



بررسی مکانیزم‌های احتمالی خوردگی در مجاری خنک‌سازی شتاب‌دهنده‌های الکترونی

مسعود عسگری^۱، مجید گل‌آبادی^۱، حمزه فراتی‌راد^{۲*}، محمد قاسم غلامی^۱، احسان صادقی^۱، رضا امرایی^۳، سید محمد موسوی^۲

۱. ارگان اصلی مولد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

۳. مجتمع پژوهشی ایران مرکزی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، کدپستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد - ایران

مقاله‌ی فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۶/۱۳

چکیده

شتاب‌دهنده الکترونی یزد با آب شهری در حال کار است. این تجهیز از فولاد کربنی (A37) ساخته شده است. این فولاد به‌عنوان یک فولاد کربنی معمول در شرایط غیر کنترل شده بسیار مستعد به تخریب خوردگی است. استفاده از آب شهری به‌عنوان خنک‌کننده منجر به خوردگی زیاد و در نتیجه انسداد مسیرهای چرخش آب شده است. آنالیزهای الگوی پراش پرتو ایکس و فلوتورسانس پرتو ایکس رسوبات جمع‌آوری شده از قسمت‌های مختلف شتاب‌دهنده نشان داد که بخش عمده رسوبات تشکیل شده از جنس اکسیدهای آهن است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رسوبات تشکیل شده الگوی تشکیل رسوب Tubulation را تأیید می‌کند. نتایج آنالیز طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی نشان می‌دهد که شیمی آب داخل تجهیز در مقایسه آب شهر یزد با گذشت زمان تغییراتی داشته است و سختی کل آب با گذشت زمان کاهش پیدا کرده است. بررسی کیفیت آب شهری با استفاده پارامتر لانگژیور انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده از پارامتر لانگژیور آب خروجی در سیستم خنک‌کننده دارای مقدار پایینی خوردگی است که با توجه به رنگ محصولات خوردگی تشکیل شده و شکل آن‌ها مکانیزم خوردگی از نوع Tubulation است.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده، خوردگی، الگوی پراش پرتو ایکس، Tubulation، پارامتر لانگژیور

The investigation of corrosion mechanisms in coolant circulation paths of electron accelerators

M. Asgari¹, M. Golabadi¹, H. Foratirad^{2*}, M.G. Gholami¹, E. Sadeghi¹, R. Amraee³, S.M. Mosavi³

1. Leading Material Organization, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

3. Central Iran Research Complex, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 89175-389, Yazd - Iran

Technical Paper

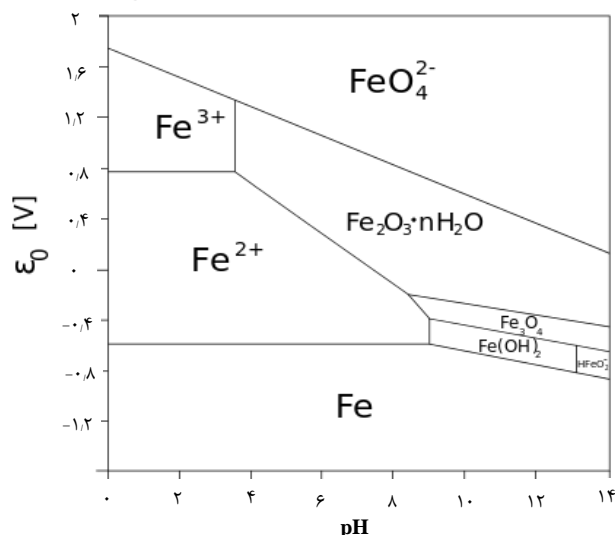
Received 2.7.2019, Accepted 4.9.2019

Abstract

The electron accelerator located at Yazd is working with tap water as cooling. This equipment is made of carbon steel (A37). This steel, as a typical carbon steel, is very susceptible to corrosion destruction in uncontrolled condition. Using tap water as a coolant, has led to high corrosion and thus blocked water circulation paths. XRD and XRF analysis of corrosion products from different parts of accelerator showed that a large quantity of these sediments is composed of Iron Oxide. SEM images indicated that the sediments have a Tubulation morphology. Also, the ICP-OES results showed that in comparison with Yazd tap water, the chemistry of the cooling water circulating in the accelerator has been changed, consequently its hardness decreased by passing time. The results obtained from the Langelier parameter showed that the water exiting from the end of the cooling system is a little corrosive. Due to the color and morphology of corrosion products, the corrosion mechanism is a Tubulation type.

Keywords: Accelerator, Corrosion, XRD, Tubulation, Langelier Index

*Email: hforatirad@aeoi.org.ir



شکل ۱. دیاگرام پوربه آهن [۴].

با توجه به این دیاگرام در مکان‌های کاتدی، واکنش مصرف شدن اکسیژن و تولید یون هیدروکسیل مطابق معادله ۱ انجام شده و در مکان‌های آندی نیز آهن مطابق معادله ۲ حل شده و کاتیون‌های آهن به الکترولیت تزریق می‌گردد. واکنش ۳ نشان‌دهنده‌ی مجموع واکنش‌های آندی و کاتدی بوده که منجر به تشکیل هیدروکسید آهن می‌گردد. با توجه به ناپایدار بودن هیدروکسید آهن در pH موردنظر، هیدروکسید آهن به اکسیدهای پایدار آهن تبدیل می‌شود.



علاوه بر این با توجه به سیکل کاری و جریان پیوسته آب شهری، فولاد ساده کربنی در معرض آب قرار می‌گیرد و اکسید آهن مگنتیت، بیش‌تر تشکیل می‌گردد [۴، ۶].

