

تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شاریپی در دماهای مختلف

رحمت... قاجار (نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
جواد علیزاده کاکلر، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
مهدی نعمتی، کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران
یونس علیزاده، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: ghajar@kntu.ac.ir

چکیده

صنعت حمل و نقل ریلی، امروزه به عنوان ایمن‌ترین سامانه حمل و نقل بار و مسافر در دنیا شناخته شده است. واماندگی ریل که یکی از اجزای اصلی و کلیدی این صنعت به شمار می‌آید، می‌تواند باعث بروز سوانح شده و ایمنی حاصله را تهدید نماید. در این مطالعه، از علم مکانیک شکست برای به دست آوردن چقرمگی شکست ریل گرید A 900 با پروفیل UIC60 در دماهای مختلف، با آزمایش ضربه شاریپی استفاده شده و طول ترک بحرانی برای برخی از ترکهای عرضی در تاج ریل محاسبه شده است. برای این منظور، آزمایش ضربه شاریپی بر روی 55 نمونه استخراج شده از ریل در بازه دمایی ۰- تا ۶۰ درجه سانتیگراد انجام و انرژی شکست اندازه‌گیری شده است. سپس با استفاده از روابط تجربی بین چقرمگی شکست و انرژی شکست نمونه‌ها، چقرمگی شکست در دماهای مختلف مورد محاسبه قرار گرفته است. در نهایت، با مساوی قرار دادن ضریب شدت تنش با چقرمگی شکست، K_{Ic} ، طول ترک بحرانی به دست آمده است. طول ترک بحرانی در کنار آزمایشهای غیرمخرب از الزامات فرایند بازرسی ریلها برای جلوگیری از خطرات شکست ریل و نیز بهره‌برداری حداکثری از عمر مفید ریل به شمار می‌آید.

واژه‌های کلیدی: ریل، آزمایش ضربه شاریپی، چقرمگی شکست، طول ترک بحرانی

۱. مقدمه

یکی از اجزای اصلی و کلیدی در سامانه‌های ریلی، ریل است. ریل بایستی در یک دوره زمانی طولانی در مقابل حوادث طبیعی و نیروهای ناشی از حرکت قطارها مقاومت کند. در این راستا اگر جزئی از ریل صدمه ببیند و یا حادثه‌ای در خط اتفاق بیفتد، باعث توقف قطارها در یک مسیر طولانی می‌شود. با وجود پیشرفتهای وسیع در صنعت ریلی، درصد قابل ملاحظه‌ای از ریلها قبل از عمر پیش‌بینی شده به دلیل شکستگی، ترک خوردگی، صدمات ناشی از عیوب متالورژیکی مربوط به تولید و یا شرایط بهره‌برداری نامناسب، از خطوط جمع‌آوری می‌شوند. بنابراین لازم است خطوط به صورت دوره‌ای تحت بازرسی قرار گیرند تا عیوب قبل از این که موجب سانحه شوند، اصلاح گردند. برای ایجاد بهره‌وری بیشتر و صرفه اقتصادی در استفاده از ریل، باید شناخت کاملی از خصوصیات ریل و بخصوص مکانیک شکست آن داشته باشیم.

در سه دهه اخیر، در کنار مطالعاتی که بر روی فولاد چرخ قطار و خواص سایشی و مکانیک شکست آن صورت گرفته [Aliza-deh & Farhangian, 2007, Asadilari & Alizadeh, 2010 and Alizadeh & Jafari, 2009]، تحقیقات گسترده‌ای در رابطه با فولادهای ریل صورت گرفته است. در سال ۱۹۸۲، راد [Ruud, 1982] روشهای به دست آوردن تنشهای پسماند را به صورت غیرمخرب و نیمه مخرب مورد مطالعه قرار داد. اسکینر و جاد [Skinner and Judd, 1996] در سال ۱۹۹۶ با مطالعه متالوگرافیک، پوسته‌ها و عیبهای عرضی ناشی از ترک خستگی را در ریل بررسی کردند. همچنین اشلائینزر و فیشر [Schleiner & Fis-cher, 2000] در سال ۲۰۰۰، با مدل‌سازی ۳ بعدی اجزا محدود، تنشهای پسماند را در یک ریل نو که برای مستقیم سازی، تحت نورد قرار گرفته محاسبه کردند. جیانگ [Jeong, 2001] در سال ۲۰۰۱، با بررسی اشکال مختلف عیوب و رشد آنها در ریل، در اثر بارهای تکراری، بیان کرد که نرخ رشد عیوب ریل در ابتدا آهسته بوده، اما با بزرگ شدن اندازه عیب، سرعت رشد آن نیز افزایش می‌یابد و اگر ریل تحت کنترل قرار نگیرد، اندازه عیب به حد بحرانی رسیده و نهایتاً ریل دچار شکست خواهد شد. زربست و همکاران [Zerbst,

Malder and Hintze, 2005] در سال ۲۰۰۵ با استفاده از مبانی مکانیک شکست، اجزای خط آهن (مانند اکسل، چرخ و ریل) و همچنین مفاهیم تیرانس آسیب و عمر ایمن را مورد بررسی قرار دادند. قاجار و علیزاده [Ghajar and Alizadeh, 2008] در سال ۲۰۰۸، خستگی تماس غلتشی و رشد ترکهای سطحی و زیرسطحی را در ریلهای راه آهن مورد مطالعه قرار دادند.

