



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2096472.2073



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

Monitoring of Physicochemical Parameters and Sediments of the Cooling Tower of the Heller Power Plant: investigating the Causes of Destruction and Providing Suggested Solutions to Reduce Corrosion

Mohsen Esmailpour^{1*}, Abbas Yousefpour¹, Majid Ghahramanafshar¹, Aliakbar Asgharinezhad¹, Hossein Ghaseminejad¹

¹ Chemistry and Process Research Department, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Received: 31 Jul 2026 Accepted: 18 Aug 2026

Abstract

Preventing corrosion and reforming the energy model are the main priorities of the industry, especially the electricity industry and power plants in the country. Therefore, monitoring and evaluating structural components, equipment, process units, and facilities for corrosion monitoring is of great importance in order to improve asset efficiency and increase life, while reducing replacement costs and increasing safety. Since corrosion can always cause major damage in power plant facilities, the ability to test or monitor corrosion of key equipment such as cooling cycles and condensers in thermal power plants is of great importance. For this purpose, the levels of anions, cations, and effective parameters of the power plant cooling cycle water must be continuously and regularly monitored. Therefore, in this study, we will first examine and evaluate the effective parameters in the water cycle of the dry cooling system (Heller) of a selected power plant. Then, based on the analysis of the sediment under the condenser of the dry cooling tower (XRF and XRD tests), we will examine the type of corrosion that has occurred and present suggested solutions to control and reduce corrosion. The results of this study show that the lack of control of parameters such as pH and oxygen are the main causes of the intensification of aluminum corrosion, and changing the chemical regime by using corrosion inhibitors such as molybdate, triazotolyl, and hydrazine (removal of oxygen) has a significant effect on controlling and reducing corrosion in the dry cooling system of this power plant.

Keyword: Power Plant, Physicochemical Parameters, Cooling System Sedimentation, Heller Tower, Corrosion, XRD and XRF Analyses

* mesmaeilpour@nri.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Esmailpour, M., Yousefpour, A., Ghahramanafshar, M., Asgharinezhad, A., Ghaseminejad, H., "Monitoring of Physicochemical Parameters and Sediments of the Cooling Tower of the Heller Power Plant: investigating the Causes of Destruction and Providing Suggested Solutions to Reduce Corrosion", Journal of Farayandno – Vol. 21 – No. 94, pp. 59-74, In Persian, (2026).



DOI: 10.22034/farayandno.2026.2096472.2073



This journal is an open access journal licensed under an
Attribution-Non Commercial 4.0
International Licenses (CC BY-NC 4.0).

پایش پارامترهای فیزیکوشیمیایی و رسوبات برج خنک کننده هدر نیروگاه: بررسی علل تخریب و ارائه راهکارهای پیشنهادی جهت کاهش خوردگی

محسن اسماعیل پور^{۱*}، عباس یوسف پور^۱، مجید قهرمان افشار^۱، علی اکبر اصغری نژاد^۱، حسین قاسمی نژاد^۱

^۱ استادیار، گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

چکیده

جلوگیری از خوردگی و اصلاح الگوی انرژی به عنوان اولویت‌های اصلی صنعت بویژه صنعت برق و نیروگاه‌های کشور مطرح می‌باشند. از اینرو نظارت و ارزیابی بر اجزا سازه‌ها، تجهیزات، واحدهای فرایندی و امکانات در راستای پایش خوردگی به منظور کارایی دارایی‌ها و افزایش عمر توأم با کاهش هزینه‌های جایگزینی و افزایش ایمنی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آنجا که پدیده خوردگی همواره می‌تواند در تأسیسات نیروگاهی خسارات کلانی را به وجود آورد، توانایی آزمون و یا پایش خوردگی تجهیزات کلیدی مانند چرخه خنک‌سازی و کندانسور در نیروگاه‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای این منظور می‌بایست به صورت پیوسته و منظم میزان آنیون‌ها، کاتیون‌ها و پارامترهای مؤثر آب چرخه خنک‌کن نیروگاهی کنترل شود. بنابراین در این پژوهش، ابتدا به بررسی و ارزیابی پارامترهای مؤثر در سیکل آب سیستم خنک‌کننده خشک (هادر) یک نیروگاه منتخب خواهیم پرداخت. سپس با توجه به آنالیز رسوب زیرکش کندانسور برج خنک‌کننده خشک (آزمون‌های XRF و XRD) به بررسی نوع خوردگی-های حادث شده و ارائه راهکارهای پیشنهادی جهت کنترل و کاهش خوردگی خواهیم پرداخت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که عدم کنترل پارامترهایی همچون pH و اکسیژن به عنوان علل اصلی در تشدید خوردگی آلومینیوم مطرح می‌باشند و تغییر رژیم شیمیایی با بکارگیری از بازدارنده‌های خوردگی همچون مولیبدات، تری‌آزول تولیل و هیدرازین (حذف اکسیژن) در کنترل و کاهش خوردگی در سیستم خنک‌کن این نیروگاه تأثیر بسزایی دارد.

کلمات کلیدی: نیروگاه، پارامترهای فیزیکوشیمیایی، رسوب سیستم خنک‌کننده، برج هادر، خوردگی، آنالیزهای XRD و XRF

* mesmaeilpour@nri.ac.ir

۱- مقدمه

با توجه به نقش حیاتی نیروگاه‌ها در تأمین انرژی، مشکلات ناشی از خوردگی تجهیزات و آلودگی آب در چرخه‌های نیروگاهی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های صنعت تولید برق تبدیل شده است [۱]. خوردگی سبب کاهش عمر مفید تجهیزات، افزایش احتمال خرابی و توقف‌های ناخواسته، کاهش راندمان حرارتی و افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. از سوی دیگر، آلودگی آب چرخه نیروگاه‌ها ناشی از ورود ناخالصی‌ها، اکسیژن محلول، یون‌های خورنده و رسوبات معدنی، فرآیند خوردگی و تشکیل رسوب را تشدید کرده و عملکرد ایمن و پایدار سیستم را با مخاطره مواجه می‌سازد [۲]. این عوامل علاوه بر تحمیل هزینه‌های کلان اقتصادی به صنعت برق، موجب افزایش مصرف مواد شیمیایی، اتلاف انرژی و کاهش قابلیت اطمینان واحدهای نیروگاهی می‌شوند. از این‌رو، پایش مستمر کیفیت آب، به‌کارگیری روش‌های نوین کنترل خوردگی و اجرای برنامه‌های مدیریت شیمی آب از مهم‌ترین راهکارهای کاهش خسارات اقتصادی و افزایش بهره‌وری نیروگاه‌ها به شمار می‌روند [۳].

