



گروه مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه مربوط به پروژه کارشناسی

در رشته مهندسی مواد و متالورژی

بررسی عوامل موثر در تخریب قطعات ریل قطار شهری بر اثر خوردگی

نگارندگان: سحرا یوبی - حسنا غفاری کیا

استاد راهنما و مشاور: دکتر احسان محمدی زهرانی

بهمن ماه 1399

تقدیر و تشکر:

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از زحمات دکتر محمدی زهرانی، مهندس وطن دوست، اعضای محترم آزمایشگاه های مختلف دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد مراتب سپاس و قدردانی را به جای آورند.

فهرست مطالب

6	چکیده
6	1- مقدمه
7	1-1 ساختار اصلی ریل ثابت در مترو
8	2- فولاد های مورد استفاده در قطارشهری
8	2-1 فولادهای ریل
9	3- خراب شدن ریل
10	4- مطالعات فعلی در مورد خوردگی ریل
11	4-1 شکل های خرابی خوردگی در مسیرهای ریلی
12	5- انواع و ویژگی های خوردگی
12	5-1 خوردگی عمومی
13	5-2 خوردگی موضعی
15	5-3 خوردگی SCC
15	5-4 جریان های سرگردان
16	5-4-1 مدل توزیع جریان سرگردان
18	5-4-2 اثر خوردگی جریان سرگردان روی بتن تقویت شده
19	5-5 خوردگی مسیر های همراه با بستر شن و سنگ ریزه و بدون آن
19	5-6 خوردگی گالوانیک
20	6- جوشکاری ریل
21	7- راه های جلوگیری از خوردگی
21	7-1 پوشش (رنگ)

22	7-2 فناوری های اصلاح سطح
23	7-3 توسعه فولادهای جدید ریل
24	8- تشخیص خوردگی
25	9- ارزیابی خوردگی
25	10 روش تحقیق
10-1	بررسی خوردگی الکتروشیمیایی بر روی فولاد Q235A تحت تاثیر جریان سرگردان با استفاده از تجزیه و تحلیل ترکیبی توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی
25	
10-1-1	مواد و آماده سازی محلول الکترولیت
27	
10-1-2	آزمون خوردگی جریان سرگردان و آزمایشات EIS
27	
10-1-3	توصیف سطح
28	
10-2	بررسی شکست غیرعادی فنر کوپل ناشی از ارتعاشات در سیستم مترو
28	
10-3	بررسی ترک خستگی در فولادهای ریلی و جوشهای ترمیت تحت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای
30	
11	نتایج و بحث
31	
11-1	نتایج خوردگی الکتروشیمیایی بر روی فولاد Q235A تحت تاثیر جریان سرگردان
31	
11-2	تحلیل نتایج شکست غیرعادی فنر کوپل ناشی از ارتعاشات در سیستم مترو
35	
11-3	تحلیل نتایج ترک خستگی در فولادهای ریلی و جوشهای ترمیت تحت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای
36	
12	بررسی قطعات خوردگی در مترو مشهد
37	
12-1	بررسی ریزساختار فنر ریل خط یک مترو مشهد
37	
12-1-1	آماده سازی نمونه
37	
12-1-2	نتایج آزمایش ریزساختار فنر ریل خط یک مترو مشهد
40	
12-1-3	درصد آستنیت باقی مانده
40	

41	..... 12-1-4. سختی سنجی
41	..... 12-2. بررسی ریزساختار نمونه تاج ریل خط یک مترو مشهد
44	..... 12-3. بررسی ریزساختار نمونه سر پیچ ریل در خط یک متروی مشهد
45	..... 13 نتایج و بحث بررسی و پیشنهادات
46	..... 14 منابع

فهرست شکل‌ها

8	..... شکل 1 سیستم چفت و بست نوع || ..
11	..... شکل 2 مثال هایی از خوردگی در مسیر ریل
13	..... شکل 3 خوردگی شیاری در پایه ریل
14	..... شکل 4 خوردگی شیاری پس از پاک سازی نوار الاستیک
14	..... شکل 5. 5a موقعیت نسبی نوار الاستیک، گسکت و پای ریل، شکل 5b بر زبری سطح تماس بین گسکت و پای ریل
17	..... شکل 6 شماتیکی از جریان سرگردان سه بعدی در مترو
18	..... شکل 7 تاثیر خوردگی جریان سرگردان روی بتن تقویت شده با میلگرد فولادی
21	..... شکل 8 جوشکاری ریل به روش ترمیت
26	..... شکل 9 خوردگی جریان سرگردان در سیستم انتقال جریان DC
28	..... شکل 10 سیستم آزمایشی خوردگی الکتروشیمیایی تحت تاثیر جریان سرگردان
29	..... شکل 11 وسیله نقلیه مترو همراه با خرابی فنر کوئل
29	..... شکل 12 الف. فنر محور و چرخ، ب. تصور اول شکست فنر کوئل، ج. تصویر دوم شکست فنر کوئل
30	..... شکل 13 الف. آزمایش شتاب و جابجایی، ب. آزمایش کشش فنر، ج. مشاهده فنر کوئل تست شده
31	..... شکل 14 توصیف سطح و مکانهای ترک بر روی مقطع عرضی ریل

- شکل 15 طرح Nyquist و نمودار Bode از فولاد Q235A با چگالی جریان سرگردان 0.3 A/cm^2 برای زمان مختلف خوردگی در محلول 0.2 mol/L NaCl 32
- شکل 16 نمودارهای خوردگی جریان سرگردان با استفاده از مدل سازی (EEC) 33
- شکل 17 خطوط رگرسیون بین نتایج برازش و داده های اندازه گیری شده: (الف) مقاومت ؛ (ب) فاز 34
- شکل 18 شماتیکی از خوردگی الکتروشیمیایی تحت تاثیر جریان سرگردان 34
- شکل 19 نتایج آزمایش تنش (الف) مشخصات دامنه زمانی تنش فنر، مقاطع مسیر و سرعت، (ب) STFT تنش فنر 35
- شکل 20. اشکال مختلف ترک نهایی تحت شرایط بارگیری مختلف 36
- شکل 21 چفت و بست مربوط به ریل قطار شهری مشهد 37
- شکل 22 قطعات خورده شده ریل متروی مشهد 37
- شکل 23 قطعات خورده شده ریل متروی مشهد 37
- شکل 24 قطعات خورده شده ریل متروی مشهد 37
- شکل 25 نمونه فنر شسته شده با الکل 38
- شکل 26 نمونه فنر بریده شده 38
- شکل 27 ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی $100X$ 39
- شکل 28 ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی $200X$ 39
- شکل 29 ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی $500X$ 39
- شکل 30 ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی $1000X$ 39
- شکل 31 تصویر بدست آمده با استفاده از نرم افزار MIP در بزرگنمایی $100X$ 40
- شکل 32 درصد های بدست آمده توسط نرم افزار MIP. 41
- شکل 33 ریزساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی $100X$ 42
- شکل 34 ریزساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی $200X$ 42

- شکل 35 ریزساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 500X 43
- شکل 36 ریزساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 1000X 43
- شکل 37 ریز ساختار نمونه سرپیچ ریل بزرگنمایی 200x 44
- شکل 38 ریز ساختار نمونه سرپیچ ریل بزرگنمایی 400x 44
- شکل 39 ریز ساختار نمونه سرپیچ ریل بزرگنمایی 800x 45

فهرست جداول

- جدول 1 ترکیبات شیمیایی چند نوع از فولادهای ریل سنگین با توجه به استانداردهای مختلف 8
- جدول 2 ترکیبهای شیمیایی و استحکام نهایی انواع ریل 11
- جدول 3 ترکیب شیمیایی فولاد Q235A 27

چکیده

سیستم مترو به طور گسترده در نظام حمل و نقل ریلی شهری به کار گرفته شده است. با این حال، بسیاری از اثرات منفی مانند خوردگی الکتروشیمیایی، خوردگی‌های عمومی و موضعی در مسیر مترو و خطوط لوله‌ی زیر زمینی، ناشی از جریان‌های سرگردان، تنش‌های وارده و اتمسفر مرطوب بتدریج ظاهر شده است. این نوع خوردگی‌ها خطر بزرگی را برای ساختارهای فلزی زیرزمینی و روی سطح در مسیر مترو و ایمنی شخصی ایجاد خواهد کرد. دانشمندان بسسیاری این مورد را از جنبه‌های مختلف مورد مطالعه قرر دادند، که در آن بررسی عوامل محیطی، تنش‌های موجود و مدل توزیع جریان سرگردان به طور گسترده به عنوان ابزارهای تجزیه و تحلیل استفاده می‌شوند. هدف از این پژوهش، بررسی انواع خوردگی‌های موثر در تخریب قطعات مسیر مترو مانند خوردگی ناشی از جریان سرگردان و راه‌های جلوگیری از آن می‌باشد. همچنین ترک خستگی در فولادهای ریلی و شکست فنر کوئل در ریل مترو مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده، خوردگی عمومی در سطح بزرگ ریل محدودکننده نیست، در حالی که خوردگی شیاری در سیستم چفت و بست ریل، باعث ایجاد عوارضی می‌شود که قابل توجه است. علاوه بر این حرکت رفت و برگشتی بین پای ریل^۱ و لاینر^۲(liner)، به طور مکانیکی به ادامه‌ی خوردگی شیاری کمک می‌کند. اصلاح سطح و پوشش ممکن است برای کاهش خوردگی ریل بکار رود. ضعف پوشش، خصوصیات مکانیکی ضعیف آن است، در حالیکه اصلاح سطح، از جمله پاشش حرارتی و روکش لیزر ممکن است روش بهتری باشد. همچنین توسعه فولادهای جدید می‌تواند یک روش موثر دیگر باشد.

1- مقدمه

صنعت راه‌آهن به سرعت در سراسر جهان توسعه یافته است. تا سال ۲۰۱۸، مجموع مسافت خط‌آهن سریع‌السیر در چین از ۲۵۰۰۰ کیلومتر فراتر رفته است و پس از آن اسپانیا، آلمان، ژاپن و فرانسه قرار دارند. این روش به کارآمدترین روش برای حمل و نقل از جمله مسافران و بار در این کشورها تبدیل شده است. با این حال، توسعه سریع صنعت راه‌آهن باعث می‌شود آسیب سطحی ریل به طور فزاینده‌ای شدید شود و مسائل ایمنی عملیات و عمر خدمات از

¹ Rail foot

² لاینر: لاینر گاید، مکانیزم حرکتی مهمی به منظور پشتیبانی بار مکانیکی برای هدایت حرکت خطی است. برای سوار کردن بار مکانیکی جهت حرکت خطی از لاینر گاید استفاده می‌شود که به عبارتی برای تولید حرکت خطی از آن بهره می‌گیرند. به دلیل استقامت اصطحاکاکی کم در لاینر گاید نیروی کمی برای به حرکت در آوردن آن لازم است که این خاصیت باعث توان کم در رسیدن به سرعت بالا می‌گردد، که برای حرکت های رفت و برگشتی مهم است.

اهمیت زیادی برخوردارند. با افزایش سرعت قطار، بارگیری و همچنین حجم ترافیک، الزامات مربوط به دوام و قابلیت اطمینان راه آهن نیز به طور فزاینده‌ای سخت گیرانه می‌شوند. علی‌رغم پیشرفت‌هایی در نگهداری فولاد ریل و بازرسی‌های غیرمخرب، تحقیقات راجع به خستگی ساختاری برای ارزیابی یکپارچگی سازه‌های فولادی راه آهن جوش داده شده هنوز هم یک ضرورت برای درک خرابی‌های شکست راه آهن است. ارزیابی رشد ترک خستگی در سازه‌های جوشکاری شده به روش ترمیت و فولاد ریل نیاز به راه حل‌های جامع برای هندسه ترک سطح در فولاد ریل و مواد جوش ترمیت دارد. همچنین در این گزارش راجع به فنرهای کوئل که در تعدادی از وسایل نقلیه مترو در چین به دلیل لرزش غیر عادی در سیستم تعلیق اولیه، تأثیرات بسیار نامطلوبی بر ایمنی کارکرد وسیله نقلیه ریلی تحمیل می‌کند و به طور مداوم در معرض خرابی قرار گرفته‌اند بحث خواهد شد.

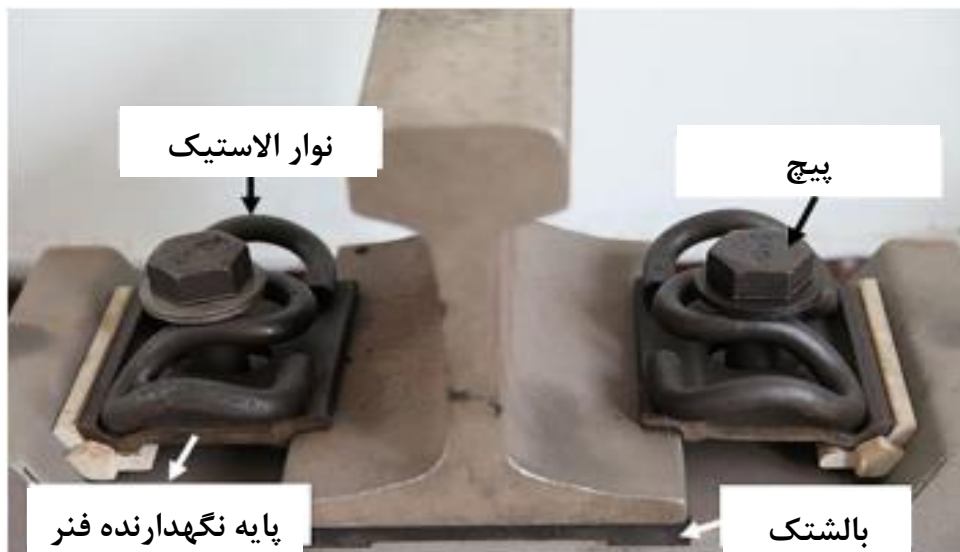
1-1 ساختار اصلی ریل ثابت در مترو

یک سیستم اتصال برای ثابت ماندن ریل روی ریل‌بند ضروری است و انواع مختلفی از سیستم‌های اتصال مناسب برای مسیرهای مختلف (به عنوان مثال خطوط بالاست^۳ دار، بدون بالاست و خطوط با وزن مختلف) و ریل‌بند^۴های متفاوت (مانند شانه‌دار^۵ یا بدون شانه، پیچی یا بدون پیچ) وجود دارد، که می‌تواند از نیروهای وارد شده و لرزش قوی و مکرر قطار در محدوده کیلونیوتن با سرعت بالا جلو کند. نیروی بستن به طور مستقیم بر روی پای ریل اعمال می‌شود که عمدتاً از طریق بستن گیره، برش الاستیک یا نوار الاستیک فراهم می‌گردد. دو نوع اول عمدتاً استفاده نمی‌شوند و نوار الاستیک به طور گسترده برای راه‌آهن مدرن به کار می‌رود. شکل ۱ یک سیستم اتصال معمولی با نوار الاستیک نوع II را نشان می‌دهد. یک سیستم اتصال اساساً شامل نوار الاستیک یا فنر، میخ پیچ، پایه نگهدارنده فنر متصل به ریل و بالشتک تحت تنش است. ترجیحاً یک عایق به دلیل برق‌رسانی راه‌آهن مدرن و جلوگیری از خوردگی گالوانیزه بین اجزای فلزی قرارداد[16].

³ Ballast

⁴ sleeper

⁵ shoulder



شکل 1: سیستم چفت و بست نوع [16].

2- فولادهای مورد استفاده در قطار شهری

2-1 فولادهای ریل

انواع زیادی از فولادها برای ریل با سطح مقطع A شکل، شامل فولادهای کربنی (ریل استاندارد) و فولادهای کم آلیاژ (ریل با استحکام بالا) همراه با Mn، Cr، V، Mo، Ti، Nb و Re به کار می‌روند که Mn درصد بالاتری را تشکیل می‌دهد.

جدول 1 ترکیبات شیمیایی چند نمونه از فولادهای سنگین ریل (برای قطارهای سریع‌السیر، راه‌آهن بین‌شهری، مترو و غیره) را با توجه به استانداردهای مختلف خلاصه کرده‌است، و می‌توان مشاهده کرد که ترکیبات شیمیایی مشابه هستند [4].

جدول 1. ترکیبات شیمیایی چند نوع از فولادهای ریل سنگین با توجه به استانداردهای مختلف [4].

Standards	Designation of steels	Chemical composition (wt %)										
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	V	H	O	N
ISO 5003-2016	HR260A	0.62-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	<0.025	<0.025	<0.15	<0.004	<0.030	<2e-4	<0.002	<0.009
	HR280	0.71-0.80	0.50-0.80	0.70-1.05	<0.025	<0.025	<0.15	<0.004	0.04-0.12			
BS EN 13674-2011	R260	0.62-0.80	0.15-0.58	0.70-1.20	<0.025	<0.025	<0.15	<0.004	<0.03	<2.5e-4	<0.002	<0.009
TB/T3276-2011	U71MnG	0.65-0.75	0.15-0.58	0.70-1.20	<0.025	<0.025	<0.15	<0.004	<0.03	<2e-4	<0.002	<0.008
	U75VG	0.71-0.80	0.50-0.70	0.75-1.05	<0.025	<0.025	<0.15	<0.004	0.04-0.08			
TB/T2344-2012	U71Mn	0.65-0.76	0.15-0.58	0.70-1.20	<0.030	<0.025	<0.15	<0.010	<0.030	<2e-4	<0.003	<0.009
	U75V	0.71-0.80	0.50-0.80	0.75-1.05	<0.030	<0.025	<0.15	<0.010	0.04-0.12			
JIS E1101-2001	60 kg/m	0.63-0.75	0.15-0.30	0.70-1.10	<0.030	<0.025	-	-	-	-	-	-

به عنوان مثال، مقاومت کششی به طور کلی بالاتر از ۸۰۰ مگاپاسکال برای ریل‌های استاندارد و ۱۲۰۰ مگاپاسکال برای ریل‌های با استحکام بالا، ازدیاد طول به طور کلی بالاتر از ۴٪ برای ریل‌های استاندارد و ۱۰٪ برای ریل‌های با استحکام بالا و سختی (HB) در حدود ۴۰۰ برای ریل‌های با استحکام بالا می‌باشد [17].