بیش از ۹۰ درصد واماندگی سازه‌ها، ناشی از بروز پدیده خستگی و شکست است، بنابراین، یکی از روشهای طراحی مناسب، انتخاب مواد بر اساس دیدگاه مکانیک شکست است. یکی از پارامترهای مهم و ضروری در این نوع از طراحی، چقرمگی شکست است. ضریب شدت تنش کرنش صفحه‌ای (چقرمگی شکست) K_{Ic} ، فقط به پارامترهای متالورژیکی وابسته بوده و مستقل از ابعاد و شکل هندسی نمونه است. به عبارت دیگر، چقرمگی شکست همانند تنش تسلیم، یک خاصیت ذاتی ماده بوده و مقادیر آن فقط به ترکیب شیمیایی، ریز ساختار و فرآیندهای حرارتی انجام شده بر روی قطعه بستگی دارد. در دماهای زیر صفر، تنشهای حرارتی کششی زیاد، همراه با چقرمگی شکست کم فولاد، ریل را بسیار آسیب پذیرتر می‌کند. در ضمن اکثر شکستهای گزارش شده برای ریل، در فصل زمستان و دماهای زیر صفر بوده است [Smith, Zerbst and et.al, 2009]. بنابراین مطالعه رفتار ریل در این دماها بسیار مفید است. آشکار است که در دماهای بالاتر، چقرمگی شکست ماده بیشتر بوده و در نتیجه طول ترک بحرانی بیشتر است و ریل، دیرتر دچار پدیده شکست می‌شود.

علاوه بر طراحی بر پایه مکانیک شکست، یکی از معیارها در رابطه با شکست ریل در فرآیند بازرسی و نگهداری و تعمیرات نیز، می‌تواند تساوی یا بیشتر شدن ضریب شدت تنش مود I از چقرمگی شکست باشد. بکار بردن این شیوه نیازمند دانستن چقرمگی شکست ریل در دماهای متفاوت و همچنین روشی تحلیلی برای مشخص کردن ضریب شدت تنش است که بتواند برای ریلهای مختلف بکار رود. فرمول ضریب شدت تنش برای اشکال مختلف ترک از تئوری الاستیسیته کلاسیک بدست می‌آید. فلسفه طراحی فوق بر این اصل نهاده شده است که طراحی به

تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف

گونه‌ای صورت پذیرد که حداکثر بهره‌وری ممکن از قطعه انجام پذیرد و خسارات احتمالی نیز دارای کمترین اثرات نامطلوب باشند. بنابراین چقرمگی شکست ریل و چگونگی تغییرات آن با دما، قسمت مهمی در طراحی و نگهداری و تعمیرات ریل‌های راه‌آهن به‌شمار می‌آید. در این مقاله به بررسی تجربی چقرمگی شکست ریل در دماهای متفاوت با استفاده از انجام آزمایش ضربه شارپی و استخراج طول ترک بحرانی در ریل پرداخته شده است. نتایج حاصل در این مقاله، قدرت تصمیم‌گیری کارشناسان را در فرایند نگهداری و تعمیرات افزایش داده و گامی در راستای طراحی بهینه این فرآیند است.

۲. عیوب ریل

عیوب ریل عمدتاً به سه شکل شکستگی، ترک خوردگی و یا آسیب‌دیدگی (تمام عیوب غیر از شکستگی و ترک خوردگی) بروز می‌کنند. ترک‌ها که منشأ عیوب شکل اول و دوم و در برخی موارد، شکل سوم به‌شمار می‌آیند، خود به انواع زیر قابل تقسیم هستند [UIC712, 2002]:

۱) ترک عرضی پیش رونده (عیب تخم‌مرغی^۱ و خپله) در قارچ ریل: این نوع ترک، شکل الف، از مرکز قارچ ریل یا از یک ترک افقی داخلی توسعه پیدا می‌کند. فرم مشخصه این نوع ترک این است که از ناحیه موسوم به لکه بیضی یا لکه تخم‌مرغی منشأ می‌گیرد و سرانجام در زمانی نه چندان طولانی این ترک سطح قارچ را فراگرفته و سپس در دو سطح جان ظاهر شده و شکستگی ریل را قریب الوقوع می‌سازد. در این حالت، هنگامی که شکستگی ایجاد شده هنوز مرئی نشده باشد، سطحی صاف و درخشان به صورت بیضی‌های متحدالمرکز قابل رویت می‌باشند.

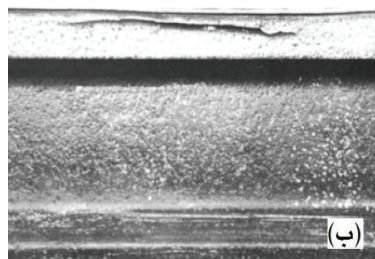
این سطح صاف خود می‌تواند نمایانگر گسترش ترک باشد. ۲) ترک افقی در قارچ ریل: عیب ترک افقی در قارچ ریل با گسترش تدریجی خود باعث جداشدگی قسمت فوقانی قارچ در سطحی تقریباً به موازات سطح غلتش ریل می‌گردد. این عیب باعث فرو رفتگی موضعی در سطح غلتش ریل می‌شود، که به صورت لکه کدری نمایان می‌شود و کاملاً از سطح درخشان غلتش ریل متمایز است. در ابتدا این ترک روی سطح بیرونی قارچ به فاصله تقریبی ۱۵ میلیمتری سطح غلتش ریل نمایان می‌شود، (شکل ۱). این ترک افقی می‌تواند در حال گسترش به طرف پایین منحرف شود و به صورت ترک عرضی درآید و سرانجام به شکستگی ریل منتهی شود.

۳) ترک عمودی طولی در قارچ ریل: ترک عمودی طولی در قارچ ریل با گسترش تدریجی خود باعث تقسیم شدن قارچ ریل در سطحی به موازات جان ریل می‌شود.

