



Review Article



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2027039.1959



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

A Review of Methods for Controlling and Monitoring Microbial Corrosion in Power Plant Cooling Sections

Majid Mirzaee^{1*}, Abbas Yousefpour², Tayyebah Mohebbi³

¹ Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute

² Assistant professor, Chemistry and Process Research Group, Niroo Research Institute

³ Ph.D Student, Chemistry Department, Kashan university, Kashan, Iran

Received: 21 Feb 2024 Accepted: 29 Apr 2024

Abstract

Biological fouling and microbial corrosion can significantly affect industrial cooling systems' efficiency. The study suggests that low concentrations of chlorine in seawater can be effective in inhibiting biological fouling and consequent corrosion. It highlights that chlorine interacts with components in seawater and that maintaining a residual chlorine concentration below 3 micromoles at condenser outlets is highly effective. A concise review of antifouling methods includes alternatives to chlorination and a monitoring strategy that can enhance treatments. Additionally, the review encompasses various approaches for anti-fouling methods and monitoring to improve treatments. Through electrochemical monitoring and optimized treatments, operators can uphold device performance and oversee the production of halogen-containing by-products in industrial cooling facilities.

Keyword: Microbial Corrosion, Chlorination, Copper Alloys, Biofilm Monitoring

* mjmirzaei@nri.ac.ir

Please Cite This Article Using:

Mirzaee, M., Yousefpour, A., Mohebbi, T., "A Review of Methods for Controlling and Monitoring Microbial Corrosion in Power Plant Cooling Sections", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 85, pp. 20-36, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2024.2027039.1959



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

مروری بر روش‌های کنترل و پایش خوردگی میکروبی در قسمت‌های خنک‌کننده نیروگاهی

مجید میرزایی^{1*}، عباس یوسف پور²، طیبه محبی³

¹ عضو هیات علمی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، استادیار، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
² عضو هیات علمی گروه پژوهشی شیمی و فرآیند، استادیار، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران
³ دانشجوی دکتری تخصصی، دانشگاه کاشان، گروه شیمی، کاشان، ایران

دریافت: 1402/12/02 پذیرش: 1403/02/10

چکیده

پدیده رسوب‌گذاری زیستی¹ و خوردگی می‌توانند راندمان سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی را به شدت تحت تأثیر قرار دهند. این مقاله نشان می‌دهد که استفاده از کلر به میزان کم در آب دریا می‌تواند به‌طور مؤثری از رسوب‌گذاری زیستی و خوردگی ناشی از آن جلوگیری کند. گزارش‌ها تأکید دارند که کلر با برمید، آمونیاک و مواد آلی موجود در آب دریا واکنش می‌دهد، در نتیجه روش مقابله و مدیریت باید به‌گونه‌ای صورت گیرد که غلظت باقی‌مانده کلر در خروجی کندانسورها کمتر از $3\mu\text{M}$ باشد. جایگزین‌های کلر نیز روش مقابله و مدیریت را بهبود می‌دهد. همچنین، در این مطالعه به بررسی روش‌های مختلف ضد رسوب‌گذاری و رویکردهای نظارتی که می‌توانند به بهبود این روش مقابله و مدیریت‌ها کمک کنند، پرداخته شده است. پایش دقیق الکتروشیمیایی و روش مقابله و مدیریت‌های بهینه‌سازی‌شده به اپراتورهای تأسیسات خنک‌کننده صنعتی کمک می‌کند تا عملکرد دستگاه‌ها را حفظ کنند و همزمان بر تولید محصولات جانبی حاوی هالوژن نظارت داشته باشند.

کلمات کلیدی: خوردگی زیستی، کلر زنی، آلیاژهای مس، پایش رسوب‌زیستی

* mjmirzaei@nri.ac.ir

¹ Biofouling

1- مقدمه

رسوب‌زیستی در کانال‌های خنک‌کننده و ایجاد لایه‌های زیستی بر روی مبدل‌های حرارتی، دو مشکل اصلی هستند که کارکرد سیستم‌های خنک‌کننده را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. بهره‌وری و قابلیت اطمینان یک نیروگاه به‌طور چشم‌گیری به یکپارچگی و تمیزی کندانسورها وابسته است. در حقیقت، بیش از 5 درصد از بازده نیروگاه ممکن است به خاطر لایه‌های زیستی از بین برود. در بدترین شرایط، اگر موجودات دریایی بزرگ مانند صدف‌ها، سرپولیدها، جلبک‌ها و غیره لوله‌های کندانسور را مسدود کنند، واحدهای تولید برق که از آب دریا به‌عنوان خنک‌کننده استفاده می‌کنند، مجبور به توقف عملیات خواهند شد [1]. رسوب‌زیستی، نخستین لایه‌ای است که به‌عنوان زیست‌رسوب بر روی سطوح سازه‌های مرطوب در ارتباط با آب‌های طبیعی شکل می‌گیرد. اگر کنترل رشد آن به‌درستی صورت نپذیرد، ممکن است زیست‌خوردگی یا خوردگی میکروبی² (MIC) اتفاق بیفتد [2]. بسیاری از مواد فلزی که در کارخانه‌ها به‌کار می‌روند، مانند فولاد ضدزنگ و آلیاژهای مسی که در مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شوند، تحت تأثیر این نوع خوردگی قرار می‌گیرند. آلیاژهای مس نیز از این قاعده مستثنی نیستند، چرا که رسوب‌زیستی‌ها می‌توانند میکروارگانیسم‌ها را در برابر اثرات سمی حل‌شدن مس محافظت کنند [3]. مبدل‌های حرارتی ساخته‌شده از تیتانیوم از خوردگی میکروبی آسیب نمی‌بینند، اما کاهش انتقال حرارت در اثر رسوب‌زیستی می‌تواند به یک مشکل جدی تبدیل شود [4]. مطالعات نشان داده‌اند که نرخ خوردگی، به‌خصوص پس از گذراندن اولین مرحله رشد رسوب‌زیستی، به‌طور مستقیم با عواملی مانند ضخامت رسوب‌زیستی، زبری آن یا تعداد میکروارگانیسم‌های موجود روی آن ارتباط ندارد [3].

یک مطالعه‌ای که توسط کارشناسان اروپایی انجام شده (BRRT-CT98-5084، برنامه 1999-2003 UE) و براساس تجربیات شخصی آن‌ها بوده، نشان می‌دهد که روش‌های متعددی برای نظارت بر خوردگی در آزمایشگاه‌ها موفقیت‌آمیز هستند، اما تعداد کمی از این روش‌ها در محیط‌های واقعی کاربرد دارند. برخی از این روش‌ها در نظارت بر رسوب‌زیستی و برخی دیگر در نظارت بر خوردگی بسیار مؤثرند، اما هیچ‌کدام به تنهایی نمی‌توانند به‌طور کامل توسعه حملات میکروبی را در تمام ترکیب‌های ممکن از فلزات، محیط‌ها و رسوب‌زیستی‌ها دنبال کنند. با این حال، تجربیات اخیر موفق در استفاده صنعتی از پروب‌های الکتروشیمیایی یکپارچه برای نظارت بر رسوب‌زیستی و خوردگی نشان می‌دهد که این رویکرد الکتروشیمیایی می‌تواند به اندازه کافی مناسب باشد تا به اپراتورهای کارخانه‌ها در اجرای روش مقابله و مدیریت‌های ضد رسوب و ضد خوردگی کمک کند [5]. بهترین فناوری موجود برای اجزای خنک‌کننده صنایع، که در سند مرجع دستورالعمل EC 1/2008 آمده، به اهمیت نوآوری در ابزارهای نظارتی اشاره می‌کند و نقش آن‌ها را برای نیروگاه‌هایی که از سیستم‌های خنک‌کننده با قابلیت خوردگی بالا (مانند آلیاژهای مس و فولاد) استفاده می‌کنند و همچنان به روش مقابله و مدیریت‌های شیمیایی مانند کلریناسیون نیاز دارند [6]، بسیار تأکید می‌کند. ابزارهای نظارت آنلاین [7] به بهبود نحوه عملیات و نگهداری سیستم‌ها کمک کرده و عملکرد تأسیسات انتقال حرارت را حفظ می‌کنند و در عین حال تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از روش مقابله و مدیریت‌های شیمیایی را به حداقل می‌رسانند. تجربیات ویژه‌ای در زمینه نظارت الکتروشیمیایی یکپارچه بر روی لوله‌های کندانسور ساخته شده از آلیاژ مس اخیراً در چارچوب شبکه آموزشی اولیه درباره زیست‌خوردگی (BIOCOR-ITN) صورت گرفته است [8]. در همین چارچوب

