

مطالعه موردی

مروری بر مطالعات موردی قطعات خورده شده در واحدهای آب شیرین کن

اکرم حسن پوریوزبند^{۱*}، محمد قربانی^۲، ابوالقاسم دولتی^۳

^۱ کارشناس ارشد، ^۲ و ^۳ استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

* نویسنده مسئول: Ghorbani@sharif.edu

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

با توجه به اینکه سهم اندکی از آب های موجود در کره ی زمین برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی مناسب هستند، برای تامین آب مورد نیاز جمعیت روزافزون باید آب اقیانوس ها و دریاها فرآوری و به آب شیرین تبدیل شود. نمک زدایی در واحدهای آب شیرین کن صنعتی انجام می شود. یکی از مهمترین عوامل تخریب قطعات و شکست ها در این صنعت، پدیده ی خوردگی است که به صورت های مختلف و به ویژه به صورت موضعی رخ می دهد و علت اصلی آن غلظت بالای سدیم کلرید در آب های شور و طراحی نادرست قسمت های مختلف این واحدهای صنعتی است. خوردگی و خرابی های ناشی از آن یکی از عوامل از سرویس خارج شدن و خوابیدن یک سیستم در صنعت محسوب می شود که می تواند منجر به کاهش تولید و حتی خسارات جانی گردد. بنابراین استفاده از فناوری های کنترل خوردگی از توقف های اضطراری جلوگیری نموده و راندمان را افزایش خواهد داد. با شناسایی تخریب های صورت گرفته، عوامل ایجاد کننده ی تخریب و راه های جلوگیری از آن می توان از تخریب های بعدی احتمالی در این صنعت جلوگیری نمود. بنابراین در این پژوهش به مطالعه علت خوردگی قطعات واقعی صنایع آب شیرین کن و راه کارهای جلوگیری از آن پرداخته شده و مطالعات موردی در این زمینه جمع بندی شده است.

واژه های کلیدی: خوردگی، نمک زدایی، اسمز معکوس، پاشش چند طبقه، تقطیر چند اثره.

Case Study

A Review of Corrosion Failures in Desalination Plants - Some Case Studies

A. Hassanpouryouzband^{1*}, M. Ghorbani², A. Dolati²

¹ M.Sc, ^{2,3} Professor, Department of Materials Science and Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* **Corresponding Author:** Akram.Hssnpr@gmail.com

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

Only a limited amount of water on the earth is suitable for domestic, industrial, or agricultural applications. Accordingly, seawater must be treated and turned into freshwater to meet the need of the growing population. The desalination process is conducted in industrial plants. One of the most significant causes of failures in desalination plants is the phenomenon of corrosion which occurs in different forms, particularly in the form of localized corrosion. Two main reasons for such corrosion failures are the high sodium chloride concentration in seawater and the incorrect design of different components. Unanticipated corrosion may contribute to unexpected stops, resulting in lower productivity and more importantly, loss of life. Thus, corrosion control technology will reduce emergency stops and increase efficiency. It is achievable to prevent future failures in this industry by analyzing previous failures, their origins, and prevention methods. Therefore, these subjects have been discussed in this paper, and some case studies have been reviewed.

Keywords: Corrosion, Desalination, Reverse Osmosis, Multi Stage Flash, Multi Effect Distillation.

۱- مقدمه

حجم آب های کره زمین در حدود ۱/۴ میلیارد مترمکعب است اما عمده ی این آب، که در اقیانوس ها، دریاها و دریاچه ها واقع شده، اغلب به علت شوری بیش از حد برای مقاصد بهداشتی، کشاورزی و صنعتی قابل استفاده نیست. در حال حاضر حدود ۱/۵ میلیارد نفر در دنیا به آب آشامیدنی سالم دسترسی ندارند درحالی که نیاز طبیعی بشر، او را به سمت مصرف آب های سوق خواهد داد، که از کیفیت و فراوری مطلوبی برخوردار نبوده و باعث مشکلات سلامت خواهد شد. بنابراین تولید آب شیرین بسیار حائز اهمیت است و با توجه به حجم وسیع آب شور موجود می توان گفت نمک زدایی یکی از بهترین راه ها برای حل مشکل کم آبی است [۵-۱]. فرایندهای نمک زدایی به منظور خالص سازی آب دریا صورت می گیرد [۶]. پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۶۰ درصد آب مورد نیاز جمعیت از طریق این فرایند تامین شود [۷، ۱]. شیوه های بسیار زیادی برای نمک زدایی وجود دارد که در متداول ترین دسته بندی آب شیرین کن ها را به دو گروه عمده حرارتی و غشایی دسته بندی می کنند، که ترکیبی از این دو نیز استفاده می شود. علاوه بر دسته بندی های فوق، سیستم های تولید آب شیرین را می توان بر مبنای منبع انرژی نیز دسته بندی کرد که عبارتند از: نمک زدایی با انرژی خورشیدی، زمین گرمایی، تبادل یونی، انجمادی، بادی و غیره [۸-۱۱]. فناوری های حرارتی اولین روش های نمک زدایی هستند که به صورت گسترده و تجاری توسعه یافته اند [۱۲ و ۱۳]. معروف ترین روش های حرارتی تجاری عبارتند از پاشش چند طبقه، تقطیر چند اثره و تراکم بخار [۴]. در روش MSF از چند مرحله تبخیر و تقطیر کنار هم و در MED از چند محفظه تبخیر پشت سرهم استفاده می شود [۱۵-۱۸]. این سه روش، عموماً در کنار نیروگاه ها برای بازیابی حرارت اتلافی کار می کنند [۱۹ و ۲۰]. به طور کلی در استفاده از غشا دو روش الکتریکی و فشاری وجود دارد. روش فشاری خود به چهار صورت میکروفلتراسیون، اولترافیلتراسیون، نانوفیلتراسیون و هایپرفیلتراسیون (اسمز معکوس) می باشد که اسمز معکوس در

حال حاضر پرکاربردترین روش برای نمک زدایی است [۲۵-۲۱]. خوردگی به عنوان یکی از زیان بارترین آفات صنایع مطرح می گردد و توجه نکردن به آن می تواند منجر به انهدام غیرمنتظره ی قطعات در حین کار و حتی حوادث و خسارات جانی شود. این تخریبات، هزینه های مستقیم و غیرمستقیم زیادی به صنایع وارد می نماید که حتی الامکان باید از آن جلوگیری شود. خوردگی یکی از مشکلاتی است که واحدهای آب شیرین کن نیز همواره با آن مواجه بوده و گزارش های زیادی از این نوع تخریب در منابع مطالعاتی ارائه شده است؛ از قدیمی ترین گزارش ها، گزارش خوردگی لوله ها و فلنج های آب شیرین کن MSF قطر در سال ۱۹۸۳ توسط لی و همکاران [۲۶]، لوله چگالنده کوپرونیکل آب شیرین کن حرارتی در سال ۱۹۹۸ توسط اسرار و همکاران [۲۷]، خوردگی سمت بخار لوله چگالنده واحد آب شیرین کن ابودهبی در سال ۱۹۹۴ توسط السام و همکاران [۲۸]، خوردگی مواد در واحد آب شیرین کن MSF در سال ۱۹۹۴ توسط مالک [۲۹] و غیره را می توان نام برد. هر چند در این مطالعه، تمرکز بررسی ها بر شکست های ناشی از خوردگی است، اما عوامل مکانیکی نیز می تواند در تخریبات رخ داده در این واحدها نقش داشته باشد. از شایع ترین این تخریبات می تواند به شکست های ناشی از خستگی در شفت های پمپ ها اشاره نمود [۳۰].