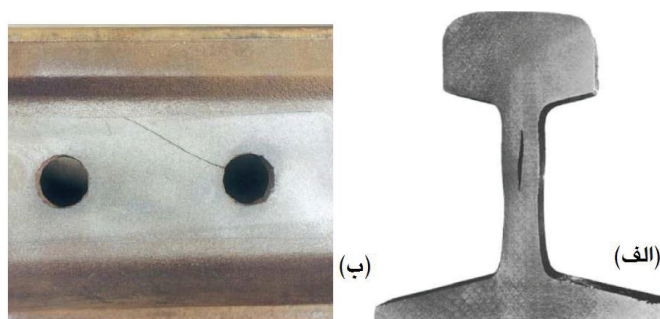
۴) ترک افقی در محل انحنای اتصال جان-قارچ: این نوع ترک ناشی از ساخت نادرست ریل بوده و حین گسترش به موازات انحنای جان-قارچ، می‌تواند به طرف بالا یا پایین منحرف شود. ۵) ترک افقی در محل انحنای اتصال جان-پاشنه: این نوع ترک نیز حین گسترش به موازات انحنای جان-پاشنه می‌تواند به طرف پایین یا بالا منحرف شود.

۶) ترک عمودی طولی در جان ریل: این عیب، شکل ۲ الف، می‌تواند با عیبهای دیگر همراه شده و موجب تسهیل شکستگی ریل گردد.

۷) ترک اطراف سوراخهای موجود در جان ریل: این نوع ترک به صورت شعاعی از لبه‌های سوراخهای واقع در جان ریل پیشروی کرده، معمولاً با زاویه ۴۵ درجه منحرف شده و سرانجام به



شکل ۱: (الف) ترک عرضی پیش رونده با منشأ داخلی. (ب) ترک سطح بیرونی قارچ به فاصله تقریبی ۱۵ میلیمتر از سطح غلتش ریل.

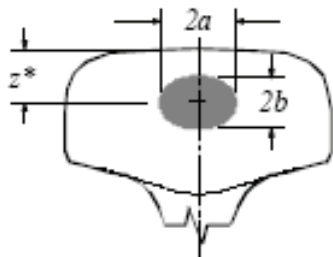


شکل ۲: (الف) ترک عمودی طولی در جان ریل. (ب) ترک اطراف سوراخ‌های موجود در جان ریل.

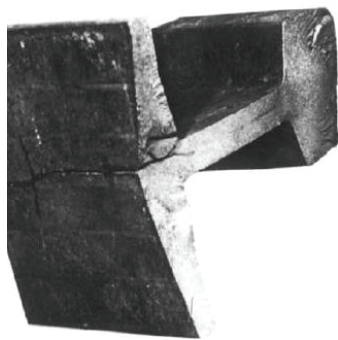
آنجا که این عیب در سمت عرضی و عمود بر سطح غلتش ریل جهت‌گیری می‌کند، تهدیدی جدی برای پیوستگی ریل به شمار می‌آید. شکل ۴ هندسه یک ترک عرضی داخلی (مثل ترک تخم‌مرغی) را به صورت یک ترک بیضوی در قارچ ریل نشان می‌دهد. موقعیت مرکز عیب نسبت به بالاترین نقطه سر ریل از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید [Jeong, 2003]:

$$z^* = 0.6213 + 1.7580 \times 10^{-2} A - 1.7933 \times 10^{-4} A^2 \quad (1)$$

به طوری که، A درصد اندازه مساحت عیب نسبت به مساحت سر ریل ($\%HA$) و واحد z^* نیز اینچ است. ضریب شدت تنش برای یک عیب بیضوی داخلی در سر ریل با معادله ریاضی زیر به دست می‌آید [Jeong, 2003].

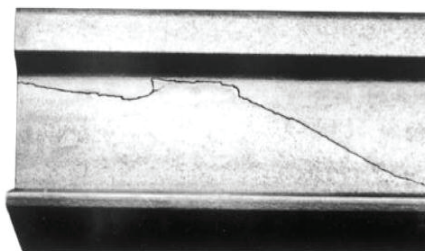


شکل ۴. هندسه یک ترک عرضی داخلی در سر ریل [Jeong, 2003]



(ب)

شکل ۳: (الف) ترک مایل که از سوراخ نمی‌گذرد. (ب) ترک عمودی طولی در پاشنه ریل.



(الف)

شکستگی ریل منتهی می‌گردد، شکل ۲ب.

ترک مایل جان ریل: این ترک با گسترش خود موجب جدایی قارچ یا پاشنه از جان ریل می‌شود. این ترکها در انحنای اتصالات قارچ - جان و یا پاشنه - جان انتشار یافته و در حال گسترش خود ممکن است به طرف پایین یا بالای جان منحرف گردند، شکل ۳الف. ترک عمودی طولی در پاشنه ریل: این نوع ترک به صورت خطوط کوچک طولی در زمان نوردکاری ریل، روی ثلث میانی سطح داخلی پاشنه ایجاد می‌گردد که به تدریج بر اثر تردد قطار، این خطوط به صورت ترک در می‌آیند، شکل ۳ب.

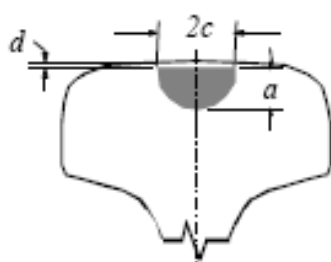
از بین این ۹ دسته ترک، ترک‌های عرضی پیش‌رونده که خود به دو دسته تخم‌مرغی و خپله تقسیم می‌شوند، خطرناک‌تر و مهم‌تر از سایرین بوده و موارد بروز بیشتری نیز دارند. در ادامه معادلات مربوط به این نوع از ترکها پرداخته خواهد شد.