² Microbial Corrosion

شبکه‌ای BIOCOR-ITN (زیربرنامه شماره 3)، رویکردهای ضد رسوب‌گذاری نیز از طریق بررسی پارامترهای شیمیایی - فیزیکی مهم که ممکن است در جلوگیری از رشد رسوب‌زیستی بر روی مواد رایج در تبادل‌گرهای حرارتی (مانند آلیاژهای مس، فولاد ضدزنگ و تیتانیوم)، که در معرض آب دریا یا آب شیرین قرار دارند، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مطالعات به دنبال کنترل جذب بیومولکول‌ها هستند که اولین قدم در تشکیل رسوب‌زیستی است و این کار را با تغییر خصوصیات سطحی ماده (به خصوص خاصیت آب‌گریزی) انجام می‌دهند [8, 9]. در مورد آلیاژهای مس، یک رویکرد پایه الکتروشیمیایی با تحلیل‌های سطحی ترکیب شده است [10]. در این مطالعات از آلبومین سرم گاوی (BSA³) به عنوان یک پروتئین نمونه استفاده شده، زیرا هزینه کمی دارد و اطلاعات خوبی از خصوصیات آن در دست است [11]. مطالعات انجام شده با استفاده از طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس⁴ (XPS) و طیف‌سنجی جرمی یون‌های ثانویه⁵ (ToF-SIMS) در این شماره منتشر شده‌اند [12].

این مقاله مروری شامل چند بخش است که ابتدا روش‌های مختصری از تمیزکاری در عمده‌صنایعی که با سیستم‌های خنک‌کننده سر و کار دارند بیان می‌شود. در بخش بعدی رایج‌ترین روش‌های موجود برای از بین بردن زیست‌کش‌ها معرفی شده که معروف‌ترین آن کلرزی بوده و در ادامه روش‌های جایگزین آن معرفی خواهد شد. در نهایت پایش دقیق الکتروشیمیایی و روش مقابله و مدیریت‌های بهینه‌سازی شده برای ارزیابی دستگاه‌ها بیان خواهد شد.

2- روش‌های تمیز کردن

روش‌های تمیزکاری باید هم در نیروگاه‌های بزرگ و هم در سایر سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی کوچکتر که با مشکل رسوب‌گذاری زیستی مواجه هستند، به کار برده شوند. این روش‌ها عمدتاً شامل روش‌های غربالگری و تمیزکاری فیزیکی به جز استفاده از مواد شیمیایی است [1, 13]. تمیزکاری مکانیکی تجهیزات و فیلتر کردن آب (از طریق فیلترهای چرخان و فیلترهای مخصوص صدف‌ها) از روش‌های متداول می‌باشد. این روش‌ها شامل تمیزکاری مداوم لوله‌های کندانسور با استفاده از توپ‌های سخت یا برس‌ها، تمیزکاری دستی، استفاده از ریک‌های زباله و فیلترهایی با توری‌های مختلف می‌باشند. روش‌های فیزیکی می‌توانند به طور منظم برای روش مقابله و مدیریت‌های ضد رسوب در سیستم‌های خنک‌کننده با طراحی مناسب به کار روند، که عمدتاً شامل موارد زیر است [14, 15]:

- حفظ سرعت‌های بالا به اندازه کافی برای جلوگیری از چسبیدن موجودات (سرعت بیشتر از 2 m/s): نگه داشتن سرعت آب در سطح بالایی (تقریباً 2 متر بر ثانیه یا بیشتر) برای جلوگیری از چسبیدن و تجمع موجوداتی مانند جلبک‌ها، صدف‌ها و دیگر عوامل رسوب‌زا، اهمیت دارد. سرعت آب بالا به جدا سازی و حذف فیزیکی هرگونه موجودات که ممکن است شروع به تجمع بر روی سطوح سیستم خنک‌کننده کنند، کمک می‌کند. این شستشو با استفاده از سرعت به جلوگیری از تشکیل لایه‌های رسوبی که می‌توانند بازدهی انتقال حرارت را کاهش دهند و باعث افزایش افت فشار در سیستم شوند، کمک می‌کند.
- افزایش دما: بالا بردن دمای آب خنک‌کننده تا 40 درجه سانتی‌گراد برای مدتی چند ساعت: بالا بردن دمای آب خنک‌کننده به حدود 40 درجه سانتی‌گراد برای چند ساعت نیز می‌تواند در روش مقابله و مدیریت‌ها

³ Bovine Serum Albumin

⁴ X-ray photoelectron spectroscopy

⁵ Time-of-flight secondary ions mass spectrometry

ضد رسوب مؤثر باشد. بسیاری از موجوداتی که می‌توانند سیستم‌های خنک‌کننده را رسوب زده کنند، تحمل دمایی محدودی دارند و نمی‌توانند در این دماهای بالا زنده بمانند یا به سطوح بچسبند. روش مقابله و مدیریت‌ها حرارتی می‌تواند به از بین بردن موجوداتی که شروع به استقرار در سیستم کرده‌اند، کمک کند و تمیز کردن فیزیکی مواد مرده یا جدا شده را آسان‌تر می‌سازد.

در نتیجه، ترکیب حفظ سرعت آب بالا و افزایش دوره‌ای دمای آب، دو روش فیزیکی مؤثر برای تمیز کردن و جلوگیری از رسوب در کاربردهای سیستم خنک‌کننده هستند. سرعت به حذف مکانیکی رسوبات کمک می‌کند، در حالی که افزایش دما موجودات را از بین می‌برد تا در فرآیند تمیزکاری یاری رساند.

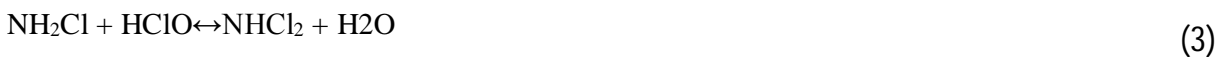
بسیاری از نیروگاه‌ها دارای سیستم تمیزکاری مداومی هستند که بر پایه چرخش توپ‌هایی از جنس لاستیک اسفنجی در داخل لوله‌های کندانسور کار می‌کند [16]. این توپ‌ها دارای چگالی مشابه آب و قطری اندکی بیشتر از قطر داخلی لوله‌های کندانسور هستند. این روش مقابله و مدیریت اغلب به صورت هم‌افزایی با روش‌های شیمیایی به کار گرفته می‌شود و برای جلوگیری از رسوب‌گذاری میکروبی بسیار مؤثر است. این روش یکی از روش‌های پیشنهادی است که به عنوان بهترین فناوری موجود برای سیستم‌های آب خنک‌کننده توصیه می‌شود.

3- کلرزی

کلرزی رایج‌ترین زیست‌کشی است که برای مقابله و مدیریت‌های شیمیایی ضد رسوب‌گذاری زیستی در آب‌های صنعتی به کار می‌رود. اغلب اوقات، اپراتورهای نیروگاه‌ها به اشتباه از اصطلاح "کلرزی" برای اشاره به دوز یا تولید گونه‌های اکسیدانی به جز کلر (یا هیپوکلریت) استفاده می‌کنند، مانند دی‌اکسید کلر که یک محصول جایگزین است. همچنین، در مورد آب دریا که غلظت برمید به طور طبیعی تا 0/87 mM بالا است، قدرت اکسیدکنندگی کلر به سرعت به برمید منتقل می‌شود و تعادل واکنش (1) به سرعت به سمت راست حرکت می‌کند و در نتیجه، فرآیند "کلرزی" به "برمیناسیون" تغییر می‌یابد.