در حال حاضر آلومینیوم و آلیاژهای آن بخاطر مزایای ویژه خود در صنایع مختلف از جمله صنایع دریائی، هواپیماسازی و صنایع شیمیایی و همچنین به عنوان ماده سازنده سیستم‌های خنک‌کننده بکار گرفته می‌شوند [۴]. از این رو در حال حاضر تحقیقاتی در خصوص کنترل کیفی آلیاژهای آلومینیوم در دنیا در حال انجام است. بررسی‌های انجام شده در سال‌های اخیر در شرایط بهره‌برداری از برج‌های هدر نشان می‌دهد که ۳ فاکتور pH، دما و میزان یون آهن موجود در محیط به نحوی بر روند خوردگی آلیاژ آلومینیوم تأثیرگذار بوده است [۵]. به طوری که با افزایش میزان pH و دمای آب و میزان یون آهن موجود در محیط؛ خوردگی آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده در برج خنک‌کننده خشک نیروگاه‌های سیکل ترکیبی افزایش می‌یابد [۶]. در برج‌های هدر با اجزای آلومینیومی، شایع‌ترین انواع خوردگی عبارت‌اند از:

- خوردگی حفره‌ای (Pitting): ایجاد حفره‌های کوچک و عمیق روی سطح آلومینیوم.
- خوردگی گالوانیکی: در محل تماس آلومینیوم با فولاد یا مس، به‌ویژه در حضور رطوبت یا الکترولیت.
- خوردگی شیار (Crevice Corrosion): در محل اتصالات، پیچ‌ها و درزها.
- خوردگی ناشی از کیفیت نامناسب آب یا مواد شیمیایی: به‌خصوص در صورت کنترل نامناسب pH، کلرید و اکسیژن محلول

نمونه‌هایی از تصاویر مرتبط با خوردگی لوله‌ها و مبدل‌های آلومینیومی در سیستم‌های خنک‌کننده هدر در شکل ۱ نشان داده شده است. این تصاویر خوردگی سطحی و تشکیل محصولات خوردگی روی سطوح فلزی در سیستم‌های خنک‌کننده، رسوب‌گذاری و خوردگی روی لوله‌های مبدل حرارتی (کاهش انتقال حرارت) و بیوفیلیم و خوردگی موضعی (سوراخ شدن لوله‌ها) را به خوبی نشان می‌دهند.



شکل ۱- خوردگی لوله‌ها و مبدل‌های آلومینیومی در سیستم‌های خنک‌کننده هلو

از اینرو در سالیان اخیر، شناخت واکنش‌های بنیادین خوردگی آلومینیوم در محیط‌های آبی و یا محیط‌هایی که بخارات آبی موجود هستند موضوع تحقیقات بسیاری بوده است [۷]. برای مثال اوبات، ویلیامز و سفاک با همکارانشان بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ به تحقیق در مورد بازدارنده‌های خوردگی آلومینیوم و آلیاژهای آن پرداختند [۸-۱۰]. رالسون و همکارانشان اثر اندازه دانه بر خوردگی آلومینیوم را بررسی کردند [۱۱]. همچنین چن و همکارانش درباره خوردگی آلومینیوم در محیط زیست شیمیایی آبی نیروگاه‌ها به تحقیق و پژوهش پرداختند که در این تحقیق به بررسی تشکیل رسوب و لجن به علت خوردگی می‌پردازند و راه‌حلی برای تبدیل محصولات خوردگی آلومینیوم به لایه پسیو Al_2OSiO_4 به کمک سیلیکات ارائه می‌دهند [۱۲]. در سال ۲۰۰۸ تامارا و همکارانش رفتار محصولات خوردگی آلومینیوم در چرخه آب و بخار نیروگاه را بررسی کرده و نشان دادند که در برخی از نیروگاه‌هایی که از برج خنک‌کننده خشک با آلیاژهای آلومینیوم استفاده شده است بعلت حضور دو آلیاژ مختلف فولاد و آلومینیوم در سیکل آب و بخار مشکلات بسیاری در شیمی آب وجود دارد زیرا حداقل نرخ خوردگی در این دو آلیاژ در دو pH متفاوت می‌باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حلالیت ترکیبات آلومینیوم در pHهای بالاتر از ۷ به شدت افزایش می‌یابد [۱۳]. علاوه بر این آبراهام و همکارانش در سال ۲۰۱۴ [۱۴] و لاکوا و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [۱۵] به ترتیب در مورد خواص آلیاژ خاصی از آلومینیوم مورد استفاده در صنعت برق و مطالعه در مورد رفتار خوردگی آلیاژی از آلومینیوم تحت شرایط متفاوتی از دما پرداختند. علی‌رغم پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با خوردگی آلیاژ آلومینیوم، تاکنون مطالعات کمی در مورد خوردگی آلیاژ آلومینیوم و نحوه پایش آن در برج‌های خنک‌کننده و نیروگاه‌ها صورت گرفته است. روش پایش خوردگی به‌عنوان یک راه برای پیش‌بینی میزان خسارات ناشی از خوردگی بر تجهیزات از اهمیت بالایی در صنایع بویژه صنعت نیروگاهی برخوردار می‌باشد [۱۶]. با توجه به تشخیص نوع خوردگی، امکان کنترل پارامترهای مؤثر بر این پدیده از قبیل pH، نرخ جریان، فشار، دما و غیره فراهم می‌گردد [۱۷]. از آنجا که پدیده خوردگی همواره می‌تواند در تأسیسات نیروگاهی خسارات کلانی را به‌وجود آورد، توانایی آزمودن و یا پایش خوردگی تجهیزات کلیدی مانند چرخه خنک‌سازی و کندانسور در نیروگاه‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۸]. از اینرو در پژوهش حاضر در ابتدا به بررسی و ارزیابی پارامترهای فیزیکوشیمیایی مؤثر در آب گردشی سیستم خنک‌کننده خشک یک نیروگاه منتخب خواهیم پرداخت. سپس با توجه به اطلاعات حاصل از پایش آب به بررسی و ارزیابی رسوب‌های موجود در زیرکش کندانسور برج خنک‌کننده خشک با بکارگیری آزمون‌های XRD و XRF خواهیم پرداخت. در نهایت با توجه به نتایج حاصل شده و عوامل مؤثر بر خوردگی در سیستم‌های خنک‌کن

آلومینیومی، راهکارهای پیشنهادی به منظور کاهش و کنترل خوردگی در برج خنک کننده خشک نیروگاه ارائه خواهد شد.

۲- بخش تجربی

پارامترهای مهم و قابل آنالیز در نمونه‌های آب دمین و آب گردشی سیستم خنک کننده خشک نیروگاه مانند یون‌های موجود در نمونه، نیازمند سنجش دقیق در آزمایشگاه می‌باشند. از اینرو با بکارگیری روش‌های استاندارد مرسوم در دنیا، آنالیزهای مربوط به هر یون انجام گرفته است. مواد شیمیایی و حلال‌های مورد نیاز آزمون‌ها از شرکت‌های مواد شیمیایی مرک و سیگما-آلدریج خریداری شدند. از دستگاه HANNA HI2300 به منظور اندازه‌گیری پارامترهایی همچون سختی آب (TDS)، هدایت الکتریکی (EC) و pH استفاده شد. از روش جذب اتمی جهت سنجش یون‌های کلسیم مطابق با استاندارد 3500 Ca-B استفاده شد. روش فلیم فلومتری به منظور سنجش یون‌های سدیم و پتاسیم مطابق با استانداردهای 3500-Na و 3500-K بکار گرفته شد. دستگاه آنالیز ICP-OES مدل Perkin-Elmer DV5300 به منظور تعیین غلظت یون‌های کاتیونی مورد استفاده قرار گرفت. از دستگاه XRF مدل PERFORM, X جهت شناسایی و اندازه‌گیری غلظت عناصر فلزی و غیرفلزی رسوب‌ها استفاده شد. از دستگاه پراش اشعه ایکس (XRD) مدل Bruker AXS D8 با تابش $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5418$) برای آنالیز و تعیین مشخصات رسوب کندانسور استفاده شد.