۳. روابط عیوب عرضی پیش‌رونده

۱-۳ عیب تخم‌مرغی

عیب تخم‌مرغی نوعی ترک عرضی پیش‌رونده است که معمولاً از یک عیب ساخت نادرست کارخانه‌ای، ناشی می‌شود. از

تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف



شکل ۶. هندسه ترک خپله در سر ریل [Jeong, 2003].

فرمول ضریب شدت تنش برای یک عیب سطحی نیمه بیضوی به

صورت زیر تعریف می‌شود [Jeong, 2003]:

$$K_I = 1.12 M_I \sigma \frac{\sqrt{\pi a}}{E(k)} \quad (4)$$

که در آن، a عمق عیب، M_I ضریب تجربی معرف مقطع عرضی محدود قارچ ریل و مقدار آن مشابه ضریب رابطه (۲) است. در رابطه (۴)، $E(k)$ انتگرال نوع دوم است که وابسته به نسبت ابعادی بیضی است.

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta$$

$$k = \sqrt{1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2} \quad (5)$$

ضریب $1/12$ در رابطه (۴) به دلیل تأثیر سطح آزاد یا نزدیکی عیب به سطح ریل استفاده می‌شود. آزمایش اولتراسونیک بر روی ۵ ریل ژاپنی حاوی عیب خپله نشان می‌دهد که نسبت رعنائی برای عیب خپله تقریباً برابر ۱ است. به بیان دیگر، عیب خپله

$$K_I = \frac{2}{\pi} M_S M_I \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

که در آن، a نصف اندازه قطر بزرگ ترک بیضوی، M_S ضریب تجربی معرف شکل بیضوی ترک، M_I ضریب تجربی معرف ابعاد محدود مقطع عرضی ریل و σ نیز تنش طولی و برابر است با:

$$\sigma = \sigma_R + \sigma_N + \sigma_B \quad (3)$$

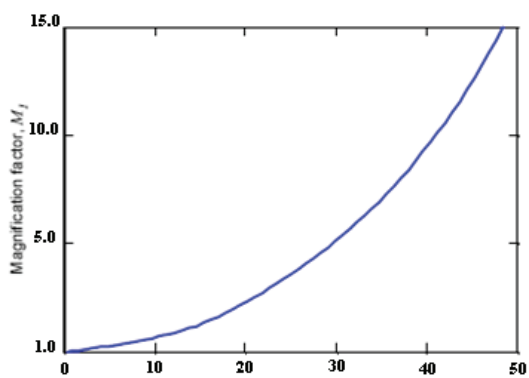
که در آن σ_R تنش پسماند، σ_N تنش افقی ناشی از نیروهای محوری و σ_B تنش خمشی ناشی از نیروی عمودی می‌باشد.

شکل ۵ الف تغییرات M_S را برای نسبت رعنائی (نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ، b/a) بین $0/4$ و $1/0$ نشان می‌دهد. در اکثر حالات نسبت رعنائی $0/7$ فرض می‌شود که M_S مربوط به آن $0/984$ است.

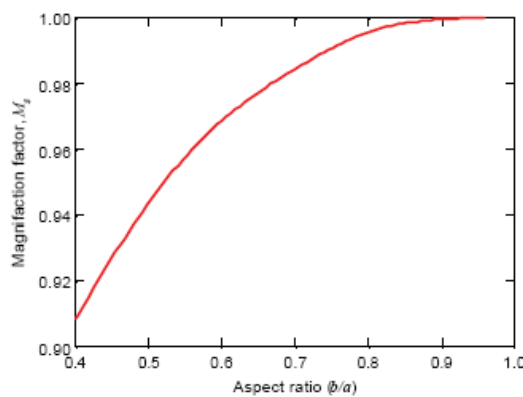
شکل ۵ ب نیز تغییرات M_I را نسبت به HA نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان دریافت که با افزایش اندازه عیب، M_I نیز همواره و با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد.

۲-۳ عیب خپله

عیب خپله نوعی ترک عرضی است که در سطح جوانه می‌زند. ترک در آغاز با زاویه کم نسبت به سطح رشد می‌کند. وقتی به عمق حدود ۳ تا ۵ میلی‌متر می‌رسد، گرایش به چرخیدن در جهت صفحه عرضی پیدا می‌کند. شکل ۶ یک عیب خپله ایده‌آل را نشان می‌دهد که به صورت یک عیب سطحی نیمه بیضوی در صفحه عرضی مدل شده است. در این شکل نسبت رعنائی به صورت a/c تعریف می‌شود.



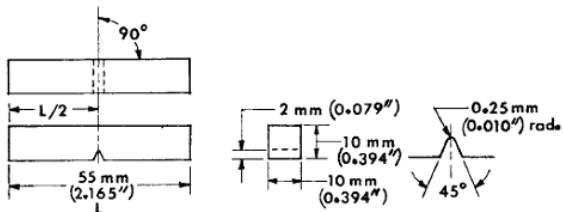
(ب)



(الف)

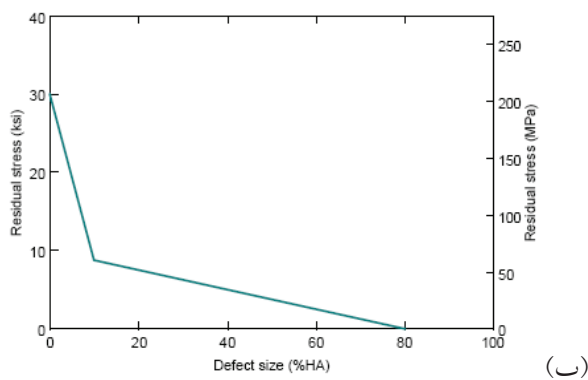
شکل ۵. (الف) ضریب تجربی M_S برحسب نسبت رعنائی. (ب) ضریب تجربی M_I برحسب درصد اندازه عیب [Jeong, 2003].

