ۳، محمود شریعی ۴
۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد
۴- استاده، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

خلاصه

آگاهی پیدا نمودند که ترک‌های کم‌عمق و زاویه‌دار سطحی تحت شرایطی تبدیل به پیتینگ و یا ترک عرضی می‌گردند و به دلیل خطرناک بودن ترک‌هایی که به سمت عمق پیش می‌روند. همچنین از عواملی مانند زاویه ترک اولیه و نوع بارگذاری را به‌عنوان مؤثر 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 خوشه‌ای 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، زیان‌آور 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 هست. هدف از این پروژه آنالیز فرایند رشد ترک و تعیین مسیر رشد یعنی دو عامل مهم در تعیین فواصل زمانی بازرسی ریل است. 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 درحالی‌که 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 به‌وسیله روش المان محدود بررسی کردند. همچنین اثر پارامترهای بار وارده بر محور، موقعیت ترک و ابعاد ترک مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل نشان داده است که اثر تنش گرمائی بسیار مهم است [۴].

بیشتر تلاش‌های صورت گرفته در زمینه رشد ترک در زمینه پیش‌بینی شروع ترک می‌باشند. در برخی از کارهای صورت گرفته نیز انتشار ترک صورت گرفته است؛ اما رشد ترک به‌صورت سه‌بعدی 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 واردشده بر ریل در طی تماس با چرخ شبیه‌سازی شده است و

قطار و ریل یکی از شیوه‌های متداول حمل‌ونقل در جهان هست که استفاده گسترده از آن، ضرورت مطالعه در این حوزه را نمایان می‌سازد. هدف از این مقاله، بررسی تأثیر جهت حرکت باربر روی رشد ترک خستگی در ریل‌های راه‌آهن است. 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 سه‌بعدی ارائه می‌شود و با استفاده از این مدل، محل تنش حداکثر ناشی از تماس چرخ و ریل به دست می‌آید. سپس با استفاده از کد المان مرزی ضمن انجام تحلیل تنش به ازای موقعیت‌های مختلف استقرار چرخ، مقادیر مختلف ضریب شدت تنش به‌دست‌آمده است. دو مشخصه مربوط به انتشار ترک خستگی تماسی غلتشی یعنی رشد و امتداد توسعه ترک به کمک این ضرایب شدت تنش محاسبه گردیده است. در ادامه رشد ترک تحت بار خستگی و به‌صورت سه‌بعدی مدل گردیده است، در این ارتباط رابطه پاریس به‌عنوان معیار سرعت رشد و راستای تنش مماسی ماکزیمم به‌عنوان امتداد رشد ترک در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده نشان داد ترک در هر دو جهت رشد می‌کند اما ترک در جهت حرکت چرخ رشدی سریع‌تری 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

ریل‌های راه‌آهن از راه‌های مختلفی دچار ازکارافتادگی می‌شوند. شکست بر اثر خستگی ممکن است شدیدتر و اثرات بیشتری داشته باشد. پیش‌بینی دقیق رشد ترک در ریل که از طریق مدل‌سازی در نرم‌افزار انجام می‌شود، می‌تواند هزینه‌های نگهداری را کاهش دهد. ونگ و همکارانش در پی تحقیقات خود در این حوزه به این نکته

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

Email: reza.masoudinejad@gmail.com

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 به دست 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]:

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

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

۴. نتایج

شکل‌های ۵، ۶ و ۷ ضرایب شدت تنش در نوک هر دو نوع ترک به ازای طول‌های اولیه مختلف ترک را نشان داده است بر اساس این شکل‌ها بیشینه ضرایب شدت تنش متعلق به ترک با طول بلندتر هست. همچنین هر آنچه 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 چرخه‌ای با افزایش طول ترک، شدت رشد ترک در جهت حرکت نسبت به ترک در خلاف حرکت افزایش می یابد.

شکل ۸ عمر خستگی به دست آمده برحسب طول ترک به ازای 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 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 هست.