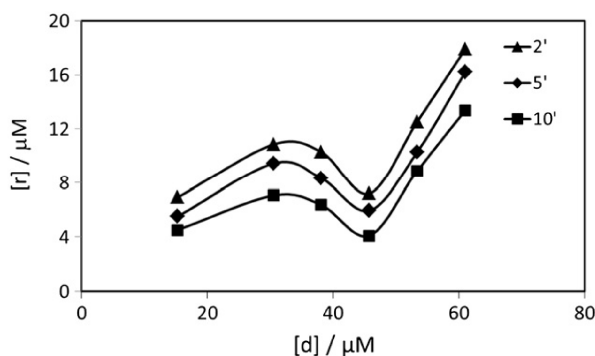


محصولات جانبی تشکیل شده از واکنش کلر با گروه آمونیاک در واکنش‌ها نشان داده شده است. نسبت‌های استوکیومتری واکنش‌های 1 تا 6 به دما، زمان واکنش، pH و نسبت اولیه واکنش دهنده‌ها بستگی دارد [17, 18]



در نهایت، کلر (همانند سایر اکسیدان‌های قوی) با تعداد زیادی از ترکیبات دیگر، چه آلی و چه معدنی (مانند عوامل کاهنده‌ای مثل هیدروژن سولفید، یون‌های آهن دو ظرفیتی، یون‌های منگنز دو ظرفیتی و یون‌های نیتريت) واکنش

می‌دهد. این واکنش‌ها «مقدار کلر مطلوب» آب را تشکیل می‌دهند (تفاوت غلظت مصرف شده و اکسیدکننده باقیمانده که پس از یک زمان ثابت اندازه‌گیری می‌شود، که به صورت Cl_2 بیان می‌شود). با توجه به محتوای بالای مواد آلی بیولوژیکی (به ویژه در طول تابستان)، که پس از تجزیه پروتئین‌ها، گروه‌های آمونیاکی را تشکیل می‌دهند، کلر خواهی آب دریا به طور معمول قادر است در چند دقیقه تقریباً به طور کامل کلر فعال مصرف شده که معمولاً کمتر از $50 \mu M$ ($3-1 \text{ mg/lit}$) است را مصرف کند. روندهای تخریب معمولی در شکل 1 نشان داده شده است، جایی که افزایش غلظت کلر مصرف شده (d) در محور افقی و روندهای مربوط به غلظت اکسیدان باقیمانده (r) در نمودار ارائه شده است. درصد کلر مصرفی در جدول 1 گزارش شده است. درصد کلر مصرفی در مورد آب مقطر (شاهد) که با کمترین غلظت کلر $15/25 \mu M$ اضافه شده نیز در جدول 1 گزارش شده است.



شکل 1- اکسیدان باقی مانده [R] به عنوان تابعی از مقدار مصرف کلر [D] در زمان‌های تماس مختلف (2، 5، 10 دقیقه) در آب دریا. نمونه‌برداری شده از سیستم خنک‌کننده یک نیروگاه در ایتالیا (دریای آدریاتیک) [19]

اطلاعات نمایش داده شده در شکل 1 و جدول 1 به غلظت‌های اکسیدان باقی‌مانده کلر (چه به صورت آزاد و چه ترکیب شده با آمونیاک) در دمای 24 درجه سانتی‌گراد اشاره دارند، که پس از فواصل زمانی مختلف (2، 5 و 10 دقیقه) از افزودن غلظت‌های متفاوتی از هیپوکلریت سدیم اندازه‌گیری شده‌اند. نمونه‌برداری از آب دریا در ورودی یک سیستم خنک‌کننده و قبل از هر نوع روش مقابله و مدیریت شیمیایی انجام شده است. روش رنگ‌سنجی مبتنی بر واکنش ترکیب اکسیدان با DPD⁶ برای اندازه‌گیری غلظت اکسیدان کل⁷ (TOC) طبق استاندارد ISO 7393-2 استفاده شد. حساسیت به غلظت‌های کمتر از $0/4 \mu M$ ($0/03 \text{ mg/lit}$)، با رنگ صورتی قابل مشاهده برای چشم انسان، این روش را به استاندارد پرکاربرد تبدیل می‌کند و برای اپراتورهای مبتدی نیز مناسب است. وقتی میزان کلر به $45/76 \mu M$ ($3/25 \text{ mg/lit}$) رسید، بیشترین کاهش کلر را شاهد بودیم که این مقدار، به عنوان "نقطه شکست"⁸ [17] شناخته می‌شود. این اتفاق به خاطر واکنش سریع اکسیداسیون کلرامین‌ها (واکنش‌های 3 تا 4) است که بلافاصله پس از افزایش دوز کلر در حضور مواد نیتروژن‌دار (واکنش (2)) رخ می‌دهد. پس از رسیدن به "نقطه شکست"، که مقادیر آن به میزان مواد کاهنده معدنی و نوع و غلظت مواد آلی و گروه‌های آمونیاکی بستگی دارد، میزان اکسیدان باقی‌مانده به صورت یک رابطه خطی با غلظت کلری که به تنهایی اضافه شده، تغییر می‌کند.

⁶ N,N-diethyl-p-phenylendiamine

⁷ Total Oxidant Concentration

⁸ Break-point

جدول 1- درصد کلر مصرفی نسبت به مقدار کلر [d] پس از 2، 5، 10 دقیقه در آب مقطر یا آب دریا [19]

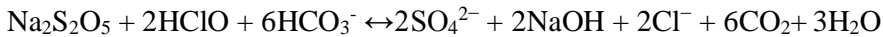
عنوان	مقدار کلر (μM)	درصد (%) / زمان بر حسب دقیقه از دوز کلر		
		2 (درصد) / 2 (دقیقه)	5 (درصد) / 5 (دقیقه)	10 (درصد) / 10 (دقیقه)
آب مقطر	15/25	5/82	5/82	10/43
آب دریا	15/25	54/76	63/99	70/45
	30/51	64/45	69/07	76/92
	38/13	73/04	78/21	83/38
	45/76	84/3	87/07	91/07
	53/39	76/52	80/74	83/38
	61/01	70/68	73/45	78/07

قدرت اکسیدکنندگی بالای اسید هیپوکلریت و هیپوبرومیت که در آب دریا به وجود می‌آیند، موجب غیرفعال شدن آنزیم‌های حیاتی متابولیسم (و دیگر اجزای سلولی) می‌شود و در نتیجه، تمام میکروارگانیسم‌ها در چند ثانیه یا دقیقه پس از تماس از بین می‌روند (اثر زیست‌کشی). اثر زیست‌کشی فرم‌های ناجدا شده بسیار بیشتر از فرم‌های جدا شده است، چرا که قطبیت کمتر مولکول‌ها، عبور آن‌ها از غشاهای زیستی را آسان‌تر می‌کند. درصد اشکال تفکیک‌نشده بین هیپوکلریت و هیپوبرومیت در pH آب دریا (8/0-8/4) به شدت متفاوت است. در حالی که هیپوکلریت 80% تفکیک می‌شود، هیپوبرومیت 80% در pH بالاتر از 8 تفکیک‌نشده است [20]. این موضوع به همراه انتقال قدرت اکسیدانی از کلر به برمید (واکنش (1))، بازده کلرزی در آب دریا را در pH بالا بهبود می‌بخشد. با این حال، قدرت اکسیدکنندگی هر دو فرم برای تجزیه کامل مواد آلی حل شده در آب کافی نیست و منجر به تولید فرآورده‌های جانبی آلی پایدار می‌شود. مهم‌ترین این فرآورده‌ها، تری‌هالومتان‌ها (THMs) هستند که در آب همراه با اکسیدان‌های باقی‌مانده پایدار می‌مانند [21-23]. سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا CHCl_3 ، CHBr_3 ، CHCl_2Br و CHClBr_2 را جزو THM قرار داده است، چون مطالعات روی فرآورده‌های جانبی ضدعفونی آب آشامیدنی از دهه 1970 سمیت این مواد را نشان داده‌اند [21]. تری‌برومومتان به خصوص در طی کلرزی در آب دریا پس از واکنش (1)، از طریق واکنش‌های خودبه‌خود با مواد آلی تشکیل می‌شود. فرآورده‌های جانبی کلردار⁹ (CBPs) شامل دیگر محصولات جانبی غیر اکسیدکننده ارگانو-هالوژنه مانند هالواستونیتریل‌ها و ترکیبات حاصل از هیدرولیز آنها می‌باشد [24].