مواد متفاوتی در بخش های مختلف آب شیرین کن ها استفاده می شود که آلیاژهای پایه نیکل، مس (به ویژه برنز و کوپرونیکل) و تیتانیوم، فولاد کربنی و ضدزنگ مهم ترین آن ها است [۳۱-۳۴]. بسته به جنس قطعات و شرایط محیطی، انواع خوردگی ها در این واحدها رخ می دهد که عبارتند از: خوردگی یکنواخت، حبابی، حفره ای، شیاری، تنش، فرسایشی، گالوانیک، درون دانه ای، انتخابی و خستگی خوردگی [۳۵-۴۰]. خوردگی های موضعی در این واحدها رایج تر بوده و نیازمند توجه بیشتری است. بیش از ۴۱٪ شکست های ناشی از خوردگی در واحدهای MSF از نوع حفره ای بوده است.

1 - Multi Stage Flash (MSF)

2 - Multi Effect Distillation (MED)

3 - Reverse osmosis (RO)

شرایط بخار در واحدهای MSF به سختی کنترل شده و باعث خوردگی‌هایی در خارج از محدوده‌ی مجاز در طراحی می‌شود. جدای از بخار آب کلردار، گازهای تراکم‌ناپذیر O_2 ، CO_2 ، SO_2 و Br_2 و N_2 از پاشش شورآب حاصل می‌شود. در برخی موارد گازهای H_2S و NH_3 نیز می‌تواند وجود داشته باشد که علت آن آلوده بودن آب دریای ورودی آب شیرین کن به مواد آلی تجزیه‌پذیر است. H_2S و NH_3 می‌تواند باعث خوردگی لوله‌هایی از آلیاژهای پایه مس در قسمت‌های بازیابی و خروج گرما شود. جعبه‌های آب، محفظه‌های پاشش، لوله‌های چگالنده، مبدل‌های حرارتی، پمپ‌ها، لوله‌ها، سوپاپ‌ها، سیستم‌های تخلیه گاز و غیره از حساس‌ترین قطعات به خوردگی موضعی، به‌ویژه خوردگی حفره‌ای، شیاری، تصادمی، حبابی، انتخابی و گالوانیک است [۴۱-۴۳]. مشکلات خوردگی در واحدهای MED به علت دمای کاری کمتر ($32^\circ C$ تا $60^\circ C$)، چندان زیاد نیست، در حالی که مطابق موارد بیان شده، شرایط کاری MSF با دمای کاری بالا ($35^\circ C$ تا $115^\circ C$)، برای شروع خوردگی بسیار مساعد بود. در آب شیرین کن‌های RO آب دریا نیز مشکلات خوردگی/فرسایشی در لوله‌های فشار بالا و غشاها وجود دارد [۴۴]. در جدول ۱ خوردگی‌های سیستم لوله‌کشی واحدهای آب شیرین کن براساس جنس و علت هر نوع

خوردگی آمده است. در جدول ۲ نیز عملکرد مواد در واحدهای RO آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وجود یکسان بودن مواد مورد استفاده در برخی آب شیرین کن‌ها، میزان خوردگی بسته به شرایط محیطی هر یک و نیز سن تقریبی آن‌ها تغییر می‌کند. هرچه عمر واحد آب شیرین کن زیاد باشد، احتمال خوردگی در آن بیشتر است. علاوه بر این، مشکلات طراحی و عدم رعایت استانداردهای ساخت و ساز مانند جوشکاری، مسبب ایجاد خوردگی است [۴۵]. با توجه به موارد بیان شده بررسی خوردگی‌های صورت گرفته در واحدهای آب شیرین کن صنعتی در حین کارکرد قطعات بسیار حائز اهمیت است. بررسی نوع خوردگی هر قطعه صنعتی طبق شرایط کاری آن، علت خوردگی و راه‌های جلوگیری از آن‌ها این امکان را فراهم می‌کند که ایرادهای محتمل در واحدهای صنعتی دیگر با مقایسه و مقارنه با قطعات صنعتی تخریب شده پیشین، قبل از وقوع حادثه تشخیص داده شده و اصلاحات لازم در طراحی و جنس قطعات صورت گیرد. بنابراین در این مقاله، مطالعات موردی انجام شده توسط متخصصین و بازرسی از قطعات واقعی تخریب شده در آب شیرین کن‌های صنعتی جمع‌بندی شده و علت خوردگی و راه‌حل‌های جلوگیری از آن به تفصیل بیان شده است.

جدول ۱ - مواد مورد استفاده در سیستم لوله‌کشی واحدهای آب شیرین کن [۴۵]

علت	سیستم مشمول	ماده	نوع تخریب
CO_2 ، O_2 و یون‌های کلر	لوله آب تقطیر شده	فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	خوردگی شیاری و حفره‌دار شدن
گازهای تراکم‌ناپذیر	لوله خروجی	فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L	خوردگی یکنواخت و حفره‌دار شدن
ضربه، اغتشاش	خط آب تولید شده	لوله فولادی با پوشش اپوکسی	نفوذ
از بین رفتن لایه روپین فولاد در از نفوذ یون کلر، هوا و رطوبت	خط آب از جنس پلاستیک	فولاد (در بتن)	خوردگی میلگرد
در اثر توزیع نامتعادل تنش‌ها	لوله‌های انتقال مایع	پلاستیکی فیبر شیشه تقویت شده	شکستن و ترک خوردگی

جدول ۲ - عملکرد مواد در واحدهای آب شیرین کن اسمز معکوس [۴۵]

عملکرد (درجه خوردگی)	ماده	سن تقریبی (تا ۲۰۱۹)	آب شیرین کن
متوسط تا شدید	فولاد زنگ نزن L ۳۱۶	۳۸	جده (قدیمی)
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۳۱۶	۳۴	البیرک
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۳۱۶	۳۱	تنجیب
کمترین مقدار در محل جوش	فولاد زنگ نزن L ۳۱۷	۳۱	تنجیب
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۹۰۴L و آلیاژ ۲۰	۳۱	تنجیب
بدون خوردگی	آلیاژ ۲۰ و SMO ۲۵۴	-	راس ابو جار جور
بدون خوردگی	SMO ۲۵۴	۲۸	جده I
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۳۱۷	-	جده (جدید)
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۳۱۷	-	حقل (جدید)
بدون خوردگی	فولاد زنگ نزن L ۳۱۷	-	دوبا
بدون خوردگی	SMO ۲۵۴	۳۲	صفانیه