هدف از این پژوهش، شناسایی نوع و مکانیزم تشکیل رسوبات و محصولات خوردگی جهت تدوین برنامه تعمیر-نگهداری برای جلوگیری از وقوع مجدد رخداد‌های مشابه در این گونه تجهیزات است. ملاحظات فوق، بیان می‌کند که رسیدن به یک راهکار قطعی برای رفع مشکل تخریب در یک تجهیز خاص، نیازمند شناخت دقیق‌تر برخی متغیرهای فرایند (نظیر سرعت حرکت سیال) و بررسی کامل‌تر محل تخریب است.

۱. مقدمه

امروزه فن‌آوری شتاب‌دهنده‌های الکترونی دارای کاربردهای تحقیقاتی و صنعتی گسترده‌ای هستند. حوزه‌های استرلیزه کردن تجهیزات پزشکی و مواد غذایی، شبکه‌ای شدن^۱ پلیمرهای مورد استفاده در صنایع سیم و کابل، اصلاح خواص پلیمرها، تولید هیدروژل‌های پوشش‌دهنده زخم، تصفیه آب و فاضلاب شهری از جمله کاربردهای وسیع فن‌آوری شتاب‌دهنده‌های الکترونی است [۱، ۲]. مکانیزم کاری شتاب‌دهنده‌های الکترونی تجاری، مبتنی بر نشر و شتاب‌دهی باریکه‌های الکترونی است. در این نوع شتاب‌دهنده‌ها، باریکه الکترونی پس از انتشار از یک فیلامان داغ، تحت تأثیر یک میدان الکتریکی رادیوفرکانس^۲ قدرت بالا، به دفعات راستای قطر داخلی نیم‌کره (کوبیتی) شتاب‌دهنده را می‌پیماید و شتاب می‌گیرد تا انرژی مطلوب (یک تا چند مگاالکترون‌ولت) خود را کسب کند. نهایتاً پس از حصول انرژی مطلوب، باریکه الکترونی توسط اپتیک مغناطیسی به بیرون از شتاب‌دهنده هدایت می‌شود تا در کاربردهای دلخواه صنعتی، مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گیرد [۳]. تمام فرایندهای ذکر شده منجر به افزایش دمای تجهیز شتاب‌دهنده می‌شوند، لذا به‌منظور خنک‌سازی هسته‌های مگنتیک، الکتریک، جداره تجهیز و نیم‌کره شتاب‌دهنده از سیستم‌های بسته چرخش آب استفاده می‌شود. با توجه به جنس آلیاژ بدنه و سیستم چرخه آب خنک‌ساز، سرویس‌های تعمیرات-نگهداری این نوع تجهیزات می‌تواند متفاوت باشد [۳].

شتاب‌دهنده الکترونی مستقر در شهر یزد از جمله تجهیزات منحصربه‌فرد در داخل کشور است که به دلیل عدم وجود برنامه تعمیر-نگهداری مدون و استفاده از آب شهری بدون هیچ‌گونه عملیات شیمیایی، با خوردگی شدید در سیستم چرخه آب خنک‌کننده و نتیجتاً انسداد مجاری مواجه شده است.

به‌طور کلی خوردگی فولادهای ساده کربنی در محیط آبی، یکی از چالش‌های صنایع مختلف است که با توجه به شرایط مختلف، راهکارهای مختلفی در جهت رفع آن ارائه شده است. به‌منظور بررسی رفتار ترمودینامیک خوردگی فولاد در محیط آبی، از دیاگرام پوربه آهن شکل ۱ استفاده می‌شود [۴، ۵].

1. Cross Linking
2. Radio Frequency (RF)

۲. ارزیابی‌ها و آنالیزها

۱.۲ ارزیابی میدانی

به منظور بررسی میدانی و نمونه برداری بازدیدی از شتاب‌دهنده الکترونی واقع در مجتمع پژوهشی ایران مرکزی صورت پذیرفت. پس از بررسی نقشه‌های فنی مشخص شد، جنس فولاد استفاده شده در بدنه شتاب‌دهنده A۳۷ بوده که مطابق استاندارد ASME BPV Code ۲۰۱۵ Sec II ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ بیان شده است [۷].

منبع تغذیه آب خنک‌کننده شتاب‌دهنده مخزنی از جنس فولاد زنگ نزن حاوی ۳۵۰ لیتر آب شهری بوده که سختی آب در حال چرخش در این مخزن برابر با ۳۶۰ اندازه‌گیری شد. این مخزن شامل یک جداکننده^۱ آب ورودی و خروجی است. در قسمت تحتانی مخزن نیز شیر تویی با ابعاد حدود نیم اینچ برای تخلیه طراحی شده است. آب درون منبع توسط یک پمپ به درون لوله‌های خنک‌ساز که در اطراف مجاری^۲ شتاب‌دهنده در قسمت‌های بالا و پایین طراحی شده وارد می‌شود. آب خنک‌ساز پس از گردش در اطراف دستگاه با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد به سمت منبع آب باز می‌گردد که برای کاهش دمای آن، پیش از ورود به منبع، آب به درون یک چیلر هدایت می‌شود تا دمای آن تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد. به منظور آنالیز و استخراج مکانیزم خوردگی در شتاب‌دهنده نمونه برداری از آب درون منبع و رسوبات ته‌نشین شده کف مخزن و همچنین رسوبات درون مجاری خنک‌ساز پیرامون شتاب‌دهنده انجام گردید. برای بررسی میزان تخریب ناشی از خورده شدن تجهیز، کاهش ضخامت جداره خارجی (بخش در دسترس دستگاه) با استفاده از آزمون آلتراسونیک مجهز به دستگاه sonat test DV۰ با پراب نرمال ۵ مگاهرتز و قطر ۱۰ میلی‌متر در قسمت‌های مختلفی هم‌چون سقف دستگاه، مخروطی زیر دستگاه و ناودانی‌ها انجام گرفت.