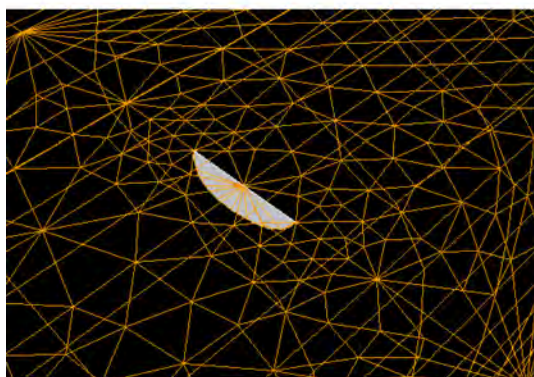
۳. رشد ترک خستگی و تخمین عمر ریل راه آهن

ترک‌های سطحی، در سطح ریل قرار داشته و بعد از رشد می توانند بنا به نوع پارامترهای تأثیرگذار از قبیل بارگذاری، اصطکاک و زاویه ترک اولیه تبدیل به ترک عرضی گردند. ترک‌های عرضی از خطرناک‌ترین عیوب موجود در ریل‌ها می باشند.

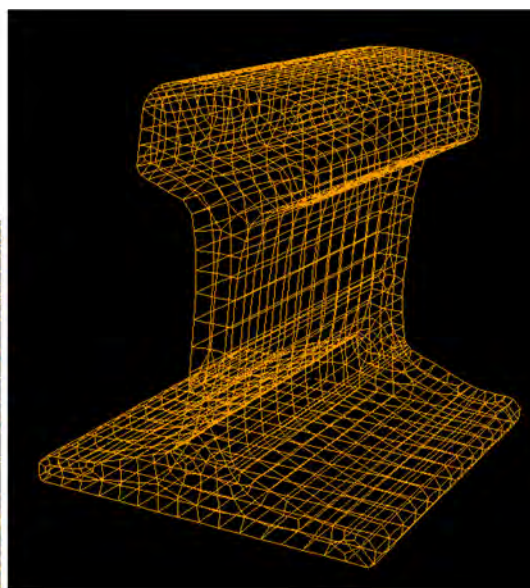
جهت شبیه‌سازی رشد ترک از نرم‌افزار FRANC3D که توسط محققان دانشگاه کرنل نوشته شده، استفاده شده است [۶]. برای مدل‌سازی، قسمتی از ریل که بین دو تراورس واقع شده، در نظر گرفته شده است. با توجه به تقارن ریل تنها نیمی از این فاصله مدل‌سازی شده است. در شکل ۴ مدل المان محدود و ترک موجود در آن نشان داده شده است 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 صفحه‌ای که در تحلیل تنش در قسمت قبل به دست آمد، قرار داده شده است. دلیل انتخاب این شکل از ترک، جامعیت و نمونه‌های دیده شده در ریل‌های راه آهن هست. طول اولیه ترک مورد بررسی با ابعاد $a=1mm$ و $b=2mm$ است که به عنوان ترک اولیه در نظر گرفته شده است.

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 است 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 نرم‌افزار 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 نرم‌افزار FRANC3D دو نوع رشد ترک امکان پذیر است: رشد ترک به صورت دستی و رشد ترک به صورت خودکار. 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 ترک‌های قبلی باشد. پس از مشخص شدن جهت رشد ترک می توان منحنی نوک ترک را فیت کرد و ترک را برای