۲- مطالعات موردی

۲-۱ - بررسی خوردگی صفحات کف محفظه پاشش در آب شیرین کن MSF

در واحد آب شیرین کن ۱۶ طبقه‌ای، که فولاد کربنی با پوشش داخلی فولاد زنگ نزن ۳۱۷ برای ساخت صفحات محفظه پاشش استفاده شده بود، در طبقات ۱۱-۱۶ تعدادی خوردگی و شکست مشاهده شد (شکل ۱الف)). بازرسی کف این طبقات بعد از آزمون پر و خالی کردن نشان داد که سطح آن‌ها ناهموار بوده و باعث راکد ماندن آب در طول زمان خاموشی (شکل ۱ب)) و ایجاد خوردگی حفره‌ای شده است. در واقع فولادهای زنگ نزن سری ۳۰۰ در حضور آب غنی از کلرید دچار خوردگی موضعی حفره‌ای می‌شود. طراحی مجدد برای جلوگیری از نشت هوا و زهکشی کامل و گرگرفتن با آب مقطر، از اتمسفر داخل محفظه در طول زمان خاموشی حفاظت می‌کند و تمیز کردن مکانیکی و شیمیایی رسوبات اقداماتی برای جلوگیری از خوردگی است [۴۶].

۲-۲ - خرابی فیلتر استوانه‌ای میکرون در واحد آب شیرین کن اسمز معکوس

جنس آن از فولاد ضدزنگ L ۹۰۴L بوده و خوردگی موضعی در رزوه درپوش پایین و پیچ، سطح پایین فلنج بالایی و شیار اورینگ (شکل ۱ج)) و سر پیچ و مهره‌ها (شکل ۱د)) مشاهده شده است. راکد شدن آب دریا با حضور غلظت بالای کلرید (به دلیل کلریناسیون برای کاهش بیوفولینگ‌ها) و هالیدها و به ویژه برمید که دمای بحرانی حفره‌دار شدن را کاهش می‌دهد، عامل اصلی این خوردگی‌های شیار است. از طرفی مقدار کم Mo و Cr در فولاد ضدزنگ L ۹۰۴L است، باعث مقاومت به خوردگی پایین این گرید می‌شود. بنابراین جایگزینی فولاد سوپرآستیتی (با مقدار Mo بیشتر از ۶٪) مانند SMO 254 یا AL-6XN به جای فولاد زنگ نزن L ۹۰۴L، خوردگی موضعی را به شدت کاهش می‌دهد. البته مواد پلیمری استحکام بالا برای ریخته‌گری بدنه فیلتر امکان خوردگی شیار در فیلتر استوانه‌ای را به طور کامل حذف می‌نماید. راه‌حل‌های دیگر عبارتند از: استفاده از واشر غیرجذب‌ی جامد یا ماده آب‌بند، تغییر در طراحی نصب فیلتر استوانه‌ای که از تجمع آب دریا در رزوه‌ها جلوگیری کند، تمیز کردن دوره‌ای سطح شیارها و جلوگیری از رکود آب [۴۷].



شکل ۱ - الف) تصویر نزدیک از خوردگی در مرکز محفظه پاشش، ب) تصویر بعد از آزمایش پر و خالی کردن آب [۴۶]، ج) خوردگی سطح پایین فلنج بالا، ب) خوردگی در کلاهی شش ضلعی پیچ و مهره [۴۷].

۲-۳- خرابی زودرس پوشش اپوکسی رنگ‌زده شده

خرابی زودرس پوشش اپوکسی رنگ‌زده شده در قسمت داخلی صفحه زیرین مخزن گازیول گزارش شده (شکل ۲ الف) و (ب) که علت آن سوراخ شدن پایین صفحه است. این خوردگی در محلی بود که به علت عدم دقت نقاش، پوشش به صورت دو بار اعمال شده بود. کلریدها و سایر ناخالصی‌ها در حفرات و سوراخ‌های پوشش رنگ شده در تماس با فولاد، تشکیل کلرید آهن دو ظرفیتی می‌دهد که در تماس با هوای اکسیدکننده به کلرید آهن سه ظرفیتی تبدیل می‌شود. پوشش اپوکسی اعمال شده در اثر نمک‌های آهن موجود در سطح چسبندگی ضعیف داشته و دچار تاول‌زدگی شده است. بعد از خرابی پوشش اپوکسی به علت وجود حفرات ناشی از نمک‌ها، مکان‌های مناسبی برای خوردگی حفره‌ای ایجاد شده است. برای جلوگیری از خرابی، عملیات شیمیایی به عنوان یک مرحله ضروری برای سلب کردن کلرید قبل از رنگ زدن کارساز است که عملیات بر پایه فسفریک اسید در این موارد موثر خواهد بود. همچنین حفره‌های سطح قبل از اعمال پوشش باید تعمیر شوند

[۴۸].

۲-۴- خرابی پمپ فشار قوی موتور در خنک کننده روغنی یاتاقان

خرابی در خروجی لوله خنک کننده کوپرونیکل در یاتاقان اصلی پمپی در واحد آب شیرین کن اسمز معکوس گزارش شده است (شکل ۲ ج) و (د) که محیط خنک کننده آب دریای هوادهی شده بود. سرعت پایین جریان آب دریا و راکد شدن آن، عامل اصلی در بروز این خوردگی حفره‌ای زودرس بوده است. از جوشکاری برای تعمیر خرابی‌ها استفاده شد اما باعث ایجاد منطقه گرمادیده جوش شده و به علت جوش نامناسب، مواد جوش به داخل لوله نفوذ کرده و باعث انسداد بیشتر در جریان آب دریا شده بود (شکل ۲ د). مقاومت خوردگی آلیاژهای مس در جریان آب دریا عمدتاً به رشد و بقای فیلم اکسید مس محافظ بستگی دارد اما حضور آب راکد منجر به تشکیل هیدروکسید مس غیر محافظ و غیرچسبنده شده و تنش‌های بعدی با کندن این رسوبات از سطح، حفراتی را ایجاد می‌کند. از طرفی، حضور غلظت بالایی از کلرید و گوگرد در شکل سولفات‌های طبیعی و معدنی در محصول خوردگی نشان دهنده - ی نقش احتمالی آنها در تسریع شکست است. برای جلوگیری از این تخریبات باید: ۱) موانع خارجی از مسیر جریان آب حذف شود؛ ۲) آزمایش‌هایی برای قابلیت اطمینان جوشکاری انجام شود؛ ۳) تلاطم و خوردگی سیال خنک کننده کاهش یابد [۴۹].