۲.۲ آنالیزها

آنالیز فازی رسوبات با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس^۳ (مدل PHILIPS-PW۱۸۰۰) مجهز به لامپ تولیدکننده پرتوی Cu K α ، با ولتاژ شتاب‌دهنده ۴۰ kV و در محدوده ۲θ مابین ۱۰ تا ۹۰ درجه با نرخ روبش S^{-۱} ۰/۰۲ انجام شد. آنالیز عنصری نمونه‌های رسوب نیز با طیف‌نگاری فلورسانس پرتو ایکس^۴ (مدل PHILIPS-PW۱۴۱۰) انجام گردید. بررسی مورفولوژی ذرات نیز با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (مدل PHILIPS-XL۳۰) مجهز به آشکارساز پراش انرژی پرتو ایکس^۶ انجام شد. محلول‌های آبی پژوهش از طریق آزمون ICP با استفاده از دستگاه Perkin elmev مدل Optima ۷۳۰۰ DV مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳. نتایج و بحث

۱.۳ ارزیابی ساختاری و فازی رسوبات خوردگی

خوردگی فولادهای کربنی در محیط آبی در محدوده pH خنثی، وابسته به حضور اکسیژن محلول در آب است؛ بنابراین با افزایش اکسیژن محلول در آب، انتظار می‌رود شدت خوردگی و تشکیل رسوبات اکسیدی افزایش یابد [۴]. نتایج آنالیز XRF نمونه‌ای از پوسته‌های اکسیدی و رسوبات معلق ایجاد شده (به صورت ترکیبات اکسیدی) در جدول ۲ ارائه شده است. نتیجه آنالیز XRF نشان می‌دهد که غالب محصولات اکسیدی تشکیل شده چه به صورت چسبیده بر روی سطح بدنه شتاب‌دهنده (پوسته اکسیدی) و چه به صورت رسوبات معلق در آب خنک‌کننده عمدتاً اکسیدهای آهن است. با این وجود به نظر می‌رسد ترکیبات پایه سیلیکاتی و ترکیبات پایه کلسیتی بیش‌تر به صورت معلق در سیستم وجود دارد و کم‌تر در محصولات اکسیدی چسبیده به سطح فلز شرکت دارند. نتایج XRF نشان می‌دهد عمده محصولات خوردگی، اکسیدهای آهن است که با احتمال بسیار بالا منشأ آن خوردگی جداره داخلی شتاب‌دهنده است.

جدول ۲. نتایج آنالیز XRF

ترکیب	مقدار در پوسته اکسیدی	مقدار در رسوبات معلق	واحد
SiO _۲	۰/۵۹	۱/۲۹	w/w%
SO _۲	۰/۴۲	۰/۴۹	w/w%
CaO	۰/۱۴	۰/۴۶	w/w%
MnO	۰/۵۴	۰/۵۶	w/w%
Fe _۲ O _۳	۹۷/۴۵	۹۶/۶۷	w/w%

جدول ۱. محدوده ترکیب شیمیایی فولاد A۳۷ مورد استفاده در بدنه شتاب‌دهنده [۷]

عناصر	کربن	منگنز	فسفر	گوگرد	سیلیسیم	آهن
درصد	۰/۲۶	۰/۵۵-۱/۳	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۱۳-۰/۴۵	باقی‌مانده
وزنی	حداکثر					

3. X-Ray Diffraction (XRD)

4. X-Ray Fluorescence (XRF)

5. Scanning Electron Microscope (SEM)

6. Energy-Dispersive Spectroscopy (EDS)

1. Divider

2. Cavity

اکسیدی تشکیل شده در این حالت از الگوی خاصی و مشابه با تحقیقات صورت گرفته پیروی می‌کند که اصطلاحاً به آن Tuberculation یا Tubulation می‌گویند [۸، ۹]. محصولات اکسیدی آهن، حجیم و چسبنده بوده و به صورت برآمدگی‌هایی، تدریجاً تمام سطح فولاد را می‌پوشاند. پدیده مهم تخریبی که اکنون در شتاب‌دهنده الکترونی یزد، سبب تخریب لوله‌های فولادی خنک‌کننده شده است خوردگی موضعی Tuberculation است.

الگوی آرایه شده توسط محققان در ارتباط با مکانیزم Tuberculation، ایجاد شرایط اسیدی در زیر محصولات خوردگی با انجام واکنش‌های آندی، مهاجرت و تغلیظ یون‌های آهن، کلر و سولفات و وقوع واکنش‌های خود تسریع شونده به وضوح بیان می‌کند که خوردگی فولادهای کربنی در این مناطق را به صورت موضعی شدت می‌دهد [۸، ۱۰]. تحت این شرایط خوردگی، تخریب و نازک شدن زیرلایه فولادی می‌تواند بالغ بر ۰/۵ تا ۳ میلی‌متر بر سال باشد. لذا به صورت مداوم در عین این که حجم این محصولات اکسیدی افزوده‌تر شده و متراکم‌تر می‌گردد؛ زیرلایه فولادی از درون دچار نازک شدن و کاهش استحکام می‌گردد [۱۱]. برای بررسی دقیق‌تر تأثیر آب شهری بر میزان خوردگی از پارامتر لانگزیر به‌عنوان شاخص خوردگی محلول و آزمون‌های آلتراسونیک برای بررسی کاهش میزان ضخامت استفاده شد.