بروموفرم‌ها در زمان تخلیه سیستم‌های خنک‌کننده هنگام کلرزی با دوزهای بالاتر از $15 \mu\text{M}$ شناسایی شده‌اند [22]. تحقیقات بعدی نشان داده‌اند که روش مقابله و مدیریت با کلرزی با غلظت اکسیدانی معادل یا کمتر از $3 \mu\text{M}$ ، مقادیر قابل توجهی از هالومتان‌ها را تولید نمی‌کند [23]. با این حال، استفاده از کلرزی توسط قوانین در سرتاسر دنیا توصیه نمی‌شود. حد استاندارد غلظت کلر در هنگام تخلیه به منابع آب طبیعی معمولاً اکنون $3 \mu\text{M}$ (0/2 mg/lit) است. دوزدهی می‌تواند با در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله شرایط آب و هوایی محل، طراحی سیستم خنک‌کننده و نوع رسوب‌زدایی بیولوژیکی به صورت پیوسته یا گسسته باشد. به عنوان یک اصل احتیاطی، غلظت ماده اکسیدکننده (که به صورت کلر باقی‌مانده بیان می‌شود) به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بلافاصله پس از عبور از کندانسور کمتر از

⁹ chlorinated by-products

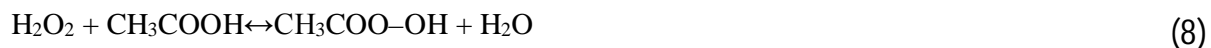
$3 \mu\text{M}$ باشد، این به خاطر اثر پاک‌کنندگی و افزایش دما است. هیپوکلریت سدیم اغلب در محل از طریق الکترولیز آب دریا تولید می‌شود [20]. این روش از استفاده از مخازن حاوی گاز کلر و خطرات ناشی از حمل و نقل محصولات با کامیون (در صورت استفاده مستقیم از NaClO در سیستم خنک‌کننده) جلوگیری می‌کند. برای پیشگیری از خطر تجاوز به حد مجاز محدودیت‌های تعیین شده در هنگام تخلیه، گاهی اوقات دی‌کلرزی (در صورت لزوم) با استفاده از (7) از مواد کاهنده مانند متابی‌سولفیت سدیم (واکنش (7)) یا دی‌اکسید گوگرد انجام می‌گیرد.



در حال حاضر، هیچ استاندارد مشخصی برای مدیریت خطر استفاده بیش از حد از این مواد شیمیایی وجود ندارد، که ممکن است به کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب منجر شود یا pH رودخانه‌ها و جریان‌های دریافت‌کننده را تغییر دهد. در برخی مناطق، استفاده از کلر به طور کلی ممنوع شده است (به عنوان مثال در ایتالیا و هلند). در این موارد، شناسایی و تولید کلر در تأسیسات و همچنین فرآیند دی‌کلرزی ممنوع است.

4- جایگزین‌های کلرزی

به دلیل قوانین سخت‌گیرانه، کلرزی به یک فرآیند حیاتی و دشوار برای مدیریت تبدیل شده و اغلب نادیده گرفته شده یا با محصولات جایگزینی که توسط بازار صنعتی پیشنهاد می‌شوند، جایگزین شده است. با این حال، تا به امروز هیچ یک از این جایگزین‌ها نتوانسته‌اند همزمان نیازهای صنعتی و استانداردهای ایمنی زیست‌محیطی را برای استفاده گسترده و واقعی برآورده کنند. دی‌اکسید کلر (ClO_2) یک استثنا به شمار می‌رود؛ در واقع، یک جایگزین صنعتی مناسب برای کلر است. اکنون چندین کاربرد ضدرسوب در نیروگاه‌ها با استفاده از ClO_2 در سیستم‌های باز و بسته در حال اجرا هستند، به خصوص در مکان‌هایی که استفاده از کلرزی ممنوع است. دی‌اکسید کلر با غلظت‌هایی پایین‌تر (تا ده برابر کمتر) نسبت به کلر با اسیدهای آمینه موجود در غشاهای باکتری‌ها، ویروس‌ها و پروتوزوآها واکنش داده و سلول‌های زیستی را غیرفعال می‌کند. مکانیزم شیمیایی اصلی درگیر، اکسیداسیون مواد آلی از طریق کاهش به کلرید است، بدون واکنش‌های میانی جایگزینی با ترکیبات آلی هالوژن‌دار، بنابراین مقادیر قابل توجهی از THMs تولید نمی‌کند، که کمتر از حد قابل اندازه‌گیری $1/5 \times 10^{-3}$ (0/1 $\mu\text{g/lit}$) است [5]. فرآورده‌های جانبی ناشی از تجزیه آن عمدتاً کلریت‌ها (و به میزان کمتر کلرات‌ها) هستند، که باید به عنوان ترکیبات پایدار در آب ضدعفونی شده به همراه دی‌اکسید کلر باقی‌مانده که همچنان فعال است، یافت شوند. چون ClO_2 می‌تواند در غلظت‌های بیش از 10% انفجاری باشد، معمولاً در راکتورهای ویژه و در محل تولید می‌شود، از طریق واکنش یک محلول رقیق سدیم کلریت (NaClO_2) با یک اسید قوی مثل HCl یا H_2SO_4 [25]. به تازگی، روش دیگری در بازار مطرح شده است که بر پایه واکنش محلول رقیق پراکسید هیدروژن با کلرات و اسید سولفوریک است [26]. دیگر محصولات اکسیدکننده مانند ازن و اسید پراستیک، در موارد خاصی به کار گرفته می‌شوند [27، 28]، اگرچه معمولاً در سیستم‌های خنک‌کننده استفاده نمی‌شوند. اسید پراستیک از واکنش گروه استیل با پراکسیژن تولید می‌شود و در محلول‌هایی که غلظت هیدروژن پراکسید و اسید استیک به اندازه یا بیشتر از پراستیک است، پایدار می‌شود (واکنش (8)). تعادل و پایداری پراکسید به شدت تحت تأثیر pH است. در pH معمول آب دریا، آنیون پراستیک ترجیح داده می‌شود.



وجود مقدار زیادی اکسیدان در آب معمولاً باعث تشدید خوردگی مواد می‌شود، به خصوص در مورد فولاد کربنی این مورد مشهود است [5]. چون غلظت لازم محلول اسید پراستیک برای جلوگیری از رسوب‌زدایی تقریباً ده برابر بیشتر از کلر (و بیشتر نسبت به دی‌اکسید کلر) است، در مورد سیستم‌های ساخته شده از فولاد کربنی، باید خوردگی به دقت زیر نظر گرفته شود و سطوح داخلی لوله‌ها محافظت شوند تا از خوردگی شیمیایی و همچنین خوردگی بیولوژیکی پیشگیری شود. معمولاً از پوشش‌ها یا لایه‌های محافظ (مانند رنگ، قیر، لاستیک، سیمان و غیره) برای حفاظت از فولاد کربنی در برابر خوردگی گسترده و فولاد زنگ‌زن حساس [29] در برابر خوردگی شیاری ناشی از رسوب‌زدایی بزرگ و خوردگی موضعی در نقاط جوش استفاده می‌شود. با این حال، عیوب پوشش ممکن است با گذشت زمان به نقاط خوردگی تبدیل شوند و مناطق جدیدی برای خوردگی مشخص شوند. پوشش‌های محلول (سمی) یا آزادساز و رنگ‌های ضدچسبندگی که میزان چسبندگی موجودات را کم می‌کنند، می‌توانند اثر سرعت را تقویت کنند و در تمیزکاری کمک‌کننده باشند. استفاده از سیلیکون‌ها هنوز به طور گسترده رایج نیست، عمدتاً به این دلیل که محصولات تجاری باید بر روی سطوح خشک اعمال شوند، که نیازمند 3 تا 4 هفته توقف فعالیت واحد است، اما می‌توانند هر 4 تا 5 سال یک بار تجدید شوند. لایه‌های اپوکسی، هرچند به عنوان مواد غیرسمی شناخته می‌شوند، ممکن است به سرعت فرسوده شوند [30]، به خصوص اگر دما بیش از 40 درجه سانتی‌گراد باشد. کوپلیمرهای آکریلیک، محصولات آزادسازی مس و دیگر رنگ‌های ضد رسوب که به طور معمول استفاده می‌شوند، نیاز به تجدید بیشتری دارند [31].