شکل ۲- الف) سطح خارجی مخزن، ب) سطح داخلی مخزن [۴۸]؛ ج) تصاویری از خنک کننده تخریب شده با حفره‌های بزرگ ب) انسداد در مسیر جریان در فلنج به علت جوش نامناسب [۴۹].

۲-۵-۲ - خوردگی قطعات از جنس آلیاژهای**پایه مس**

گزارشی از خوردگی فلکه آب برنز نیکل-آلومینیوم در واحد آب شیرین کن خاورمیانه انجام شده است (شکل ۳(ه)). تخریب ناشی از خوردگی انتخابی روی بوده است که باعث نزول خواص مکانیکی و ایجاد ساختار متخلخل در درون آن شده و مقاومت به خوردگی را کاهش داده و در نهایت تهاجم عناصر خورنده مانند کلر باعث تخریب آن شده است. البته سولفید موجود در آب دریا رسوبات سبزرنگ سولفید مس با فرمول CuS را بر سطح ایجاد نموده است. برای جلوگیری از این تخریب باید: (۱) سرعت جریان آب بهینه شود؛ (۲) آلودگی های سولفیدی و آمونیای آب حذف شود؛ (۳) ذرات جامدی مثل شن و ماسه در آب وجود نداشته باشد؛ (۴) فلزات با جنس های مختلف با عایق از هم جدا شوند؛ (۵) برای جلوگیری از تشکیل لایه زیستی در سطح، از زیست کش استفاده شود [۵۰].

۲-۶-۲ - بررسی تخریب پیچ پمپ و صفحه زیرین**مخزن آب آشامیدنی [۵۱]**

در پیچ هایی که برای اتصال یاتاقان با لوله های ستون بالایی و پایینی استفاده شده بود تخریب هایی مشاهده شد. این پیچ ها که از جنس فولاد ضدزنگ دوپلکس ۱/۴۴۶۰ ساخته شده اند، کاملاً در داخل آب دریا غوطه ور بودند اما در مهره ها که از جنس فولاد ضدزنگ دوپلکس ۱/۴۴۶۲ ساخته شده بودند خوردگی مشاهده نشد. پیچ ها به دلیل غوطه وری طولانی مدت در زیر آب دریا در اثر خوردگی شیار دچار خرابی موضعی (شکل ۴(الف)) و همراهی این شرایط با تنش های موجود باعث شروع خوردگی خستگی (شکل ۴(ب)) شده است. برای چنین پیچ هایی که به مدت طولانی در معرض آب دریا هستند، در حضور شیارها و زیر شرایط تنش های دینامیک، استفاده از سوپر دپلکس با درصد بالای Mo (بالای ۳ درصد) با افزودنی نیتروژن توصیه شده است [۵۱].

۲-۵-۵ - خوردگی بخش های مختلف از جنس**فولاد ضدزنگ و آلیاژهای پایه مس در واحد آب-****شیرین کن اسمز معکوس****۲-۵-۱ - خوردگی قطعات از جنس فولادهای****ضدزنگ**

خوردگی پمپ تقویتی فشار قوی از جنس فولادزنگ زن دوپلکس ۲۲۰۵ واحد آب شیرین کن دریای مدیترانه مشاهده شده است (شکل ۳(الف)). خوردگی شیاری در محل واشر (شکل ۳(ب)) و خوردگی حفره ای در سطح باز آن قابل مشاهده است. با در نظر گرفتن دمای نسبتاً بالای محیط و آب راکد، خوردگی موضعی در این بخش کاملاً منتظره است. در شکل ۳(ج) نیز تصاویر پمپ خورده شده از جنس فولاد زنگ-زن سوپر دوپلکس ASTM A۸۹۰ آمده است. در این مورد نیز در محل واشرها خوردگی شیاری و در سطح باز، خوردگی حفره ای ایجاد شده است. این گرید فولاد ضدزنگ در دمای بالای ۲۰°C به خوردگی حساس است، بنابراین آب ۲۰-۳۵°C و رکود آن عامل اصلی خوردگی بوده است. برای جلوگیری از خوردگی این پمپ ها، باید حتی الامکان از خاموش کردن دستگاه و مرطوب ماندن آن در دوره های رکود خودداری شود. راه حل بهتر، استفاده از حفاظت کاتدی مخصوص برای هر پمپ است و برای قسمت هایی که حفاظت کاتدی کارآمد نیست، مانند لبه ی بیرونی فلنج ها، جوش دادن ورق نازک مواد پایه نیکل مقاوم به خوردگی مفید است. در این مورد باید پرکننده جوش غنی از کرم و مولیبدن بوده و مطابق با استانداردهای جوشکاری اعمال شود. خوردگی های دیگری که برای این گرید فولاد زنگ زن گزارش شده است، پوسیدگی خط جوش (نوعی خوردگی مرزانه ای) در منطقه گرمادیده جوش و ناشی از عدم رعایت استانداردهای جوشکاری بوده است (شکل ۳(د)). در این موارد باید استانداردهای جوش توسط بازررس جوشکاری کنترل شود و از گریدهای فولاد زنگ زن که به این نوع خوردگی حساس نیست استفاده شود [۵۰].

در شکل ۴(ج) سوراخ‌ها و حفره‌های عمیقی در صفحه زیرین مخزن آب آشامیدنی نشان داده شده‌است. صفحه زیرین مخزن در تماس با دو نوع محیط خورنده بود که عبارتند از: آب آشامیدنی از داخل و خاک از سطح خارجی آن. سطح داخلی آن با استفاده از ترکیب پوشش اپوکسی و حفاظت کاتدی و سطح خارجی آن با لایه‌ای از آسفالت در برابر خوردگی محافظت شده بود. خوردگی سمت آب در اثر تاول‌زدگی پوشش اپوکسی بوده است که به خوردگی موضعی حفره‌دار شدن و در نتیجه سوراخ شدن منتهی شده است. تاول‌زدگی پوشش می‌تواند در اثر سیستم حفاظت کاتدی باشد. خوردگی سطح زیرین سنگین (سمت خاک) نیز ممکن است در اثر جریان‌های آواره‌ای ناشی از حفاظت کاتدی مخازن مجاور باشد. در این مورد استفاده از حفاظت کاتدی یکپارچه برای تمام مخازن کارساز خواهد بود زیرا که امکان وجود جریان‌های آواره‌ای را حذف می‌نماید [۵۱].