3- خراب شدن ریل

طول عمر طراحی راه‌آهن گاهی اوقات ۱۰۰ سال (چرخه عمر) بیان می‌شود، اما طول عمر یک ریل خاص به طور کلی بیش از ۳۰ سال براساس بازرسی، نگهداری و جایگزینی مناسب نیست. این تصمیم با شرایط خدماتی خاص گرفته می‌شود و عمر استاندارد مشخصی وجود ندارد. براساس بازرسی، تعمیر و نگهداری روزانه، دوره باسازی و یا جایگزینی عمده، اغلب در حدود ۱۰ تا ۲۰ سال است. ممکن است هیچ حادثه یا مشکلی در کیفیت گزارش نشده باشد، اما برای بخش‌های خاص راه‌آهن دوره جایگزینی ممکن است تا حد زیادی کوتاه شود، به عنوان مثال در بخش خم یا منحنی که در آن سایش جدی است، یا در مناطق ساحلی و مرطوب که مشکلات خوردگی ممکن است شدید باشد (حتی در چند ماه)، باید تعمیر و نگهداری منظم کوتاه‌مدت برای این شرایط خاص، به عنوان مثال بازرسی هفتگی انجام شود. خرابی مسیر قطار شهری در حال حاضر توجه را به خود جلب کرده‌است، از جمله سایش، ضربه تماسی، خستگی (که اغلب به عنوان RCF (Rolling Contact Fatigue) ذکر می‌شود)، خوردگی، ترک خوردگی و شکست. در میان این موضوعات تحقیقاتی، سایش، ضربه تماسی، خستگی و خوردگی به عنوان عوامل اصلی آغاز کننده تخریب ساختار ریل از همان ابتدا در نظر گرفته می‌شوند، در حالی که ترک خوردگی و شکستگی را می‌توان به عنوان نتایج قابل توجه شکست در نظر گرفت. این‌ها تحت شرایط مختلف تاثیرات زیان آوری را اعمال می‌کنند. به عنوان مثال، تفاوت‌هایی در تخریب ریل‌ها برای قطارهای باری و قطارهای مسافری وجود دارد. اولویت، برای قطارهای باری ظرفیت بار است در حالی که برای قطارهای مسافری سرعت اولویت دارد (به خصوص قطارهای سریع‌السیر بالای ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت). قطارهای باری معمولاً از سیستم‌های تعلیق اولیه و همچنین عدم وجود جاذب شوک موثر بر روی محورها استفاده می‌کنند، که منجر به برخورد جدی روی سطح بالایی و سایش در سمت ریل‌ها می‌شود. در قطارهای مسافری اغلب فشار روی کناره ریل‌ها در بخش منحنی وارد می‌شود، بنابراین شعاع منحنی برای مسیرهای قطار مسافربری عموماً بزرگ‌تر است. همچنین، رسوب نمک و آلاینده‌های ناشی از اتمسفر تا حد زیادی بر خوردگی مسیرهای ریلی، هم برای قطارهای باری و هم برای قطارهای مسافری تاثیر می‌گذارد، در حالی که برخی شرایط خاص برای هر دوی آن‌ها وجود دارد. تخلیه فاضلاب‌ها نیز گاهی اوقات نگرانی برای خوردگی مسیر راه‌آهن برای قطارهای مسافری بوجود می‌آورد. علاوه بر این، خطوط مسیر برای قطارهای مسافربری با سرعت

بالا، معمولا از تونل‌های بیشتری با رطوبت زیاد و تهویه ضعیف عبور می‌کنند. بنابراین محیط در امتداد خطوط متفاوت است. بخش‌های مختلف ریل نیز از اشکال متفاوتی از خرابی رنج می‌برند. در سطح بالایی ریل، خوردگی یک مساله جدی نیست زیرا عمدتاً خوردگی عمومی است اما RCF و سایش جدی هستند و گاهی اوقات منجر به ترک خوردگی ریل می‌شوند. از طرف دیگر، اگر ریل را به دو قسمت به بالا و پایین تقسیم کنیم، تخریب بالا عمدتاً به سایش نسبت داده می‌شود، به خصوص در بخش‌های خم، که معمولا قابل مشاهده و گاهی بزرگ هستند. برای نقطه ضعف ریل‌ها، سایش مهم نیست زیرا خارج از سطح تماس بین ریل‌ها و چرخ‌ها است، اما یک مساله قابل توجه، خوردگی در نزدیکی پای ریل و پایه ریل است که عمدتاً به خوردگی شیار و خوردگی جریان سرگردان نسبت داده می‌شود. با این حال، ضخامت اضافی برای حد مجاز خوردگی به طور کلی برای ریل در نظر گرفته نمی‌شود و اندازه سر ریل، کمر و پایه برای برآورده کردن الزامات بار و سرعت قطارها طراحی شده‌اند [5-7].

4- مطالعات فعلی در مورد خوردگی ریل

مطالعات گسترده و متنوعی روی سایش، ضربه تماسی و خستگی قطعات مسیر مترو انجام شده‌است که بیشتر آن‌ها اثر رطوبت (محیط مرطوب) را در نظر نگرفته‌اند. با این حال، اثر معکوس خوردگی کم‌تر از اثرات دیگر عوامل تخریب در مسیر قطار شهری نیست. شرایط محیطی از جمله نور خورشید، رطوبت نسبی، دما و اتمسفر تا حد زیادی بر خوردگی تاثیر می‌گذارند. علاوه بر این، رسوب نمک عامل مهمی است که خوردگی را آغاز می‌کند. خوردگی به خودی خود باعث از دست رفتن جرم قابل توجه ریل نمی‌شود و به طور کلی پنهان است و به سختی می‌توان آن را در زمان تشخیص داد. این ممکن است یکی از دلایل اصلی باشد که مساله خوردگی ریل هنوز توجه کافی را به خود جلب نکرده و به یک نگرانی عمده تبدیل شده‌است. با این حال، از دست دادن بخش کوچکی از مصالح راه‌آهن (به عنوان مثال احتمالا بیش از ۵ / ۶ کیلوگرم در هر کیلومتر در سال) ممکن است تغییر قابل توجهی در عملکرد مواد ایجاد کند و یا حتی به عنوان "متمرکز کننده تنش" برای آغاز ترک عمل نماید [5].

در حقیقت، استانداردهای نگهداری بسیار بالا [به عنوان مثال بالا بردن درجه های فولاد (درجه های فولاد نشان دهنده خصوصیات مختلف مکانیکی از جمله مقاومت و سختی و اندازه های مختلف از جمله عرض سر راه آهن و ضخامت پایه راه آهن هستند. مثلا، ریل های P75 و P60 هر دو مستحکم تر و ضخیم تر از ریل P50 هستند، و برای یک بخش ریل که روی آن خواص ریل P50 کافی است، از P60، P75 یا حتی درجه بالاتر برای اطمینان از عملکرد مطلوب استفاده می‌شود]، تا حد زیادی دوره تعویض را کاهش می‌دهد.

در جدول 2 ترکیب شیمیایی و استحکام نهایی سه نوع ریل ذکر شده در بالا نشان داده شده است.

جدول 2. ترکیب‌های شیمیایی و استحکام نهایی انواع ریل.

نوع ریل	درجه فولاد	کربن	منگنز	سیلیکون	فسفر	گوگرد	آرسنیک	مقاومت نهایی MPa (kgf / mm ²) نه کمتر، (2)
P75 (P65)	M-76	0,71- 0,82	0,75- 1,05	0,20- 0,40	≤0,035	≤0,045	≤0,15	885(90)
P50	M-75	0,69- 0,80	0,75- 1,05	0,20- 0,40	≤0,035	≤0,045	≤0,15	765(88)

1-4 شکل‌های خرابی خوردگی در مسیرهای ریلی

خرابی‌های ناشی از خوردگی ریل اساساً نزدیک پایه ریل و پای ریل است. خوردگی در پایه ریل و پای ریل منجر به نازک شدن مقطع پا و ناپایداری ریل، ایجاد خطر بالقوه جابجایی، ایجاد تنش‌های بزرگ یا حتی خرابی ریل می‌شود. شکل ۲ مثال‌هایی از خرابی خوردگی در مسیرهای ریل را نشان می‌دهد. بسیار واضح است که خوردگی قسمت پایینی ریل، به خصوص در پایه و پای ریل شدیدتر است.



شکل 2. مثال‌هایی از خوردگی در مسیر ریل [14].

شکل 2 الف خسارت خوردگی جدی در پایه ریل را نشان می‌دهد که عمدتاً توسط جریان سرگردان ایجاد می‌شود. شکل 2 ب و شکل 2 ج خوردگی ناشی از رسوب نمک را نشان می‌دهد که احتمالاً از خوردگی موضعی آغاز شده و با هم ترکیب می‌شوند تا تلفات فلزی قابل توجهی را القا کنند و حتی خراش‌های زنگ زده را از بین ببرند. شکل 2 د نشان می‌دهد که پایه و پای ریل به طور جدی خورده شده‌اند در حالی که شرایط قسمت بالایی بسیار بهتر

است. شکل 2 ه پای ریل شدیداً خورده شده با لایه زنگ ضخیم را نشان می‌دهد. البته تا کنون گزارش نشده است که خسارت خوردگی ریل به طور مستقیم منجر به حوادث شدیدی مانند خروج از خط شود، اما اعتقاد بر این است که هر شکست مهندسی ناشی از بیش از یک عامل است و خوردگی یک پیش عامل مهم می‌باشد. یک استاندارد بالا برای تشخیص و نگهداری همیشه مورد نیاز است زیرا خوردگی نگرانی‌های ایمنی و هزینه‌های بالا را ایجاد می‌کند [14].

5- انواع و ویژگی‌های خوردگی

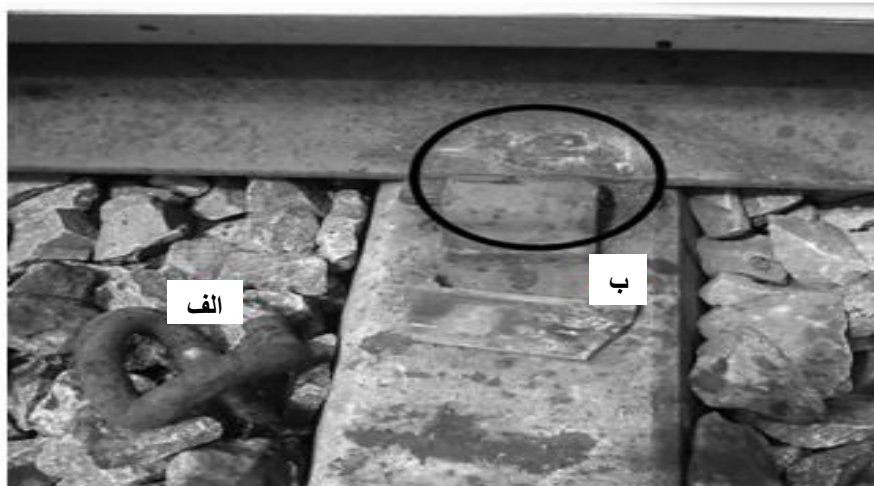
1-5 خوردگی عمومی

اشکال مختلف خوردگی مسیرهای ریلی را می‌توان به دو دسته خوردگی عمومی و خوردگی موضعی تقسیم کرد. خوردگی عمومی به طور معمول روی سطوح بزرگ ریل‌ها رخ می‌دهد در حالی که آغاز آن ممکن است به شکل خوردگی حفره‌ای باشد. از آنجایی که مقاومت به خوردگی حفره‌ای فولادهای ریل (هم برای Mn حاوی فولادهای کربنی و هم فولادهای کم آلیاژ ذکر شده) به دلیل عدم وجود فیلم پسیو پایدار و مقاوم، ضعیف است، حفره‌ها معمولاً به راحتی و به سرعت بر روی سطح بزرگ به جای عمق رشد می‌کنند و بنابراین به عنوان خوردگی عمومی مشاهده می‌شوند. این مهم نیست، زیرا خوردگی عمومی معمولاً باعث از دست دادن مواد در سطح بزرگ بدون حمله موضعی جدی می‌شود. اگر چه محصولات خوردگی ممکن است موجب تخریب مواد راه‌آهن در شرایط خاص شوند، به عنوان مثال آکاگانیت⁶ ($\beta\text{-FeOOH}$) که در زیر زمین در غلظت بالای کلرید شکل می‌گیرد و یک ماده بلوری با چگالی کم است. اما تحت شرایط کلی‌تر، محصول خوردگی ممکن است اثر حفاظتی بر روی سطح ریل داشته باشد و سپس نرخ خوردگی کاهش یابد. بنابراین، بسیار رایج است که زنگ می‌تواند چندین ماه پس از استفاده روی سطح ریل مشاهده شود و نگهداری و بازرسی مناسب باعث ایمن شدن عملیات می‌گردد. خوردگی عمومی را می‌توان تا حد زیادی به رسوب نمک و خوردگی اتمسفری، به ویژه در نواحی با دمای بالا، رطوبت نسبی بالا یا شوری بالا (که به راحتی شروع حفره دار شدن و انعقاد بعدی را القا می‌کند) نسبت داد. تاثیر منفی خوردگی عمومی را می‌توان به خوبی با بازرسی و نگهداری مناسب و استفاده از تکنولوژی‌های پیش‌گیری از خوردگی که در ادامه مورد بحث قرار خواهند گرفت، کنترل کرد [8].

⁶ Akaganeite

2-5 خوردگی موضعی

اگر چه خوردگی حفره‌ای می‌تواند به راحتی بر روی سطوح ریل رخ دهد اما تمایل به رشد عمیق‌تر ندارد اما احتمال ادغام، تشکیل مورفولوژی خوردگی گسترده و کم‌عمق بیشتر است و حفره‌های عمیق بر روی ریل‌ها گزارش نشده‌اند. در حالی که گزارش شده است که خوردگی شیاری نوعی خوردگی موضعی است. به وضوح خوردگی شیاری در مقطع پای ریل را با پوشش خطی که در بالا به عنوان شیاری عمل می‌کند، گزارش کرده‌اند. یک لاینر اغلب بین گیره الاستیک و پای ریل به کار می‌رود که نیروی محکم کردن پایدار برای تعمیر ریل و جلوگیری از حرکت جانبی و طولی را تضمین می‌کند. با توجه به برق‌رسانی راه‌آهن مدرن، مواد عایق مانند پلی‌آمیدها اغلب استفاده می‌شوند، که به عنوان عایق گسکت شناخته می‌شوند. یک سیستم اتصال معمول که در شکل ۱ نشان داده شده است، شیاری بین بخش عایق و پای ریل مشاهده می‌گردد. بنابراین تجمع محیط خورنده از جمله یون‌های کلرید و شاید میکروپها به راحتی رخ می‌دهند و همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، خوردگی شیاری را آغاز می‌کنند [8].



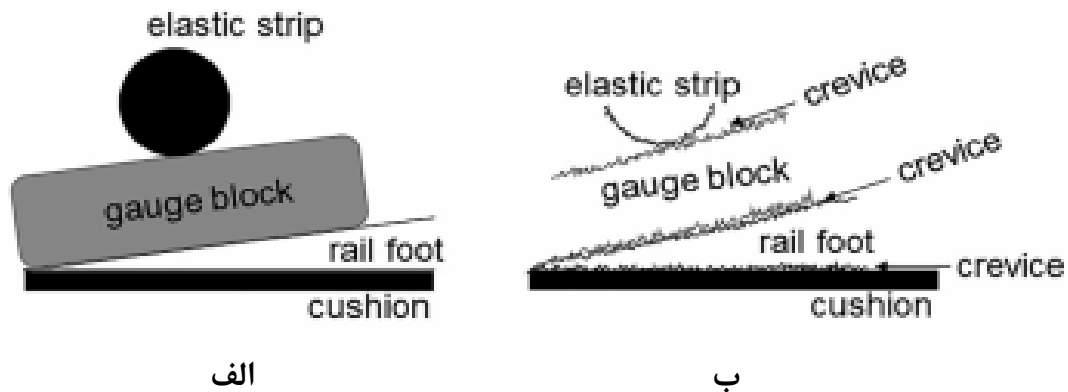
شکل 3. خوردگی شیاری در پایه ریل [8].

این پدیده را در طول دوره نگهداری ریل پس از حذف نوار الاستیک می‌توان مشاهده کرد. پای ریل دارای کم‌ترین سطح مقطع است در حالی که تنها بخشی است که باید با آن تماس برقرار شود و با سیستم اتصال ثابت گردد (نوار الاستیک نیروی مهار را فراهم می‌کند)، بنابراین خوردگی شیاری شدید منجر به نازک شدن پای ریل می‌شود که اساساً خطرناک است. علاوه بر این، شکافی بین پایه ریل و بالشتک نیز وجود دارد که در آن خوردگی شیاری ممکن است رخ دهد. شکل ۵ الف موقعیت نسبی نوار الاستیک، بلوک اندازه‌گیری و پای ریل را توصیف می‌کند و شکل ۵ ب بر زبری سطح تماس بین بلوک اندازه‌گیری و پای ریل، بین بلوک اندازه‌گیری و نوار الاستیک و همچنین بین

پایه ریل و چنبره، که در آن فیلم الکترولیت می‌تواند تشکیل شود و خوردگی شیاری عملی است، تاکید می‌کند. با این حال، این مساله هنوز توجه کافی را به خود جلب نکرده است.



شکل 4. خوردگی شیاری پس از حذف نوار الاستیک [8].



شکل 5. الف موقعیت نسبی نوار الاستیک، گسکت و پای ریل، شکل 5 ب بر زبری سطح تماس بین گسکت و پای ریل [16].

به طور جدی‌تر، مقطع پای ریل در معرض ارتعاش با دامنه بسیار کوچک (حدود $100\mu\text{m}$) هنگامی که قطارها بر روی ریل حرکت می‌کنند قرار می‌گیرد.

با توجه به نیروی نگهدارنده بزرگ توسط گیره اتصال، حرکت میکرو بین پای ریل و لاینر (هندسه سیستم اتصال در شکل ۱) باعث آسیب دیدن فیلم پسیو یا از بین بردن محصولات خوردگی می‌شود، که منجر به تماس مستقیم سطح تازه در الکترولیت خورنده در شیار می‌گردد. این را می‌توان به عنوان ترکیبی از خوردگی شیاری و سایش در نظر گرفت، همچنین می‌تواند به عنوان خوردگی شیاری به کمک مکانیک توصیف شود. اثر هم افزایی خوردگی شیاری و سایش به طور قابل توجهی سطح مشترک را تخریب کرده و خوردگی جدی و مداوم را ایجاد می‌کند. بار، دامنه و فرکانس ارتعاش پارامترهای مهمی برای مطالعه این نوع خوردگی شیاری هستند. همچنین شیاری‌های روی پای ریل در شکل ۳ و شکل ۴ مشاهده می‌گردند، که به حرکت رفت و برگشتی کم دامنه بین پای ریل و لاینر نسبت داده می‌شوند. ناحیه شیاری یک آند کوچک بود و اگر سطح فلزی اطراف می‌توانست به عنوان یک کاتد بزرگ عمل کند، خوردگی موضعی شدید به طور بالقوه رخ می‌داد. علاوه بر این، از آنجایی که محیط مرطوب باعث شروع خوردگی شیاری پای ریل می‌باشد و تا حد زیادی به دلیل جمع‌آوری رطوبت از اتمسفر است، و همچنین الکترولیت رسانا برای خوردگی تنها به عنوان لایه نازک محلول وجود دارد، بنابراین مساحت کاتدی معمولاً محدود و متغیر است. این عامل پیچیده دیگری است که بر رفتارهای خوردگی شیاری پای ریل تاثیر می‌گذارد. خوردگی شیاری تحت این شرایط اغلب با جریان کاتدی کنترل می‌شود، بنابراین این مساله بسیار مهمی است که باید در نظر گرفته شود.