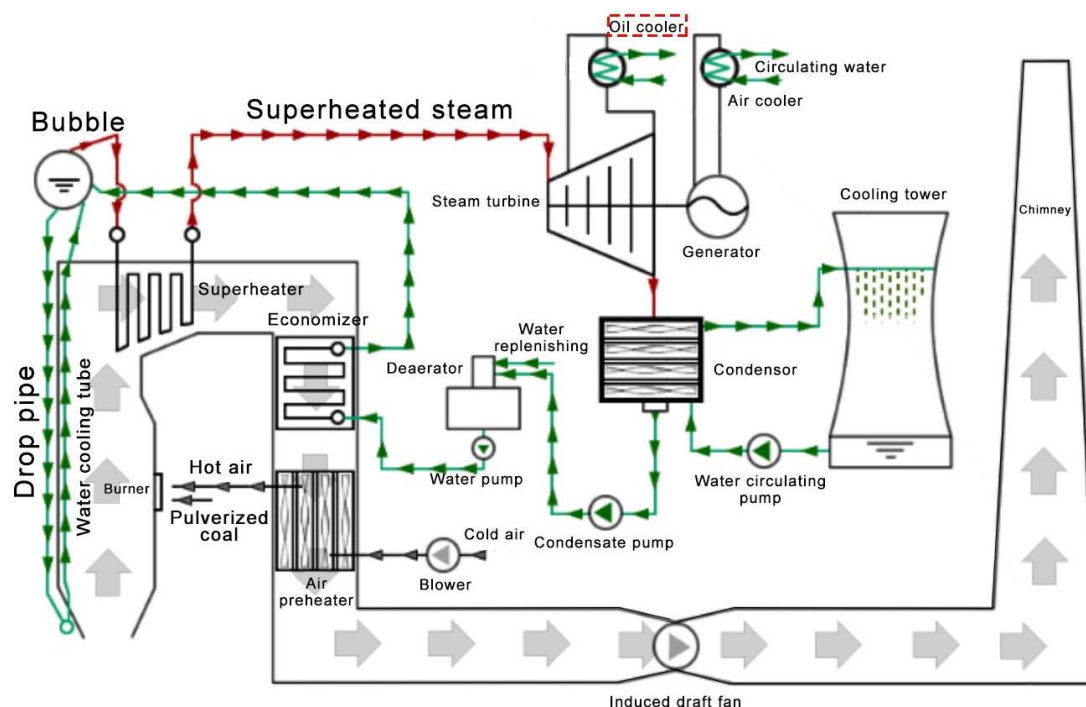
۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی و ارزیابی وضعیت کنونی برج خنک کن نیروگاه منتخب

با توجه به بحران منابع آبی و افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه، حدود ۸۹ درصد از آب مورد نیاز نیروگاه منتخب از محل پساب شهری و صنعتی تأمین می‌شود. در همین راستا و به منظور مدیریت بهینه مصرف آب، برج‌های خنک‌کن تر واحدهای ۱ و ۲ با نوع خشک جایگزین شده است. اجرای این تغییرات موجب کاهش قابل توجه برداشت آب و ارتقای شاخص‌های بهره‌وری زیست‌محیطی نیروگاه شده است. نحوه بهره‌برداری از سامانه‌های خنک‌کن نیز متناسب با تغییرات فصلی تنظیم می‌شود؛ به گونه‌ای که در ماه‌های سرد سال (تقریباً هفت تا هشت ماه) از برج خشک به صورت کامل استفاده شده و در دوره گرم سال (از نیمه خرداد تا نیمه شهریور) عملکرد برج به صورت هیبریدی، یعنی ترکیبی از سامانه خشک و تر ادامه می‌یابد. این راهکار علاوه بر صرفه‌جویی در منابع آبی، موجب افزایش انعطاف‌پذیری عملیاتی نیروگاه در مواجهه با تغییرات دمایی و بار مصرفی می‌شود. سیستم خنک‌کن واحد یک نیروگاه به عنوان موضوع مورد مطالعه پروژه حاضر از اجزای مختلفی تشکیل شده که هر یک نقش مهمی در تضمین کارکرد پایدار و راندمان مطلوب مجموعه دارند. این اجزا عبارتند از:

- کندانسور با لوله‌هایی از جنس مس
- برج خنک‌کن خشک با لوله‌هایی از جنس آلومینیوم
- مبدل‌های میانی با لوله‌هایی از کربن استیل
- خطوط رابط سه جزء فوق از جنس کربن استیل
- دو دستگاه پمپ

سیستم برج خنک کن واحد ۱ نیروگاه به دو پمپ اصلی مجهز است که هر یک توانایی تأمین دبی معادل ۱۷۵۰۰ مترمکعب بر ساعت را دارند. در شرایطی که هر دو پمپ به صورت همزمان وارد مدار شوند، ظرفیت کل سیستم به حدود ۳۰ هزار مترمکعب بر ساعت می‌رسد. فشار جریان آب در خطوط انتقال نیز در محدوده ۲/۵ تا ۳ بار قرار دارد. آب خنک کن با دمای حدود ۳۰ درجه سانتی گراد وارد کندانسور شده و بخار خروجی از توربین را در خارج از لوله‌های کندانسور متراکم می‌کند. این فرآیند سبب افزایش دمای آب تا حدود ۴۰ درجه سانتی گراد می‌شود. بر همین اساس، دمای میانگین آب خنک کن در داخل لوله‌های مبدل حرارتی، حدود ۳۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می‌شود. کندانسور این مجموعه شامل حدود ۱۴ هزار لوله با قطر یک اینچ است که تمامی آن‌ها از جنس مس ساخته شده‌اند. طراحی این لوله‌ها با توجه به دبی جریان، ابعاد و تعداد آن‌ها صورت گرفته و امکان محاسبه سرعت خطی سیال در داخل لوله‌ها را فراهم می‌کند. شکل ۲ نحوه استقرار کندانسور، بویلر، توربین و برج خنک کننده خشک را در کنار یکدیگر به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل ۲- شماتیک نحوه استقرار کندانسور، بویلر، توربین و برج خنک کننده خشک در کنار یکدیگر

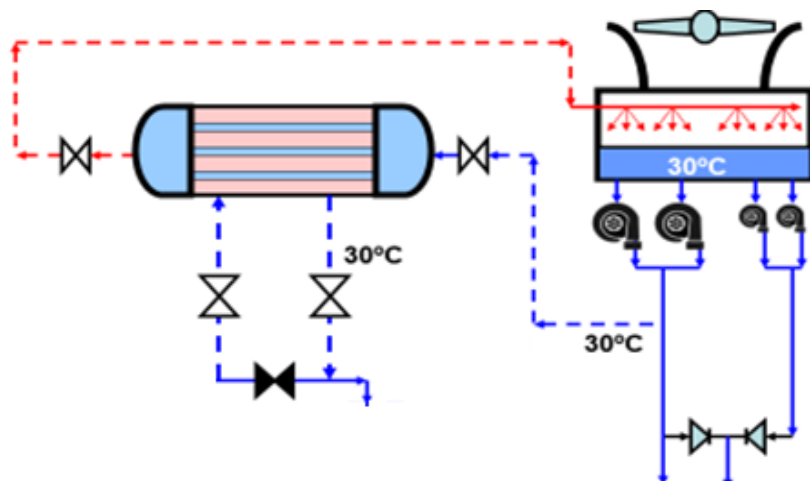
آب خروجی از کندانسور به رادیاتورهای برج خشک منتقل می‌شود؛ این رادیاتورها از جنس آلومینیوم ساخته شده‌اند و فرآیند خنک سازی در آن‌ها به صورت مکش طبیعی صورت می‌گیرد. فشار داخل لوله‌های برج خشک بین ۳ تا ۵ بار است. رادیاتورهای خشک از نوع Fin-Tube طراحی شده‌اند؛ پره‌های آن‌ها از آلیاژ آلومینیوم Al 99.5H و تیوب‌ها از آلومینیوم خالص Al 99.5 ساخته شده‌اند. برج خشک شامل شش سکتور است که هر سکتور حاوی ۹ واحد دلتا می‌باشد. شکل ۳ نمای یک دلتا و نحوه استقرار لوله‌ها در آن را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- برج خشک و نمای دلتا و نحوه قرارگیری لوله‌ها