نمونه‌های مورد نیاز برای به دست آوردن یک مقدار مرجع و مطمئن، ۵ عدد است [ASTM E23]. از بین دو جهت L-T و T-L بنابر توصیه کارشناسان مرکز تحقیقات راه آهن ایران، جهت T-L برای استخراج نمونه‌ها انتخاب شد. در این حالت، طول نمونه‌ها در راستای طول ریل قرار خواهد داشت (شکل ۹ الف). برای تهیه نمونه‌ها، ابتدا قطعه ریلی به طول ۱ متر توسط اهر نواری به ۴ قسمت (هر کدام به طول ۰/۲۵ متر) بریده شد. سپس تاج هر قسمت، از جان و پاشنه جدا شد. در مرحله بعد، به وسیله دستگاه فرز عمودی و با استفاده از تیغه‌های الماسه، عملیات کاهش ضخامت برای رسیدن به ابعاد استاندارد، صورت گرفت. سختی بالای ریل منجر به شکستگی مکرر تیغه اهر نواری و تیغه‌های الماسه فرز عمودی شد. نهایتاً با استفاده از دستگاه فرز افقی، شیار مناسب طبق استاندارد روی نمونه‌ها ایجاد گردید. شکل ۹ ب نمونه آماده شده را نشان می‌دهد.



شکل ۸. ابعاد و شکل نمونه مورد استفاده برای آزمایش ضربه شارپی.

پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه تست ضربه شارپی (شکل ۱۰)، نمونه‌ها در دماهای مختلف از -۴۰°C تا دمای $+۶۰^{\circ}\text{C}$ با فاصله ۱۰°C مورد آزمایش قرار گرفتند. این محدوده دمایی با توجه به شرایط اقلیمی ایران انتخاب شد. دمای



شکل ۷: الف) رابطه تجربی بین M_G و اندازه عیب خپله و ب) رابطه تجربی بین تنش پسماند و اندازه عیب [Jeong, 2003]

می‌تواند به صورت یک عیب سطحی نیم دایره‌ای مدل شود. تنش در معادله (۴) مجموع ۳ قسمت زیر است [Jeong, 2003]:

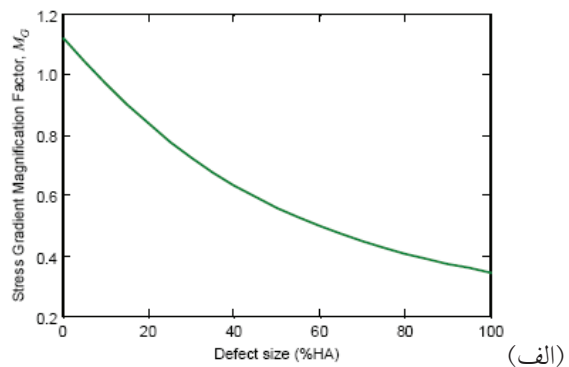
$$\sigma = \sigma_R + \sigma_N + M_G \sigma_B \quad (6)$$

نیز ضریب تجربی معرف شیب تنش ناشی از خمش است. شکل ۷ الف رابطه تجربی بین M_G و اندازه عیب خپله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تأثیر شیب تنش با بزرگ شدن عیب کاهش می‌یابد [Jeong, 2003]. رابطه تجربی بین تنش پسماند و اندازه عیب در شکل ۷ ب نشان داده شده است [Jeong, 2003].

۴. فعالیت تجربی

هدف از فعالیت تجربی، تعیین انرژی جذب شده فولاد ریل در دماهای مختلف برای نمونه‌های استاندارد تهیه شده از ریل UIC60 است. آزمایش ضربه شارپی بر روی فولادها و در محدوده مشخصی از دما، تغییر مود شکست (شکست ترد در دمای کم، محدوده گذار از نرمی به تردی و شکست نرم یا برشی در دمای بالا) و انرژی جذب شده را نشان می‌دهد. دمای گذار محدوده دمایی است که در آن، تغییر مقادیر جذب انرژی جهت شکسته شدن قطعه، از ناحیه پایینی به ناحیه بالایی اتفاق می‌افتد [Burdekin and Floch, 1999].

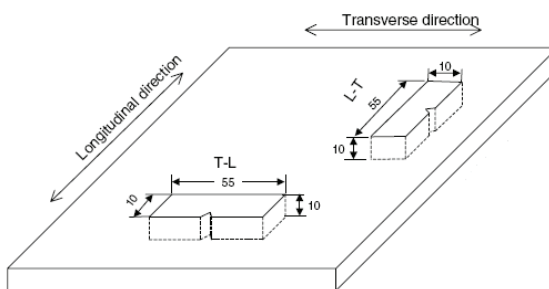
برای انجام این آزمایش از استاندارد ASTM E23 استفاده شده است. به نمونه مورد استفاده در این آزمایش، خمش ۳ نقطه‌ای گفته می‌شود. شکل ۸ ابعاد نمونه و شیار استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. نمونه‌ها از ریل نو و از قسمت تاج آن تهیه شدند. حداقل تعداد



تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف



(ب)



(الف)

شکل ۹: (الف) نمونه‌های (T-L) و [L-T] (Sands, Ward and Chao, 2007). (ب) نمونه آماده شده از ریل برای انجام آزمایش.

در ادامه، با استفاده از نتایج این قسمت (مقادیر میانگین) چقرمگی شکست فولاد ریل در دماهای مختلف محاسبه خواهد شد.



شکل ۱۰. دستگاه ضربه شارپی.