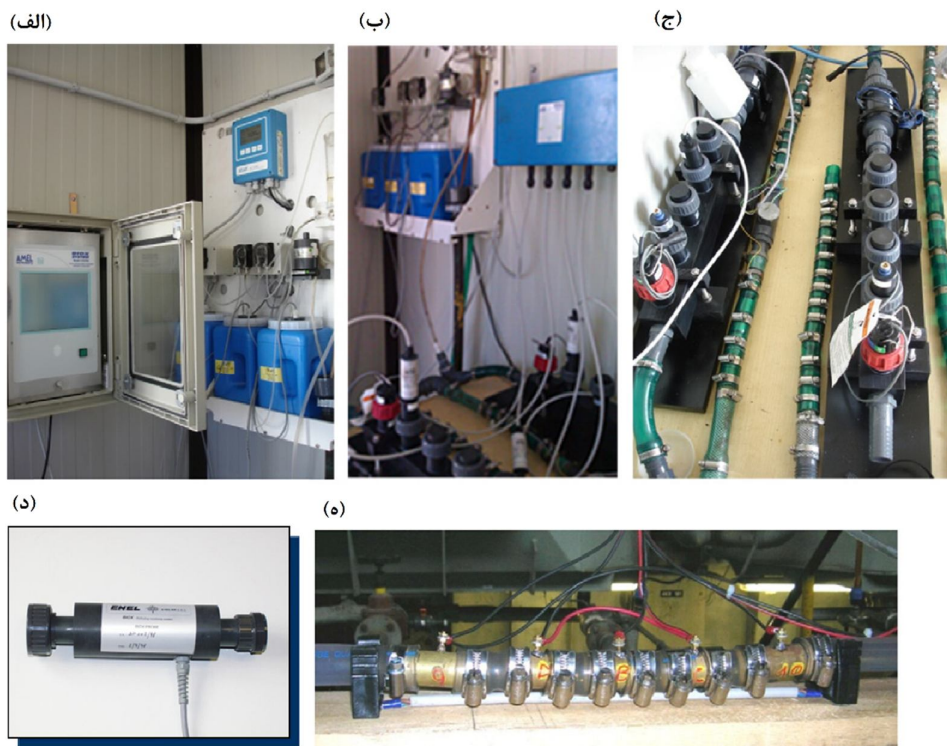
5- پایش و مانیتورینگ

روش رایج برای برآورد رسوب در لوله‌های کندانسور، محاسبه تبادل حرارت بر اساس مقادیر پارامترهای کندانسور، به خصوص فشار برگشتی است. وجود فشار برگشتی بالا در کندانسور معمولاً نشان‌دهنده وجود یک لایه ضخیم بیوفیلم است. در سال‌های اخیر، روش‌های نوینی برای پایش مرحله اولیه رشد رسوب‌زیستی توسعه یافته و به‌طور وسیعی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [32]. حسگرهای الکتروشیمیایی نسبت به مرحله اولیه رشد رسوب‌زیستی بسیار حساس بوده‌اند و سیستم خاصی به نام BioX برای نظارت بر عملیات اکسیدان (کلرزی و روش مقابله و مدیریت جایگزین) سیستم‌های خنک‌کننده پیاده‌سازی شده است. یک روش جامع پایش برای پیشگیری از رسوب‌زیستی و خوردگی‌زیستی شامل استفاده از انواع مختلفی از پروب‌های الکتروشیمیایی (شکل 2ج) در مسیر فرعی کندانسورهای خنک‌کننده آب می‌باشد.

دو نوع پروب الکتروشیمیایی لوله‌ای بسیار مهم شناخته شده‌اند [33]: اولی، پروب BioX (شکل 2د)، که به مراحل اولیه رشد رسوب‌زیستی و وجود اکسیدان‌ها در آب حساس است. دومین حسگر (شکل 2ه)، شامل پنج نمونه لوله‌ای از لوله‌های کندانسور است که برای اندازه‌گیری مقاومت پلاریزاسیون خطی¹⁰ (LPR) به صورت آنلاین طراحی شده‌اند. حسگرهای الکتروشیمیایی این خصوصیت را دارند که نیازی به تعمیر و نگهداری مکرر یا داشتن تخصص خاص، یا استفاده از مواد واکنش‌دهنده شیمیایی ندارند. پارامترهای فیزیکی-شیمیایی معمولاً توسط پروب‌هایی که در خط با حسگرهای الکتروشیمیایی قرار دارند (شکل 2ب) پایش می‌شوند و این بستگی به کاربرد دارد. نرخ جریان (که می‌تواند در بای‌پس به‌گونه‌ای تنظیم شود که تا حد امکان به نرخ جریان واقعی لوله‌های کندانسور نزدیک باشد) و دمای آب

¹⁰ Linear polarization resistance

همواره تحت نظارت هستند. در موارد حساس تر، کدورت، پتانسیل¹¹ ORP، پتانسیل خوردگی (برای مواد خاص)، و گونه‌های شیمیایی نیز اندازه‌گیری می‌شوند. علاوه بر این، برخی نمونه‌ها که از لوله‌های کندانسور در حال کار بریده شده‌اند، برای انجام مشاهدات دوره‌ای بصری، تعیین از دست دادن وزن، و سایر اندازه‌گیری‌های آفلاین اضافه شده‌اند. این نمونه‌ها معمولاً خط آزمایش هیدرولیکی را تکمیل می‌کنند، همانطور که در نمونه واقعی نشان داده شده در شکل 2 ج است. در نهایت، اگر قوانین ایجاب کنند، پایش غلظت اکسیدان باقی‌مانده در خروجی (از طریق سیستم‌های الکتروشیمیایی و/یا کلریمتریک) نیز انجام می‌شود. در سیستم‌های پیشرفته و یکپارچه‌ای مانند آنچه در شکل 2 ب گزارش شده، حسگرهای الکتروشیمیایی می‌توانند از طریق اتصال مستقیم یا سیگنال‌های فرکانس رادیویی با دستگاه‌های الکترونیکی و کامپیوتر ارتباط برقرار کنند. نرم‌افزار مخصوصی وجود دارد که روند به‌روز و مداوم پارامترهای تحت نظارت و جمع‌آوری داده‌ها را فراهم می‌کند. سیستم‌های تجاری نوین این قابلیت را دارند که از راه دور کنترل شوند و امکان دارد که روش مقابله و مدیریت انجام شده در چندین کارخانه را به‌طور همزمان و در لحظه از طریق یک ایستگاه کاری مرکزی نظارت کنند.



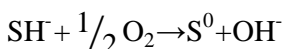
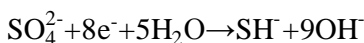
شکل 2- نماهایی از تجهیزات (الف و ب) و پروب‌های نظارت (ج) وارد شده در یک گذر هیدرولیکی سیستم آب خنک‌کننده یک نیروگاه، از جمله نمونه‌های لوله کندانسور (د) تصویر کاوشگر Biox و (ه) پروب خوردگی LPR [19]

5-1- رویکرد الکتروشیمیایی

روش LPR به طور گسترده‌ای برای سنجش سرعت خوردگی در محیط‌های واقعی به کار می‌رود، اما پروب‌های مورد استفاده معمولاً استاندارد هستند و نمی‌توانند دقیقاً شرایط لوله‌های کندانسور را تصویر کنند [34]. پروب Biox یک

¹¹ Oxidation-reduction potential

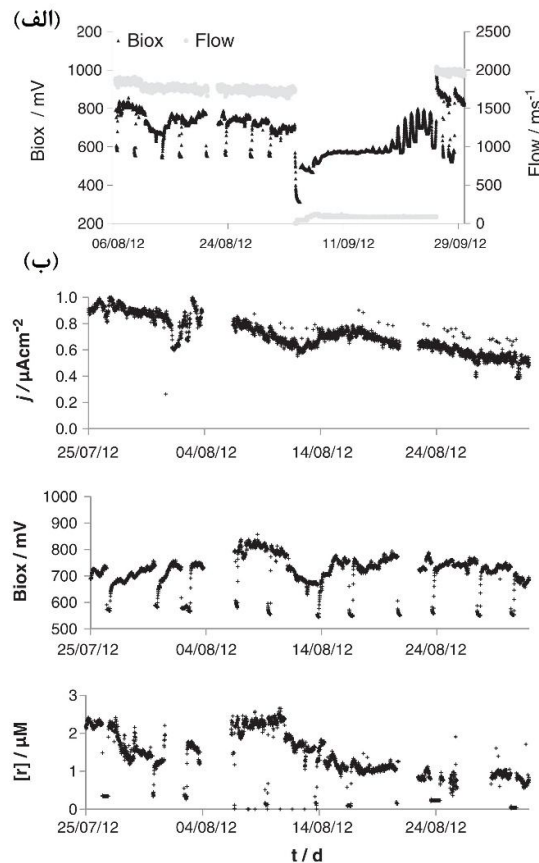
نوع "بیو-باتری" ویژه است که با افزایش رشد رسوب‌زیستی روی الکتروکاتدی خود، چگالی جریان آن بیشتر می‌شود. کاتد از جنس فولاد ضدزنگ ساخته شده و با استفاده از یک مقاومت الکتریکی با ارزش بالا به روی متصل می‌شود تا از حل شدن روی به‌طور قابل توجهی جلوگیری کند. سیگنال BioX که از طریق این مقاومت جمع‌آوری می‌شود، یک ولتاژ الکتریکی حدود 1 ولت است که بر اساس رشد رسوب‌زیستی روی کاتد و وجود اکسیدان‌ها در آب تغییر می‌کند [35]. مقدار پایه در نبود رسوب‌زیستی یا اکسیدان بین 300 تا 700 میلی‌ولت است و در حالت اشباع، زمانی که سطح کاملاً با رسوب‌زیستی پوشیده شده، حدود 1200 تا 1400 میلی‌ولت است. مقدار پایه سیستم بسته به خصوصیات آب و تنظیمات پروب متفاوت است؛ به‌طور معمول در آب دریا، این مقدار بین 500 تا 700 میلی‌ولت می‌باشد. چگالی جریان درون پروب تحت کنترل مقاومت الکتریکی است، اما واکنش‌های کاتدی که در مرز بین آب و کاتد از جنس فولاد ضدزنگ اتفاق می‌افتند، می‌توانند به‌طور مستقیم بر شدت جریان تأثیر بگذارند. حل شدن روی به تعادل فرآیند الکتروشیمیایی کمک کرده و افزایش جریان در پروب را تقویت می‌کند. در آب دریای طبیعی جریان‌دار، مهم‌ترین واکنش کاتدی، تخلیه اکسیژن است. باکتری‌های هوازی رسوب‌زیستی که روی سطح پروب رشد می‌کنند، تخلیه اکسیژن به آب را کاتالیز می‌کنند [35]. باکتری‌های بی‌هوازی نیز می‌توانند واکنش کاتدی تبدیل (9) ت به سولفید را کاتالیز کنند (واکنش 9 و 10)، همانطور که در نوع دیگری از بیو-باتری‌ها (سلول سوختی (10) [36]) مشاهده شده است، اگرچه دستیابی به شرایط بی‌هوازی در زیر جریان آب دریا دشوار است.