3-5 خوردگی SCC

علاوه بر خوردگی شیاری، ترک خوردگی تنشی نیز مهم است. تنش چرخه‌ای اعمال شده بر فولادهای مسیر ریلی به شدت مورد مطالعه قرار گرفته‌است، اما عدم تمرکز در مورد مساله خوردگی وجود دارد. خوردگی ناشی از تنش می‌تواند به طور قابل توجهی بر کرنش فولاد در طول فرآیند بارگذاری تاثیر بگذارد، بنابراین تنش و خوردگی به طور متقابل تحت تاثیر قرار می‌گیرند، که ترک‌ها را آغاز کرده و تا حد زیادی دوام فولادهای ریلی را از بین می‌برد. به طور کلی، تحقیقات قبلی نشان داده‌اند که ترک خوردگی تنشی معمولاً از توسعه خوردگی موضعی آغاز می‌شود.

4-5 جریان‌های سرگردان

با توجه به هزینه‌های ساخت و ساز و تعمیر و نگهداری، ریل مترو به عنوان حلقه‌ی کششی در سیستم کشش جریان مترو استفاده می‌شود. ریل دارای رسانایی محدود است و به طور کامل روی زمین عایق بندی ندارد. بنابراین بخشی از جریان کششی از طریق ریل به زمین جریان می‌یابد و به جای بازگشت به ایستگاه کشش در امتداد ریل،

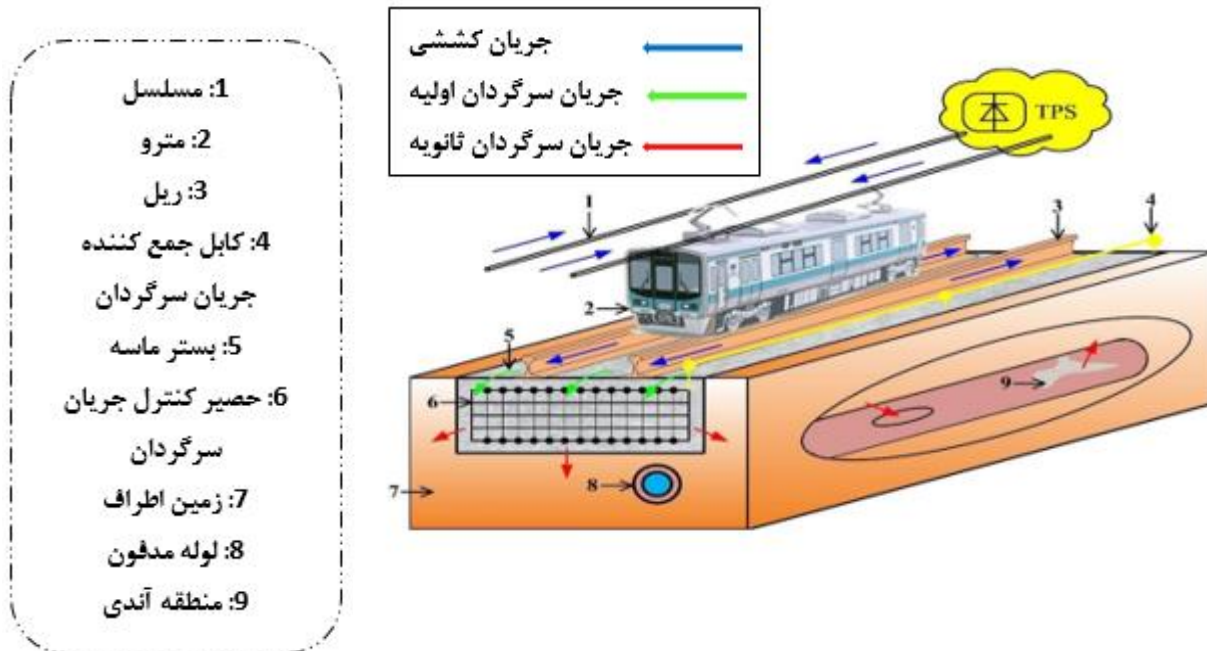
مستقیماً به ایستگاه کششی زمین برمی‌گردد. این نوع جریان که از طریق ریل به زمین انتقال می‌یابد، جریان سرگردان نامیده می‌شود. تخمین زده شده است که نشت یک آمپری جریان تواند باعث کاهش 20 پوندی آهن در سال شود، و این یعنی 7.5 تن در سال با جریان ۷۵۰ آمپری آهن از دست می‌رود. خوردگی جدی در پایه ریلی نشان داده شده در شکل 2 الف عمدتاً به خوردگی جریان سرگردان نسبت داده می‌شود زیرا پایه راه آهن در موقعیت نشت جریان است.

همچنین، مقاومت الکتریکی مسیر مهم است زیرا مقاومت زیاد (به ویژه در اتصال ریل) جریان را از طریق مسیرهای دیگر انتقال می‌دهد، که می‌تواند به طور موثر با جوشکاری مناسب کنترل می‌شود.

از نظر کنترل مقاومت در محیط پیرامون، کنترل رطوبت به ویژه هنگامی که با شوری زیاد همراه باشد بسیار مهم است، بنابراین ممکن است برای هر دو مورد زیرزمینی و بالای زمین برای خشک نگه داشتن محیط طراحی تغییر مسیر آب لازم باشد. خوردگی جریان سرگردان خود ریل و همچنین سازه های اطراف آن را می‌توان تا حدی با سیستم کنترل و طراحی مناسب کاهش داد، اما در حال حاضر همچنان اجتناب ناپذیر است [11].

1-4-5 مدل توزیع جریان سرگردان

جریان سرگردان یک کمیت فیزیکی ناپایدار است. به طور عمده دو دلیل منجر به ایجاد آن می‌شود. دلیل اول نشت جریان است. این مشکل عمدتاً از عواملی مانند مشکلات عایق بندی و یا تماس بین ریل و پوشش عایق ناشی می‌شود. از آنجا که نقطه نشت جریان در طول ریل وجود دارد، بنابراین جریان از طریق ریل در حال اجرا روی زمین جاری می‌شود، سپس پدیده جدایی بین کاتیونی و الکترونی در فلز الکترولیت ایجاد می‌شود. بدین ترتیب، فلز مدفون مانند خط لوله نفت خورده می‌شود. دلیل دوم، شیب پتانسیل الکتریکی است. ساختار فلزی در میدان الکتریکی قرار داده می‌شود که توزیع پتانسیل آن کاملاً ناهمگن است. به این دلیل که گرادیان پتانسیل در میدان الکتریکی وجود دارد و نیروی میدان الکتریکی بر الکترون‌های آزاد فلز تاثیر می‌گذارد. بنابراین، الکترون‌های آزاد در یک جهت ثابت از کاتیون خارج می‌شوند که در نهایت منجر به خوردگی فلز مدفون می‌شود. جریان سرگردان در سیستم مترو را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: (۱) جریان سرگردان اولیه. جریانی که در حصیر کنترل جریان سرگردان جاری می‌شود و بخشی از آن به جای نشت در زمین توسط حصیر کنترل جریان جمع‌آوری می‌گردد. (۲) جریان سرگردان ثانویه. جریانی که به جای جمع شدن توسط حصیر کنترل جریان به درون زمین نفوذ می‌کند. شماتیکی از جریان سرگردان سه بعدی در سیستم مترو در شکل 6 نشان داده شده است [1].



شکل 6. شماتیکی از جریان سرگردان سه بعدی در مترو [1].

نشت جریان سرگردان با جریان کشنده و فاصله بین لایه های کشنده، و همچنین با افزایش مقاومت در مسیر ریلی در جهت طولی یا کاهش مقاومت بین پایه راه آهن و بستر مسیر افزایش می یابد. اختلاف ولتاژ بین مواد مختلف توسط جریان سرگردان، (از جمله جریان AC^7 سیگنال و جریان DC^8 برگشتی) تا حد زیادی افزایش می یابد و منجر به خوردگی می شود.

جریان متناوب AC ولتاژ عمده ای برای خوردگی ریل نخواهد بود، اما، تحقیقات در مورد خوردگی جریان AC سرگردان روی سایر ساختارهای فلزی اطراف، مانند خطوط لوله دفن شده متمرکز شده است. معمولاً برای سیستم راه آهن مترو و قطار شهری جریان ولتاژ مستقیم DC اعمال می شود، بیشتر تحقیقات نیز در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته شده است. اما مشخص است که تسریع خوردگی در سایر ساختارهای فلزی اطراف مانند پایه ریل در حضور رطوبت و نمک ایجاد می شود، در حالی که خوردگی در عدم وجود جریان DC اهمیت کمتری دارد. ناحیه ای که جریان نشت می کند به صورت آندی خورده می شود و ناحیه ای که جریان در آن جاری می شود، از لحاظ کاتدی محافظت می گردد.

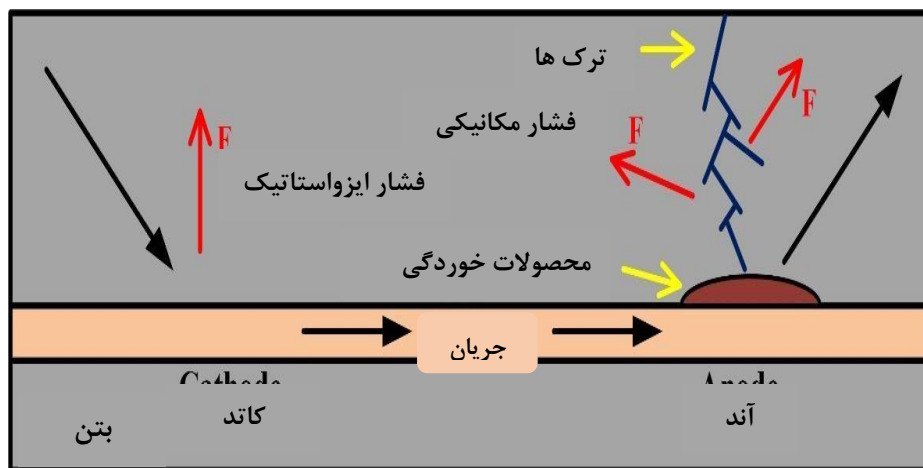
⁷ Alternating Current

⁸ Direct Current

جریان سرگردان DC از پایه ریل، جایی که انحلال آندی اتفاق می افتد و محصولات خوردگی تمایل به تجمع در نزدیکی پایه راه آهن دارند، باعث ایجاد خوردگی جدی و حتی از بین رفتن یا ترک خوردگی قابل توجه فلز می شود. علاوه بر این، میلگرد در بتن بستر مسیر بدون ماسه، اگرچه ممکن است از نظر کاتدی محافظت شود، اما اگر پتانسیل کاتدی تا حد زیادی کاهش یابد، ممکن است آسیب ناشی از تکامل هیدروژن را تحمل کند، که به طور بالقوه خطر ترک و کاهش قدرت را ایجاد می کند، و این تهدید دیگری برای ایمنی راه آهن به وجود می آورد.

2-4-5 اثر خوردگی جریان سرگردان روی بتن تقویت شده

جریان سرگردان همچنین روی بتن های تقویت شده با میلگردهای فولادی در تونل مترو تاثیر می گذارند و باعث خوردگی آنها می شوند. در ناحیه کاتدی اگر کاتد موجب بیشتر شدن هیدروژن شود و هیدروژن نتواند از بتن خارج شود، فشار ایزواستاتیک شکل می گیرد، که باعث می شود میلگرد از بتن جدا شود. در ناحیه آندی میلگرد آندایز شده و خورده می شود. سپس تجمع محصولات خوردگی، بتن را با کار مکانیکی فشرده می کند و ترک می خورد. اثر خورنده جریان سرگردان روی بتن تقویت شده با الیاف فولادی در شکل 7 نشان داده شده است [3].



شکل 7. تاثیر خوردگی جریان سرگردان روی بتن تقویت شده با میلگرد فولادی [1].

پدیده الکترولیتی در خطوط لوله فلزی زیرزمینی و بتن تقویت شده نزدیک خط مترو به دلیل جریان سرگردان ثانویه تولید می شود. بر اساس قانون الکترولیز فارادی، برای هر آمپر جریان سرگردان از طریق تاسیسات فلزی زیرزمینی، ۹,۱ کیلوگرم فلز در یک سال خورده می شود [1].

5-5 خوردگی مسیر های همراه با بستر شن و سنگ ریزه و بدون آن

اگرچه مسیر سنتی ماسه‌ای برای ساخت و ساز مقرون به صرفه و آسان است اما قابلیت اطمینان، پایداری و دوام آن به خوبی مسیر های بدون شن و سنگ ریزه نیست و نیاز به نگهداری بیشتری دارد.

از لحاظ مسئله خوردگی، حرکت در هر دو جهت جانبی و طولی برای مسیر بالاست‌دار بزرگتر است؛ این بدین معناست که حرکات کوچک باعث افزایش خوردگی شیاری می‌شود و از آنجایی که تنش نیز افزایش می‌یابد، خطر ایجاد ترک نیز وجود دارد. سنگ های خرد شده ممکن است پاشیده شوند و به ریل و چرخ ها آسیب برسانند و در صورت باقی ماندن سنگ به روی سطح ریل، سایش تشدید می‌شود. علاوه بر این، ذرات ریز سنگ‌ها ممکن است باعث تخلیه بستر بالاست شده و خطر خوردگی را افزایش دهند. در مورد مسیر بدون بالاست، مشکلات خوردگی ذکر شده در بالا می‌تواند تا حد زیادی مهار شود، با این حال، خراب شدن بتن، نقطه ضعف برای دوام است و باید به دقت مورد توجه قرار گیرد، از جمله خوردگی میلگرد، کربوره شدن، اسیدی بودن سایش، چرخه یخ-ذوب، واکنش سنگ‌دانه قلیایی و سایش مکانیکی. خوردگی به عنوان یکی از موارد در نظر گرفته شده است. خوردگی بتن بیشتر تحت تأثیر نفوذ کلرید و جریان سرگردان می‌باشد که خطر ترک خوردگی را ایجاد می‌کند.

6-5 خوردگی گالوانیک

چند نوع دیگر از خوردگی نیز وجود دارد. به عنوان مثال ، رفتار خوردگی گالوانیک در مورد مواد ریلی هنگام تماس با ساختار فولاد ضد زنگ در ایستگاه قطار مورد بحث قرار گرفته است، اما می‌توان با طراحی مناسب تا حد زیادی از این نوع خوردگی جلوگیری کرد. از آنجا که خوردگی ریلی معمول است، باید فن‌آوری های حفاظتی برای کاهش خطر ایمنی و همچنین هزینه نگهداری استفاده شود. بیشترین کاربردها، پوشش ها و مواد مقاوم در برابر خوردگی پیشرفته است که به شرح زیر به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

6- جوشکاری ریل

جوشکاری راه آهن ترمیت مدرن برای اولین بار در اواسط دهه 1890 توسط هانس گلدشمیت مورد استفاده واقع شد. اولین خط ریلی در اسن از کشور آلمان در سال 1899 جوش داده شد، و ریل های جوش داده شده با ترمیت از محبوبیت بیشتری برخوردار شدند زیرا در مقایسه با سایش اضافی که توسط ریل های جدید الکتریکی و پر سرعت نصب شده بودند، از قابلیت اطمینان بیشتری برخوردار بودند. به طور معمول، در این روش انتهای ریل ها تمیز می شوند و بصورت مسطح و صاف و درست کنار هم قرار می گیرند. ریل ها با فاصله 25 میلی متر (1 اینچ) از یکدیگر فاصله می گیرند. این فاصله بین انتهای ریل ها برای اطمینان از نتیجه خوب جوشکاری در ریختن فولاد مذاب در قالب جوش است. در صورت خرابی جوش، می توان انتهای ریل را به اندازه 75 میلی متر (3 اینچ) برش داد، انتهای ریل ذوب شده و آسیب دیده را برداشته و جوش جدیدی را با قالب مخصوص و شارژ ترمیت بیشتر انجام داد. قالب شن و ماسه ای سخت دو یا سه تکه ای در اطراف انتهای ریل وصل شده است و از یک مشعل با ظرفیت گرمای مناسب برای پیش گرم کردن انتهای ریل و فضای داخلی قالب استفاده می شود. مقدار مناسب ترمیت با فلز آلیاژی در یک ظرف سنگین نسوز قرار داده می شود و هنگامی که ریل ها به دمای کافی رسیده اند، ترمیت مشتعل شده و واکنش به اتمام می رسد (زمان کافی اجازه می دهد تا هر فلز آلیاژی کاملاً ذوب و مخلوط شود). سپس به انتهای ظرفی که فلز در آن ذوب شده است ضربه زده می شود. فولاد مذاب وارد قالب می شود و با انتهای ریل همجوشی می شود و جوش را تشکیل می دهد. سرباره، سبکتر از جریان فولاد است در انتها از ظرف خارج می شود و به درون حوضچه فلزی سرریز می کند تا پس از خنک شدن از آن جدا شود. همه فرایندها انجام شده باید خنک شود. قالب خارج می شود و جوش با استفاده از سنگ شکن داغ و آسیاب تمیز می شود تا مفصلی صاف ایجاد شود. زمان معمول از شروع کار تا زمانی که قطار بتواند از روی ریل حرکت کند، بسته به اندازه راه آهن و دمای محیط، تقریباً 45 دقیقه تا بیش از یک ساعت است. در هر صورت، فولاد ریلی باید قبل از تحمل وزن لوکوموتیوهای ریلی به اندازه کمتر از 370 درجه سانتیگراد (700 درجه فارنهایت) خنک شود. جوشکاری ریلی ترمیت از اکسید آلومینیوم و آهن (از جمله مواد افزودنی) برای ایجاد واکنش ردوکس در دمای معین استفاده می کند. فلز مایع با دمای بالا به قالب مخصوصی ارسال می شود، دو انتهای راه آهن جوش داده شده برای رسیدن به اتصال ذوب می شوند.



شکل 8. جوشکاری ریل به روش ترمیت.

مزایای جوشکاری ریل راه آهن به روش ترمیت

جوشکاری ترمیت ریل راه آهن دارای ویژگی های مثل تجهیزات ساده ، بهره برداری راحت ، هزینه کم تولید ، ظاهر خوب مفاصل و مدت زمان کوتاه است. روش جوشکاری ریل راه آهن به روش ترمیت به ویژه برای تعمیر ریل فولادی شکسته مناسب است.