در این برج، تعداد ۲۸،۸۰۰ لوله با قطر داخلی ۲۱/۱۸ میلی‌متر تعبیه شده است. جریان خروجی از کندانسور پس از عبور از هدرهای اصلی برج در تمام این لوله‌ها تقسیم می‌شود. شکل ۳، نمای برج خشک و محل ورودی و خروجی‌های آن را نشان می‌دهد. در این سیستم، تعداد مبدل‌ها مجموعاً ۸ دستگاه دو قلو می‌باشد. تیوب‌های آب خنک‌کننده و پوسته (Shell) مبدل‌ها از جنس کربن استیل ساخته شده‌اند و براساس شرایط دمای محیط می‌توان تعداد مبدل‌ها را افزایش یا کاهش داد. برای مثال، در زمستان که دمای محیط کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد است، نیاز به استفاده از مبدل نیست. اما در تابستان، زمانی که دمای هوا بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد است و اختلاف دما با آب ورودی ۴۰ درجه سانتی‌گراد کافی نیست، تمام بار حرارتی بر روی برج تر قرار می‌گیرد و در عمل برج خشک تنها جریان آب را منتقل می‌کند و انتقال حرارت چندانی صورت نمی‌گیرد.

در فصول گرم سال، زمانی که اختلاف دمای آب برگشتی از کندانسور با دمای هوای محیط نیروگاه حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد یا کمتر باشد (مثلاً آب با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و هوای محیط با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد) از برج تر نیز در سیستم اصلی استفاده می‌شود. در این شرایط، گرادیان دما بین آب ورودی به برج و هوای محیط کمتر از ۲۰ درجه است و هنگام تماس آب و هوا، دمای آب به حدود ۳۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. برای کاهش بیشتر دما تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد یک مبدل حرارتی پوسته و لوله (Shell & Tube) بین برج خنک‌کن خشک و تر تعبیه می‌شود که حدود ۵ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش دمای آب می‌گردد. در فصل زمستان، این مبدل از مدار خارج می‌گردد. شکل ۴ نمای این مبدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴- شماتیک مبدل حرارتی با برج خنک کننده تر

۳-۲- بررسی پارامترهای مؤثر سیکل خنک کن هالر

با توجه به خوردگی‌های حادث شده در برج خنک کننده خشک این نیروگاه، بررسی پارامترهای مؤثر فیزیکوشیمیایی آب و رسوبات موجود به منظور ارزیابی علل خوردگی و ارائه راهکارهای پیشنهادی جهت کنترل خوردگی حائز اهمیت می‌باشد. از اینرو نمونه‌برداری از آب جبرانی (آب دمین)، آب گردش برج خنک کننده خشک، آب گردش برج خنک کننده تر و آب ورودی مبدل حرارتی در نیروگاه انجام گرفت و نتایج حاصل از آزمون‌های پارامترهای مؤثر آب از قبیل هدایت الکتریکی (EC)، سختی (TDS)، شوری (NaCl)، دما، pH، Fe، Al، Cu، Zn، Ca، Na، K و Si به ترتیب در جداول ۱ و ۲ خلاصه شده است.

جدول ۱- آنالیز عمومی نمونه‌های آب بخش‌های مختلف نیروگاه

نمونه‌ها	Cond. (μms)	TDS (ppm)	% NaCl	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	pH
آب دمین	۱/۱۵	۰/۵۷	۰	۲۲/۶	۸/۷۴
آب گردش برج خشک	۶/۰۶	۳/۰۴	۰	۳۱	۷/۶۱
آب گردش برج تر	۸۴۰۰	۴۲۱۰	۱۶/۵	۲۹	۷/۵۷
ورودی مبدل حرارتی	۶/۲۴	۳/۱۲	۰	۳۶	۷/۵۲

همچنین در ادامه آنالیز ICP-MS بر روی دو نمونه آب دمین و آب در گردش برج خنک کن خشک و برج تر انجام شد و نتایج به دست آمده در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲- آنالیز ICP-MS آب دمین و آب در گردش برج خنک کن خشک

نمونه‌ها	Fe (ppb)	Al (ppb)	Cu (ppb)	Zn (ppb)	Ca (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Si (ppm)
آب دمین	<۱۰	<۱۰	<۱	<۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱
آب گردش برج خشک	<۱۰	۲۶۰	۴/۳	۱۴/۱۸	۰/۴۵	<۰/۰۱	<۰/۰۱	۰/۱۶
آب گردش برج تر	<۱۰	۳۰	۱۳۵/۹	۴۵۴/۲	۳۵۵/۸	۱۲۳۰	۱۱۷/۲	۲۹/۶۶

براساس آنالیز انجام گرفته، میزان ۲۶۰ ppb آلومینیوم در آب در گردش برج خشک وجود دارد که حاکی از خوردگی شدید این فلز می‌باشد. غلظت دو عنصر مس و آهن همچنان که در جدول ۲ نشان داده شده است، بسیار ناچیز است

و بنابراین میزان خوردگی این دو فلز نیز بسیار کم می‌باشد. بررسی نتایج آنالیز شیمیایی آب در سه وضعیت دمین، سیکل خشک و برج تر نشان می‌دهد که کیفیت آب و غلظت عناصر محلول به شدت تحت تأثیر شرایط عملیاتی و تماس با تجهیزات فلزی قرار دارد. آب دمین که به عنوان خوراک اولیه وارد سیستم می‌شود، خلوص بسیار بالایی دارد و مقادیر تمامی فلزات سنگین و یون‌های اصلی در آن یا کمتر از حد تشخیص بوده یا در حد ناچیز گزارش شده است. چنین ترکیبی کاملاً مطابق انتظار برای یک آب دیونیزه است و به خودی خود نه تنها زمینه‌ای برای خوردگی فراهم نمی‌کند، بلکه فاقد هرگونه پتانسیل رسوب‌گذاری نیز می‌باشد. بنابراین، آب دمین در ابتدای ورود به مدار یک پایه خنثی و ایده‌آل محسوب می‌شود. با ورود آب به سیکل خشک، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در ترکیب شیمیایی مشاهده می‌شود. مهم‌ترین شاخص، افزایش شدید غلظت آلومینیوم تا ۲۶۰ ppb است که نشانه بارز خوردگی فعال اجزای آلومینیومی در تماس با این آب می‌باشد. حضور آلومینیوم محلول در این غلظت بالا نشان می‌دهد که شرایط محیطی سیکل خشک شامل دما، میزان اکسیژن محلول و ویژگی‌های فیزیکی جریان به طور مستقیم باعث انحلال تدریجی اجزای آلومینیومی شده است. افزون بر این، افزایش فلزات روی ۱۴/۱۸ ppb و مس ۴/۳ ppb گرچه در مقادیر پایین‌تر رخ داده، اما می‌تواند ناشی از انحلال جزئی پوشش‌ها یا قطعات آلیاژی حاوی این فلزات باشد. در این مدار، غلظت کلسیم ۰/۴۵ ppm و سیلیس ۰/۱۶ ppm بسیار پایین است و بنابراین امکان رسوب‌گذاری وسیع در مقایسه با برج تر وجود ندارد. این داده‌ها نشان می‌دهند که پدیده غالب در سیکل خشک خوردگی آلومینیوم است، نه خوردگی گسترده سایر فلزات.