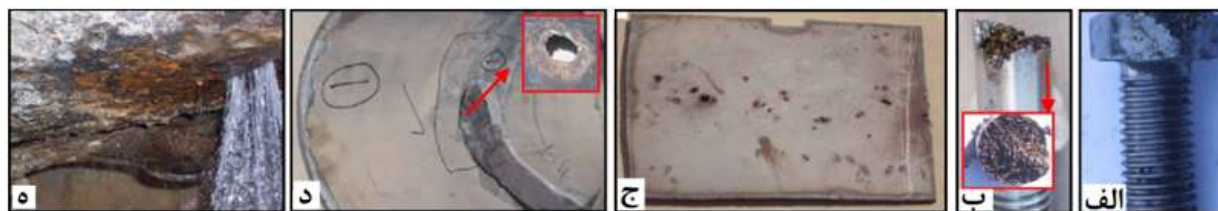
۲-۷- خرابی خطوط لوله آب پوشش داده شده با ملات سیمان [۵۱]

این خرابی در لوله فولادی با پوشش داخلی ملات سیمانی و پوشش خارجی پلی‌اتیلن که توسط X پاندو (آب‌بند پایه MgO) آب‌بند شده بودند، رخ داده‌است. خوردگی شدیدی تنها در سطح داخلی این لوله‌ها مشاهده شد (شکل ۴(د)) که

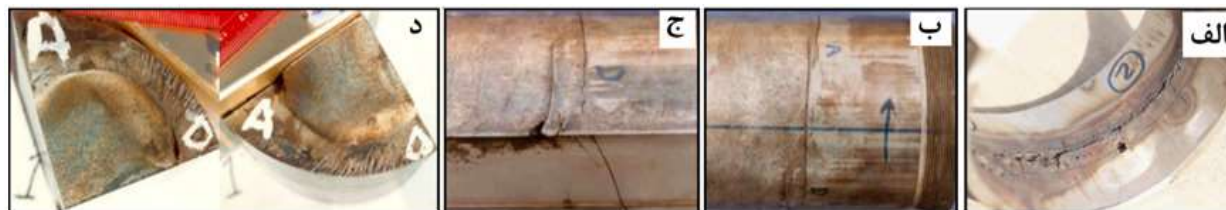
آنالیز محصولات خوردگی و ملات سیمان، غلظت بالای کلرید را نشان داد. سایر مطالعات تعدادی خوردگی، ترک و حفره را در قسمت داخلی لوله نشان داد (شکل ب). به نظر می‌رسد علت اصلی این خرابی‌ها زوال یا جدایش X پاندو توسط آب غنی از سولفات-کلرید باشد که حاصل از تماس فلز با آب و در نتیجه شروع و سپس انتشار خوردگی موضعی در داخل لوله است. از آنجایی که عملکرد X پاندو در محل اتصال رضایت بخش نبود، توصیه شده است که ماده آب‌بند دیگری جایگزین شود. خرابی مشابهی در یکی از بزرگترین لوله‌های انتقال آب فشار بالا (با پوشش‌های مشابه مورد قبلی) که بیشتر از ۲۰ سال در حال کارکردن بود رخ داده بود. این پارگی در محلی دور از نقطه اتصال بوده و اطراف محل نشی به شدت خورده شده بود که مقدار بسیار زیادی آب از این قسمت به سمت بیرون جاری می‌شد (شکل ۴(ه)). مراحل مختلف که منجر به خرابی شده‌اند عبارتند از: ۱) جدا شدن پوشش خارجی پلی‌اتیلن از سطح فولاد؛ ۲) تماس فولاد با خاک خورنده، شروع و انتشار طولانی مدت خوردگی در قسمت خارجی؛ ۳) نازک شدن موضعی لوله و متعاقباً شکست آن؛ ۴) حذف موضعی پوشش سیمانی و ایجاد حفره‌هایی در سمت آب (در نزدیکی و نیز دور از محل پارگی)؛ ۵) پیشروی پارگی به دلیل حفره‌ها و رخ دادن پارگی در مکان‌های دیگر. در این مورد نیز نوسازی سیستم حفاظت کاتدی لوله کارساز خواهد بود [۵۱].



شکل ۳- خوردگی فولاد ضدزنگ گرید دوپلکس ۲۲۰۵ (الف: پمپ و ب) در محل واشر و فلنج؛ خوردگی فولاد ضدزنگ سوپر دوپلکس ASTM A ۸۹۰ (ج: پمپ و د) محل جوش لوله‌ها؛ (ه) خوردگی ماکروسکوپی فکله آب [۵۰].



شکل ۴- (الف) سطح کلاهک خراب شده، (ب) مود خرابی پیچ در نزدیکی کلاهک، (ج) سطح داخلی صفحه زیرین، (د) سطح داخلی لوله که آب‌بند X پاندو جدایش یافته و (ه) تصویر نشان‌دهنده ریزش آب از لوله پاره شده [۵۱].



شکل ۵ - الف) سطح داخلی لوله خورده شده از محل جوشکاری [۵۱]؛ ب) ترک‌هایی بر روی شفت پمپ بازگردش شورآب، ج) ترک - های روش شفت و خوردگی در شیار جاکلیدی و گوشه‌ها، د) سطوح مقطع شکست [۳۰].

۲ - ۸ - نشت‌هایی در محل جوش‌های لوله‌های شورآب در یک واحد آب شیرین کن اسمز معکوس

در این مورد، نشت‌هایی در موقعیت‌های مختلف محل اتصال جوش در خروجی شورآب گزارش شده است (شکل ۵ الف). لوله‌ها، هدرهای اصلی، پمپ‌های فشار قوی و محل‌های اتصال جوش از فولاد زنگ‌نزن ۳۱۷L ساخته شده است. قبل از راه اندازی، واحد آب شیرین کن اسمز معکوس تحت حفاظت قرار گرفته و غشاها با استفاده از فرمالین حفاظت شدند، با این حال خوردگی شدید در اتصالات جوش در لوله‌ها مشاهده شد. این خوردگی ناشی از حفاظت طولانی در شورآب حاوی فرمالین بود که باعث اسیدی شدن آب شده است. رکود این آب، منجر به تشکیل حفرات، سپس شروع و انتشار فرایند خوردگی می‌شود. محل اتصال جوش، که به دلیل مقاومت به خوردگی نامناسب در شورآب، عملکرد ضعیفی دارد، می‌تواند توسط جوشکاری TIG با استفاده از جوشکاری اینکونل ۶۲۵ جایگزین شود که به نظر می‌رسد که قابلیت اطمینان جوش را فراهم کند [۵۱].

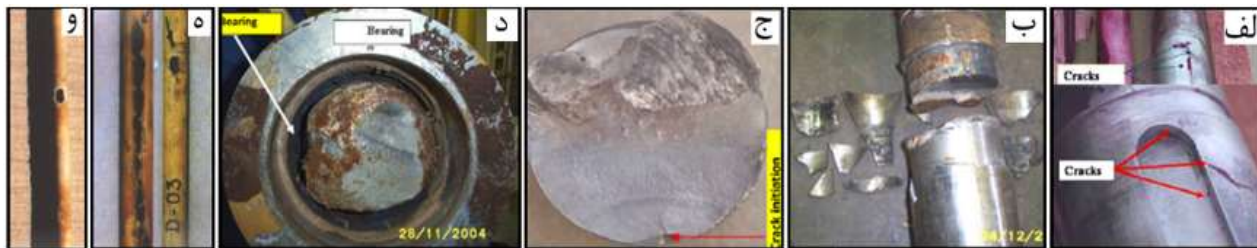
۲ - ۹ - بررسی شکست پمپ بازگردش شورآب در شفت واحد آب شیرین کن [۳۰].