سیگنال BioX زیر مقدار پایه کاهش می‌یابد وقتی جریان به کمتر از 0/1 متر بر ثانیه می‌رسد، شرایطی که ممکن است رشد شرایط بی‌هوازی را تسهیل کند. همچنین در طول روش مقابله و مدیریت‌های ضد رسوب، کاهش گونه‌های اکسیدان روی کاتد بر جریان در حسگر تأثیر می‌گذارد. وجود اکسیدان‌ها تغییر خروجی تقریباً خطی حدود 500 میلی‌ولت از مقدار پایه پروب را ایجاد می‌کند، در محدوده‌ای از غلظت‌ها که بسته به نوع ماده شیمیایی متفاوت است. پاسخ خطی سیگنال BioX در محدوده‌های 0/2 تا 2 میلی‌گرم بر لیتر برای کلر، 0/1 تا 1 میلی‌گرم بر لیتر برای دی‌اکسید کلر، و 1 تا 10 میلی‌گرم بر لیتر برای اسید پراستیک تأیید شده است، که همیشه شامل غلظت‌های مورد استفاده در روش مقابله و مدیریت ضد رسوب می‌باشد. تشخیص وجود اکسیدان‌ها بلافاصله انجام می‌شود، اما زمان لازم برای واکنش به رشد رسوب‌زیستی نسبتاً طولانی است، چرا که باکتری‌ها برای پوشاندن کامل سطح الکترودها به زمان نیاز دارند. بنابراین، در شرایط عملیاتی معمولی، تفکیک تأثیر هر دو پدیده با بررسی روند سیگنال کار ساده‌ای است. به‌عنوان نمونه، شکل 3 روندهای سیگنال را از طریق پایش آنالین مقابله و مدیریت مؤثر با دی‌اکسید کلر نشان می‌دهد. نمودار 3 الف به ترتیب شاهد این موارد است: (1) افزایش/کاهش سیگنال BioX، حدود 200 میلی‌ولت از مقدار پایه (550 میلی‌ولت)، به دلیل دوزدهی تقریباً مداوم دی‌اکسید کلر؛ (2) کاهش سیگنال زیر مقدار پایه هنگام توقف جریان؛ و افزایش مجدد سیگنال به دلیل رشد اولیه رسوب‌زیستی (با وجود نوسانات) بین 20 تا 25 سپتامبر، زمانی که جریان حدود 0/1 متر بر ثانیه یا کمتر بود. از 25 سپتامبر، با بازگشت جریان منظم، اثربخشی روش مقابله و مدیریت با دی‌اکسید کلر مشخص شد، چرا که توانست رشد رسوب‌زیستی را مهار کند و سیگنال BioX در فاصله بین دو دوز دی‌اکسید کلر به مقدار پایه بازگشت، همانطور که قبل از توقف جریان بود.

5-2- نمونه موردی نظارت

یک مثال از واکنش به روش مقابله و مدیریت بهینه‌سازی شده با دی‌اکسید کلر در یک نیروگاه واقع در تالاب ونیز در شکل 3 ارائه شده است.



شکل 3- نمودارهایی از پایش الکتروشیمیایی سرعت خوردگی برنج آلومینیوم و روش مقابله و مدیریت تقریباً مداوم با دی‌اکسید کلر ($6\mu\text{M}$ خروجی به کندانسور) در آب دریا؛ الف: نمودار تغییرات سیگنال Biox در سرعت‌های جریان متفاوت؛ ب: نمودارهای تغییرات چگالی جریان خوردگی ز که توسط پروب LPR برآورد شده، سیگنال Biox و غلظت باقی‌مانده ClO_2 که با روش سنجش رنگی اندازه‌گیری شده‌اند [19] CuNi 70/30 (UNS C71500)

این روش مقابله و مدیریت شامل دوزدهی پایین و تقریباً مداوم ($6\mu\text{M}$ در دوره‌ای که در نمودارها نشان داده شده) بوده و در یک سیستم هیدرولیکی اندازه‌گیری شده که با حسگرهای الکتروشیمیایی مشابه آنچه در شکل 2 نشان داده شده، مجهز شده و درست قبل از کندانسور نصب شده‌اند. روند چگالی جریان خوردگی ز (که با استفاده از روش LPR محاسبه شده) به نمونه‌های کندانسور از آلیاژ برنج آلومینیومی (UNS C68700) مربوط می‌شود، که یکی از رایج‌ترین آلیاژهای مسی مورد استفاده در آب دریا است. مقادیر پایین ز (کمتر از $1\mu\text{A cm}^{-2}$) نشان‌دهنده غیرفعال شدن خوبی است که توسط این آلیاژ مس به دست آمده است. دو نمودار دیگر از شکل 3 سیگنال پروب Biox (ولت) را در مقایسه با غلظت اکسیدان باقی‌مانده (دی‌اکسید کلر) اندازه‌گیری شده در آب (r) نشان می‌دهند. این

آخرین پارامتر توسط دستگاه‌های آنلاین (AMI Codes, SWAN) بر اساس روش کلریمتریک DPD به دست آمده است. کاهش دوره‌ای سیگنال Biox تا مقدار پایه حدود 550 میلی‌ولت (که هر دو روز یک بار رخ می‌دهد) به دلیل قطع موقت دوز دی‌اکسید کلر بعد از اضافه کردن کلرید آهن است (کلرید آهن به عنوان یک ماده مهارکننده خوردگی یا به عنوان عامل ضد خوردگی برای سیستم به کار گرفته می‌شود). اضافه کردن دوره‌ای این ماده به اختلال موقتی در شرایط نرمال اکسیداسیون و کاهش منجر می‌شود، که این امر از طریق کاهش در اندازه‌گیری سیگنال Biox نشان داده می‌شود) رسیدن به سیگنال پایه در نبود اکسیدان در آب تأیید می‌کند که رشد قابل توجهی از رسوب‌زیستی وجود ندارد (این موضوع همچنین توسط آزمایش‌های بصری و دستی انجام شده روی نمونه‌های کندانسور در خط تأیید شده است). کاهش مشاهده شده در غلظت اکسیدان باقی‌مانده [r] که توسط آزمایش‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده، نشان‌دهنده عدم وجود دی‌اکسید کلر در واقعیت است. اختلاف بین دو سیگنال هنگامی که دی‌اکسید کلر دوزدهی می‌شود، بر دقت بیشتر آزمایش‌های کلریمتریک در مقایسه با سیگنال Biox در تشخیص غلظت دی‌اکسید کلر در محدوده $1-2\mu\text{M}$ تأکید می‌کند. با این وجود، هر دو روش نسبت به غلظت‌های بسیار پایین اکسیدان باقی‌مانده حساسیت نشان می‌دهند. عدم وجود داده‌ها در نمودار اکسیدان باقی‌مانده به دلیل نیاز به نگهداری مکرر ابزار دقیق شیمیایی-کلریمتریک است که شامل تأمین مواد واکنش‌دهنده، تمیزکاری و کالیبراسیون می‌شود. یکی دیگر از آلیاژهای مسی متداول است که در سیستم‌های خنک‌کننده دریایی به کار می‌رود. این آلیاژ حاوی مقادیر کمی آهن و منگنز است تا مقاومت در برابر خوردگی را در جریان‌های آب با سرعت بالا (تا $4/5\text{ ms}^{-1}$) بهبود بخشد. تصاویر نمونه‌های CuNi 70/30 که از کندانسور واقعی یک نیروگاه بریده شده و در سیستم پایشی مشابهی که در بای‌پس کندانسور ایجاد شده و مشابه آنچه در شکل 2 نشان داده شده است، در شکل 4 آورده شده‌اند.