معایب جوشکاری ریل راه آهن به روش ترمیت

جوشکاری ریل راه آهن ترمیت از استحکام کم ، کیفیت پایین ، سرعت شکستگی بالا ، و عملکرد کلی ضعیف برخوردار است.

7- راه های جلوگیری از خوردگی

1-7 پوشش (رنگ)

پوشش یکی از مهمترین فناوری ها برای محافظت در برابر خوردگی صنعت ریلی است که می توان قدمت آن را به سال 1933 در راه آهن آلمان بازگرداند. با توجه به شرایط پیچیده خدمات مواد ریلی، پوشش ها باید به طور همزمان دارای ویژگی های مقاومت در برابر خوردگی بالا و مقاومت در برابر سایش بالا، همچنین با دوام طولانی مدت (مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی) باشند. شرایط سخت برای تسریع روند خوردگی، پیشنهاد می شود از چرخه های مرطوب یا خشک و یخ زدگی، اشعه ماورا بنفش و اسپری نمک برای ارزیابی قابلیت اطمینان پوشش های ضد خوردگی استفاده شود. از همه مهم تر، شرایط عملیاتی راه آهن نیاز به ویژگی مکانیکی عالی پوشش ها دارد که نه

تنها در برابر خوردگی، بلکه در برابر سایش نیز مقاومت کند. مقاومت در برابر سایش باید در نظر گرفته شود زیرا سایش سیستم پوشش را تا حد زیادی خراب می کند.

اخیراً، یک سیستم پوشش نوشتار ناپذیر^۹ که با چند لایه شامل آغازگر^{۱۰} مقاوم در برابر خوردگی، پرکننده، آغازگر اولیه، پوشش زیرین و پوشش شفاف مقاوم در برابر graffiti، که نشان دهنده خواص خوب چسبندگی، سختی و کشش است توسعه یافته است، با این حال، کاربرد آن در سطح ریل آزمایش نشده است.

پوشش های معدنی مبتنی بر آب برای مسیر ریلی عمدتاً با هدف جذب کمتر نور خورشید از آنجایی که دمای ریل ها به طور موثری کاهش می یابد، توسعه پیدا کرده اند. این پوشش ها دارای دوام بالا و مقاومت به خوردگی مناسب هستند.

گزارش شده است که می توان این پوشش را روی ریل های فعال راه آهن اعمال کرد (تحقیقات میدانی دو ماهه برای آزمون دوام طولانی و آزمون اسپری نمک انجام شد). با این حال عملکرد بسیار مهم تریبولوژیکی^{۱۱} در نظر گرفته نشده است و حجم ترافیک مسیر در مشاهدات میدانی مشخص نبود. بنابراین مقاومت در برابر این پوشش در واقع نامشخص است. علاوه بر این، برای کاهش سایش، پوشش های "CrN + CrO_x" و "PVD TiSiN / TiAlN" را تولید کرده اند. این پوشش ها ضریب اصطکاک کم، مقاومت بالا در برابر خوردگی (با از بین بردن ریز حفره ها و زنگ زدگی) و سایش را دارند. با این حال، این پوشش فقط ممکن است در برابر سایش موضعی قطعات مکانیکی خاص مانند قسمت های اتصال مقاومت کند و تلاش برای استفاده از آن در سطح ریل در مقیاس کامل انجام نشده است. بنابراین، فناوری های پوشش (رنگ) قادر به برآوردن نیاز به مقاومت در برابر خوردگی هستند، اما مقاومت در برابر سایش در حال حاضر نقطه ضعف برای کاربردهای عملی است [18].

2-7 فناوری های اصلاح سطح

فناوری های اصلاح سطح، از جمله پاشش حرارتی^{۱۲} و روکش لیزر^{۱۳}، می توانند باعث پیشرفت مواد، افزایش طول عمر و همچنین صرفه جویی اقتصادی شوند. پوشش های پاشش حرارتی در برابر سایش با اصطکاک کم مقاوم

⁹ Anti-graffiti

¹⁰ Primer

¹¹ Tribological

¹² Thermal Spraying

¹³ Laser Cladding

هستند که در این میان پوشش های سرامیکی (از جمله آلومینا، تیتانیا، زیرکونیا، کرومیا، ایتریا و مخلوط آنها) بیشترین کاربرد را دارند و به اصطلاح "پوشش های تریبو" نامیده می شوند.

رفتار سطح نیتريد کننده پلاσμα همچنين برای اجزای مکانیکی صنعت ریلی با هدف افزایش مقاومت در برابر سایش و خوردگی و همچنین سختی سطح پیشنهاد شده است. با این حال، بیشترین مطالعه در مورد تکنولوژی پوشش مواد ریلی، روکش لیزر است که باعث تغییر شکل کم در منطقه کوچک تحت تأثیر گرما برای مواد ریلی می شود و همچنین اجازه می دهد تا به طور موثر پیوند متالورژی با بستر ایجاد شود. مشخص شده است که پوشش های لیزر با عناصر مختلف از جمله La_2O_3 و Ni, Co, Fe مقاومت در برابر سایش را بهبود می بخشد و از خستگی یا ترک سطح ریل جلوگیری می کنند.

با این حال، به عنوان یک فناوری اصلاح سطح برای مواد ریلی، تحول مارتنزیت حاصل در منطقه تحت تأثیر گرما (HAZ)، بر خصوصیات مکانیکی تأثیر منفی می گذارد و منجر به شکنندگی، کاهش مقاومت و تمایل به خستگی می شود. اخیراً یک روش جدید با عنوان فناوری روکش هیبریدی القایی لیزر (LIHC) بر روی سطح فولاد ریل اعمال شده است، که نه تنها به طور موثر باعث کاهش اندازه HAZ و افزایش مقاومت در برابر شکست می شود، بلکه می تواند در سخت کاری و تعمیر ریل اعمال شود.

در رابطه با مسئله خوردگی، فناوری پوشش روکش لیزری به خوبی انجام شده است و میتوان اذعان کرد که برای بهبود موثر است اما عملکرد هیچ یک از اینها، برای مواد ریل ارزیابی نشده است. همانطور که در بالا گفته شد، تحقیقات قبلی کار بر روی مقاومت در برابر سایش و خواص مکانیکی متمرکز شده است، که فقط نقطه ضعف پوشش است. با این حال، در ارزیابی و توصیف ویژگی مقاومت در برابر خوردگی ریل، کم توجهی وجود دارد.

در فناوری های اصلاح باید یک پوسته اضافه را خارج از سطح ریل معرفی کرد. با این حال، هزینه این فناوری های اصلاح سطح برای کاربرد واقعی هنوز روشن نشده است و می توان گفت که بدون کنترل معقول هزینه، این فناوری هنوز هم نمی تواند به طور گسترده استفاده شود [19].

3-7 توسعه فولادهای جدید ریل

دانشمندان اخیراً توجه ویژه ای به اثر نامطلوب خوردگی بر روی مواد ریلی داشته اند و چندین فولاد جدید بوسیله ریز آلیاژهای Cu, Ni, Cr, Si و شناخته شده اند که قادر به بهبود خوردگی هستند و یا با ایجاد تحریک پذیری فولادها با ایجاد فرآورده های خوردگی محافظ، مقاومت به خوردگی را افزایش می دهند. مشخص شده است که

ترکیبات محافظ زنگ زدگی به عناصر مختلف آلیاژهای مختلف بستگی دارد و فولادهای ریل جدید فیلم های زنگ زدگی محافظ تری را به نمایش می گذارند. اثر مشابه برای محصولات خوردگی نیز بر روی یک فولاد ریلی U76CrRE که اخیراً ساخته شده است و فولاد ریل Cu-Mo جدید وجود دارد. خوردگی فولاد جدید U68CuCr نیز با فولاد U75V سنتی مقایسه شده است، که نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر خوردگی با آلیاژهای Cu و Cr است و به احتمال زیاد به تغییر در ریزساختار به جای تنوع محصولات خوردگی نسبت داده می شود. همچنین گزارش شده است که ریز آلیاژهای مس، نیکل، کروم و مولیبدن می توانند درجه تردی هیدروژن را کاهش دهند.

با این حال، تردی هیدروژنی فقط تاکنون در آزمایشگاه ها مورد مطالعه قرار گرفته است و هیچ گونه شکست ریل به طور مستقیم ناشی از تردی هیدروژن گزارش نشده است. مقدار هیدروژن در فولادهای مسیر ریلی شاخص قابل توجهی است و هنگام ساخت کاملاً کنترل می شود، و مقدار آن به طور معمول زیر 3ppm است.

بنابراین مقاومت در برابر خوردگی فولادهای جدید با آلیاژهای Cu، Cr، Ni و Si بررسی شده است، و مشخص شد که عناصر تازه اضافه شده، منجر به کاهش ضریب اصطکاک و کاهش آسیب سطح هستند، علاوه بر این، یک لایه محافظ "الکتروشیمیایی" می تواند تحت شرایط برفکاری حفظ شود.

در میان این فولادهای جدید، ریز آلیاژهای Cr-Cu-Ni فولادها عملکرد فوق العاده ای از جمله انفعال آسان و مقاومت بالا در برابر خوردگی را نشان داده اند. مهمتر از همه، بدون افزودن Mo، هزینه این فولاد ریل جدید Cr-Cu-Ni می تواند به صورت منطقی کنترل شود. علاوه بر ارزیابی مقاومت در برابر خوردگی، خصوصیات مکانیکی فولادهای ریل جدید نیز وجود داشته است [20].

8- تشخیص خوردگی

تشخیص خوردگی راه آهن مهم، ترجیحاً غیر مخرب و بدون تماس است. لیزر پر قدرت که در بالای سطح ریل قرار گرفته و امواج مافوق صوت را تولید می کند، در همان سمت با یک مبدل متصل به هوا که سیگنال های فراصوت را دریافت می کند، می تواند نقایص موجود بالا و زیر ریل در یک بخش کامل راه آهن را شناسایی کند. اگر دستگاه به وسیله نقلیه ردیابی مجهز باشد، می توان تا حد زیادی کارایی تشخیص را افزایش داد. تشخیص اولتراسونیک^{۱۴} در خوردگی پایه ریلی دشوار اما مهم است و برای بررسی مناسب پایه ریلی، طراحی خاصی لازم می باشد. همچنین بازرسی مادون قرمز برای تشخیص ریل اعمال می شود، که می تواند نقص را با توجه به ویژگی های مختلف حرارتی

¹⁴ Ultrasonic

پیدا کند. از آنجا که خوردگی موضعی همیشه در مراحل اولیه از طریق چشم قابل شناسایی نیست، از تشخیص نقص اولتراسونیک استفاده شده است و همچنین برای ارزیابی خوردگی پای ریل استفاده می شود. باید تأکید کرد که توسعه و استفاده صحیح از فناوری تشخیص، به همان اندازه تحقیق در مورد خوردگی موضعی دارای اهمیت است. تلاش استفاده از انتشار موج هدایت شده برای تشخیص خوردگی در پایین تخت پایه ریل، با یک ژنراتور لیزر در سطح بالای پایه ریل، می توان سوراخهای مصنوعی ایجاد شده در سطح پایین (برای شبیه سازی خوردگی حفره‌ای) را با موفقیت شناسایی کرد، در حالی که کاربرد عملی دیگری در زمینه گزارش نشده است.

البته برخی دیگر از فناوری های غیر مخرب تشخیص عیب نیز وجود دارد از جمله بازرسی رادیوگرافی، بازرسی جریان گردابی، مبدل صوتی الکترومغناطیسی، رادار نفوذی زمین و غیره.

9- ارزیابی خوردگی

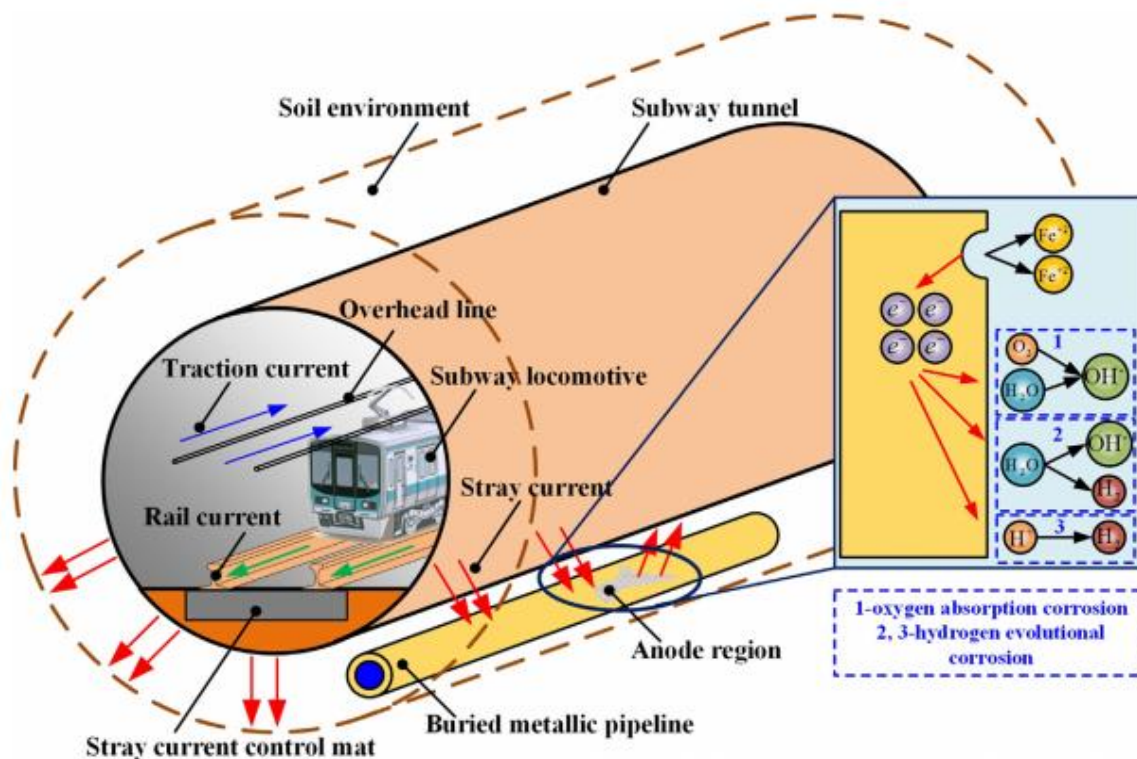
استانداردهای ارزیابی تعویض ریل در کشورهای مختلف کاملاً یکسان نیست. به عنوان مثال در چین، تعویض ریل باید هنگامی انجام شود که آسیب بتواند به عنوان "عمده" طبقه بندی شود (در مقایسه با "جزئی"). برای صرفه جویی در هزینه تعمیر و نگهداری، تعویض ریل اغلب هنگامی انجام می شود که خسارت بسیار نزدیک به "عمده" باشد. برای مسیر ریلی که برای سرعت قطار بالاتر از 120 کیلومتر در ساعت طراحی شده است، اگر ضخامت پایه ریلی کمتر باشد، آسیب عمده‌ای محسوب می شود که بیش از 8 میلی متر یا کمتر ریلی کمتر از 14 میلی متر است. در حالی که برای کمتر از 120 کیلومتر در ساعت، اگر ضخامت پایه ریلی کمتر از 5 میلی متر یا کمتر ریل کمتر از 8 میلی متر باشد. علاوه بر این، بدون توجه به اندازه و موقعیت آن، یک بار آسیب دیدگی "عمده" تلقی می شود. همچنین زمانی که 1.4 تا 1.8 اینچ (حدود 3.2-6.4 میلی متر) پایه ریلی برای راه آهن در ایالات متحده از بین می رود، جایگزینی فوری لازم است. اندازه گیری ضخامت بعد از زدودن مناسب زنگ زدگی است. از آنجا که ضخامت پایه ریلی معمولاً در محدوده 10-14 میلی متر است، این استانداردها در چین و ایالات متحده تقریباً با یکدیگر موافق هستند [14].

10- روش تحقیق

10-1 بررسی خوردگی الکتروشیمیایی بر روی فولاد Q235A تحت تأثیر جریان سرگردان با استفاده

از تجزیه و تحلیل ترکیبی توسط طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و شبکه عصبی مصنوعی

جریان سرگردان باعث خوردگی شدید الکتروشیمیایی در خطوط لوله فلزی مدفون، از جمله خطوط لوله انتقال محصولات نفت و گاز می شود. در این بخش، با استفاده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS¹⁵) ویژگی های خوردگی تحت تاثیر جریان سرگردان با استفاده از تجزیه و تحلیل ترکیبی بر اساس روش اندازه گیری الکتروشیمیایی و الگوریتم یادگیری ماشین مورد بررسی قرار می گیرد، که در آن اثر زمان خوردگی، چگالی جریان سرگردان و غلظت یون کلرید بر EIS به طور خاص مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. هنگامی که جریان سرگردان به دلیل مقاومت کم آن در مقایسه با خاک به دور فولاد Q235A جمع می شود، در آندی که فولاد لوله Q235A در معرض خاک قرار دارد، خوردگی جریان سرگردان رخ می دهد، که به وضوح در شکل 1 دیده می شود. اصل خوردگی جریان سرگردان در محیط های مختلف خارجی متفاوت است، اما با وجود کنترل جریان سرگردان، این امر منجر به از بین رفتن زمینه فلز خواهد شد. بنابراین، این خطوط لوله فلزی مدفون، به ویژه خطوط لوله در سیستم های زیربنایی اصلی که محصولات نفت و گاز را حمل می کنند، به شدت توسط خوردگی الکتروشیمیایی تولید شده توسط جریان سرگردان تهدید می شوند.



شکل 9. خوردگی جریان سرگردان در سیستم انتقال جریان DC.

¹⁵ Electrochemical Impedance Spectroscopy

1-1-10 مواد و آماده سازی محلول الکترولیت

در این تحقیق از نمونه های آزمایشی برش داده شده از لوله فولادی Q235A استفاده شد. ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) در جدول 3 گزارش شده است.

جدول 3. ترکیب شیمیایی فولاد Q235A.