۵. محاسبه چقرمگی شکست

در خصوص محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از داده‌های آزمایش ضربه شارپی چندین رابطه تجربی مطرح شده است. بر اساس استاندارد ASTM E23، چقرمگی شکست، K_{Ic} با انرژی شکست آزمایش ضربه شارپی (CVN) به صورت زیر رابطه دارد:

$$K_{Ic}^2 = 5 \times E \times (CVN) \quad (7)$$

محیط در لحظه انجام آزمایش معادل $26^\circ\text{C} +$ بود. برای رسیدن به دماهای کمتر از محیط، از مخزن نیتروژن مایع استفاده شد، به این نحو که ۵ نمونه‌ای را که می‌بایست در یک دمای خاص مثل $40^\circ\text{C} -$ مورد آزمایش قرار می‌گرفتند، به یک ترمومتر وصل کرده و در مخزن نیتروژن مایع قرار داده شدند. پس از این که ترمومتر دمای $45 -$ درجه را نشان داد، نمونه‌ها از مخزن بیرون آورده شده و برای انجام آزمایش، در دستگاه ضربه شارپی قرار داده شدند. برای درجات بالای دمای اتاق نیز از حمام آب جوش استفاده گردید.

بنابراین، نمونه‌ها در ۱۱ دمای $30, 20, 10, 0, -10, -20, -30, -40$ و 40 و 60 درجه سانتی‌گراد و در هر دما ۵ نمونه مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشها در جدول ۱ آورده شده است. دیده می‌شود که با افزایش دما، مقدار انرژی لازم برای شکسته شدن نمونه‌ها افزایش یافته و در واقع از تردی فولاد ریل کاسته شده است. به عبارت دیگر، در دماهای زیر صفر برای شکسته شدن ریل به انرژی کمتری نیاز است. این امر نشان می‌دهد که چرا بیشتر شکستهای رخ داده در ریل راه‌آهن، در فصل زمستان و در هوای زیر صفر اتفاق افتاده است.

جدول ۱. انرژی شکست نمونه‌ها در دماهای مختلف.

شماره نمونه	دمای آزمایش (سانتی‌گراد)										
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
	انرژی جذب شده تا شکست (CVN) بر حسب ژول										
۱	۶	۶/۳	۷/۶	۸/۱	۹/۲	۱۰/۸	۱۱	۱۳	۱۵	۱۷	۲۰
۲	۵	۷	۷/۲	۸/۳	۹	۱۰/۲	۱۸	۱۲	۱۳/۷	۱۶	۱۷
۳	۶	۶/۵	۷/۴	۸/۳	۸/۷	۱۰	۱۰	۱۲	۱۳/۵	۱۵	۱۸
۴	۷	۶/۸	۷/۵	۸/۵	۹/۱	۹/۲	۱۰	۱۲/۵	۱۴/۲	۱۴	۱۸
۵	۶	۷/۴	۷/۸	۸/۳	۹	۹/۸	۱۱	۱۳	۱۴	۱۵/۵	۱۷
Ave.	۶	۶/۸	۷/۵	۸/۳	۹	۱۰	۱۰/۵	۱۲/۵	۱۴	۱۵/۵	۱۸

رابطه دیگری که توسط رابرت و نیوتن برای داده‌های آزمایش در تمام دماها ارائه شده است به صورت زیر است [Kim, et. al, 2002]

$$K_{Ic} = 8.47 \times (CVN)^{0.63} \quad (12)$$

در معادلات (۱۰) الی (۱۲)، کلیه واحدها در سیستم متریک است، یعنی، K_{Ic} بر حسب $(\text{MPa}\cdot\text{m})^{1/2}$ ، E بر حسب GPa ، σ_{ys} بر حسب MPa است.

با استفاده از میانگین داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های شاری (انرژی CVN در دماهای متفاوت) و روابط میان انرژی CVN و K_{Ic} ، مقادیر K_{Ic} محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.

۶. طول ترک بحرانی

برای به دست آوردن طول ترک بحرانی ضریب شدت تنش K_I را برابر چقرمگی شکست ماده K_{Ic} (متوسط K_{Ic} به دست آمده از روابط مختلف) قرار می‌دهیم. آشکار است که در دماهای متفاوت، طول ترک بحرانی نیز ثابت نخواهد بود و در واقع در دماهای کمتر، طول ترک بحرانی کمتر خواهد بود. طول ترک بحرانی برای ترک بیضوی داخلی (عیب تخم‌مرغی) و ترک نیم‌بیضوی سطحی (عیب خپله) در جدول ۴ ثبت شده است.

با فرض 0.83 برای نسبت رعنائی، M_s مربوط به آن با توجه به شکل

که در آن، K_{Ic} بر حسب $(\text{psi}\cdot\text{in})^{1/2}$ ، E بر حسب psi و CVN بر حسب $\text{ft}\cdot\text{lb}$ است.

بارسام و رالف [Kim, et. al, 2002] در سال ۱۹۷۰ با استفاده از داده‌های آزمایش‌هایی که بر روی ۸ نوع فولاد با مقاومت تسلیم بین 270 MPa الی 1700 MPa انجام دادند، معادله زیر را پیشنهاد کردند:

$$K_{Ic}^2 = 2.2 \times 10^{-4} \times E \times (CVN) \quad (8)$$

که در آن، K_{Ic} بر حسب $(\text{MPa}\cdot\text{m})^{1/2}$ ، E بر حسب MPa و CVN بر حسب ژول است.

سیلورس و کورتن [Kim, et. al, 2002] یک رابطه ساده بین انرژی CVN و K_{Ic} برای فولادهایی که مقاومت تسلیم آنها بین 410 MPa و 480 MPa است، به صورت رابطه (۹) به دست آوردند:

$$K_{Ic} = 14.63 \times (CVN)^2 \quad (9)$$

همچنین روابط زیر نیز به بارسام و رالف نسبت داده شده‌اند [Kim, et. al, 2002]:

(۱) برای تمام دماهای آزمایش:

$$K_{Ic} = [0.64 \times E \times (CVN)]^{0.5} \quad (10)$$

(۲) برای داده‌های واقع در ناحیه بالای:

$$K_{Ic} = 0.804 \times \sigma_{ys} \left[\frac{CVN}{\sigma_{ys}} - 0.0098 \right]^{0.5} \quad (11)$$

جدول ۲. مقادیر K_{Ic} به دست آمده از روابط تجربی داده شده.