جدول ۳. فهرست فازهای شناسایی شده از نمونه‌های جمع‌آوری شده از شتاب‌دهنده

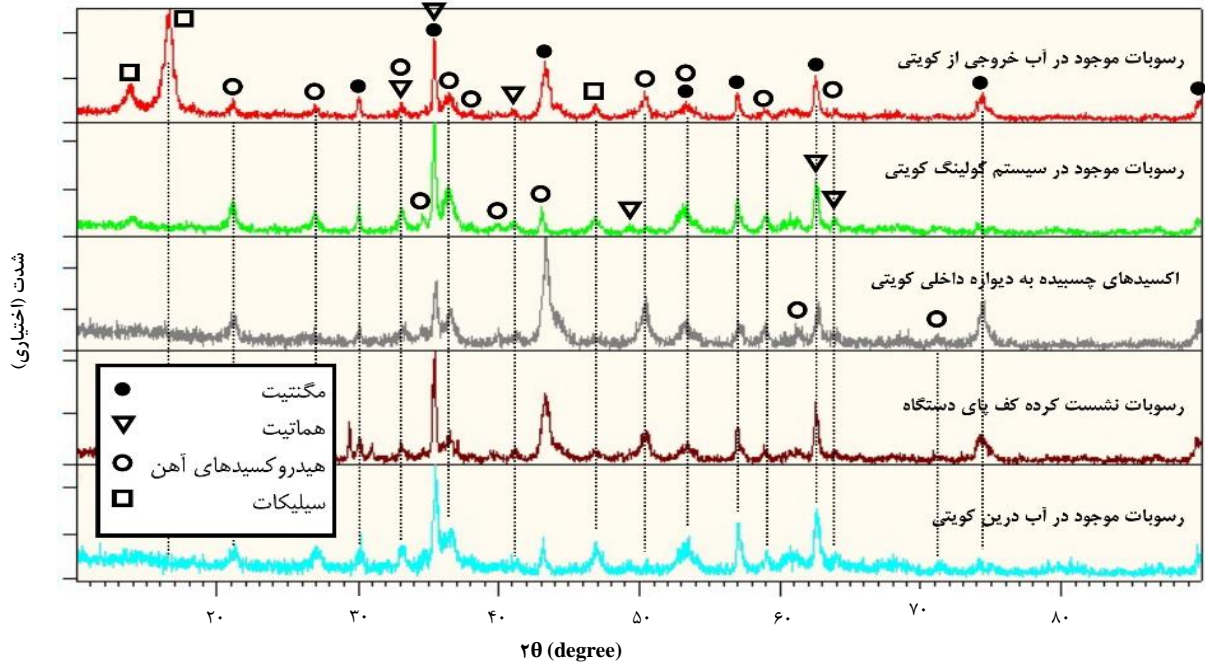
فرمول شیمیایی	مقیاس	نام ترکیب	امتیاز	شماره مرجع
Fe ₂₄ O ₇	۰/۶۳۲	مگنتیت	۵۹	۹۶-۹۰۰-۰۹۲۷
Fe ₂ O ₈	۰/۱۹۴	گوتیت	۲۷	۹۶-۹۰۰-۳۰۷۷
Si ₈ O ₁₆	۰/۱۳۹	۹۰۰۶۲۸۹	۱۵	۹۶-۹۰۰-۶۲۹۰
Mn ₂ O ₈	۰/۲۶۲	Groutite	۹	۹۶-۹۰۱-۱۵۴۷
Fe ₂ O ₈ H ₂	۰/۲۰۷	گوتیت	۲۵	۹۶-۱۰۰-۸۷۶۷
Ca ₂ O ₄	۰/۲۰۳	آهک	۱۳	۹۶-۹۰۰-۶۷۱۰
Fe ₂ O ₄ H ₂	۰/۱۰۶	هیدروکسید آهن	۶	۹۶-۱۰۰-۹۰۷۴
Fe ₂ O ₇	۰/۱۸۷	اکسید آهن	۱۳	۰۰-۰۲۳-۰۶۶۴

نتایج XRD نمونه رسوبات جمع‌آوری شده از قسمت‌های مختلف شتاب‌دهنده در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طوری که الگوهای پراش پرتو ایکس نمونه‌ها نشان می‌دهد فاز غالب در نمونه‌ها، فازهای اکسیدی آهن مگنتیت (Fe₂O₃) و هماتیت (Fe₂O₃) است. همچنین بررسی الگوهای XRD، به میزان کم‌تر، حضور ساختارهای هیدروکسید آهن نظیر FeOOH و همچنین ترکیباتی نظیر اکسید کلسیم CaO را نشان داد. در برخی نمونه‌ها در زاویه ۲θ حدود ۱۴ و ۱۶ درجه، پیک تیزی مشاهده شد که ممکن است مربوط به ترکیبات پایه سیلیکاتی باشد. فهرست فازهای شناسایی شده در جدول ۳ آرایه شده است.

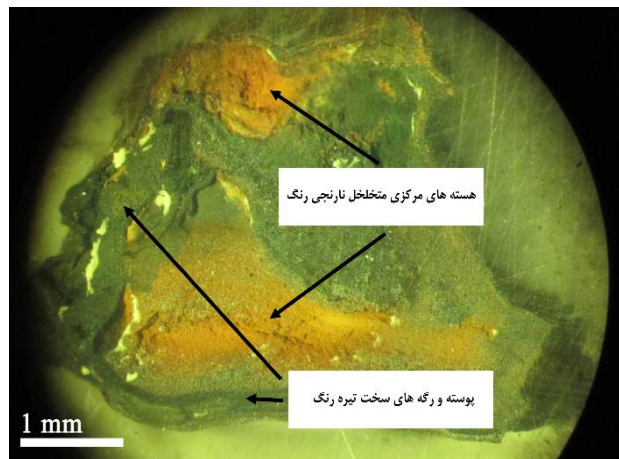
به منظور بررسی ساختار و مورفولوژی رسوبات تشکیل شده در فرایند خوردگی ارزیابی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ‌های نوری و روبشی انجام پذیرفت. شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری از سطح رسوبات را نشان می‌دهد. همان‌طوری که در این تصویر دیده می‌شود رسوبات دارای ساختاری حجیم، متراکم و لایه‌ای بوده و در مجموع متشکل از یک پوسته سخت و تیره خارجی، هسته متخلخل و روشن داخلی و لایه سطحی ضعیف در بخش بیرونی است. با توجه به تحقیقات مختلف انجام شده این الگوی ثابت برای محصولات خوردگی تشکیل شده بر روی زیرلایه‌های فولادی مشاهده شده است.