شکست ناشی از چندمحدوده ترک بزرگ است که به صورت موازی هم بوده و تعدادی ترک کوچکتر نیز وجود داشت که یا از لبه‌ها شروع شده و به صورت منشعب و درون‌دانه‌ای انتشار یافته بودند و یا محدود به بخش داخلی نمونه بودند (شکل ۵ ب). اگرچه در بخش بزرگی از شفت با جنس ۳۱۶L، که دائما در تماس با پمپ شورآب است، خوردگی یا ترک رخ نمی‌دهد، اما کلیدهای زیر شیار در محل اتصال شفت به موتور محرک، به دلیل امکان تجمع شورآب و بالا رفتن غلظت یون‌ها کلر، محل‌های مناسبی برای حمله خوردگی موضعی فراهم

نموده و تمرکز بالای تنش سبب شروع ترک از این نواحی می‌شود (شکل ۵ ج). بررسی‌های سطح شکست مطابق شکل ۵ د) نشان داد که شکست شفت اساسا در اثر خستگی خوردگی در محیط حاوی کلر و بارگذاری دینامیک شفت چرخان اتفاق افتاده است. در این مورد می‌توان با اصلاح طراحی نحوه نصب شفت به موتور از تماس کلر با شیار کلید جلوگیری نمود. همچنین، آبی که برای خنک کاری و روان کاری به سطح اسپری می‌شود باید عاری از نمک باشد تا یون‌ها کلر در محل اتصالات تجمع ننماید.

۲ - ۱۰ - شکست برشی شفت پمپ بازیافت شورآب [۵۲].

شکست برشی شفت (از جنس فولاد زنگ‌نزن آستنیتی ۳۱۶) پمپ بازیابی شورآب در واحد آب شیرین کن گزارش شده است. در بازرسی چشمی ترک‌های زیادی در منطقه کلید دیده شد (شکل ۶ الف) و روکش نیز به قسمت‌های زیادی شکسته شده بود (شکل ۶ ب). مکانیزم شکست شامل چهار مرحله بوده است: ۱) شروع حفره (که از منطقه شیار کلید است؛ ۲) شروع ترک (در اثر وجود تمرکز تنش و نیز لقی بین کلید و شیار کلید؛ ۳) انتشار ترک (در اثر چرخش و لرزش در طول ترک، ترک در اثر پدیده خستگی خوردگی انتشار می‌یابد؛ ۴) برش شفت (که در اثر وارد شدن تنش زیاد به شفت صورت می‌گیرد). محل شروع ترک و شکست شفت به ترتیب در شکل‌های ۶ ج) و د) آمده است. برای جلوگیری از خستگی خوردگی باید: ۱) راه‌اندازی پمپ بازیابی شورآب به دقت انجام شده و از بسته بودن شیر تخلیه قسمت پایین پمپ اطمینان حاصل شود، تا برگشت جریان آب به داخل پمپ در حال کار صورت نگیرد. ۲) تمام شفت‌های پمپ بازیابی شورآب در تعمیر و نگهداری معمول باید بازرسی شوند.



شکل ۶ - الف) ترک‌های روی منطقه کلید شفت، ب) دید نزدیک شفت شکسته ج) محل شروع ترک در شفت، د) محل شکست شفت [۵۲، ۵۳]، ه) لوله‌های سوراخ شده تبخیر کننده، و) لوله سوراخ شده در شرایط سرویس [۵۳، ۵۴].

۲ - ۱۱ - شکست در لوله‌های تبخیر کننده در واحد

MED و لوله‌های آب شیرین کن الوجه [۵۳، ۵۴]

شکست‌هایی در لوله‌های آلومینیومی-برنجی اتفاق افتاده است (شکل ۶ ه)). در لوله سمت راست، تخریب به دلیل خوردگی تصادمی بوده که ناشی از سرعت جریان بالای آب حاوی ضایعات مواد است. در لوله سمت چپ، عامل تخریب خوردگی فرسایشی ناشی از ذرات ساینده درون آب بوده است. برای جلوگیری از خوردگی تصادمی باید لوله‌ها از جنس آلیاژ نیکل-مس ۹۰/۱۰ یا آهن و یا مس-نیکل اصلاح شده با منگنز استفاده شود. راه‌حل دیگر افزایش سطح مقطع مسیر جریان با استفاده از سینی‌های توزیع است که سرعت جریان و خوردگی تصادمی را کاهش می‌دهد. خوردگی فرسایشی لوله‌های ردیف پایین می‌تواند با بهبود سیستم تخلیه محفظه تبخیر کننده کنترل شود. در شکل ۶ و) نیز شکست لوله از جنس آلومینیوم-برنج (UNSC8700) آمده است. در مجموعه ۳۱ لوله در طول سرویس سوراخ شده‌اند که به مدت ۱۳ سال کار کرده بودند. تخریب لوله‌ها بیشتر شبیه خوردگی فرسایشی ناشی از سطح خارجی بوده و الگوی پاشش غیریکنواخت آب دریا بر روی لوله‌ها عامل سوراخ شدن موضعی لوله‌ها شده است. البته توسعه فیلم اکسید غیر چسبنده در طول سرویس می‌تواند عامل شکست زودرس لوله‌ها باشد. تمیز کردن منظم سینی توزیع، حفره‌ها و نازل‌ها باعث می‌شود که الگوی پاشش آب دریا بر لوله‌ها یکنواخت شده و خوردگی فرسایشی را محدود نماید. از طرفی، در زمان خاموشی، محیط باید خشک و اکسید مس بدون آب تشکیل شود که لایه محافظ‌تری از سایر شکل‌های اکسید مس بر سطح لوله است [۵۳، ۵۴].

۲ - ۱۲ - خوردگی لوله چگالنده واحد آب شیرین کن

MSF شماره IV جده [۵۴]

در اثر مشاهده خوردگی در لوله‌های چگالنده، مشخص شد که از ۵۴۰۰ لوله، حدود ۲۰۰ لوله در اثر مشکلات ناشی مسدود شده‌اند. تمام لوله‌های مسدود شده در دو طرف محل تخلیه قرار داشت. در این قسمت، باید گازهای خارج شده از شورآب در اتمسفر تخلیه می‌شدند اما به دلیل عدم تخلیه مناسب، این گاز-های خورنده وارد لوله‌ها شده، در آنجا محبوس شده و میعان شده‌اند. این میعانات گازی به دلیل حل شدن گاز CO_2 و سایر گازهای خورنده مانند: SO_2 ، Cl_2 ، H_2S و غیره، اسیدی هستند و باعث خوردگی یکنواخت لوله‌ها می‌شود. نازک شدن لوله‌ها در اثر خوردگی یکنواخت در دو انتهای سینی تخلیه باعث شکست لوله‌ها شده است. برای حل این مشکل باید طراحی و عملکرد سیستم تخلیه اصلاح شده و لوله‌هایی که دچار خوردگی شده‌اند، به خطوط تخلیه اصلی وصل شوند.