شماره را بظه	دما (سانتی‌گراد)										
	-۴۰	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
	CVN میانگین (ژول)										
	۶	۶/۸	۷/۵	۸/۳	۹	۱۰	۱۰/۵	۱۲/۵	۱۴	۱۵/۵	۱۸
	چقرمگی شکست، K_{Ic} ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)										
(۷)	۲۷/۸	۲۹/۶	۳۱/۱	۳۲/۷	۳۴	۳۵/۹	۳۶/۸	۴۰/۱	۴۲/۵	۴۴/۷	۴۸/۲
(۸)	۲۵/۴	۲۷/۹	۳۰	۳۲/۴	۳۴/۴	۳۷/۳	۳۸/۶	۴۴/۱	۴۸	۵۱/۸	۵۸
(۹)	۳۵/۸	۳۸/۱	۴۰/۶	۴۲/۱	۴۳/۹	۴۶/۲	۴۷/۴	۵۱/۷	۵۴/۷	۵۷/۶	۶۲
(۱۰)	۲۷/۷	۲۹/۵	۳۱	۳۲/۵	۳۳/۹	۳۵/۷	۳۶/۶	۴۰	۴۲/۳	۴۴/۵	۴۸
(۱۱)	۲۰	۲۵/۵	۲۹/۴	۳۳/۴	۳۶/۵	۴۰/۵	۴۲/۴	۴۹/۱	۵۳/۷	۵۷/۸	۶۴/۲
(۱۲)	۲۶/۱	۲۸/۳	۳۰/۱	۳۲/۱	۳۳/۸	۳۶/۱	۳۷/۲	۴۱/۵	۴۴/۶	۴۷/۶	۵۲/۳
Ave.	۲۷/۱	۲۹/۸	۳۲	۳۴/۲	۳۶/۱	۳۸/۶	۳۹/۸	۴۴/۴	۴۷/۶	۵۰/۶	۵۵/۴

تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف

چنان که گفته شد یک عیب خپله ایده آل به صورت یک عیب سطحی نیمه بیضوی در صفحه عرضی مدل می شود. برای این نوع عیب، با فرض این که نسبت رعنائی $a/c=1$ باشد، مقدار k از رابطه (۵) صفر و در نتیجه $E(k)=\pi/2$ خواهد شد. بنابراین، رابطه (۴) برای عیب خپله به صورت زیر قابل بازنویسی خواهد بود:

$$K_I = \frac{2}{\pi} 1.12 M_I \sigma \sqrt{\pi a} \quad (17)$$

با استفاده از شکل (۹) مقدار MG برابر با $0/8$ به دست می آید. حال برای به دست آوردن طول ترک بحرانی عیب خپله در دمای $-40^\circ C$ با استفاده از رابطه (۱۷) خواهیم داشت:

$$27.17 = \frac{2}{\pi} \times 1.12 \times 2.5 \times (55 + 67.1 + 0.8 \times 108.5) \times \sqrt{\pi a} \quad (18)$$

که از آن نتیجه می شود:

$$2a = 3.4 \text{ mm} \quad (19)$$

به ازای سایر مقادیر دما، مقدار طول ترک بحرانی محاسبه شده در جدول ۴ آورده شده است.

۷. نتیجه گیری

در این مقاله، آزمایش ضربه شارپی بر روی نمونه های فولادی ریل UIC60 که در حال حاضر در سامانه ریلی ایران مورد استفاده قرار می گیرد انجام گرفت. محدوده دمایی آزمایش، دمای متغیر آب و هوای ایران یعنی -40 تا 60 درجه سانتی گراد انتخاب شد. از نتایج آزمایش برای محاسبه چقرمگی شکست ریل، طول ترک بحرانی برای ترک بیضوی داخلی و نیم بیضوی سطحی در محدوده دمایی مورد نظر استفاده شد.

بر اساس نتایج، با تغییرات دما از 60 به -40 درجه سانتی گراد، چقرمگی شکست ریل از حدود 55 به $27 \text{ MPa.m}^{1/2}$ طول

الف برابر $0/996$ است. همچنین اگر مرکز عیب را حدوداً 20 mm پایین تر از سطح قارچ ریل فرض کنیم ($Z^*=20 \text{ mm} = 0/9 \text{ in}$)، با استفاده از رابطه (۱) مقدار $A=0/20$ خواهد شد. با استفاده از شکل ۷ ب که رابطه تجربی بین تنش پسماند σ_R و اندازه عیب را نشان می دهد، مقدار σ_R برای $A=0/20$ ، $\sigma_R = 55 \text{ MPa}$ به دست می آید. مقدار M_I نیز از روی شکل ۵ ب برابر با $2/5$ خواهد شد. تنش افقی ناشی از نیروهای محوری است که در این جا برابر تنشهای حرارتی ایجاد شده در ریل است.