مقایسه نتایج آنالیز شیمیایی آب سیکل خشک با مقادیر هدف ارائه‌شده در دستورالعمل EPRI نشان می‌دهد که رفتار عناصر فلزی در این سیستم از الگوی متفاوتی تبعیت می‌کند. غلظت آهن در آب سیکل خشک کمتر از ۱۰ ppb اندازه‌گیری شد که اگرچه اندکی بالاتر از مقدار هدف ایده‌آل EPRI برای سیستم‌های سیکل بخار (کمتر از ۲ ppb) می‌باشد، اما با توجه به ماهیت سیستم‌های خنک‌کن خشک و دشواری دستیابی به این مقدار در شرایط بهره‌برداری واقعی، همچنان بیانگر کنترل مناسب خوردگی تجهیزات آهنی و عدم وجود خوردگی گسترده در اجزای فولادی مدار است. همچنین، غلظت مس برابر با ۴/۳ ppb بوده که پایین‌تر از حد هدف ۱۰ ppb توصیه‌شده توسط استاندارد EPRI قرار دارد و نشان می‌دهد که خوردگی تجهیزات و آلیاژهای مسی در سیکل خشک در سطح قابل قبولی کنترل شده است. در مقابل، غلظت آلومینیوم محلول برابر با ۲۶۰ ppb اندازه‌گیری شد که به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر مورد انتظار برای یک سیستم سالم است. اگرچه دستورالعمل EPRI حد عددی مشخصی برای آلومینیوم ارائه نمی‌کند، اما تأکید دارد که در سیستم‌های خنک‌کن خشک از نوع هدر، آلومینیوم باید تا حد امکان در کمترین مقدار ممکن باقی بماند، زیرا افزایش غلظت آن مستقیماً نشان‌دهنده انحلال و خوردگی سطوح آلومینیومی مبدل‌های حرارتی است. از دیدگاه EPRI، افزایش آلومینیوم محلول علاوه بر بیانگر بودن تخریب تجهیزات آلومینیومی، می‌تواند موجب انتقال محصولات خوردگی به مدار بخار، تشکیل رسوبات آلومینیومی بر روی سطوح انتقال حرارت در HRSG و در نهایت کاهش راندمان حرارتی و افزایش هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات شود. بنابراین، در میان فلزات مورد بررسی، آلومینیوم به عنوان شاخص اصلی خوردگی در این سیستم مطرح بوده و مقدار اندازه‌گیری‌شده آن بیانگر ضرورت بررسی دقیق‌تر شرایط شیمی آب، عملکرد برنامه کنترل خوردگی، وضعیت pH و قلیائیت و همچنین ارزیابی وضعیت سطوح آلومینیومی برج خشک به منظور شناسایی منشأ و کاهش نرخ خوردگی است.

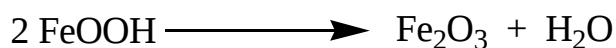
۳-۳- نتایج و تحلیل آنالیزهای XRD و XRF

به منظور بررسی و ارزیابی رسوب (شکل ۵)، نمونه‌برداری از کندانسور واحد ۱ نیروگاه انجام شد که نتایج حاصل از آزمون‌های طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس (XRF) و پراش اشعه ایکس (XRD) در جدول ۳ و شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۵- نمونه رسوب زیرکش کندانسور برج خنک‌کننده خشک

رسوبات تشکیل شده در کندانسور نیروگاه شامل ترکیبات معدنی متنوعی هستند که می‌توانند موجب کاهش انتقال حرارت و افزایش خوردگی شوند. تحلیل XRD- XRF و داده‌های شدت مربوطه نشان‌دهنده ترکیب شیمیایی و فازی رسوب است. حضور پیک‌های شاخص در زوایای پراش 30.1° ، 35.4° ، 43.1° ، 53.4° ، 57.0° و 62.6° که به ترتیب به اندیس‌های میلر (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۴۲۲)، (۵۱۱) و (۴۴۰) اختصاص دارند، تشکیل نانوذرات مگنتیت با ساختار اسپینل مکعبی را نشان می‌دهد که با استاندارد JCPDS card No. 47-0748 مطابقت دارد [۱۹]. براساس نتایج به دست آمده، غالب‌ترین فاز، Fe_3O_4 است که با شدت‌های بالاتر در پیک‌های اصلی مشخص شده است. سطح کریستالی در پیک‌های پراش که با مربع قرمز و مرتبط با اندیس‌های میلر (۰۰۶)، (۱۰۴)، (۱۱۰)، (۱۱۳)، (۰۲۴)، (۱۱۶)، (۲۱۴)، (۳۰۰)، (۰۱۲)، (۰۱۸) و (۲۰۲) در شکل مشخص شده است با استاندارد ۲۱-۱۲۷۲ JCPDS No: و با رسوبات $FeO(OH)$ مطابقت دارد که در pHهای بین ۶ تا ۸ تبدیل $FeO(OH)$ به $\alpha-Fe_2O_3$ از طریق دی‌هیدراسیون اتفاق می‌افتد:



حضور Fe_2O_3 نشان‌دهنده اکسیداسیون سطح فلز و خوردگی جزئی است. این درصد بالای Fe_2O_3 معمولاً در رسوبات ناشی از خوردگی فولاد و تجهیزات حاوی آهن مشاهده می‌شود. همچنین در pHهای حدود ۹، اکسید آهن هنگام واکنش تبدیل دوباره ممکن است حل شود و $FeOOH$ به $Fe(OH)_4^-$ تبدیل شود که واکنش تعادلی کمپلکس هیدروکسید آهن به صورت زیر می‌باشد:



تبدیل هماتیت (Fe_2O_3) به مگنتیت (Fe_3O_4) فرآیندی شیمیایی است که در آن آهن موجود در هماتیت با اکسیژن اضافی واکنش می‌دهد و اکسید آهن با فرمول شیمیایی جدید (Fe_3O_4) تشکیل می‌شود [۲۰].