C	Si	Mn	P	S	As	Al	V	Nb	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo	B	N	Ceq
10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10 ⁻²
13	19	49	28	19	10	1	2	2	1	1	1	3	1	1	37	22

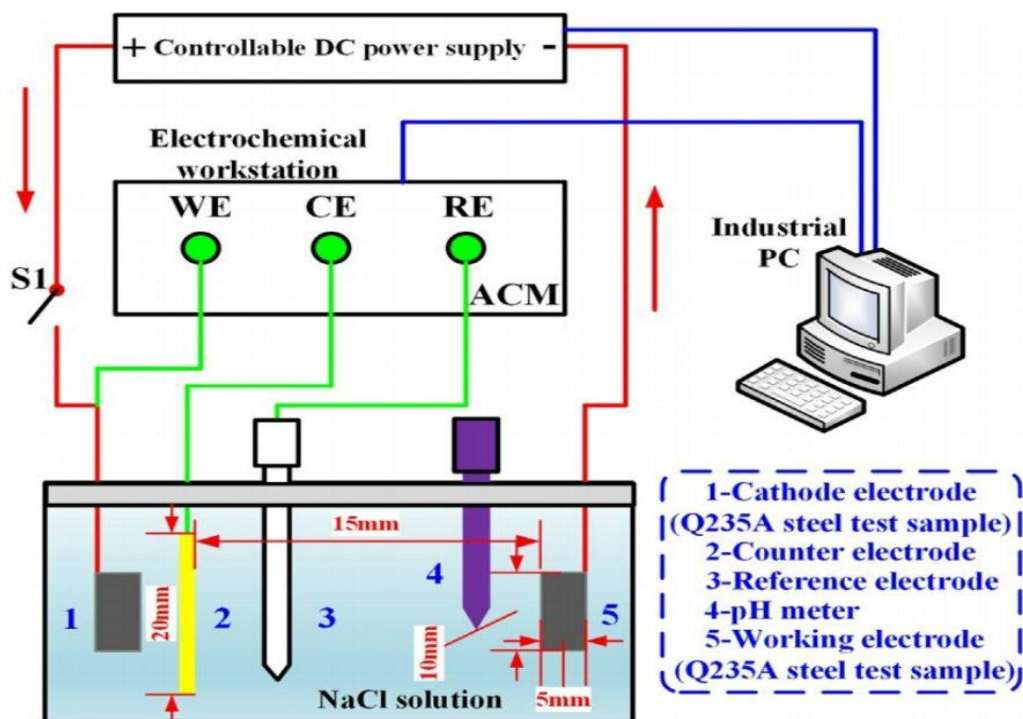
همه نمونه ها در حجم 10 میلی متر در 10 میلی متر در 5 میلی متر ساخته شده اند. پس از اینکه نمونه ها با کاغذهای سنباده با درجه 240 ، 400 ، 800 ، 1000 ، 1500 ، 2000 ، 2500 ، 3000 ، 5000 و 7000 سنباده شدند، یک سطح از نمونه آزمایش با مساحت 100 میلی متر مربع برای خوردگی جریان سرگردان نگه داشته شده است. نمونه ها در آب مقطر و متانول تمیز و در هوا خشک شدند. آماده سازی نمونه با دقت کنترل شد تا اطمینان حاصل شود که هیچ حباب و شکافی در فولاد وجود نداشته باشد. از با NaCl با مقادیرهای 0.05mol/L، 0.1 mol/L، 0.2 mol/L و 0.3mol/L به عنوان الکترولیت خورنده استفاده شد.

1-1-2 10-1-2 آزمون خوردگی جریان سرگردان و آزمایشات EIS

خوردگی شبیه سازی شده برای مطالعه روند خوردگی جریان سرگردان انجام شده است. سیستم آزمایشی در شکل 2 نشان داده شده است، که در آن نمونه ها تحت اثر همزمان جریان سرگردان و یون کلرید بودند. به منظور شبیه سازی خوردگی جریان سرگردان در هنگام تخریب عایق ریل به زمین (با توجه به این واقعیت که مقاومت انتقال ریل به زمین به طور معمول در طول عملیات طولانی مدت کاهش می یابد)، چگالی جریان سرگردان 0.1 A/cm^2 ، 0.2 A/cm^2 ، 0.3 A/cm^2 و 0.4 A/cm^2 در سیستم سه الکتروده اعمال شد. سوئیچ S1 برای کنترل اندازه گیری EIS در هر 10 دقیقه انجام شد. و کل زمان خوردگی هر نمونه آزمایش 60 دقیقه است. الکتروده $4 \text{ cm}^2 \text{ Ti}$ به عنوان الکتروده شمارنده (CE^{16}) استفاده شد، و یک الکتروده کالومل اشباع (SCE^{17}) به عنوان مرجع استفاده شد.

¹⁶ Counter Electrode

¹⁷ Saturated Calomel Electrode



شکل 10. سیستم آزمایشی خوردگی الکتروشیمیایی تحت تاثیر جریان سرگردان.

تمام مقادیر بالقوه نشان داده شده در این مطالعه SCE نسبی هستند. فاصله 80 میلی متری بین WE و CE در طول آزمون حفظ شد تا اطمینان حاصل شود که میدان الکتریکی می تواند به طور کامل گسترش یابد. از آنالیزر الکتروشیمیایی سری CHI به عنوان ابزار آزمایش الکتروشیمیایی استفاده شد. اندازه گیری EIS پس از رسیدن هر نمونه به یک حالت پایدار آغاز شد. پتانسیل آزمایش 5 میلی ولت است. فرکانس بالا و پایین به ترتیب 0.01 و 100000 هرتز است. پتانسیل اولیه روی پتانسیل مدار باز (OCP) تنظیم می شود که در زمان های مختلف خوردگی اندازه گیری می شود.

3-1-10 توصیف سطح

هنگامی که اندازه گیری EIS به پایان رسید، نمونه های آزمایش شسته و خشک شدند. اسکن SEM از نمونه های آزمایش برای توصیف سطح انجام شده است. ظاهر سطح با استفاده از یک میکروسکوپ الکترون روبشی FEI Quanta TM 250 مشاهده شد.

2-10 بررسی شکست غیرعادی فنر کوپل ناشی از ارتعاشات در سیستم مترو

فنرهای کویل در تعدادی از وسایل نقلیه مترو، به دلیل ارتعاش غیر عادی در تعلیق اولیه، به طور مداوم در معرض خرابی قرار گرفته‌اند، که اثرات بسیار نامطلوبی را بر ایمنی تحمیل می‌کند. شکل زیر یک وسیله نقلیه مترو با خرابی فنر کویل است. آزمون‌های میدانی و ساخت مدل براساس این وسیله نقلیه هستند.



شکل 11. وسیله نقلیه مترو همراه با خرابی فنر کویل.

گروه اصلی فنر شامل دو فنر کویل، یک فنر بزرگ خارجی و یک فنر کوچک داخلی است. ارتفاع فنرها ۲۹۰ میلیمتر است. فنر خارجی قطر ۲۰۰ میلیمتر و قطر سیم ۳۰ میلیمتر دارد، در حالی که فنر داخلی قطر ۱۳۵ میلیمتر و قطر سیم ۲۰ میلیمتر دارد. فنرهای داخلی و خارجی از یک ماده ساخته شده‌اند. وقتی فنر ساخته می‌شود، با موقعیت ۱،۲ دور به عنوان نقطه علامت‌گذاری پردازش می‌شود. بخش فنری که در آن سطح مقطع تغییر می‌کند به عنوان ضعیف‌ترین بخش فنر کویل در نظر گرفته می‌شود و شکست اصلی در حدود ۱،۲ دور کویل به نظر می‌رسد. شکل زیر آرایش فنر محوری و شکست فنر نشان داده شده است.



الف



ب



ج

شکل 12. الف. فنر محور و چرخ، ب. تصویر اول شکست فنر کویل، ج. تصویر دوم شکست فنر کویل.

۹۸٪ فنرهای شکسته شده، از قسمت فنرهای داخلی سرچشمه می‌گیرند. این امر به ارتعاشات غیر طبیعی شدید در فنرهای داخلی نسبت داده می‌شود.

برای شناسایی عوامل شکست فنر کوپل آزمایش‌های میدانی انجام گردیده که در شکل زیر نشان داده شده است.



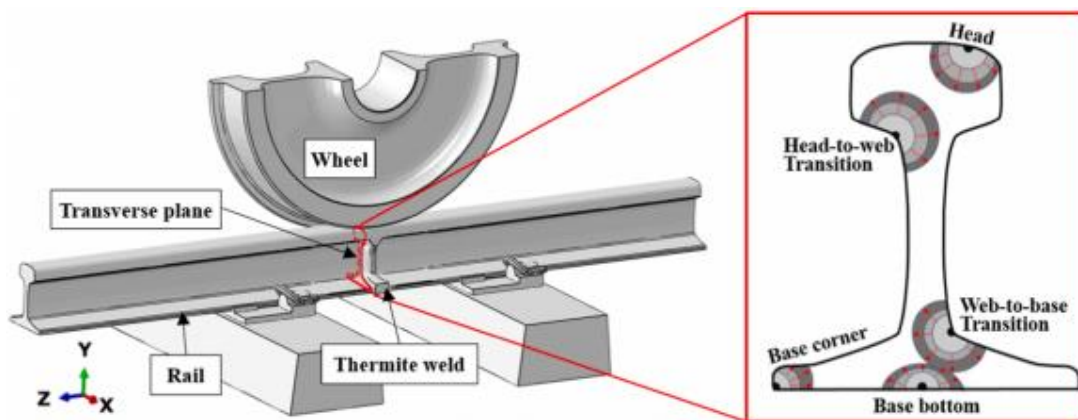
شکل 13. الف. آزمایش شتاب و جابجایی، ب. آزمایش کشش فنر، ج. مشاهده فنر کوپل تست شده.

جنبه‌های مختلفی توسط این آزمایشات میدانی تحت پوشش قرار می‌گیرند. دوربین‌ها برای مشاهده ارتعاشات فنر مرتب شده‌اند. سنسورهای شتاب برای آزمایش مشخصات ارتعاش قطعات اصلی مانند بدنه، قاب، جعبه محور و جایگاه فنر بکار گرفته شده‌اند. سنسورهای جابجایی برای اندازه‌گیری تغییر مکان نسبی فنر اولیه در هنگام نصب و کار تنظیم شده‌اند. همچنین کرنش سنج‌ها برای آزمایش کرنش دینامیکی 1.2 دور و بخش میانی گروه فنر کوپل مرتب شده‌اند. آزمایش‌های ضربه - چکش برای اندازه‌گیری عملکرد پاسخ فرکانس کالیبره نشده گروه فنر در ایالات مختلف تنظیم شده است. اندازه‌گیری بی‌نظمی‌های مسیر ریلی برای تشخیص شیارها در مقاطع مختلف ریلی تنظیم شده است [21].

3-10 بررسی ترک خستگی در فولادهای ریلی و جوش‌های ترمیت تحت بارگذاری درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای

این بخش، رفتار رشد ترک ناشی از خستگی در فولاد ریل و جوش ترمیت تحت بارگذاری درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای را بررسی می‌کند و مطالعات فقط بر روی ترک‌های سطح سر ریل متمرکز شده است. شکل زیر مکان‌های

ترک ایجاد شده روی مقطع عرضی ریل را نشان می‌دهد. در مورد ایجاد SIF^{18} برای موارد ترک خوردگی سطحی خاص در هر یک از پنج مکان مختلف نشان داده شده در شکل ب برای ترک های سطح سه بعدی در مقطع عرضی جوش ترمیت، کمبود مطالعات وجود دارد. به منظور تحلیل رشد ترک خستگی، از روش RMS^{19} (مربع میانگین ریشه) استفاده شد و مدل سازی تغییرات شکل ترک تحت شرایط بارگیری مختلف بدست آمد که در قسمت نتایج و بحث بررسی خواهند شد.



شکل 14. توصیف سطح و مکانهای ترک بر روی مقطع عرضی ریل.

11 نتایج و بحث

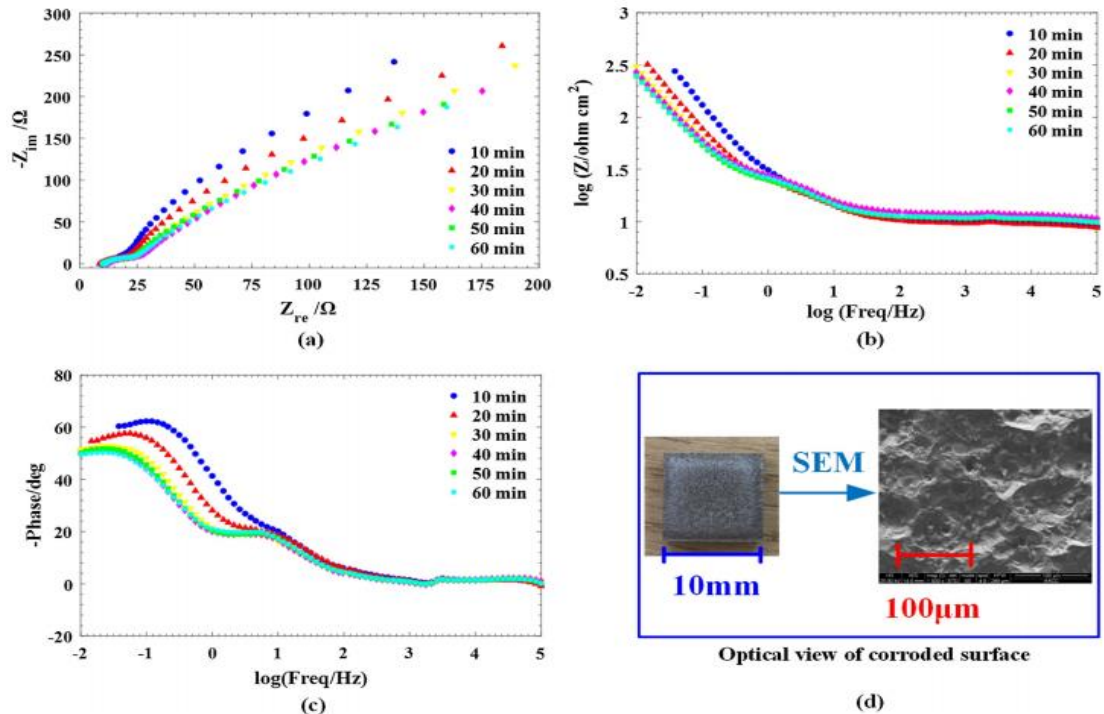
11-1 نتایج خوردگی الکتروشیمیایی بر روی فولاد Q235A تحت تاثیر جریان سرگردان

هنگامی که غلظت یون کلرید 0.2 mol / L باشد، سیگنال EIS اندازه گیری شده تحت چگالی جریان سرگردان 0.3 A / cm^2 در شکل 3 نشان داده شده است. در نمودار Bode، مقاومت و فاز آزمایش شده در فرکانس بالای 102 هرتز تغییر چندانی نمی کنند. هنگامی که فرکانس کمتر از 102 هرتز است، مقاومت و فاز اندازه گیری شده به شدت تغییر می کند و به تدریج ویژگی های مختلف را نشان می دهد. در طرح Bode سه منطقه مشاهده شده

¹⁸ Stress Intensity Factor

¹⁹ Root Mean Square

است. در فرکانس بالا ، که در این آزمایش بین 102 هرتز و 105 هرتز است ، فاز به دلیل مقاومت در برابر الکترولیت افت کرده و به سمت صفر میرود. هنگامی که فرکانس در محدوده بین 100 هرتز و 102 هرتز کاهش می یابد ، فرکانس میانی ، قله ای تولید می کند که نشان دهنده یک پاسخ خازنی است.

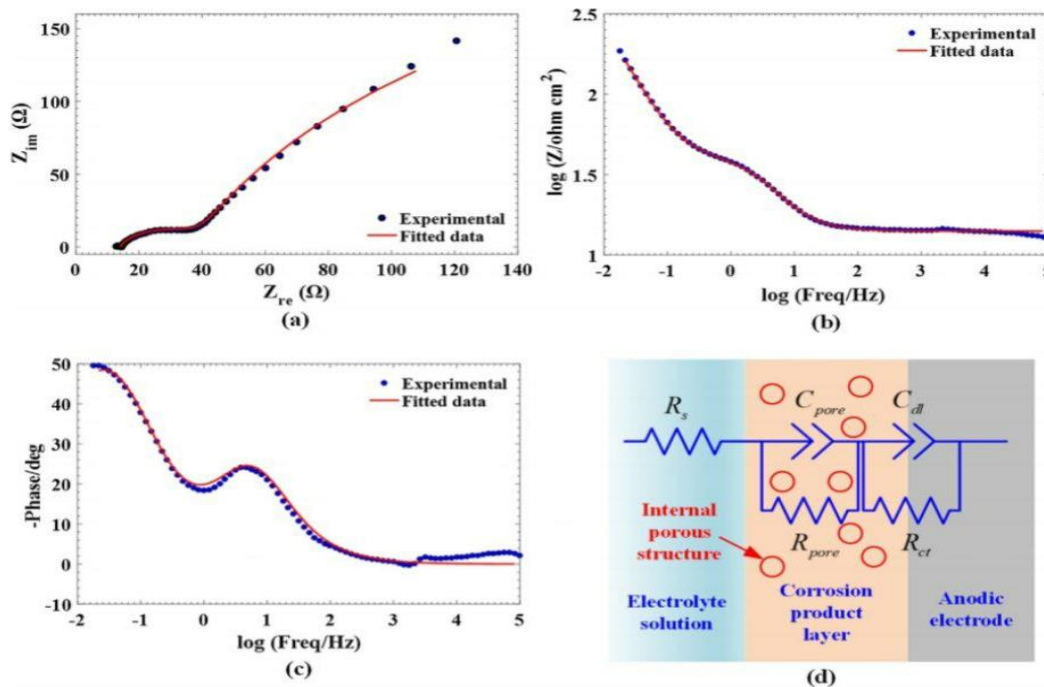


شکل 15. طرح Nyquist و نمودار Bode از فولاد Q235A با چگالی جریان سرگردان 0.3 A/cm^2 برای زمان مختلف خوردگی در محلول 0.2 mol/L NaCl (الف: Nyquist plot)؛ (ب) نمودار مقاومت اندازه گیری شده ؛ (ج) نمودار Bode از فاز اندازه گیری شده ؛ (د) مورفولوژی سطح خورده.

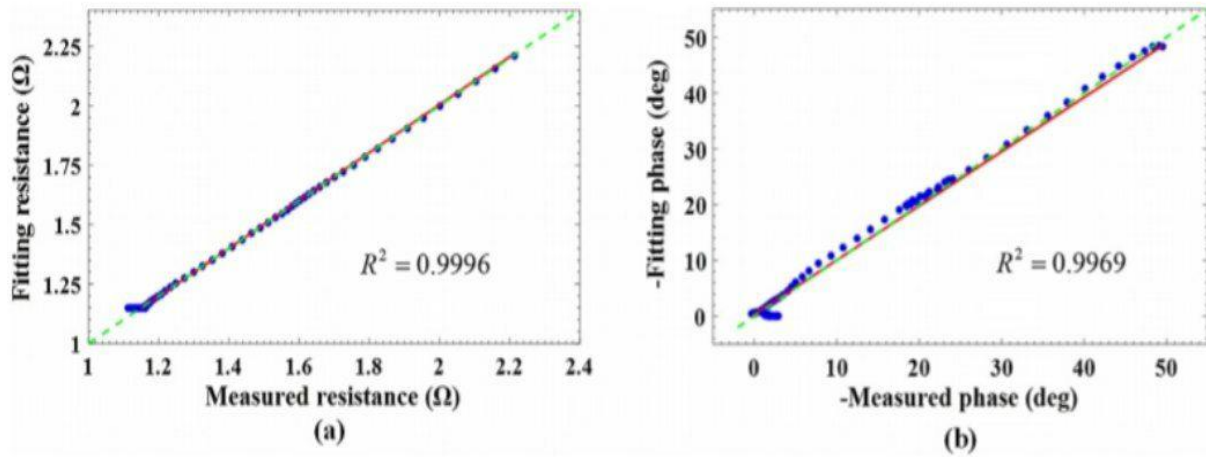
با افزایش زمان خوردگی ، پدیده قله بیش از پیش آشکار می شود. در فرکانس پایین ، قله ی بالاتر تولید می شود که نشان دهنده پاسخ خازنی دیگری است. بدیهی است با زمان خوردگی در مقایسه با قله در فرکانس میانی ، اوج در فرکانس پایین بیشتر تغییر می کند . با مقایسه مقدار امپدانس در 0.01 هرتز ، می توان با افزایش زمان خوردگی، روند کاهشی مشاهده کرد ، که نشان دهنده خراب شدن بستر است.