$$\sigma_T = \sigma_N = -E \alpha \Delta T \quad (13)$$

با فرض این که ریلها در دمای $10^\circ C$ نصب شده اند، تنشهای حرارتی ایجاد شده در جدول ۳ آورده شده اند. به عنوان مثال تنش حرارتی در دمای $-40^\circ C$ برابر است با:

$$\sigma = -E \alpha \Delta T = -0.0000065 \times 30 \times 10^6 \times 1 \quad (14)$$

$$(-50) = 9750 \text{ psi} = 67.17 \text{ MPa}$$

مقدار تنش خمشی، σ_B با مدل سازی و تحلیل اجزای محدود ریل UIC60 در نرم افزار Ansys برابر $108/5 \text{ MPa}$ به دست آمد. در این تحلیل، با توجه به شرایط خطوط باری راه آهن ایران، بار محوری اعمالی بر ریل 25 تن در نظر گرفته شد. نهایتاً برای به دست آوردن طول ترک بحرانی بیضوی در دمای $-40^\circ C$ با استفاده از رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$27.17 = \frac{2}{\pi} \times 0.996 \times 2.5 \times (55 + 67.1 + 108.5) \times \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

که از آن نتیجه می شود:

$$2a = 3.5 \text{ mm} \quad (16)$$

به ازای سایر مقادیر دما، مقدار طول ترک بحرانی محاسبه شده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۳. تنش های حرارتی ایجاد شده در ریل.

دما ($^\circ C$)	۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
تنش حرارتی (MPa)	۶۷	۵۳	۴۰	۲۶	۱۳	۰	۱۳	۲۶	۴۰	۵۳	۶۷

جدول ۴. طول ترک بحرانی برای ترک بیضوی داخلی و ترک نیم بیضوی سطحی بر حسب میلی متر.

دما ($^\circ C$)	-۴۰	-۳۰	-۲۰	-۱۰	۰	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰
طول بحرانی برای ترک بیضوی	۳/۵	۴/۸	۶/۳	۸/۲	۱۰/۶	۱۴/۲	۱۷/۹	۲۶/۸	۳۷/۹	۵۳/۹	۸۳/۹
طول بحرانی برای ترک نیم بیضوی	۳/۴	۴/۷	۶/۲	۸/۳	۱۰/۹	۱۴/۹	۱۹/۳	۲۹/۹	۴۴/۱	۶۶/۲	۱۱۰/۵

خستگی تماس غلتشی در ریل‌های راه‌آهن»، فصل‌نامه علمی-ترویجی جاده، شماره ۶۲، تابستان ۱۳۸۷، ص. ۸۷-۹۶.

- Chao, Y. J., Ward, J. D. and Sands, R. G. (2007) "Charpy impact energy, fracture toughness and ductile-brittle transition temperature of dual-phase 590 steel", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 551-557.

- Floch, L. C. A. and Burdekin, F. M. (1999) "Application of coupled brittle-ductile model to study correlation between Charpy energy and fracture toughness values", *J. Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, pp. 57-80.

- Jeong, D. Y. (2001) "Progress in rail integrity research", Department of Transportation Research and Special Programs Administration Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, USA.

- Jeong, D. Y. (2003) "Correlations between rail defect growth data and engineering analyses, part I: laboratory tests", Department of Transportation Research and Special Programs Administration Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, USA.

- Jeong, D. Y. (2003) "Correlations between rail defect growth data and engineering analyses, part II: field tests", Department of Transportation Research and Special Programs Administration Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, Massachusetts, USA.

- Kim, S. H., Park, Y. W., Kang, S. S. and Chung, H. D. (2002) "Estimation of fracture toughness transition curves of RPV steels from Charpy impact test data", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 212, pp. 49-57.

- Ruud, C. O. (1982) "Nondestructive and semi destructive method for residual stress measurement", *ASTM STP776*.

- Schleinzer, G. and Fischer, F. D. (2000) "Residual stresses in new rails", *Material Science and Engineering A*, Vol. 288, pp. 280-283.

ترک بحرانی برای ترک بیضوی داخلی از ۸۴ به ۳/۶ میلیمتر و طول ترک بحرانی برای ترک نیم‌بیضوی سطحی از ۱۱۰ به ۳/۴ میلیمتر تغییر می‌کند. بنابراین در فصول سرد سال، لزوم بازرسی پیوسته ریل، بیش از پیش نمایان می‌شود. همچنین معیار مورد استفاده برای ترکهای شناسایی شده، ۳ میلیمتر توصیه می‌شود. به عبارت دیگر، مشاهده ترکی با طول ۳ میلیمتر در ریل در فصول سرد سال و در مناطق سرد ایران، می‌تواند تهدیدی برای ریل و ایمنی قطارها باشد.

۸. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود فرض می‌دانند که از همکاری مرکز تحقیقات راه‌آهن، در انجام بخش تجربی مطالعه سپاسگزاری کنند.

۹. پی نوشت:

1. Tache Ovale Defect

۱۰. مراجع

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

- علیزاده کاکلر، جواد و جعفری، علی اصغر (۱۳۸۹) «تعیین طول آستانه و بحرانی ترک زیرسطحی برای چرخ سامانه ریلی ایران»، فصلنامه مهندسی حمل و نقل، سال اول، شماره ۳، بهار ۱۳۸۹، ص. ۶۵-۵۵.

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

- قاجار، رحمت... و علیزاده کاکلر، جواد (۱۳۸۷) «بررسی پدیده

تعیین چقرمگی شکست فولاد ریل UIC60 با استفاده از آزمایش ضربه شارپی در دماهای مختلف

- Zerbst, U., Lunden, R., Edel, K. O. and Smith, R. A. (2009) "Introduction to the damage tolerance behavior of railway rails – a review", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, pp. 2563-2601.

- Zerbst, U., Madler, K. and Hintze, H. (2005) "Fracture mechanics in railway applications—an overview", J. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 72, pp. 163-194.

- Skinner, D. H. and Judd, P. A. (1996) "A metallographic study of fatigue defect in rail", J. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 12, pp. 143-151.

- Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials, ASTM E23-06.

- UIC 712 Leaflet (2002), "Rail defects", International Union of Railways, 4th ed.