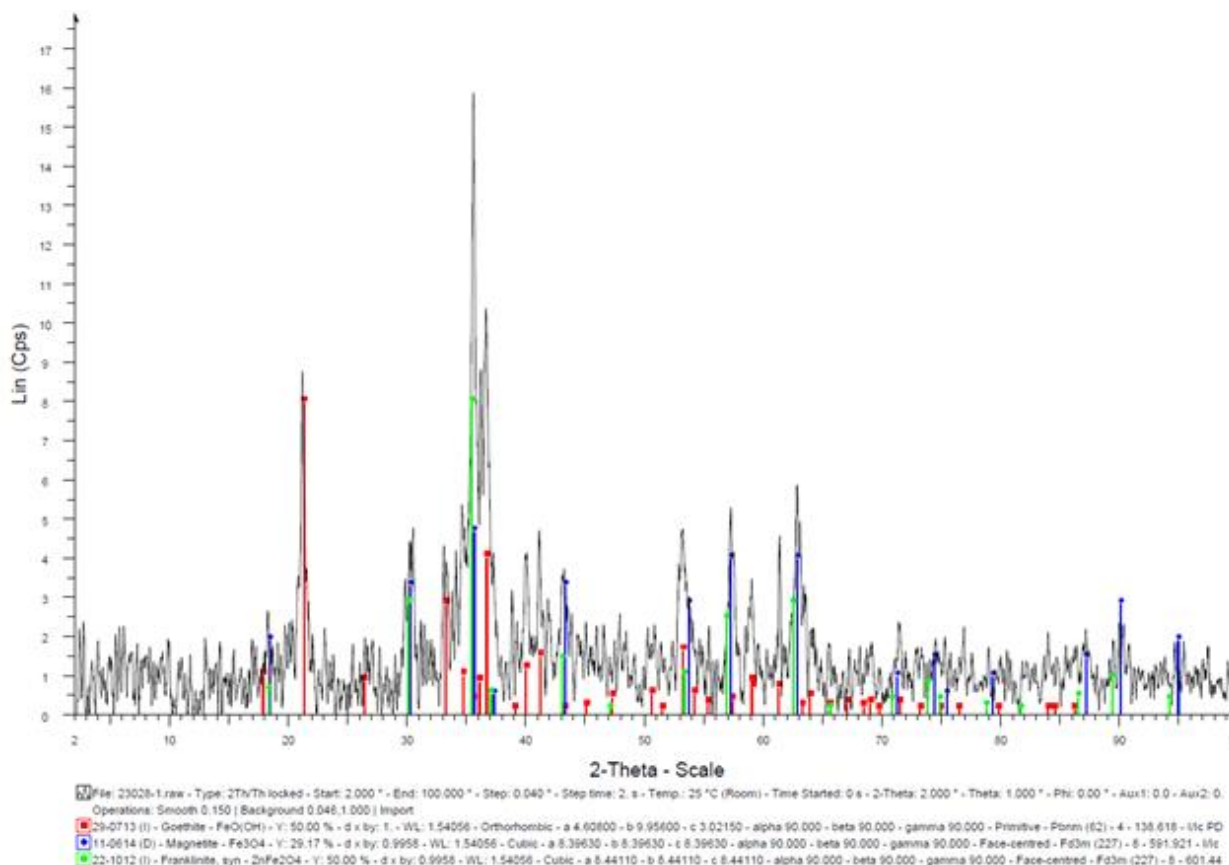
جدول ۳- آزمون شیمیایی به روش XRF برای رسوب کندانسور برج خنک‌کننده خشک

درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید	درصد وزنی	اکسید
۰/۶۶۲	SiO_2	۲/۳۲	Al_2O_3	۷۵/۱۶	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{Fe}_3\text{O}_4$	۰/۳۲	Na_2O
۰/۲۷	Cr_2O_3	۱/۷۱	CaO	۰/۳۴	SO_3	۰/۷۵	P_2O_5
۸/۸	L.O.I	۱/۱۸	ZnO	۰/۳۱	CuO	۲/۲۲	MnO

شرایط و توضیحات آزمون: ۱- نتایج آزمون به نحوه نمونه برداری و یکنواختی نمونه بستگی دارد. ۲- آنالیز به صورت نیمه کمی (Semi Quantitative) انجام شده است. ۳- ابتدا نمونه در دمای 110°C رطوبت گیری شد و سپس آزمون اندازه گیری L.O.I (کاهش وزن ناشی از احتراق)، نمونه به مدت ۱٫۵ ساعت در دمای 950°C قرار گرفت.

بنابراین عدم کنترل اکسیژن مازاد در چرخه خنک‌کن منجر به تشکیل اکسیدهای گوناگون شده و در pHهای مختلف منجر به تشکیل رسوبات Fe_2O_3 ، FeOOH و در pHهای بالای ۸ منجر به تشکیل فاز مگنتیت Fe_3O_4 خواهد شد. علاوه بر این با توجه به اینکه در صد بالایی از رسوب موجود در کندانسور واحد ۱ فاز مگنتیت می‌باشد حضور اکسیژن مازاد در آب گردش چرخه خنک‌کن مورد تأیید می‌باشد. همچنین با توجه به جنس متریال کندانسور که شامل فلز Zn می‌باشد حضور اکسیژن مازاد منجر به تشکیل ZnO شده که نتایج حاصل در آنالیز XRF مشخص می‌باشد. این نوع اکسید در pHهای بالا و در حضور اکسیدهای آهن منجر به تشکیل فاز مکعبی ZnFe_2O_4 مطابق با استاندارد JCPDS:01-077-0011 می‌شود. پیک‌های پراش مربوط به این نوع از رسوب با مربع‌های سبز رنگ در طیف شکل ۶ مشخص شده است [۲۱]. همچنین نتایج حاصل از آزمون XRF در صد قابل توجهی از رسوب Al_2O_3 را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه اکسید آلومینیوم به عنوان لایه پوششی از خوردگی آلومینیوم جلوگیری می‌کند اما عواملی همچون pH و اکسیژن مازاد منجر به تشدید خوردگی آلومینیوم خواهند شد. عدم کنترل دقیق pH و افزایش آن به بالای ۸/۵ و همچنین اکسیژن مازاد، ضخامت لایه اکسید آلومینیوم را افزایش داده که وجود عواملی همچون توربالانس و خوردگی تسریع شده با جریان (FAC) در چرخه خنک‌کن منجر به Leaching اکسیدهای آلومینیوم (Al_2O_3) به داخل محیط می‌شود. همچنین افزایش ضخامت لایه اکسید آلومینیوم به علت وجود اکسیژن مازاد منجر به جدا شدن موضعی لایه پوششی و افزایش خوردگی زیر لایه‌ای (Under Layer Corrosion) خواهد شد.

با توجه به حضور مس در محیط براساس نتایج XRF، خوردگی گالوانیک آلومینیوم در حضور فلز مس امکان‌پذیر می‌باشد. فلز مس واکنش‌پذیری کمتری نسبت به آلومینیوم دارد و قرار گرفتن مس بر روی آلومینیوم منجر به تشکیل پیل الکتروشیمیایی و خوردگی آلومینیوم خواهد شد. از دیگر خوردگی‌های متداول در آلیاژهای آلومینیومی، خوردگی حفره‌ای می‌باشد که با توجه به عدم وجود کلر در نتایج حاصل از XRF، وجود خوردگی حفره‌ای در آلومینیوم که معمولاً به دلیل حضور یون‌های هالیدی بویژه Cl^- اتفاق می‌افتد منتفی می‌باشد.

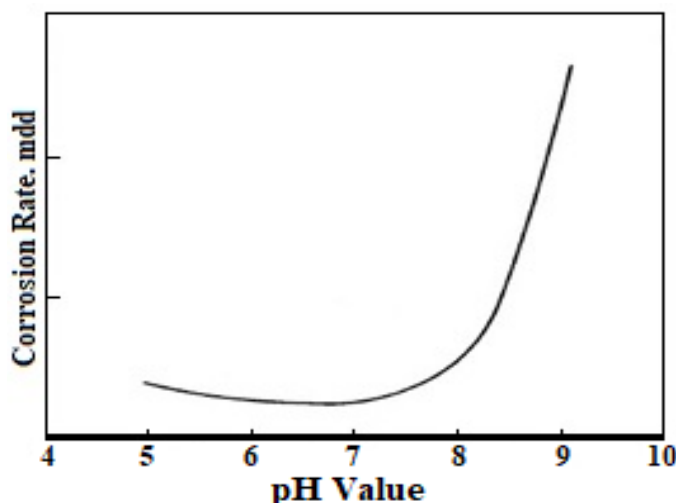


شرایط و توضیحات آزمون: ۱- نتایج آزمون به نحوه‌ی نمونه‌برداری و یکنواختی نمونه بستگی دارد ۲- به دلیل همپوشانی Fe_3O_4 و ZnFe_2O_4 امکان شناسایی دقیق امکان‌پذیر نمی‌باشد.