به‌منظور بررسی دقیق‌تر فازهای تشکیل شده در رسوبات تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگ‌نمایی بالاتر نیز تهیه گردید. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت الکترون برگشتی برای رسوبات تشکیل شده در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به تفاوت جرم اکسیدهای آهن (مگنتیت و هماتیت) با هیدروکسیدهای آهن آنالیز الکترون برگشتی در تصاویر تفاوت را نشان خواهد داد؛ بنابراین پوسته سخت و تیره خارجی عمدتاً فاز مگنتیت و هسته متخلخل و روشن داخلی عمدتاً هیدروکسید آهن و لایه سطحی ضعیف در بخش بیرونی ترکیبی متشکل از هیدروکسیدهای آهن و ترکیبات پایه سیلیکاتی و کلسیتی است.

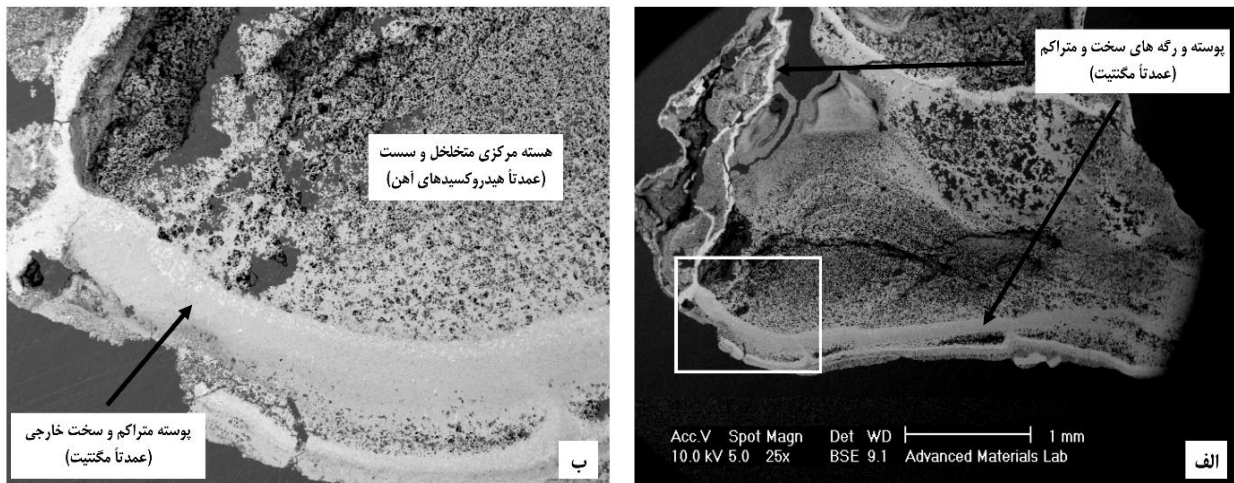
با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققان و نتایج به دست آمده در شکل‌های ۳ و ۴، مورفولوژی و حجم رسوبات



شکل ۲. نتایج XRD از نمونه‌های جمع‌آوری شده از شتاب‌دهنده.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری رسوبات خوردگی.



شکل ۴. (الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رسوبات و (ب) تصویر مربع مشخص شده در تصویر (الف) در بزرگ‌نمایی‌های بالاتر.

دیگر از پدیده‌هایی که منجر به تسریع خوردگی در شتاب‌دهنده یزد گردیده است، فعل‌وانفعالات تابش با آب خنک‌کننده و در نتیجه امکان هیدرولیز و رادیولیز آب و تشکیل برخی گونه‌ها در آب مطابق جدول ۴ است. یکی از محصولات این فعل‌وانفعالات؛ تولید آب‌اکسیژنه است. جدول ۴ به‌طور خلاصه فعل‌وانفعالات ناشی از تابش شتاب‌دهنده با آب خنک‌کننده را فهرست کرده است [۱، ۱۴].

۲.۴ آنالیز شیمی آب شهر و آب سیستم خنک‌کننده

آنالیز شیمی آب شهر و آب خنک‌کننده سیستم از طریق آزمون طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی^۲ انجام و نتایج آن در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شیمی آب شهر، هنگامی که وارد سیستم خنک‌کننده می‌شود، تدریجاً در یک بازه زمانی طولانی مدت تغییر می‌کند به گونه‌ای که منجر به تغییر قابل‌توجه TDS و سختی کل می‌شود. در حالی که TDS و سختی کل آب شهر یزد به ترتیب مقادیر حدودی ۱۱۴۰ و ۲۶۷ است، اما با گذشت زمان و چرخش آن در سیستم خنک‌کننده به تدریج مقادیر آن افت می‌کند و به ترتیب به حدود ۴۰۰ و ۳۴ می‌رسد. این مسئله می‌تواند حاکی از آن باشد که برخی از یون‌های محلول همانند کلسیم و منیزیم با افزایش نسبی pH در داخل سیستم خنک‌کننده رسوب‌گذاری کرده‌اند، لذا به همراه افزایش نسبی pH، مقادیر کمی TDS، سختی کل، منیزیم و کلسیم کاهش پیدا کرده است. این نتیجه‌گیری با نتایج XRD رسوبات نیز در تطابق است که نشان از حضور پیک‌های فاز اکسید کلسیم (CaO) در ساختار رسوبات دارد.

از سوی دیگر نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر کمی سدیم و کلر تدریجاً در طول مدت زمان در آب خنک‌کننده سیستم تغلیظ شده است. این مسئله نشان می‌دهد که در طول یک بازه زمانی طولانی مدت، با تبخیر آب خنک‌کننده و یا نشتی‌های احتمالی و در نتیجه آب‌های جبرانی اضافه‌شده از آب شهر، به‌طور مداوم نمک محلول وارد سیستم خنک‌کننده شده و از آن‌جا که به دلیل حلالیت بالای نمک طعام (یون‌های سدیم و کلر) رسوب‌گذاری برخلاف نمک‌های پایه کلسیتی به‌سرعت انجام نمی‌گیرد، غلظت یون‌های سدیم و کلر افزایش می‌یابد.