علاوه بر این ، ویژگی های مختلف EIS در زمان مختلف خوردگی از طرح Nyquist در شکل (a) که سیستم خوردگی نشان می دهد قابل مشاهده است. با این وجود می توان EIS فولاد Q235A را بدون در نظر گرفتن زمان خوردگی به صورت یک قوس واکنش دو برابر ظرفیت بیان کرد. یک قوس کوچک در منطقه با فرکانس بالا EIS ظاهر می شود و فرکانس پایین هنوز یک قوس تک ظرفیت با شعاع بزرگ است ، که نشان می دهد نمونه آزمایش شروع به حفره ای شدن می کند. در منطقه با فرکانس بالا ، به دلیل مقاومت در برابر الکترولیت ، یک قسمت مسطح

وجود دارد. با افزایش زمان خوردگی فولاد Q235A، شعاع قوس واکنش رابط خازنی در منطقه با فرکانس پایین کمتر است. تحت اثر الکترولیت 0/02 mol/L NaCl، مقاومت پلاریزاسیون خطی با زمان خوردگی کاهش می یابد، در حالی که چگالی جریان خوردگی افزایش می یابد. نمای نوری سطح خوردگی در شکل 3 (d) نشان داده شده است. پس از یک ساعت خوردگی، تحت این شرایط، سطح به دلیل دست دادن فلز بسیار مات و خشن دیده می شود. مدارهای الکتریکی معادل (CPEdlRct) (CPEporeRpore) متناسب با داده های EIS، استفاده می شود که R_s ، R_{pore} ، R_{ct} ، CPE_{dl} و CPE_{pore} به ترتیب مقاومت در برابر محلول، مقاومت انتقال بار، مقاومت لایه محصول خوردگی متخلخل، عنصر فاز ثابت محصول رابط Q235A محصول خوردگی و لایه محصول خوردگی متخلخل هستند. علاوه بر این، به دلیل خاصیت متخلخل بودن محصولات خوردگی و ناهمگنی سطح، از عناصر فاز ثابت در این مدل برای جایگزینی ظرفیت مربوطه استفاده شده است تا بهترین تناسب ایجاد شود. نمونه ای از نتایج در شکل زیر نشان داده شده است که در آن می توان از طرح Nyquist و نمودار Bode یک تناسب ایده آل مشاهده کرد. بعلاوه، ارزیابی همبستگی بین مقدار فیت شده و مقدار اندازه گیری شده در نمودار Bode در شکل 5 انجام شده است.

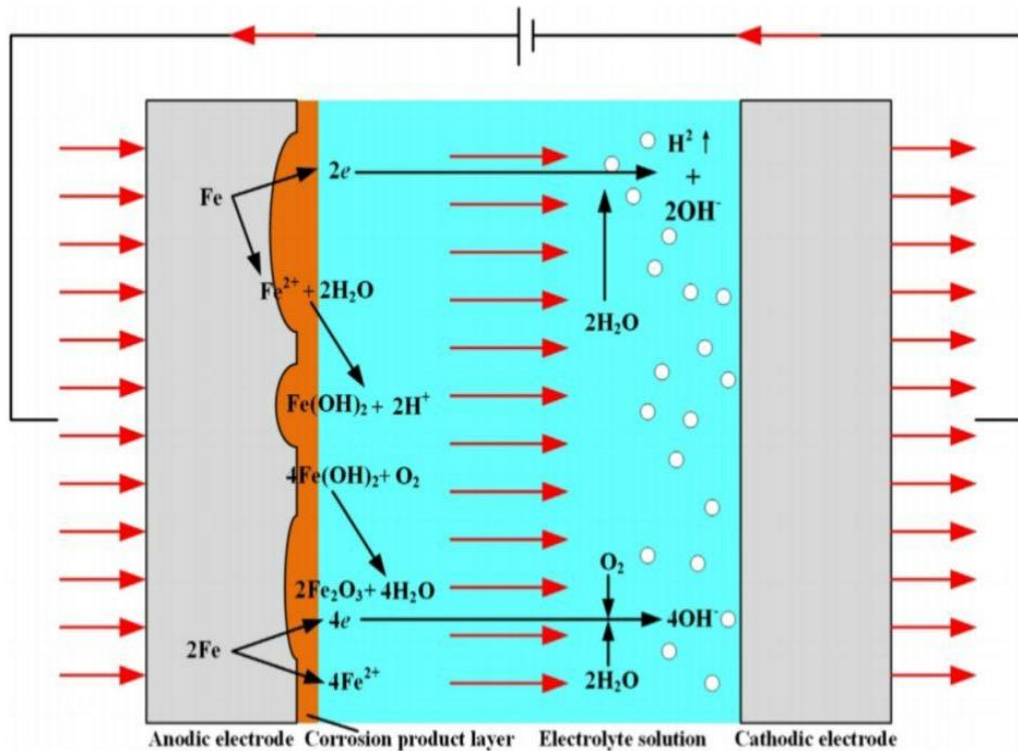


شکل 16. نمودارهای خوردگی جریان سرگردان با استفاده از مدل سازی (EEC): (الف) طرح Nyquist فیت شده؛ (ب) طرح مقاومت Bode (ج) طرح فاز Bode فیت شده؛ (د) مدار معادل.



شکل 17. خطوط رگرسیون بین نتایج برازش و داده های اندازه گیری شده: (الف) مقاومت ؛ (ب) فاز.

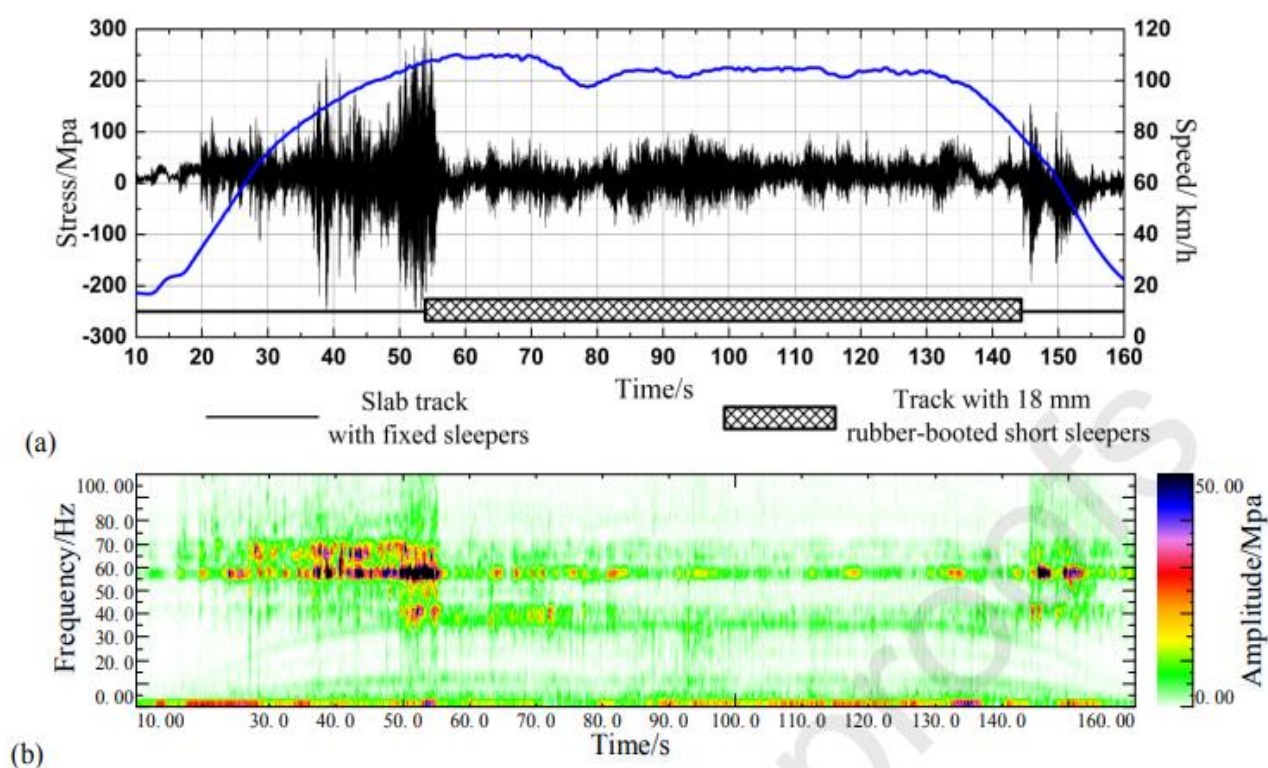
نتیجه ارزیابی نشان می دهد که EEC می تواند به طور موثر ترکیب سیستم خوردنده را منعکس کند. واکنش شیمیایی روی سطوح الکترود هنگام خوردگی جریان سرگردان در شکل 18 نشان داده شده است.



شکل 18. شمایلی از خوردگی الکتروشیمیایی تحت تاثیر جریان سرگردان.

2-11 تحلیل نتایج شکست غیرعادی فنر کویل ناشی از ارتعاشات در سیستم مترو

شکل زیر، نتیجه تنش فون میزز از فنر داخلی در 1.2 دور کویل فنر را نشان می دهد، همانطور که در شکل 19الف نشان داده شده است. ناهنجاری تنش به عنوان افزایش ناگهانی دامنه تنش در بخشهای خاصی از عملیات (به عنوان مثال، محدوده عملیاتی 10-55 ثانیه) ظاهر می شود. حداکثر مقدار به 300 مگاپاسکال می رسد که 3 تا 4 برابر حداکثر مقدار طبیعی است. نتایج تنش حوزه زمانی با استفاده از تبدیل فوریه کوتاه مدت ($STFT^{20}$)، همانطور که در شکل 19ب نشان داده شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند.



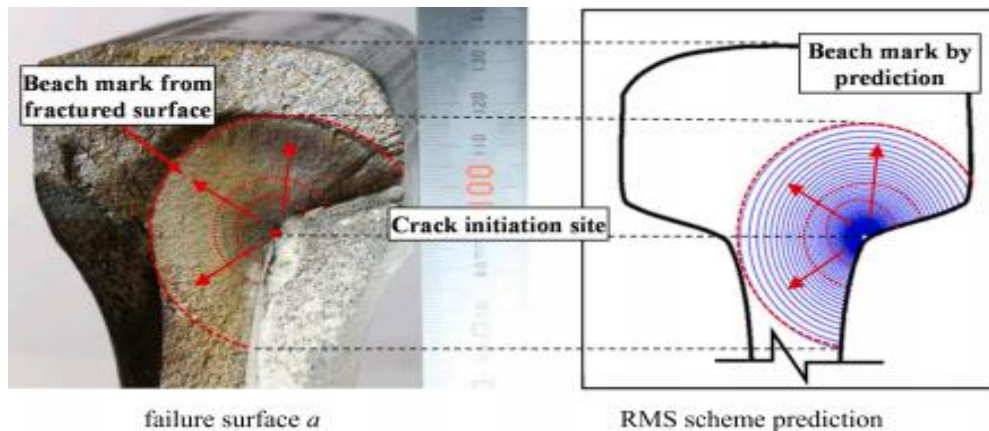
شکل 19. نتایج آزمایش تنش (الف) مشخصات دامنه زمانی تنش فنر، مقاطع مسیر و سرعت، (ب) $STFT$ تنش فنر.

نتایج نشان می دهد که ناهنجاری تنش در درجه اول تقریباً در 55-70 هرتز متمرکز است. این دامنه بزرگ با سرعت تغییر نمی کند. ارتعاشات با فرکانس پایین در محدوده 55 تا 60 هرتز در تمام بخشها وجود دارد و با شکل و سرعت مسیر تغییر نمی کند. فرض بر این است که این امر ناشی از فرکانس طبیعی فنر کویل و ایجاد صوت است که در طول عملیات رخ می دهد.

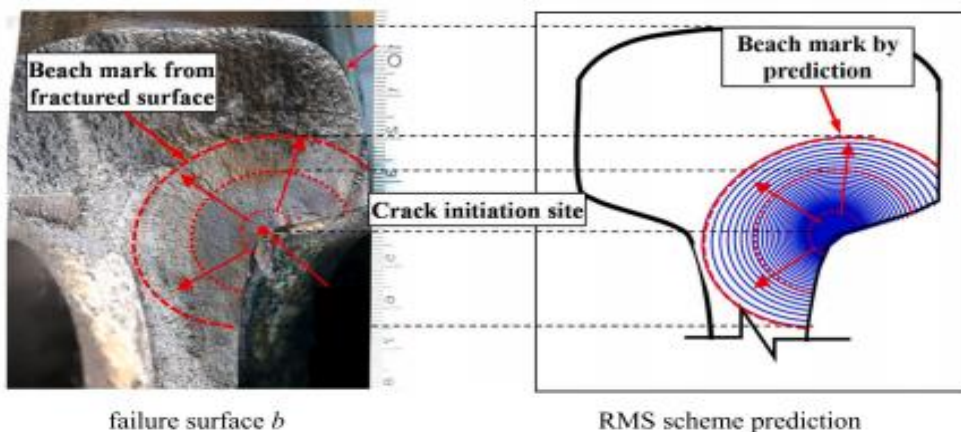
²⁰ Short-time Fourier transform

3-11 بررسی نتایج ترک ناشی از خستگی در فولادهای ریلی و جوش‌های ترمیت تحت بارگذاری درون و برون صفحه‌ای

اشکال پس از تحلیل با استفاده از روش RMS و مقایسه آن با یک سطح شکست خستگی واقعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.



(a) crack shape under pure in-plane load condition



(b) crack shape under mixed load condition

شکل 20. اشکال مختلف ترک نهایی تحت شرایط بارگیری مختلف.

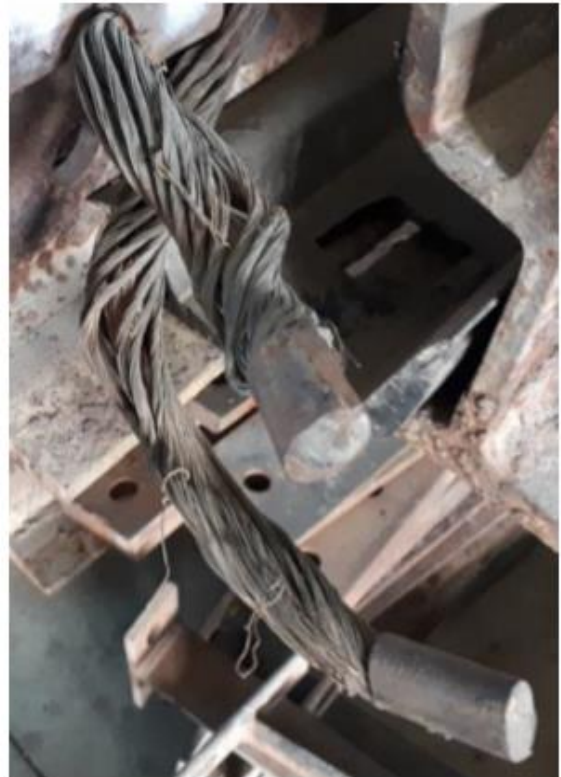
این روش نشان داد که تحت شرایط بارگذاری پیچیده، الگوریتم رشد ترک ناشی از خستگی قادر به پیش‌بینی شکل واقعی ترک مشاهده‌شده از شکست می‌باشد. اندازه اولیه ترک به صورت ۰٫۱ تا ۰٫۲ میلی متر در نظر گرفته شد و

بارها از اندازه‌گیری در محل به دست آمده است. علاوه بر بررسی تکامل شکل ترک، پیش‌بینی عمر انتشار ترک ناشی از خستگی در این دو حالت در شکل 13 را می‌توان انجام داد.

12- بررسی قطعات خوردگی در مترو مشهد



شکل 21. چفت و بست مربوط به ریل قطار شهری مشهد.

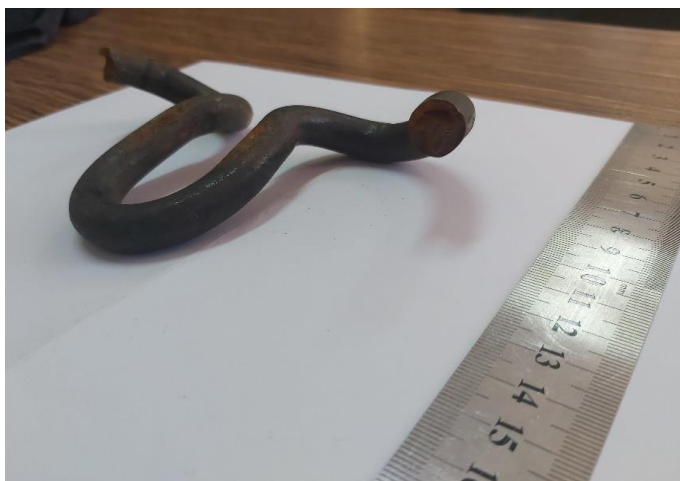


تصاویر 22 تا 24. قطعات خورده شده ریل مترو مشهد.

12-1. بررسی ریزساختار فنر ریل خط یک مترو مشهد

12-1-1. آماده سازی نمونه

نمونه فنر برای آماده سازی ابتدا با محلول متانول شسته شده است.



شکل 25: نمونه فنر شسته شده با الکل.