(الف)



(ب)



(ج)



(د)



شکل 4- نمای نمونه‌های کندانسور CuNi:70/30 که در آب دریا با تصفیه‌های مختلف کار می‌کنند. الف: شش ماه کلرزی
منظم؛ ب: پس از یک ماه قطع کلر. ج: شش ماه کلرزی نامنظم. د: شش ماه بدون کلرزی [19]

نمونه‌ها در معرض دفعات و الگوهای متفاوتی از روش مقابله و مدیریت کلرزی دوره‌ای قرار گرفتند که بر اساس 2 تا 4 بار دوزدهی روزانه از 7 تا 10 میلی‌مولار کلر (به صورت محلول متمرکز هیپوکلریت) و قبل از ورود به کندانسور انجام شد. این فرآیند به مدت 1 ساعت و هر 6 ساعت یکبار صورت گرفت تا اطمینان حاصل شود که میزان تخلیه کلر مطابق با استاندارد (با غلظتی کمتر از 3 میکرومولار) باقی می‌ماند. این نیروگاه در منطقه‌ای بندری قرار دارد که آب دریا در آن به شدت تهاجمی است و تقریباً 9 تا 10 ماه از سال شاهد فعالیت بیولوژیکی فشرده‌ای است. تصاویر موجود در شکل 4 و داده‌های پایشی نرخ خوردگی که طی سال‌ها جمع‌آوری شده‌اند [37] نشان می‌دهند که چگونه اثربخشی روش مقابله و مدیریت کلرزی (در این مورد بدون تمیزکاری مکانیکی و بدون روش مقابله و مدیریت ضد خوردگی دیگر) می‌تواند در جلوگیری از فرسایش این آلیاژ نقش حیاتی داشته باشد. از نظر ترمودینامیکی، فعالیت اکسیدکنندگی قوی کلر می‌تواند به ترویج خوردگی آلیاژهای مس کمک کند [38]، اما در غلظت‌هایی که استفاده می‌شود، محدوده ایمنی خوبی را ارائه می‌دهد. در دهه گذشته، کلرزی و روش مقابله و مدیریت جایگزین با دی‌اکسید کلر و اسید پراستیک با استفاده از سیستم پایش الکتروشیمیایی یکپارچه، به‌ویژه در تالاب ونیز (ایتالیا) که استفاده از کلر از سال 2000 ممنوع شده بود [39]، بهینه‌سازی شدند. اگرچه وابسته به مکان، بهترین نسبت هزینه به عملکرد کندانسور معمولاً با ترکیب تمیزکاری مکانیکی (به‌طور مداوم یا چند ساعت در روز) و دوزهای کم مواد شیمیایی حاصل شد. روش مقابله و مدیریت که قادر به جلوگیری از خوردگی میکروبی آلیاژهای مس بودند به‌طور خاص مورد آزمایش قرار گرفتند [37]. پایش الکتروشیمیایی نشان داد که آلیاژ Cu-Ni که با نرخ جریان کمتر از 1/8m/s کار می‌کند، در معرض خوردگی شدید قرار دارد؛ و در مقابل، برنج آلومینیومی که با نرخ جریان بیشتر از 1/8m/s کار می‌کند، با مشکلات خوردگی-فرسایش مواجه است. دوزهای دوره‌ای (یک بار در روز) از یون‌های آهنی با غلظت M 0/01-0/02 برای ترویج غیرفعال شدن برنج آلومینیومی (با نرخ خوردگی کمتر از 20 میکرومتر در سال) و همچنین بازگشت به حالت غیرفعال توصیه می‌شود. در مورد آلیاژ Cu-Ni، یک روش مقابله و مدیریت کلرزی مؤثر، حتی اگر به‌صورت متناوب انجام شود، اگر با غلظت بیشتر از 3μM (که قادر به کنترل کامل رشد رسوب‌زیستی است) و تحت جریان آب حدود 1/8 یا بالاتر انجام شود، برای افزایش غیرفعالی کافی است.

6- نتیجه‌گیری

- برای مقابله با افت تبادلی حرارتی و مشکلات خوردگی ناشی از میکروارگانیزم‌ها در کندانسورهای نیروگاه‌ها، مخصوصاً زمانی که با آلیاژهای مسی سروکار داریم، باید از راهکارهایی استفاده کنیم که مختص به هر محل باشند و روش مقابله و مدیریت شیمیایی با استفاده از مواد ضد میکروبی بهینه‌سازی شده باشند.
- با توجه به قوانین کنونی که میزان تخلیه کلر به محیط‌های طبیعی را محدود می‌کنند، نتایج نشان داد که یک روش کلرزی که به‌طور ویژه برای هر محل بهینه‌سازی شده، می‌تواند به عنوان یکی از بهترین تکنولوژی‌های موجود شناخته شود، حتی با وجود اینکه کلر به سرعت و به شدت تجزیه می‌شود.

- دی اکسید کلر به دلیل واکنش مؤثری که با باکتری‌ها و ویروس‌ها دارد، به عنوان یک جایگزین موفق برای کلر در زمینه‌های ضد رسوب شناخته شده است. این ماده در فرآیند تولید خود کلریت‌ها را به عنوان محصولات جانبی تولید می‌کند و در راکتورهای خاصی در محل تهیه می‌شود. جایگزین‌های دیگری مانند اسید پراستیک و ازون نیز در موارد خاصی به کار می‌روند اما به طور رایج در مدارهای خنک‌کننده استفاده نمی‌شوند. استفاده از اسید پراستیک نیاز به نظارت دقیق دارد تا از خوردگی جلوگیری شود و برای حفاظت از سطوح فولادی از پوشش‌هایی استفاده می‌شود. سیلیکون‌ها به دلیل الزامات کاربردی خاص، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار نمی‌گیرند، در حالی که پوشش‌های اپوکسی ممکن است در دماهای بالا تجزیه شوند. دیگر رنگ‌های ضد رسوب نیز نیاز به تجدید فرکانس بالایی دارند، به خصوص در محیط‌های آب دریا.
- پایش رشد رسوب زیستی در لوله‌های کندانسور برای پیشگیری از رسوب‌زدایی و خوردگی بسیار مهم است. روش‌های نوینی که از سنسورهای الکتروشیمیایی بهره می‌برند، برای شناسایی مراحل ابتدایی بیوفیلم و مواد اکسیدکننده در آب ابداع شده‌اند. تلفیق سنسورهای متنوع در سیستم‌های خنک‌کننده آبی کندانسورها، نظارت دقیق و جامعی بر متغیرهای فیزیکی و شیمیایی را بدون نیاز به تعمیر و نگهداری مداوم ممکن می‌سازد. سیستم‌های پیشرفته، کنترل از دور و پایش زمان واقعی فرآیندهای تصفیه را امکان‌پذیر می‌کنند.
- در مورد آلیاژهای مسی که در تأسیسات دریایی استفاده می‌شوند، یک روش کلرزنی که با غلظت اکسیدان باقی‌مانده کمتر از $3\mu\text{M}$ در خروجی کندانسورها و با سرعت جریان $1/8\text{ ms}^{-1}$ انجام شود، می‌تواند بهترین حفاظت را ارائه دهد. این روش نه تنها از کاهش بازده تجهیزات جلوگیری می‌کند بلکه با نظارت دقیق الکتروشیمیایی آنلاین، از بروز اثرات منفی احتمالی ناشی از محصولات جانبی نیز پیشگیری می‌کند.