در صورتی که محصولات اکسیدی فوق در داخل لوله‌های فولاد کربنی سیستم‌های خنک‌کننده تشکیل شوند، می‌توانند منجر به کاهش کیفیت آب خروجی از لوله، افت فشار، دبی آب و در شرایط وخیم‌تر انسداد مجاری آب شوند [۱۲]. شرایط قلبیابی، حضور ترکیبات بی‌کربناتی، سولفات، کلراید و دیگر آنیون‌ها تشکیل محصولات اکسیدی را تشدید می‌کند. در زیر محصولات اکسیدی، در مجاورت سطح داخلی لوله فولادی، تدریجاً محیط خورنده و اسیدی ایجاد شده منجر به خوردگی موضعی و حفره‌ای فولاد می‌شود و در نهایت کاهش ضخامت دیواره لوله‌های فولادی را در پی خواهد داشت [۱۰]. مراجع گزارش داده‌اند که حضور میکروارگانیزم‌ها (نظیر باکتری‌های احیاکننده سولفات—SRB) نیز در تشکیل این نوع محصولات اکسیدی سهم دارند. آب‌های سطحی فیلتر نشده بسیار مستعد به رشد بایوفیلم‌ها هستند [۱۳]. خوردگی لوله‌های آهنی در شتاب‌دهنده یزد تأثیر مستقیمی بر تشکیل و رشد بایوفیلم‌ها دارد. در مرحله اول؛ محصولات خوردگی با کلرواکتانش داده و میزان کلر را به‌عنوان یک گندزدا در مجاورت سطح فلز کاهش می‌دهد. در مرحله دوم آهن محلول، رشد باکتری‌های احیاکننده آهن و متعاقباً Tuberculation را تشویق می‌کند و در مرحله سوم، Tuberculation محیط مناسبی را برای حفره‌دار شدن و هم‌چنین ایجاد و چسبیدن بایوفیلم‌ها فراهم می‌کند.

اکسیژن محلول (DO) بیش‌تر از ۲۰ ppb حتی در آب مقطر منجر به رسوب‌گذاری محصولات اکسیدی در تجهیزات فولادی می‌شود. فیلتراسیون ذرات بزرگ‌تر از ۰/۵ میکرومتر می‌تواند شدت رسوب‌گذاری را کم‌تر کند. در سیستم‌های خنک‌کننده، اگر از پالاینده‌های اکسیژن^۱ استفاده نشود، به دلیل باز بودن محفظه تانک نگه‌داری آب و تماس با اتمسفر هوا، میزان اکسیژن بسیار بالا می‌رود و تا حدود ۴۰۰۰ ppb افزایش می‌یابد. با افزایش اکسیژن محلول، خوردگی تجهیزات فولادی و ترسیب محصولات اکسید آهن (در شتاب‌دهنده‌های فولادی) تسریع می‌شود. محصولات اکسیدی به‌صورت ترجیحی بر روی مناطق و سطوح داغ‌تر رسوب می‌کند. مناطقی با الگوی جریان غیرمنظم و نرخ جریان کم‌تر از ۱ m/s نیز مکان‌های مرجحی برای ترسیب محصولات اکسیدی فراهم می‌آورند. ترسیب محصولات اکسیدی هدایت الکتریکی را کم و با محدود کردن دبی آب خنک‌ساز، نهایتاً منجر به انسداد می‌گردد. یکی

2. Inductively Coupled Plasma (ICP)

1. Oxygen Scavenger

جدول ۴. واکنش‌های رادیولیز و هیدرولیز آب در شتاب‌دهنده‌ها [۱]

واکنش	انرژی اکتیواسیون (J/mol)	نرخ واکنش (s) ^{-۱}
$e^- + H_2O = H + OH^-$	$1,26 \times 10^4$	$2,4 \times 10^{10}$
$e^- + OH = OH^-$	$1,26 \times 10^4$	3×10^{10}
$H + H = H_2$	$1,26 \times 10^4$	1×10^{10}
$e^- + HO_2 = HO_2^-$	$1,26 \times 10^4$	2×10^{10}
$OH + OH = H_2O_2$	$1,26 \times 10^4$	$4,5 \times 10^9$
$H + OH = H_2O$	$1,26 \times 10^4$	$2,4 \times 10^{10}$
$H + O_2 = HO_2$	$1,26 \times 10^4$	1×10^9
$OH^- + H_2O_2 = HO_2^- + H_2O$	$1,89 \times 10^4$	1×10^8
$OH_2 = O_2^- + H^+$	$1,26 \times 10^4$	8×10^5

جدول ۵. آنالیز شیمی آب شهر و آب خنک‌کننده سیستم

پارامتر	آب شهر	آب خنک‌کننده سیستم	واحد
pH	۶	۷	-
TDS	۱۱۴۰	۴۰۰	ppm
سختی کل	۲۶۷	۳۴	ppm
منیزیم	۴۳	۶	ppm
کلسیم	۳۶	۴	ppm
سولفات	۱۳۷	۵۰	ppm
سدیم	۷۸	۲۰۴	ppm
کلر	۷۸	۱۷۷	ppm

گرم برآورد می‌شود، لذا می‌توان این نتیجه را گرفت که عمده رسوبات داخل دستگاه منشأ غیر از ناخالصی‌های آب (منیزیم، کلسیم و سولفات) داشته باشد. لازم به یادآوری است که نتایج XRD فقط به صورت خیلی محدود و جزئی نشان از حضور برخی ترکیبات پایه کلسیتی و سیلیکاتی داده بود.