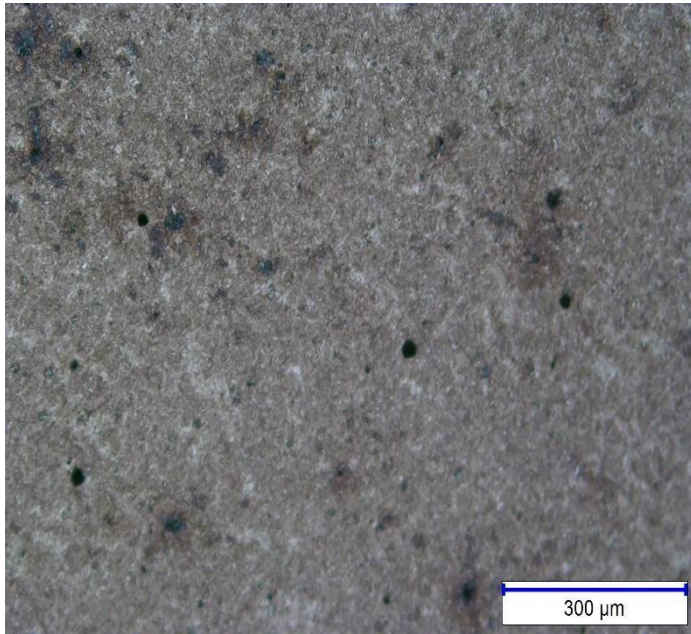
پس از شستشو، از دو قسمت نمونه دو قطعه کوچک برای انجام عملیات متالوگرافی بریده شده است.



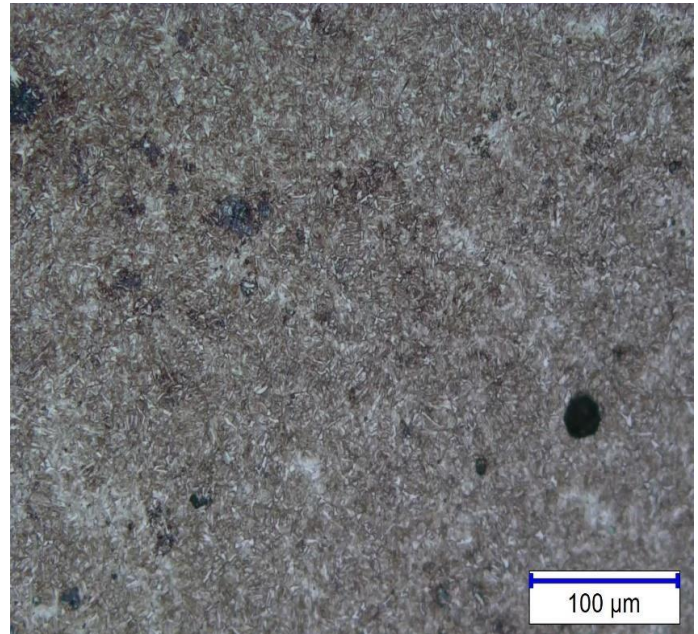
شکل 26: نمونه فنر بریده شده.

این دو قطعه در آزمایشگاه متالوگرافی مانده شده سپس با سنباده های 60، 80، 100، 120، 240، 320، 400، 600، 800، 1200 سنباده زده شده است.

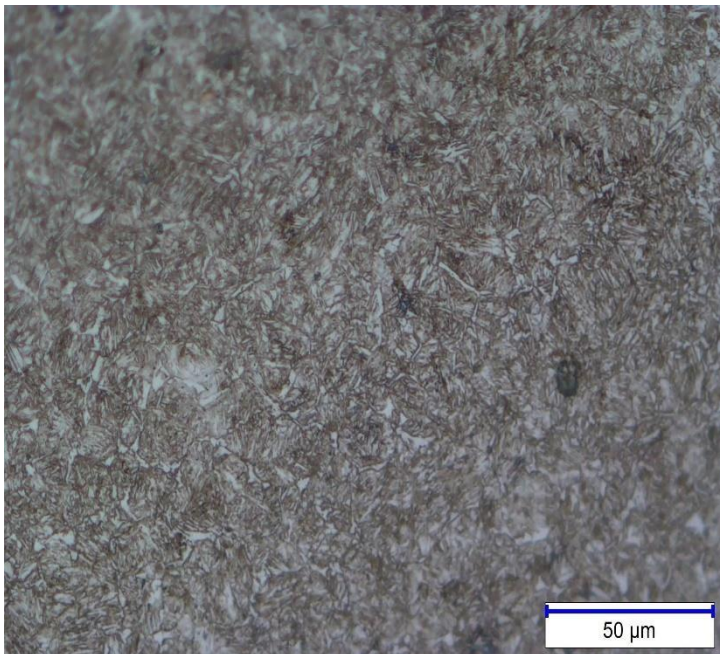
سپس قطعه ها توسط پولیشر پولیش شده اند و بعد از آن با محلول نایتال 2٪ اچ کردن انجام شده است و ریز ساختار آنها توسط میکروسکوپ الکترونی با بزرگ نمایی های مختلف مشاهده شد.



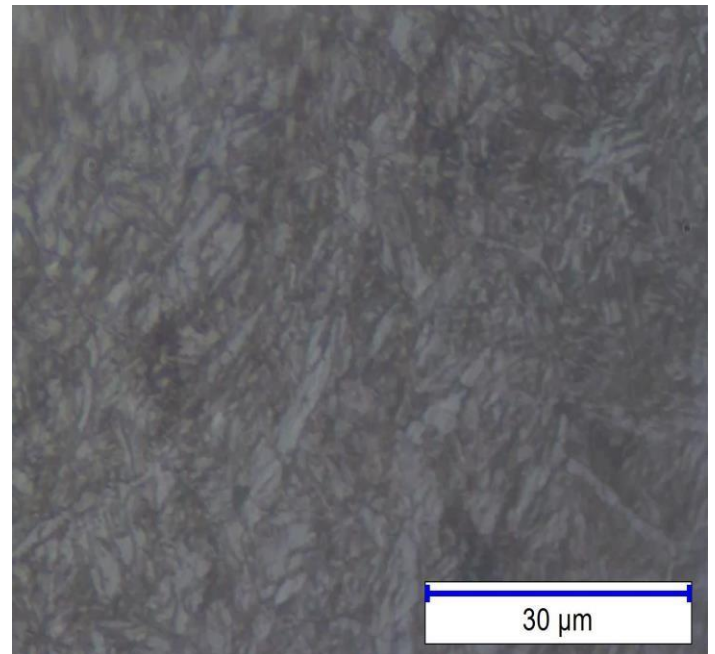
شکل 27: ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی 100X.



شکل 28: ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی 200X.



شکل 29: ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی 500x.



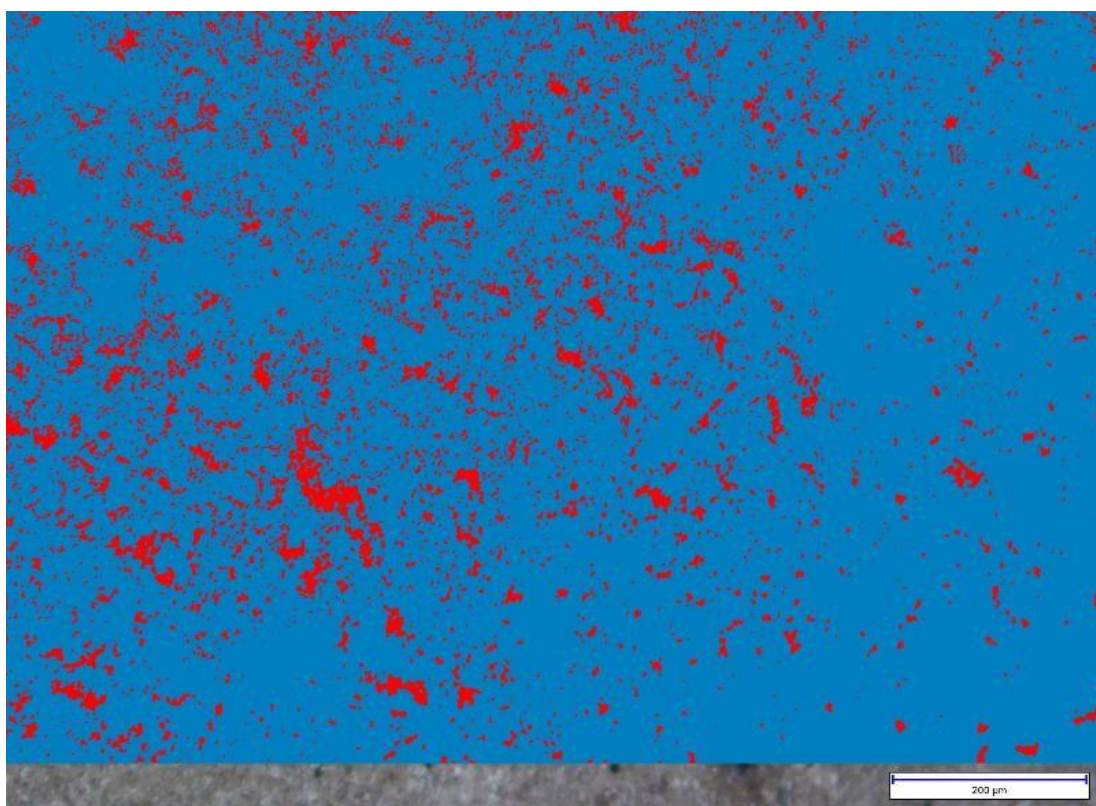
شکل 30: ریزساختار نمونه فنر بزرگنمایی 1000x.

2-1-12 نتایج آزمایش ریزساختار فنر ریل خط یک مترو مشهد

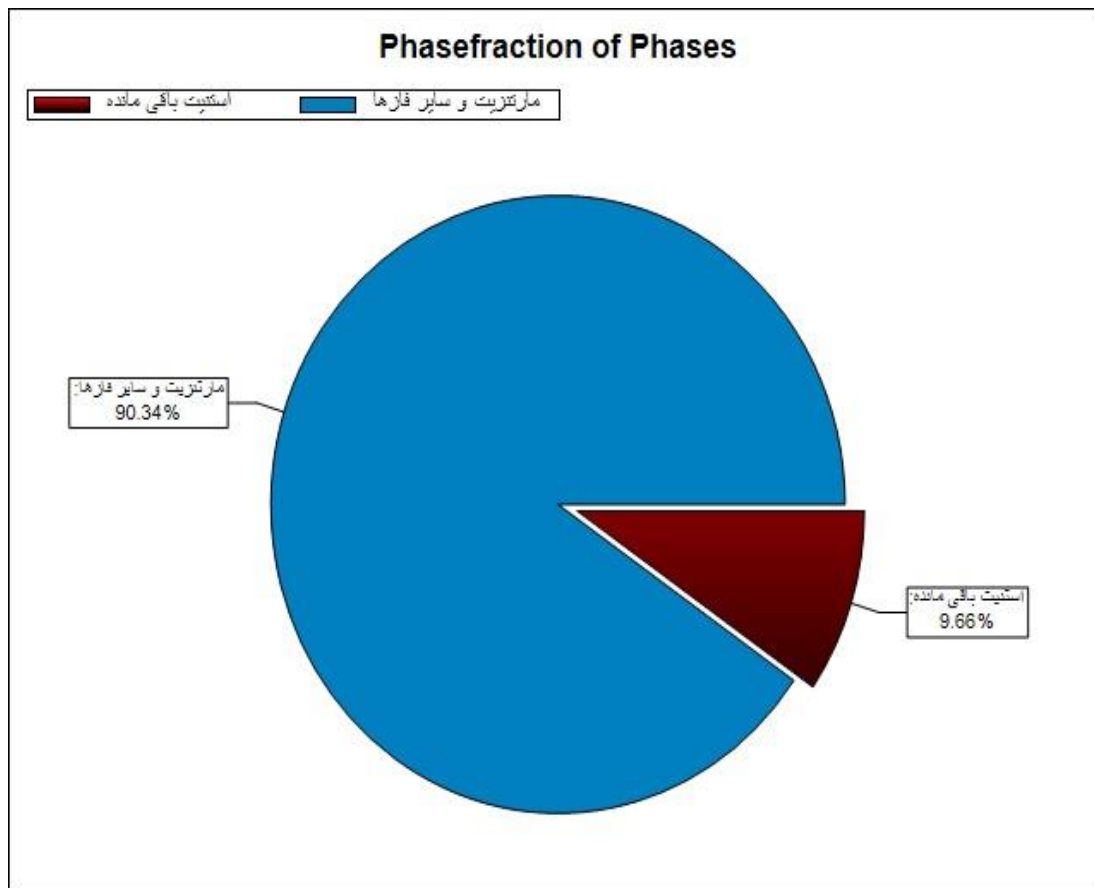
تصاویر متالوگرافی بدست آمده از طریق میکروسکوپ الکترونی نشان میدهد که فولاد کمک فنر از نوع مارتنزیتی است و این نمونه شامل مارتنزیت های سوزنی بهم پیچیده میباشد. همچنین فاز سفید در شکل مقدار کمی آستنیت باقی مانده را نشان میدهد که در حین سریع سرد کردن، استحاله نیافته است.

3-1-12 آستنیت باقی مانده

با استفاده از نرم افزار MIP و تصاویر متالوگرافی بدست آمده میتوان درصد آستنیت باقی مانده ساختار را تخمین زد.



شکل 31: تصویر بدست آمده با استفاده از نرم افزار MIP در بزرگنمایی X100.



شکل 32: درصد های بدست آمده توسط نرم افزار MIP.

4-1-12. سختی سنجی

با استفاده از دستگاه میکرو سختی، سختی نمونه در چند نقطه اندازه گیری شد و میانگین سختی بدست آمده است.

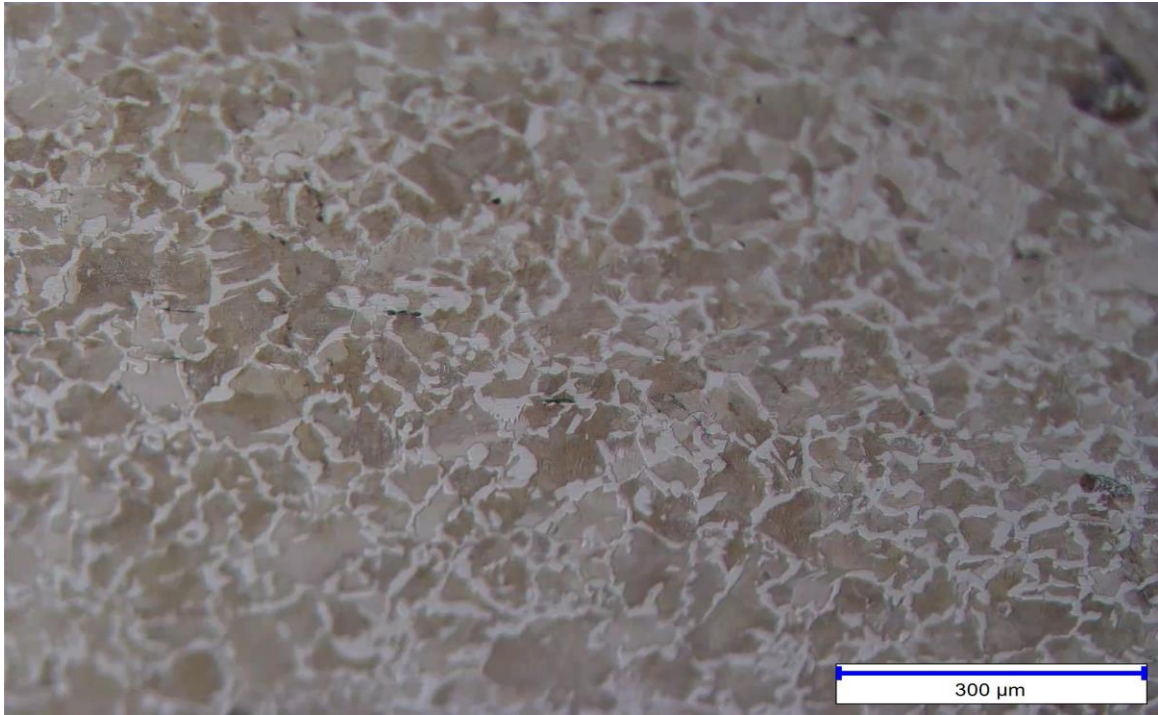
با توجه به مطالعات انجام شده سختی فنر باید مقداری بین 42 تا 46 راکول C باشد که سختی بدست آمده صحت این موضوع را تایید می کند.

سختی نقطه A: 410 ویکرز، سختی نقطه B: 400 ویکرز و سختی نقطه C: 422.5 ویکرز

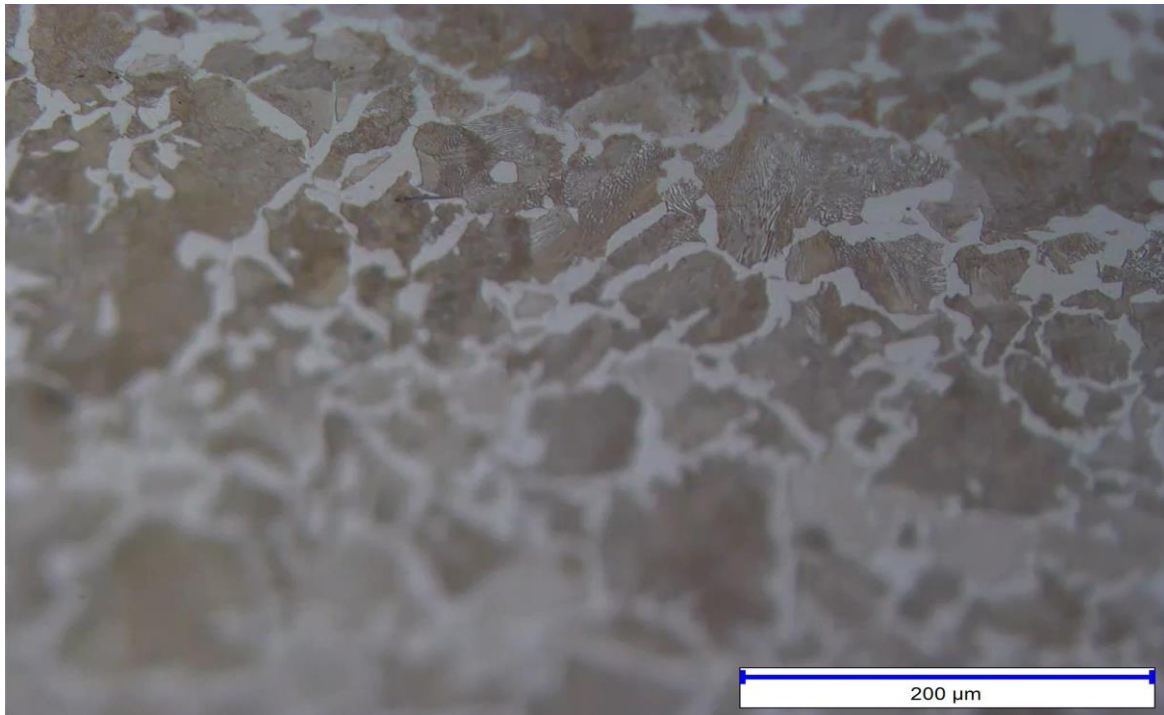
سختی میانگین: 410.83 ویکرز = 42.5 راکول C

2-12. بررسی ریزساختار نمونه تاج ریل خط یک مترو مشهد

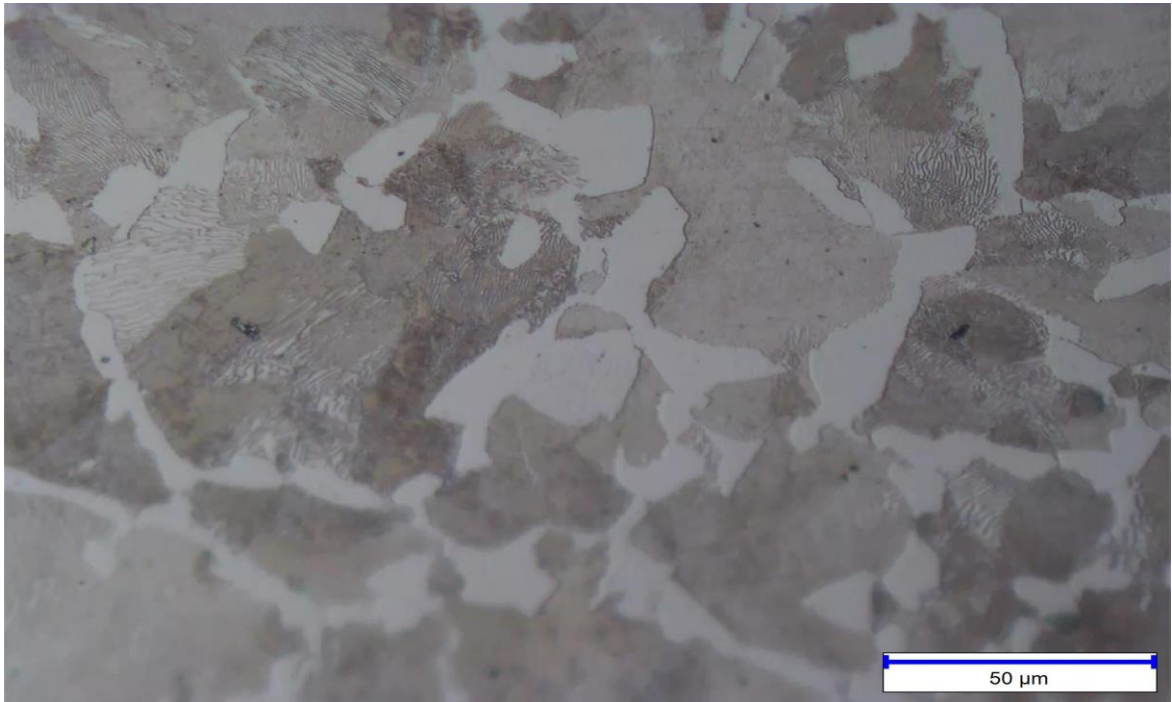
ریزساختار تاج ریل که توسط میکروسکوپ الکترونی گرفته شده است، در شکل های زیر مشاهده می شود.