7- منابع

- [1] P. Cristiani and U. Giancola, "Prevention of fouling and microbial corrosion in power stations using seawater as a coolant," *Heat Exchanger Fouling Mitigation and Cleaning Technologies, Publico, Publ., Essen, D*, p. 334, 2000.
- [2] Y. Lekbach *et al.*, "Microbial corrosion of metals: The corrosion microbiome," in *Advances in microbial physiology*, vol. 78: Elsevier, pp. 317-390, 2021.
- [3] I. B. Beech, J. A. Sunner, and K. Hiraoka, "Microbe-surface interactions in biofouling and biocorrosion processes," *International microbiology*, vol. 8, no. 3, pp. 157-168, 2005.
- [4] H. Ezuber and S. Zakir Hossain, "A review of corrosion failures in shell and tube heat exchangers: roots and advanced counteractive," *Heat and Mass Transfer*, vol. 59, no. 6, pp. 971-987, 2023.
- [5] L. Yang, *Techniques for corrosion monitoring*. Woodhead Publishing, 2020.
- [6] X. Shi, G. G. Clark, C. Huang, T. H. Nguyen, and B. Yuan, "Chlorine decay and disinfection by-products formation during chlorination of biofilms formed with simulated drinking water containing corrosion inhibitors," *Science of the Total Environment*, vol. 815, pp. 152763, 2022.
- [7] P. Cristiani and G. Perboni, "Corrosion monitoring in microbial environments," in *Techniques for corrosion monitoring*: Elsevier, pp. 335-377, 2021.
- [8] L. Románszki, J. Telegdi, and E. Kálmán, "Comparative study of Langmuir-and Langmuir-Blodgett layers of amphiphilic carboxylic-and hydroxamic acids," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 321, no. 1-3, pp. 20-28, 2008.
- [9] Y. Yang, P. G. Rouxhet, D. Chudziak, J. Telegdi, and C. C. Dupont-Gillain, "Influence of poly (ethylene oxide)-based copolymer on protein adsorption and bacterial adhesion on stainless steel: modulation by surface hydrophobicity," *Bioelectrochemistry*, vol. 97, pp. 127-136, 2014.

- [10] B. Hirschorn, M. E. Orazem, B. Tribollet, V. Vivier, I. Frateur, and M. Musiani, "Determination of effective capacitance and film thickness from constant-phase-element parameters," *Electrochimica acta*, vol. 55, no. 21, pp. 6218-6227, 2010.
- [11] D. C. Carter and J. X. Ho, "Structure of serum albumin," *Advances in protein chemistry*, vol. 45, pp. 153-203, 1994.
- [12] B. E. T. Bautista *et al.*, "Effect of protein adsorption on the corrosion behavior of 70Cu–30Ni alloy in artificial seawater," *Bioelectrochemistry*, vol. 97, pp. 34-42, 2014.
- [13] Z. Li, H. Zhang, and H. Chen, "Application of transport membrane condenser for recovering water in a coal-fired power plant: A pilot study," *Journal of cleaner production*, vol. 261, pp. 121229, 2020.
- [14] N. A. A. M. Amin, M. A. Mokhter, N. Salamun, and M. F. b. Mohamad, "Anti-fouling electrospun organic and inorganic nanofiber wastewater treatment membranes for wastewater treatment," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 302-317, 2023.
- [15] S. Du, P. Zhao, L. Wang, G. He, and X. Jiang, "Progresses of advanced anti-fouling membrane and membrane processes for high salinity wastewater treatment," *Results in Engineering*, vol. 17, p. 100995, 2023.
- [16] D.-W. Jung, C.-W. Seo, Y.-C. Lim, D.-S. Kim, S.-Y. Lee, and H.-K. Suh, "Analysis of Flow Characteristics of a Debris Filter in a Condenser Tube Cleaning System," *Energies*, vol. 16, no. 11, pp. 4472, 2023.
- [17] A. Griffin and N. Chamberlin, "Bacteriological improvements obtained by the practice of break-point chlorination," *American Journal of Public Health and the Nations Health*, vol. 35, no. 3, pp. 199-210, 1945.
- [18] R. L. Jolley, *Water chlorination: chemistry, environmental impact and health effects*. Lewis Publishers, 1990.
- [19] P. Cristiani and G. Perboni, "Antifouling strategies and corrosion control in cooling circuits," *Bioelectrochemistry*, vol. 97, pp. 120-126, 2014.
- [20] P. Cristiani, "Electrochemical technologies for antifouling treatments of cooling circuits," *Biofouling Types, Impact and Anti-Fouling (eds. Chan, J. and Wong, S.)*, pp. 175-198, 2010.
- [21] R. A. Minear and G. Amy, *Disinfection By-Products in Water Treatment The Chemistry of Their Formation and Control*. CRC Press, 1995.
- [22] H. A. Jenner, C. Taylor, M. Van Donk, and M. Khalanski, "Chlorination by-products in chlorinated cooling water of some European coastal power stations," *Marine Environmental Research*, vol. 43, no. 4, pp. 279-293, 1997.
- [23] M. Khalanski, "Organic by-products generated by the chlorination of cooling water at marine power stations," *La Tribune de l'eau*, vol. 55, no. 619-21, pp. 24-39, 2002.
- [24] S. R. Qasim, *Wastewater treatment plants: planning, design, and operation*. Routledge, 2017.
- [25] S. Vigneswaran and C. Visvanathan, *Water treatment processes: simple options*. CRC Press, 1995.
- [26] R. Morris, "Reduction of microbial levels in sewage effluents using chlorine and peracetic acid disinfectants," *Water Science and Technology*, vol. 27, no. 3-4, pp. 387-393, 1993.
- [27] M. Baldry, A. Cavadore, M. French, G. Massa, L. Rodrigues, P. Schirch, and T. Threadgold, "Effluent disinfection in warm climates with peracetic acid," *Water Science and Technology*, vol. 31, no. 5-6, pp. 161-164, 1995.
- [28] V. Lazarova, M. Janex, L. Fiksdal, C. Oberg, I. Barcina, and M. Pommepuy, "Advanced wastewater disinfection technologies: short and long term efficiency," *Water Science and Technology*, vol. 38, no. 12, pp. 109-117, 1998.
- [29] R. M. Kain, "Crevice corrosion behavior of coated stainless steel in natural seawater," in *NACE CORROSION, 2000: NACE*, pp. NACE-00827.

- [30] S. Masadeh, "Electrochemical impedance spectroscopy of epoxy-coated steel exposed to dead sea water," *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 75-84, 2005.
- [31] L. K. Herrera, C. A. Giudice, and H. A. Videla, "Evaluation of Antifouling Coatings Performance to Protect Carbon Steel Against MIC and Biofouling in Polluted Seawater," in *NACE CORROSION*, NACE, pp. NACE-06516, 2006.
- [32] E. Diaz-Bejarano, F. Coletti, and S. Macchietto, "A model-based method for visualization, monitoring, and diagnosis of fouling in heat exchangers," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 10, pp. 4602-4619, 2020.
- [33] B. Wallen and S. Henrikson, "Effect of chlorination on stainless steels in seawater," *Materials and Corrosion*, vol. 40, no. 10, pp. 602-615, 1989.
- [34] S. Heidari, H. Etemadi, and R. Yegani, "A comprehensive analysis of membrane fouling in microfiltration of complex linear macromolecules based on theoretical modeling and FESEM images," *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, vol. 96, no. 2, pp. 360-373, 2021.
- [35] A. Mollica and P. Cristiani, "On-line biofilm monitoring by" BIOX" electrochemical probe," *Water Science and Technology*, vol. 47, no. 5, pp. 45-49, 2003.
- [36] P. Cristiani, M. Carvalho, E. Guerrini, M. Daglio, C. Santoro, and B. Li, "Cathodic and anodic biofilms in single chamber microbial fuel cells," *Bioelectrochemistry*, vol. 92, pp. 6-13, 2013.
- [37] P. Cristiani, G. Perboni, and A. Debenedetti, "Effect of chlorination on the corrosion of Cu/Ni 70/30 condenser tubing," *Electrochimica Acta*, vol. 54, no. 1, pp. 100-107, 2008.
- [38] R. Ferrara and L. Taschenberg, "The effects of chlorinated seawater on galvanic corrosion behavior of alloys used in seawater piping systems," 1986.
- [39] P. Cristiani, "Solutions to fouling in power station condensers," *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 16, pp. 2630-2640, 2005.