۳.۳ نتایج بازرسی‌های آزمون امواج فرا صوت^۱

پدیده خوردگی در صفحات و لوله‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی شامل واکنش‌های الکتروشیمیایی در مناطق آندی (آزاد شدن کاتیون‌های آهن) و کاتدی (احیای اکسیژن و آزاد شدن یون هیدروکسید) است. با توجه به تحقیقات انجام‌شده، خوردگی یکنواخت ناشی از انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی در مکان‌های آندی و کاتدی منجر به کاهش ضخامت سطح زیرلایه می‌گردد. بازرسی‌های UT انجام‌شده برای تعیین ضخامت لوله‌ها از شتاب‌دهنده موجود در مجتمع پژوهشی ایران مرکزی واقع در یزد، هیچ‌گونه تغییر ضخامت در مناطق بحرانی و در دسترس نشان نداده است که علت این موضوع احتمالاً بنا به دلایل ذکر شده در زیر است:

۱. با توجه به بسته بودن مدار گردش سیال و عدم امکان باز کردن تجهیز، امکان بازرسی از بعضی از مناطق با بیش‌ترین میزان نرخ خوردگی پیش‌بینی شده (با توجه به باز کردن کامل تجهیز در دوره‌های بازرسی قبلی و عدم اندازه‌گیری کاهش ضخامت و مشاهدات موجود مبنی بر رخداد خوردگی شدید در صفحات ورودی، این فرضیه مهم‌ترین علت برای تشریح حادثه‌ترین شرایط خوردگی در این قسمت از شتاب‌دهنده است) شبیه صفحات ورودی آب به شتاب‌دهنده و جداکننده‌های آن وجود نداشت. به نظر می‌رسد بیش‌ترین سرعت خوردگی مربوط به همان صفحات ورودی آب و جداکننده‌ها باشد که به دلیل قرارگیری در داخل مجاری امکان UT آن وجود ندارد.

۲. طبق تصویر موجود در شکل ۵ از سطح مقطع برش داده شده در ناودانی شتاب‌دهنده، می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس نواحی نشان داده شده در شکل، رسوبات و یا محصولات اکسیدی، از گوشت زیرلایه نبوده و به‌وسیله پیوندهای فیزیکی با سطح اتصال برقرار کرده‌اند؛ منظور از

با فرض این‌که رسوبات ایجاد شده در داخل مجاری خنک‌ساز منشأ از خود آب یزد داشته باشند می‌توان تخمینی از حجم رسوبات را برآورد کرد. با توجه به کاهش غلظت منیزیم، کلسیم و سولفات در آب خنک‌کننده سیستم، میزان کاهش غلظت آن‌ها در هر لیتر به ترتیب برابر ۳۷٫۲، ۳۲ و ۸۶٫۸۸ میلی‌گرم برآورد شد که همین میزان احتمالاً در تشکیل رسوبات دخالت مستقیم دارد. از آن‌جا که کل حجم آب در گردش در سیستم خنک‌کننده حدود ۵۰۰ لیتر است، میزان رسوبات حاصل از ۵۰۰ لیتر آب، با در نظر گرفتن ترکیبات MgO ، CaO و $FeSO_4$ به ترتیب برابر ۲۲٫۴ و ۶۸٫۷ گرم است. لذا در مجموع رسوبات حاصل حدود ۱۲۰ گرم وزن دارد. این میزان حجم رسوبات نسبت به گزارش‌های ثبت شده از رسوبات جمع‌آوری‌شده از داخل کویته دستگاه همخوانی ندارد، به‌بیان‌دیگر، رسوبات داخل دستگاه بسیار بیش‌تر از چند صد

1. Ultrasonic Test (UT)

۳. به‌منظور تعیین کیفیت آب از نظر پایداری، شاخص‌های مختلفی پیشنهاد شده که یکی از پرکاربردترین آن‌ها شاخص لانگژیر است [۱۶]. اگر مقدار این شاخص منفی باشد، آب یا سیال خورنده تلقی می‌شود و مقادیر مثبت مبین خاصیت رسوب‌گذاری بوده و چنان‌چه صفر باشد آب پایدار محسوب می‌شود.

$$LSI = pH - pH_s \quad (۴)$$

$$pH_s = (۹.۳ + A + B) - (C + D) \quad (۵)$$

در فرمول فوق A ، B ، C و D به ترتیب ضرایب مربوط به TDS برحسب میلی‌گرم در لیتر، درجه حرارت برحسب درجه سانتی‌گراد، سختی کلسیم برحسب میلی‌گرم در لیتر کربنات کلسیم و بازیسیته کل برحسب میلی‌گرم است. با توجه به اندازه‌گیری پارامتر لانگژیر (۱.۵ -) در این سیال و مکانیزم خوردگی ارایه شده توسط محققین می‌توان به این نکته اشاره کرد که سیال در حال حرکت ماهیتی خورنده دارد و سطوح دنداندار (حفره‌دار شده — pitlike depressions) بر روی سطح زیرلایه تشکیل می‌گردد؛ اما اندازه‌گیری ضخامت با استفاده از دستگاه UT فقط تغییرات ضخامت ناشی از کاهش جرم و خوردگی یکنواخت را نشان می‌دهد درحالی‌که بر اساس مکانیزم‌های ارایه شده سطح زیرلایه در دسترس دچار خوردگی موضعی شده است.

در تحقیقات انجام شده در سالیان اخیر، برای حل رسوبات تشکیل شده بر روی زیرلایه‌های فولادی راه‌حل‌های مختلفی ارایه شده است. در بین روش‌های مورد استفاده، شست‌وشوی رسوبات به‌وسیله اسیدشویی با کم‌ترین تخریب به تجهیز مورد نظر از طریق به‌کارگیری بازدارنده مناسب و محلول اسیدشویی ایده‌آل، بهترین راه‌حل بوده است. برای افزایش طول عمر تجهیز بعد از بین بردن رسوبات، استفاده از شیمی مناسب سیال به‌منظور تعمیر و نگهداری تجهیز با توجه به مطالعات انجام شده پیشنهاد می‌گردد.