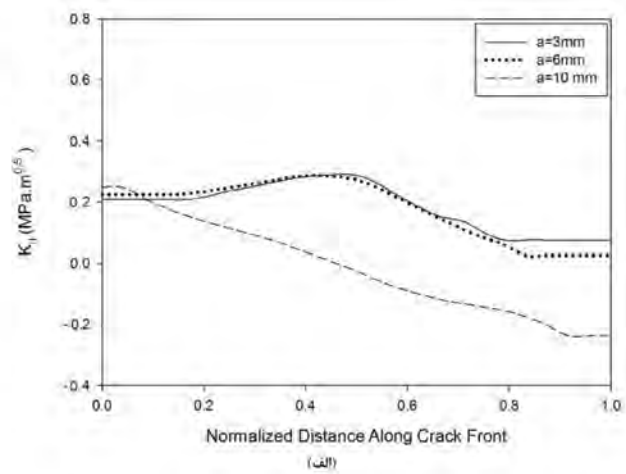
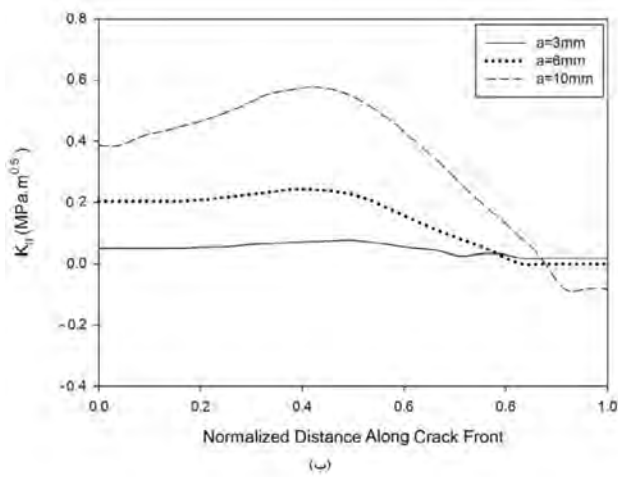
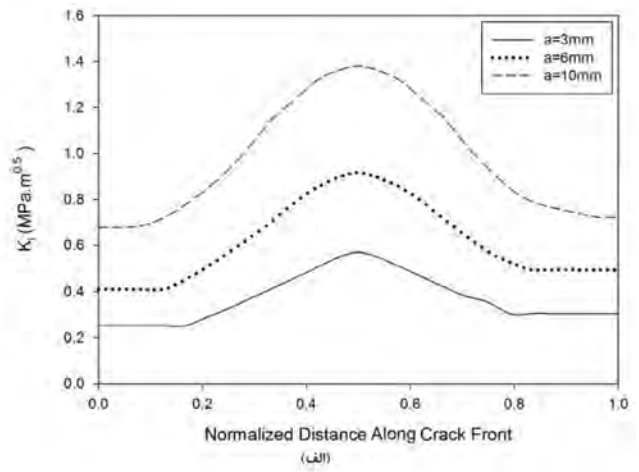
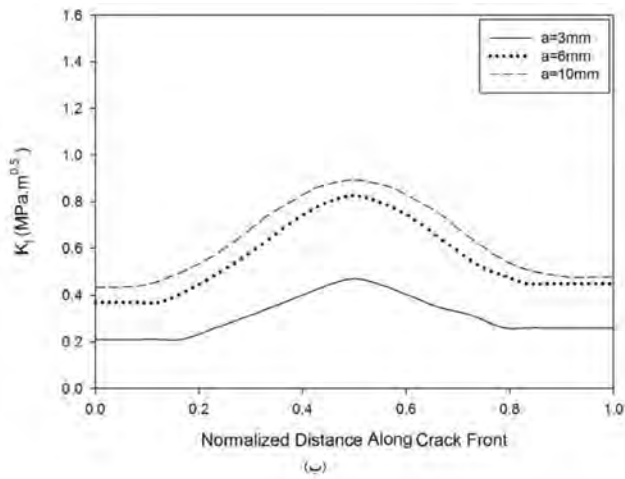


(ب)

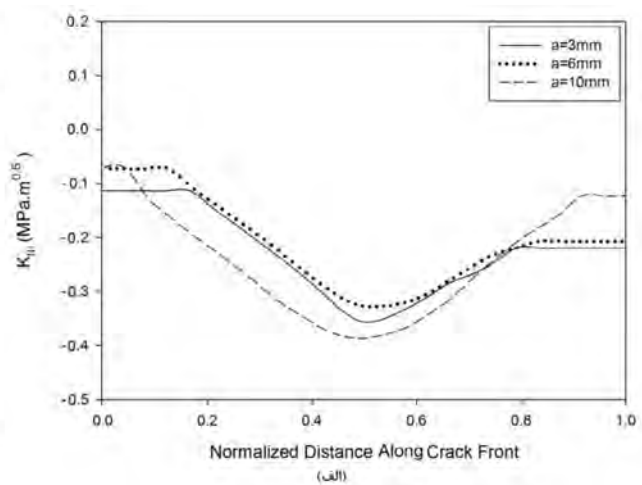
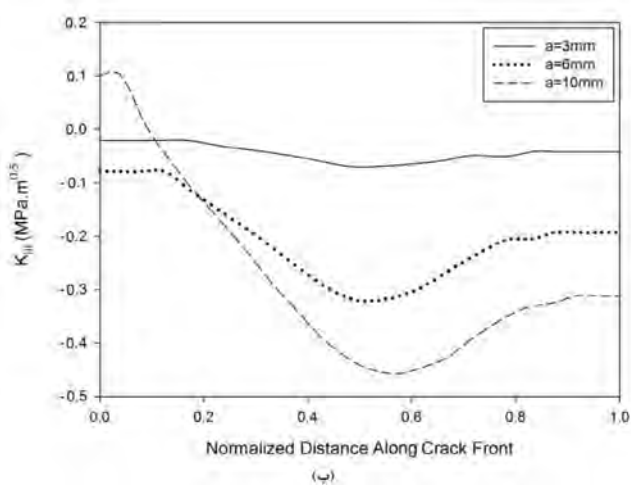