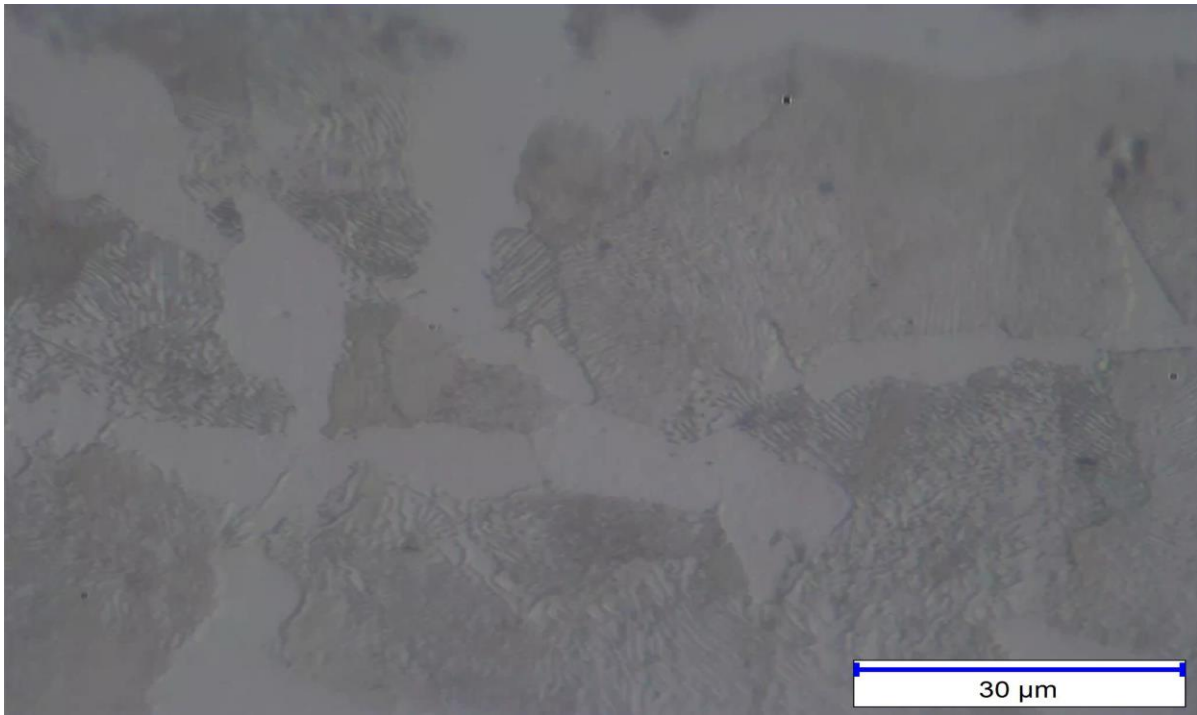
شکل 33: ریز ساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 100x.



شکل 34: ریز ساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 200x.



شکل 35: ریز ساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 500x.

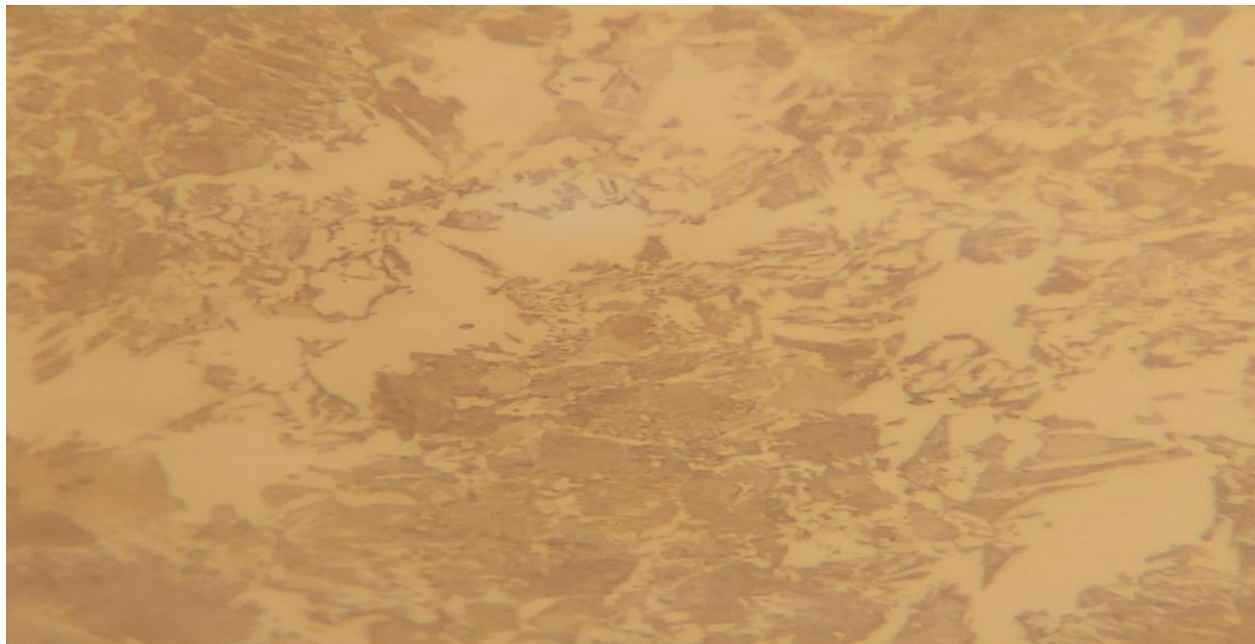


شکل 36: ریز ساختار نمونه تاج ریل بزرگنمایی 1000x.

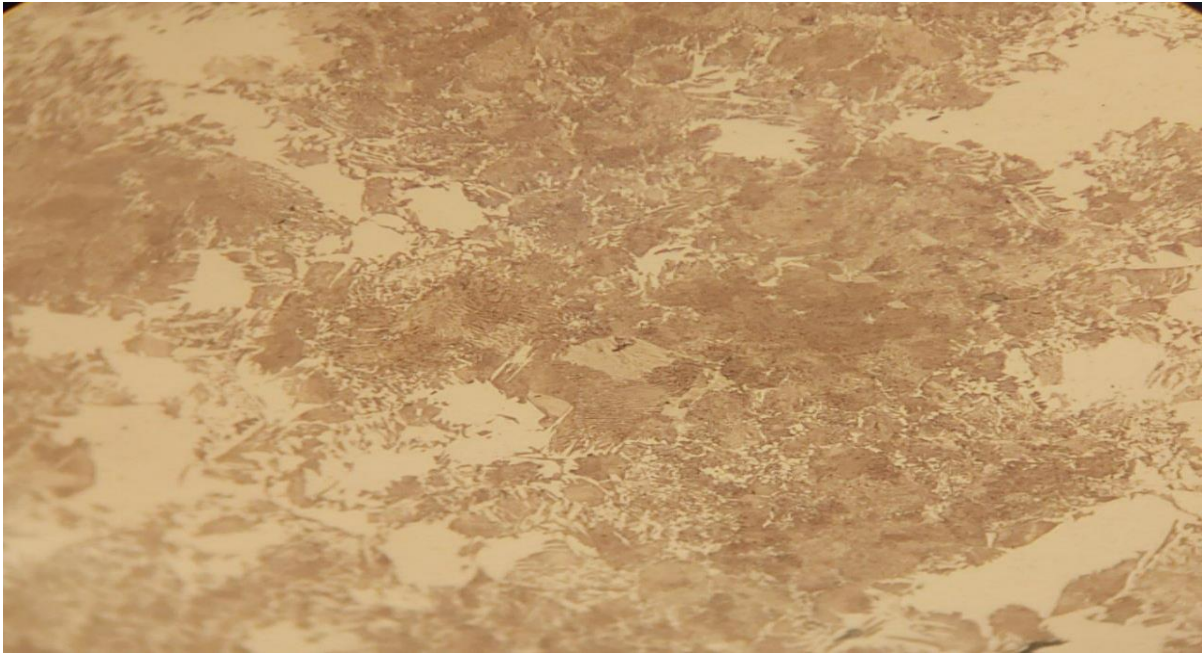
3-12. بررسی ریزساختار نمونه سر پیچ ریل در خط یک متروی مشهد



شکل 37: ریز ساختار نمونه سر پیچ ریل بزرگنمایی 200x.



شکل 38: ریز ساختار نمونه سر پیچ ریل بزرگنمایی 400x.



شکل 39: ریز ساختار نمونه سرپیچ ریل بزرگنمایی 800x.

13- نتایج و بحث بررسی و پیشنهادات

تحقیقات متمرکز بر خوردگی مسیرهای ریلی، از جمله شکل‌های خوردگی، فناوری‌های محافظت در برابر خوردگی و تشخیص، بررسی شده است. خوردگی عمومی مسئله مهمی در سطح بزرگ ریل نخواهد بود، اما خوردگی حفره‌ای در ریل خطر نازک شدن پایه ریل را دارد. حرکت رفت و برگشتی بین پایه ریل به صورت مکانیکی انجام می‌شود و به شروع و تداوم خوردگی شیاری کمک می‌کند، در حالی که این فقط به طور خلاصه توسط تعداد کمی از محققان بدون کار بیشتر ارائه شده است. ما پیشنهاد می‌کنیم که خوردگی شیاری تحت هر دو شرایط استاتیکی و میکرودینامیکی باید متمرکز شود، در غیر این صورت این مشکل خوردگی تهدیدی بالقوه برای طول عمر سرویس و بهره‌برداری ایمن از خطوط ریلی است.

علاوه بر این، خوردگی جریان سرگردان DC نیز مسئله مهمی برای خرابی مسیر ریلی، به ویژه برای پایه ریلی و میلگرد در بتون تونل مترو است. پوشش (graffiti) می‌تواند مقاومت در برابر خوردگی مسیر ریلی را به طور موثر افزایش دهد، اما در حال حاضر دارای یک نقطه ضعف از ویژگی‌های مکانیکی ضعیف، به ویژه برای فعل و انفعالات بین سطح ریل و چرخ‌هاست. فناوری‌های اصلاح سطح از جمله پاشش حرارتی و روکش لیزر، باید قادر به غلبه بر ضعف و به طور همزمان مقاومت در برابر خوردگی مناسب را حفظ کنند اما هنوز هزینه واقعی آن مشخص نیست.

یکی دیگر از موثر راه در حال توسعه فولاد ریل جدید است، اما ضرر اجتناب ناپذیر خواص مکانیکی با بهبود مقاومت در برابر خوردگی گاهی اوقات به مانعی برای کاربردهای عملی بیشتر تبدیل می شود. ما پیشنهاد می کنیم که اثر هم افزایی مقاومت در برابر خوردگی و خاصیت مکانیکی باید مورد تحقیق و تمرکز باشد، به جای تمرکز تنها بر روی خوردگی. توسعه در فناوری های تشخیص خوردگی به اندازه تحقیقات مربوط به خوردگی در مسیر ریلی، به ویژه در فن آوری های غیرمخرب و بدون تماس، مهم است. تشخیص اولتراسونیک و بازرسی مادون قرمز عملاً مورد استفاده قرار گرفته است، در حالی که بسیاری از فن آوری های پیشرفته تشخیص نقص مورد استفاده در سناریوهای دیگر نیز امیدوار کننده است. نتایج نشان داد که تحت شرایط بارگذاری پیچیده، الگوریتم رشد ترک ناشی از خستگی قادر به پیش بینی شکل واقعی ترک مشاهده شده از شکست می باشد. همچنین نتایج ارتعاشات غیر طبیعی شدید در فنرهای داخلی نشان می دهد که ناهنجاری تنش در درجه اول تقریباً در 55-70 هرتز متمرکز است. این دامنه بزرگ با سرعت تغییر نمی کند.

14- منابع

- [1] Chengtao Wang, Wei Li, Yuqiao Wang, Shaoyi Xu, and Mengbao Fan, " Stray Current Distributing Model in the Subway System: A review and outlook." *Int. J. Electrochem. Sci.*, 13 (2018) 1700 – 1727.
- [2] W. Li and X. Yan, *Int. J. Mining Sci. Technol.*, 11 (2001) 221.
- [3] J. B. Thomas and D. Z. Alan, *Stray current corrosion in electrified rail systems—Final report*, 1994.
- [4] Zhi, H., Li, H., and Zhang, H. (2019). Comparative analysis and research on railway rail standards at home and abroad. *Sci. Technol. Vision* 32: 1–6.
- [5] Hernandez, F., Demas, N., Davis, D., Polycarpou, A., and Maal, L. (2007). Mechanical properties and wear performance of premium rail steels. *Wear* 263.
- [6] Zhao, X., Fan, Y., Liu, Y., Wang, H., and Dong, P. (2015). Evaluation of fatigue fracture mechanism in a flash butt welding joint of a U75V type steel for railroad applications. *Eng. Fail. Anal.* 55: 26–38.
- [7] Safa, M., Sabet, A., Ghahremani, K., Haas, C., and Walbridge, S. (2015). Rail corrosion forensics using 3D imaging and finite element analysis. *Int. J. Rail. Transp.*

[8] Isozaki, H., Oosawa, J., Kawano, Y., Hirasawa, R., Kubota, S., and Konishi, S. (2016). Measures against electrolytic rail corrosion in Tokyo metro subway tunnels. In: Alpatov, S., Prentkovskis, O., Sterling, R.L., and Kaliampakos, D. (Eds.). 15th international scientific conference underground urbanisation as a prerequisite for sustainable development, Vol. 165. Elsevier Science Bv, Amsterdam.

[9] Panda, B., Balasubramaniam, R., and Dwivedi, G. (2008a). On the corrosion behaviour of novel high carbon rail steels in simulated cyclic wet-dry salt fog conditions. *Corrosion Sci.* 50.

[10] R D WHITE, A FINLAYSON, L M McCORMACK, P W HOOPER, " Electrical System Integration, Electromagnetic Compatibility (EMC) Interface Management of Railway Electrification Systems", *TRANSACTIONS • Volume 13 Number 1*.

[11] فاضل.س، نادری.ح، "اصول مهندسی راه آهن برقی"، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[12]

https://www.researchgate.net/profile/Alfredo_Nunez/publication/283781776/figure/fig1/AS:296755234131969@1447763369410/nsulated-rail-joint-and-its-components.png.

[13] Wang, H., Salemi, M., and Balaguru, R. (2017). Proceedings of ASME 2017: multifunctional coating system for rail track applications. Amer. Soc. Mechanical Engineers, New York.

[14] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2007). Rail base corrosion detection and prevention. The National Academies Press, Washington, DC.

[15] Hikaru, I. Junichirou ,O. Yousuke, K. Ryo, H. Souichi, K. Shinji, K. (2016). Measures against electrolytic rail corrosion in Tokyo metro subway tunnels. 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development”.

[16] Weichen Xu*, Binbin Zhang, Yu Deng, Zhengquan Wang, Quantong Jiang, Lihui Yang and Jie Zhang*. (2020). Corrosion of rail tracks and their protection. Article in *Corrosion Reviews*.

- [17] Wang, X., An, S., and Cao, Z. (2016a). Advances in corrosion resistance for heavy rail steel. *J. IMU. Sci. Technol.* 35: 205–208.
- [18] Radek, N., Pasieczynski, L., Makrenek, M., and Dudek, A. (2018). Mechanical properties of anti-graffiti coating systems used in the railway industry. In: Szczotok, A., Pietraszek, J., and Radek, N. (Eds.). *Terotechnology, 2017, Vol. 5. Materials Research Forum Llc, Millersville*, pp. 243–247.
- [19] Clare, A., Oyelola, O., Folkes, J., and Farayibi, P. (2012). Laser cladding for railway repair and preventative maintenance. *J. Laser Appl.* 24: 10.
- [20] Design of high-strength and damage-resistant carbide-free fine bainitic steels for railway crossing applications. *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.* 759: 210–223.
- [21] : Zhou, C., Chi, M., Wen, Z., Wu, X., Cai, W., Dai, L., Zhang, H., Qiu, W., He, X., Li, M., An investigation of abnormal vibration – induced coil spring failure in metro vehicles, *Engineering Failure Analysis* (2019).