شکل ۶- الگوی XRD رسوب کندانسور واحد ۱ (برج خشک)

بنابراین از جمله عوامل اصلی خوردگی در سیستم خنک‌کننده خشک می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزایش دما توأم با حضور اکسیژن اشباع به عنوان ۲ پارامتر تأثیرگذار در افزایش سرعت خوردگی آلیاژهای آلومینیوم با گذشت زمان می‌باشند.
- عدم کنترل دقیق pH و افزایش آن به بالای ۸/۵ (شکل ۷) منجر به افزایش سرعت خوردگی و ضخامت لایه اکسید آلومینیوم شده و وجود عواملی همچون توربالانس و FAC در چرخه خنک‌کن منجر به Leaching اکسیدهای آلومینیوم (Al_2O_3) به داخل محیط می‌شود.



شکل ۷- تأثیرات pH محلول بر خوردگی آلیاژهای آلومینیوم در محلول اشباع شده با اکسیژن

- حضور اکسیژن اشباع در آب گردشی برج خنک کننده منجر به افزایش ضخامت لایه اکسید آلومینیوم، جدا شدن موضعی لایه پوششی و در نهایت افزایش خوردگی زیر لایه‌ای خواهد شد.
- در طراحی لازم است شیارها بین آلومینیوم و فلزات دیگر به حداقل برسد چون ممکن است باعث ترکیب خوردگی شیاری و تهاجم گالوانیکی شود. فلز مس خوردگی گالوانیک در آلومینیوم را امکان پذیر می‌سازد. از آنجائیکه مس نسبت به آلومینیوم واکنش پذیری کمتری دارد با قرار گرفتن بر روی آلومینیوم منجر به تشکیل پیل الکتروشیمیایی و در نتیجه خوردگی در آلومینیوم خواهد شد.
- افزایش دما و سرعت سیال به عنوان دو پارامتر مؤثر در ایجاد خوردگی سایشی در آلیاژهای آلومینیومی شناخته می‌شوند.
- در آب با خلوص بالا خوردگی آلومینیومی با شروع سریع خوردگی و سپس تقریباً ثابت ماندن آن تداوم می‌یابد. در این حالت تهاجم، یکنواخت و بدون حفره دار شدن است [۲۲].
- بنابراین با توجه به نتایج فیزیکوشیمیایی آب گردشی و نتایج حاصل از آزمون‌های XRD و XRF رسوب زیرکش کندانسور واحد ۱، راهکارهای زیر جهت کنترل و کاهش خوردگی در سیستم خنک کننده خشک این نیروگاه پیشنهاد می‌گردد:
- کنترل شرایط محیطی در صورت امکان، مانند کاهش ورود آلاینده‌های خورنده
- حذف اکسیژن خورنده و مازاد از آب به وسیله تجهیزات مکانیکی یا بازدارنده‌های شیمیایی (هیدرازین)
- پایش و کنترل دقیق pH در بین مقادیر ۸/۵-۸/۲ در آب گردشی برج خنک کننده خشک
- اصلاح خواص سطح و استفاده از پوشش‌های محافظ (مانند پوشش‌های اپوکسی یا پوشش‌های مخصوص فین‌های آلومینیومی)
- عدم مجاورت با فلزات دیگر: حضور هم‌زمان آلومینیوم، فولاد کربنی و آلیاژهای مسی در سیستم خنک کن مدار بسته باعث تشدید خوردگی گالوانیکی می‌گردد. براساس استاندارد EPRI، عدم ایزولاسیون الکتریکی فلزات غیرهمجنس، همراه با انتخاب نامناسب رژیم شیمیایی می‌تواند منجر به تشدید هم‌زمان خوردگی گالوانیکی فولاد کربنی و انحلال آلومینیوم شود [۲۳].

- شست و شوی دوره‌ای پره‌ها برای حذف گردوغبار، نمک و آلاینده‌ها
- استفاده از آب با کیفیت مناسب برای شست و شو و جلوگیری از باقی ماندن املاح
- بازرسی دوره‌ای و تعویض پره‌های آسیب‌دیده پیش از گسترش خوردگی
- کنترل و تغییر رژیم شیمیایی و بکارگیری از بازدارنده‌های خوردگی همچون کرومات‌ها، نیتريت‌ها، مولیبدات‌ها و ارتوفسفات‌ها [۲۴-۲۶]: بازدارنده‌ها با برهمکنش با سطح فلز، خوردگی را کاهش داده و سرعت واکنش‌های خوردگی الکتروشیمیایی را کاهش می‌دهند. مولیبدات/نیتريت/سیلیکات/بورات؛ این مواد شیمیایی عمدتاً در برج‌های خنک‌کننده مدار بسته برای مهار خوردگی استفاده می‌شوند. در کار حاضر با بکارگیری از مولیبدات به همراه تری‌آزول تولیل (TTA) به عنوان بازدارنده‌های مؤثر خوردگی و کنترل pH بین مقادیر ۸/۲ تا ۸/۵ با هیدرازین بهینه‌ترین حالت برای کنترل خوردگی آلومینیوم و حفظ پایداری شیمیایی آب در سیستم خنک‌کننده خشک نیروگاه مشاهده گردید.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت پایش و جلوگیری از خوردگی در صنایع بویژه نیروگاه‌های کشور، پیاده‌سازی و اجراء برنامه‌های پایش و نظارت در راستای افزایش عمر و بهبود کارایی تجهیزات توجه زیادی را به خود جلب کرده است. از اینرو در پژوهش حاضر با توجه به خوردگی‌های حادث شده در سیکل خنک‌کننده خشک واحد یک نیروگاه منتخب، بررسی و ارزیابی پارامترهای مؤثر آب سیکل خنک‌کن از قبیل آب دمین (جبرانی) و آب گردشی برج خشک انجام گرفت. آنالیز ICP-MS نشان می‌دهد که میزان آلومینیوم در آب گردشی برابر با ۲۶۰ ppb می‌باشد که خوردگی شدید این فلز را نشان می‌دهد. بنابراین آنالیزهای XRD و XRF از رسوب زیرکش کندانسور برج خنک‌کننده انجام گرفت که نتایج این آزمون‌ها مؤید وجود Al_2O_3 در رسوب و وجود خوردگی آلومینیوم می‌باشد. عدم کنترل دقیق pH و افزایش آن به بالای ۸/۵ و همچنین وجود اکسیژن مازاد در آب گردشی از جمله پارامترهای مؤثر در افزایش ضخامت لایه پوششی اکسید آلومینیوم می‌باشد که عواملی چون FAC و توربالانس منجر به جدایش این لایه به داخل محیط و افزایش خوردگی آلومینیوم می‌شود. بنابراین ارائه راهکارهایی از قبیل پایش و کنترل دقیق pH (۸/۲-۸/۵)، حذف اکسیژن مازاد (افزودن هیدرازین)، استفاده از پوشش‌های مداوم و اصلاح خواص سطح، کنترل و تغییر رژیم شیمیایی و بکارگیری از بازدارنده‌های خوردگی (مولیبدات و تری‌آزول تولیل) در راستای کنترل و کاهش خوردگی در سیستم خنک‌کن خشک این نیروگاه پیشنهاد می‌گردد.