۲ - ۱۳ - تعدادی از مشکلات خوردگی در واحد آب

شیرین کن MSF الجبیل [۵۵]

۲ - ۱۳ - ۱ - تقسیمات و دیوارهای جانبی

در این واحد آب شیرین کن، تمام تقسیمات و دیوارهای جانبی از فولاد کربنی ساخته شده‌اند، به جز دو دیوار اول که با فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L پوشش داده شده‌اند. سرعت متوسط خوردگی که در سه بخش شورآب، پاشش و بخار محاسبه شد تماماً در محدوده‌ی مجاز طراحی قرار داشت. در طبقات با دمای بالا نسبت به طبقات با دمای پایین، غلظت گازهای تراکم‌ناپذیر و سرعت بخار بیشتر است. از طرفی در دمای پایین، غلظت اکسیژن نقش کلیدی در سرعت خوردگی بازی می‌کند. بیشترین خوردگی در نزدیکی فیلتر و به شکل خوردگی حفره‌دار شدن بود که مربوط به اثر گالوانیک بین ۳۱۶L (جنس فیلتر) و دیوارات تقسیم کننده بخش‌ها (فولاد کربنی) است. همچنین تعدادی حفره نیز در خط آب یافت شد که به علت پیل‌های اختلاف دمشی و اختلاف غلظت بود [۵۵].

۲-۱۳-۲- ناودان آب مقطر

حفره های کم عمق در ناودان آب مقطر ساخته شده از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L مشاهده شد. شروع حفره از فولاد زنگ نزن به طور قابل ملاحظه ای متأثر از رکود آب غنی از کلر است، در حالی که از منظر انتشار حفره، غلظت اکسیژن و کلر با سرعت جریان کم، مهمترین عواملی هستند که سرعت انتشار حفره را تعیین می کنند. برای جلوگیری از این مشکل، ناودان آب مقطر باید در زمان های خاموشی برای تعمیر به خوبی خشک شود [۵۵].

۲-۱۳-۳- ورق کف طبقه

خوردگی حفره ای ورق سقف در طبقات مختلف در نزدیکی دروازه شور آب، در اثر تماس گالوانیک دروازه شور آب (از جنس فولاد زنگ نزن ۳۱۶L) و ورقه سقف (از جنس فولاد کربنی)، به وجود آمده است [۵۵].

۲-۱۳-۴- سقف خارجی

در بازرسی سطح خارجی سقف محفظه پاشش خارجی، چندین خوردگی در تمام واحدها، مشاهده شد (شکل ۷ الف)). علت اصلی این خوردگی، تخلیه ضعیف و توقف آب در این مناطق است. به طور کلی، خوردگی سقف محفظه پاشش می تواند متأثر از عوامل زیادی باشد: (۱) دما، (۲) زمان مرطوب ماندن و (۳) شوری اتمسفر. برای جلوگیری از مشکلات خوردگی سقف، سه نکته باید در نظر گرفته شود: (۱) تهویه خوب به منظور به حداقل رساندن زمان مرطوب ماندن، (۲) اعمال پوشش اپوکسی با کیفیت خوب، با در نظر گرفتن عمر پوشش و (۳) بازرسی دوره ای پوشش و مواد سقف [۵۵].

۲-۱۳-۵- تکیه گاه لوله ها

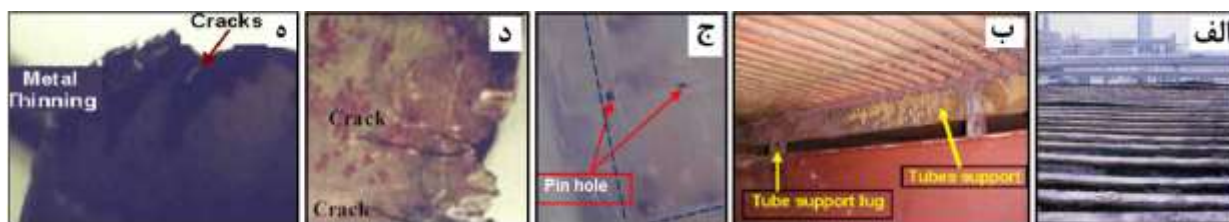
تکیه گاه های لوله های دو طبقه اول از فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و سایر طبقات از فولاد کربنی ساخته شده است. در دو قسمت، فولاد کربنی دچار تخریب شده بودند؛ (۱) بخش پایینی که به سینی آب جوش داده شده بود و (۲) محل باز شدن لوله. در هر دو محل، خوردگی گالوانیک رخ داده بود که در قسمت اول به دلیل تماس با فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و در قسمت دوم به دلیل تماس با نیکل-مس ۹۰/۱۰ بوده است. شکل ۷ ب) شدت خوردگی را در بخش پایینی محل بسته شدن تکیه گاه لوله ها نشان می دهد [۵۵].

۲-۱۳-۶- یاتاقان چکانده

خوردگی حفره دار شدن و خوردگی یکنواخت در این منطقه، با نفوذ زیاد حفره مشاهده شد (شکل ۷ ج)). محفظه پاشش در منطقه مجموعه لوله ها گسترش یافته و باعث ایجاد یک لایه آب با pH پایین (به دلیل انحلال گازهای تراکم ناپذیر) شده است، که همیشه در یاتاقان چکانده وجود دارد. این مشکل می تواند با اصلاح طراحی طبقات حل شود [۵۵].

۲-۱۳-۷- لوله های چکانده

تقریباً بعد از ۱۴ سال کارکردن تبخیر کننده، شکست ناگهانی تعدادی زیادی لوله نیکل-مس ۹۰/۱۰ در طبقه اول گزارش شد. مشخص شد که شکست لوله به علت خوردگی شیاری و ناشی از این عوامل بوده است: (۱) اثر گالوانیک بین فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و نیکل-مس ۹۰/۱۰؛ (۲) pH پایین با توجه به انباشت CO₂؛ (۳) لرزش لوله به دلیل شکاف ایجاد شده بین لوله و تکیه گاه لوله [۵۵].



شکل ۷- خوردگی: الف) سقف خارجی، ب) بخش پایین تکیه گاه و تیر لوله، ج) یاتاقان چکانده در محفظه پاشش، د) سطح خارجی، ه) سطح داخلی خط لوله تخلیه [۵۵].