۴. نتیجه‌گیری

آنالیزهای الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و فلورئوسانس پرتو ایکس (XRF) رسوبات جمع‌آوری شده از قسمت‌های مختلف شتاب‌دهنده نشان داد که بخش عمده رسوبات تشکیل شده از جنس اکسید آهن (مگنتیت و هماتیت) هستند. مقایسه آب

پیوند فیزیکی برقراری اتصال بین رسوبات خوردگی و زیرلایه فولادی با استفاده از قفل مکانیکی است. به بیان دیگر رسوبات تشکیل شده با جریان سیال به مناطق خاص مثل ناودانی‌ها انتقال پیدا کرده و پس از انباشته شدن رسوبات، دیگر امکان حرکت ندارند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که اکسیدهای آهن موجود در این منطقه از مناطقی دیگر کنده شده و به این محل‌ها انتقال پیدا کرده و تجمع کرده‌اند. علاوه بر این، تحقیقات انجام شده در زمینه بررسی اثر پارامترهای محیطی (شبه دما، سرعت سیال، میزان اکسیژن حل‌شده، pH و غیره) بر خوردگی لوله‌های فولاد ساده کربنی نشان می‌دهد که مکان‌هایی شبیه مواضع زانویی ناودانی‌ها، مستعد تشکیل اکسید از همان سطح مقطع نبوده و به‌وسیله سیال تحت گردش به این مناطق حمل و با گذشت زمان با توجه به سرعت سیال در این مناطق انباشته می‌شود و پیوند فیزیکی با سطح تشکیل می‌دهند [۳، ۸]. در ضمن ذکر این نکته ضروری است که با گذشت زمان، اکسیدهای تشکیل شده در مواضع زانویی به علت افزایش حجم و متراکم شدن به‌عنوان لایه محافظتی از سطح عمل کرده و جریان خروجی سیال خنک‌کننده را با کندی مواجه می‌کند که ادامه این روند منجر به از کار افتادن دستگاه می‌گردد [۱۵].



شکل ۵. سطح مقطع برش داده شده در زانویی شتاب‌دهنده به همراه محصولات خوردگی موجود.

مراجع

1. R. Lillard, D. Pile, D. Butt, *The corrosion of materials in water irradiated by 800 MeV protons*, [Journal of nuclear materials](#), **278**, 277-289 (2000).
2. C. White, *Laser and electron beam processing of materials*, Elsevier (2012).
3. T.E. Larson, R. Skold, *Current research on corrosion and tuberculation of cast iron*, [Journal \(American Water Works Association\)](#), **50**, 1429-1432 (1958).
4. L. Shreir, *1.05-Basic Concepts of Corrosion*, [Shreir's Corrosion. Oxford: Elsevier](#), DOI, 89-100 (2010).
5. D. Landolt, *Corrosion and surface chemistry of metals*, EPFL Press, (2007).
6. D. Parham, C. Tod, *Condensed Phosphates in the Treatment of Corrosive Waters*, [Chemistry & Industry](#), DOI, 628-631 (1953).
7. A. Boiler, P.V. Committee, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 2. Alternative Rules*, [American Society of Mechanical Engineers](#) (1980).
8. E.W. Barbee, *Tuberculation Measurement as an Index of Corrosion and Corrosion Control*, [Journal \(American Water Works Association\)](#), **39**, 220-230 (1947).
9. M. White, R. Dortwegt, S. Pasky, *Improved temperature regulation and corrosion protection of APS linac RF components*, [Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference](#) (Cat. No. 99CH36366), IEEE, 1414-1416 (1999).
10. D. Ellison, *Investigation of pipe cleaning methods*, [American Water Works Association](#) (2003).
11. G. Gedge, *Corrosion of cast Iron in potable water service*, [The Institute of Materials, Corrosion and Related Aspects of Materials for Potable Water Supplies\(UK\)](#), 1993, DOI, 18-28 (1993).
12. M. Edwards, L. Hidmi, D. Gladwell, *Phosphate inhibition of soluble copper corrosion by-product release*, [Corrosion science](#), **44**, 1057-1071 (2002).
13. A.A. Olajire, *Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors-A review*, [Journal of Molecular Liquids](#), **248**, 775-808 (2017).
14. M.R. Cleland, F. Stichelbaut, *Radiation processing with high-energy X-rays*, [Radiation Physics and Chemistry](#), **84**, 91-99 (2013).
15. M. Askari, et al, *Film former corrosion inhibitors for oil and gas pipelines-A technical review*, [Journal of Natural Gas Science and Engineering](#), DOI (2018).
16. *Awwa Standard for Coal-Tar Epoxy Coating System for thr Interior and Exterior of Steel Water Pipe*, [Journal \(American Water Works Association\)](#), **70**, 284-288 (1978).

خنک‌کننده و آب شهر یزد که توسط آنالیز ICP انجام شد نیز نشان داد که سختی کل و TDS آب داخل تجهیز با گذشت زمان کاهش پیدا کرده است. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد رسوباتی غیر از اکسید آهن در تجهیز شده باشد. مشاهدات و بررسی‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که نوع تخریب زیرلایه فولادی به خصوص در مقاطعی که قطر لوله با کاهش مواجه می‌شود و یا اتصالات فلنج و یا مقاطع جوش و یا زانویی‌ها که الگوی حرکت سیال را تغییر می‌دهند، ناشی از خوردگی الکتروشیمیایی تسریع شده با سرعت حرکت سیال است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از رسوبات تشکیل شده الگوی تشکیل رسوب Tubulation را تأیید می‌کند. نتایج آنالیز طیفسنجی پلاسمای جفت شده القایی نشان می‌دهد که شیمی آب داخل تجهیز در مقایسه آب شهر یزد با گذشت زمان تغییراتی داشته است و سختی کل آب با گذشت زمان کاهش پیدا کرده است. بررسی کیفیت آب شهری با استفاده از پارامتر لانگژیتر انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده از پارامتر لانگژیتر آب خروجی در سیستم خنک‌کننده دارای مقدار پایینی خوردگی است که با توجه به رنگ محصولات خوردگی تشکیل شده و شکل آن‌ها مکانیزم خوردگی از نوع Tubulation است.