۵- سپاسگزاری

نویسندگان مقاله و پژوهش حاضر از حمایت‌های مالی پژوهشگاه نیرو و همکاری و مساعدت نیروگاه مراتب قدردانی را به عمل می‌آورد.

۶- منابع

- [1] F. Dai, Z. Xu, F. Shi, L. Yan, X. Pang and K. Gao, "Mechanical and corrosion behaviors of 17-4PH martensitic stainless steel after 3.5 years of service in nuclear power plant secondary loop environment," *Corrosion Science*, vol. 270, pp. 114029, 2026.
- [2] C. Du , X. Wang , Q. Huang and Y. Zhang, "Corrosion behavior of Cr steel tube in ultra-supercritical power plants under the sulfidation-oxidation coupling effect," *Anti-Corrosion Methods and Materials*, vol. 73, pp. 544-553, 2026.
- [3] M. Shiri, M. Amirjan, D. Rezakhani and S. Naghdali, "Investigation of copper corrosion behavior subjected to power plants' atmosphere," *Materials Today Communications*, vol. 49, pp. 114037, 2025.
- [4] A. Jahangiri, M.M. Yahyaabadi and A. Sharif, "Exergy and economic analysis of using the flue gas injection system of a combined cycle power plant into the Heller Tower to improve the power plant performance," *Journal of Cleaner Production*, vol. 233, pp. 695-710, 2019.
- [5] C. Shi, Z. Li, Y. Tang, J. Chen, B. Lei, H. An, S.Wang, G. Liu and Y. Shao, "Multi-Factor Coupling Effects on the Electrochemical Corrosion Behavior and Mechanism of 7A04 Aluminum Alloy," *Surfaces and Interfaces*, In Press, 2026.
- [6] M. Hao, H. Tan, W. Yang, D. Yue, L. Gao, Z. Wang and C. He, "Effect of pH on long-term corrosion protection of Zn doped MgAl-LDHs coatings by in situ growth on 5052 aluminum alloy," *Surfaces and Interfaces*, vol. 64, 2025.
- [7] D. Wang, A. Leong, Q. Yang and J. Zhang, "Corrosion behavior of aluminum alloy in simulated nuclear accident environments regarding the chemical effects in GSI-191," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 54, pp. 4062-4071, 2022.
- [8] I.B. Obot, N.O. Obi-egbedi and S.A.Umoren, "The synergistic inhibitive effect and some quantum chemical parameters of 2,3-diaminonaphthalene and iodide ions on the hydrochloric acid corrosion of aluminium," *Corrosion Science*, vol. 51, pp. 276-282, 2009.
- [9] G. Williams, A.J. Coleman and H.N. Mc Murray, "Inhibition of Aluminium Alloy AA2024-T3 pitting corrosion by copper complexing compounds," *Electrochimica Acta*, vol. 55, pp. 5947-5958, 2010.
- [10] S. Safak, B. Duran, A. Yart and G. Turgoglu, "Schiff bases as corrosion inhibitor for aluminium in HCl solution," *Corrosion Science*, vol. 54, pp. 251-259, 2012.
- [11] K.D. Ralston, D. Fabijanic and N. Birbilis, "Effect of grain size on corrosion of high purity aluminium," *Electrochimica Acta*, vol. 56, pp. 1729-1736, 2011.
- [12] D. Chen, K. Howe, J. Dallman and B. Letellier, "Corrosion of aluminium in the aqueous chemical environment of a loss-of-coolant accident at a nuclear power plant," *Corrosion Science*, Vol 50, pp. 1046-1057, 2008.
- [13] P. Tamara and N. Pvel, "Behavior of aluminium corrosion products in water-steam cycle of power plant," PREPRINT-ICPWS XV, Berlin, pp. 8-11, 2008.
- [14] D.S. Abraham, H. Kanagasabapathy and R. John, "Evaluation of Corrosion Behaviour for Aluminium Alloy 7075 in 5% NaCl Solution under Slightly Varying Temperature," *Advanced Materials*, vol. 984, pp. 557-563, 2014.
- [15] P. Lacková, M. Halama and L. Dragošek, "The Corrosion Properties of EN AW 7075 Aluminium Alloy in Power Industry," *Materials Science*, vol. 811, pp. 83-87, 2015.
- [16] J. Xiao, J. Ren, S. Xiao, H. Zhang, J. Chen, Y. Ren, C. Liu and C. Jia, "Corrosion behavior of different alloys in novel chloride molten salts for concentrating solar power plants," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 286, pp. 113531, 2025.



- [17] Q. Zuopeng and T. Xinli, "Anti corrosion system for high parameter garbage power plant based on Analytic Hierarchy Process Fuzzy comprehensive evaluation, *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*," vol. 12, pp. 100223, 2025.
- [18] M. Al-Abed Allah and M. Arroussi, "Osman K. Siddiqui, Muhammad Yusuf, Timothy N. Hunter, Afaque Shams, Ihsan ul Haq Toor, Flow accelerated corrosion in nuclear power plants: a detailed review on mechanisms, mitigation, and management," *Engineering Failure Analysis*, vol. 183, 2026.
- [19] A. R. Sardarian, H. Eslahi and M. Esmaeilpour, "Green, cost-effective and efficient procedure for Heck and Sonogashira coupling reactions using palladium nanoparticles supported on functionalized $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$ by polyvinyl alcohol as a highly active, durable and reusable catalyst," *Applied Organometallic Chemistry*, vol. 33, pp. e4856, 2019.
- [20] Q. Ma, H. Li, Y. Liu, M. Liu, X. Fu, S. Chu, H. Li and J. Guo, "Facile synthesis of flower-like $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ architectures with self-assembled core-shell nanorods for superior TEA detection," *Current Applied Physics*, vol. 21, pp.161-169, 2021.
- [21] M.S. Lv, G.L. Chen, T. T. Wang, Y.Y. Xin, Z.P. Deng, Y.M. Xu, L.H. Huo and S. Gao, "Willow catkins-assisted synthesis of $\text{ZnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ hetero-tubes for chemiresistive dibutylamine sensors operated at 130 °C," *Sensors and Actuators B: Chemical*," vol. 417, pp. 136203, 2024.
- [22] Battelle Pacific Northwest Laboratories, Prepared for the Energy Research and Development Administration under Contract, E(45-1), 1830, 1976.
- [23] Comprehensive Cycle Chemistry Guidelines for Combined Cycle/Heat Recovery Steam Generators (HRSGs), *Technical report*, 2013.
- [24] M. Chinisaz, M. Soleimani, M. Esmaeilpour and M. Ghahraman Afshar, "Application of novel chemical regimen in a thermal power plants' cooling tower," *Energy Reports*, vol. 15, pp.109010, 2026.
- [25] A. Yousefpour, M. Mehdizadeh, H. Ghaseminejad, M. Esmaeilpour, N. Abdi, M. Valaee and M. Esmaeilzadeh, "Investigating corrosion caused by improper operation in CWT regime of a combined cycle power plant; Causes and solutions, *Energy Equipment and Systems*, vol. 13, pp. 35-57, 2025.
- [26] M. Ghahraman. Afshar, M. Azimi, N. Habibi, H. Masihi, and M. Esameilpour, "Batch and continuous bleaching regimen in the cooling tower of Montazer Ghaem power plant," *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 11, pp. 100339, 2023.