(الف)

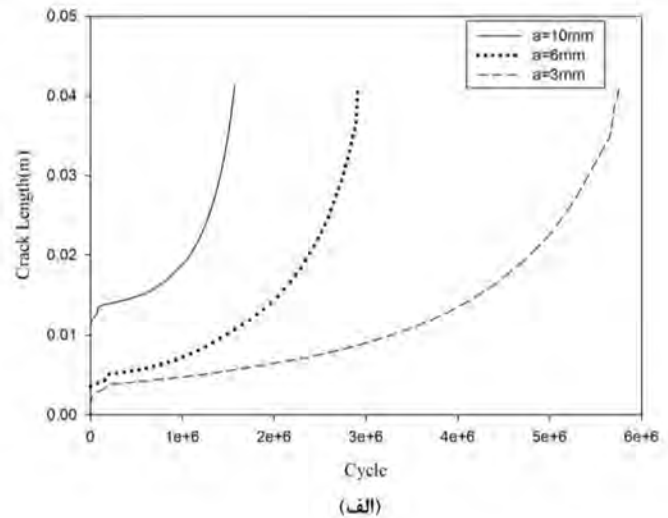
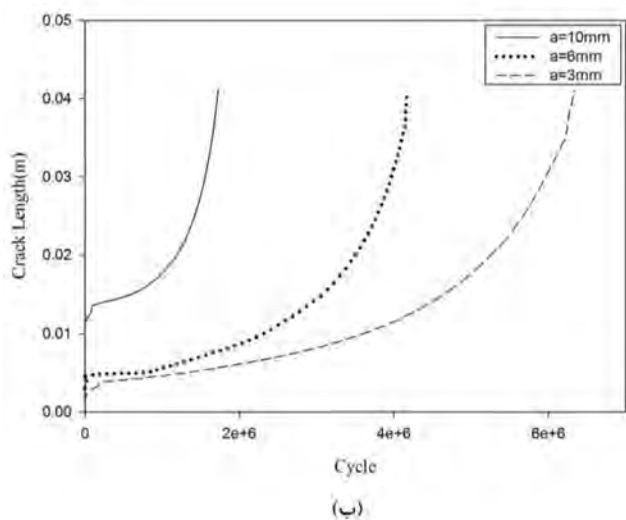
شکل ۴: (الف) هندسه المان بندی شده ریل (ب) هندسه ترک اولیه در نرم‌افزار Franc3D



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



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



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

به اینکه ترک اولیه عموماً از فرایندهای ساخت و تماس چرخ و ریل (بهره‌برداری) ناشی می‌شود، می‌توان 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 است که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر ترک‌های در راستای حرکت است. به عبارت دیگر عمر خستگی برای ترک در راستای حرکت چرخ قطار کمتر از ترک در خلاف حرکت آن هست.

نتیجه گیری

در این مطالعه یک مدل سه‌بعدی 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 تأثیرگذاری بر رشد ترک برای دو نوع ترک سطحی بر شکست انجام شده است. طول ترک اولیه تأثیر بسزایی در عمر خستگی دارد به گونه‌ای هر چه این طول اولیه کمتر باشد عمر خستگی افزایش بیشتری می‌یابد. با توجه

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