۲- ۱۳- ۸- سیستم لوله‌کشی خروجی

در سیستم لوله‌کشی تخلیه که از فولاد ضدزنگ ۳۱۶، برای طبقات با درجه حرارت بالا، استفاده شده بود، در بازرسی چشمی سطوح درونی و بیرونی، ترک‌ها و نازک شدن لوله‌ها مشاهده شد. این ترک‌ها که در نزدیکی اتصالات جوش بودند از یک ناحیه نازک با شاخه‌های زیاد از سطح داخلی آغاز شده بودند. این خوردگی در لوله‌ها به pH پایین نسبت داده‌است و تصاویر آن در شکل ۷(د) و (ه) آمده است. در این مورد با طراحی سیستم تهویه می‌توان خوردگی داخل محفظه پاشش را کاهش داد. از طرفی برای بهبود عملکرد سیستم تهویه زمان ماندن CO₂ در داخل محفظه پاشش، باید دیده‌بانی شود. همچنین در زمان خاموش بودن، قبل از باز کردن برای تعمیر و نگهداری، باید محفظه‌های پاشش کاملاً خشک شود [۵۵].

۲- ۱۴- خوردگی محفظه پاشش در واحد MSF

[۴۲]

فولادهای کربنی رایج‌ترین مواد برای ساختن محفظه‌های پاشش هستند که می‌تواند به صورت کلد شده با فولاد زنگ‌نزن یا نیکل-مس نیز مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۸(الف) و (ب) به ترتیب خوردگی در طبقه سوم و خوردگی در سقف و دیوار طبقه هشتم نشان داده شده‌است. علت این خوردگی‌ها عبارتند از: (۱) سرعت بالای شورآب که کف طبقات را تخریب می‌کند؛ (۲) تصادم و فرونشستن شورآب پاشیده شده در دیوار-های طبقات؛ (۳) غلظت بالای کلر در شورآب؛ (۴) غلظت بالای مس در شورآب بازیافت شده. درجه‌هایی که مقدار جریان

شورآب از یک طبقه به طبقه دیگر را کنترل می‌کند، از فولاد زنگ‌نزن ساخته شده است که علت آن مقاومت در برابر شورآب متلاطم است. اگرچه در طبقات پوشش داده شده با فولاد زنگ‌نزن، مشکلی ایجاد نشده ولی در طبقات فولاد زنگ‌نزن، حفره‌های عمیقی مشاهده شد. این حفره‌ها ناشی از اثر گالوانیکی در فولاد زنگ‌نزن است که عایق الکتریکی نمودن فولاد زنگ‌نزن توسط ورق‌های پلاستیک، واشرها در تمام بست‌های محل اتصال فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی، بسیار کارساز است.

تعدادی خوردگی موضعی محفظه پاشش در شکل ۸(ج) و (د) آمده است. ورق‌های پوشش‌دار توسط جوش به یکدیگر و توسط بست از جنس فولاد زنگ‌نزن به فولاد کربنی متصل شده‌اند. حفره‌های میکروسکوپی و پوسته شدن زنگ در این محل (اغلب در منطقه گرمادیده جوش)، بست‌ها و شیار ظاهر شده است. در محفظه پاشش فولاد کربنی با پوشش فولاد زنگ‌نزن، موثرترین روش کنترل خوردگی در محل اتصالات، ایجاد منطقه‌ی کاتدی موثر با رنگ‌کردن فولاد زنگ‌نزن است، هرچند رنگ‌کردن فولاد کربنی برای کنترل خوردگی توصیه نمی‌شود. خوردگی فولاد کربنی در محفظه پاشش ناشی از دوره‌ی خاموشی بوده که باعث به وجود آمده شرایط زیل شده است: (۱) حضور شورآب با غلظت بالای کلرید، به صورت راکد یا با سرعت جریان کم. (۲) تشکیل شیارها در اثر نمک و رسوبات آلاینده در کف، دیوار و سایر قسمت‌های محفظه. (۳) اکسیژن حل‌شده، که محیط مناسبی برای شروع و انتشار خوردگی فراهم می‌کند.



شکل ۸- خوردگی در: (الف) طبقه سوم محفظه پاشش، (ب) سقف و دیوار طبقه هشتم محفظه پاشش، (ج) خوردگی سمت بخار در تبخیر-کننده و (د) خوردگی لوله‌های انتقال حرارت [۴۲].

نتیجه گیری

در این مقاله به مرور پدیده ی خوردگی در واحدهای آب شیرین کن پرداخته شده، نوع خوردگی، علت و راههای جلوگیری از آن با مطالعه موردی قطعات واقعی تخریب شده در این صنایع مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به شرایط کاری هر نوع واحد، خوردگی های خاصی در هر یک از آنها صورت می گیرد، اما رایج ترین خوردگی در بین آنها خوردگی های موضعی و به ویژه خوردگی حفره ای، شیار، فرسایشی، گالوانیک و خستگی خوردگی است. غلظت بالای کلر در شوراب و سایر گازهای تراکم ناپذیر در اتمسفر این واحد به همراه عواملی از قبیل: دمای بالا، طراحی نامناسب سیستم و راکد ماندن آب، انتخاب و طراحی نامناسب تک تک قطعات، انتخاب نامناسب جنس قطعات، در تماس بودن قطعات غیرهمجنس در حضور آب، عدم رعایت استانداردهای جوش کاری، عدم دقت در عملیات پوشش دهی قطعات، سرعت بالای سیال حاوی ذرات و رسوبات ساینده، وارد آمدن تنش بیشتر از حد مجاز به قطعات و غیره باعث تشدید شرایط خوردگی در این صنعت شده است. در مجموع برای کنترل پدیده خوردگی در این واحدها می توان از این روش ها استفاده نمود:

- اعمال پوشش های مقاوم.
- طراحی، ساخت و انتخاب مواد مناسب، مانند: (۱) پرهیز از زاویه های تند و استفاده از زاویه های بازتر به منظور کاهش خوردگی تصادمی در لوله ها؛ (۲) پرهیز از طراحی هایی که باعث راکد ماندن آب در سطح قطعات می شود؛ مانند: شکاف ها و شیارها؛ (۳) استفاده از آب بندهای مناسب برای جلوگیری از نشتی ها؛ (۴) استفاده از مواد فلزی مقاوم تر در برابر آب دریا؛ (۵) استفاده از مواد پلیمری با استحکام بالا به جای برخی قطعه های فلزی؛ (۶) استفاده از واشر غیر جذبی جامد یا ماده آب بند، مانند واشر لاستیکی برای زیر فلنج ها و محل های اتصال؛ (۷) عایق نمودن فلزات با جنس های مختلف؛ (۸) اصلاحات طراحی قطعاتی که سیال از درون آنها عبور می کند، به صورتی که از جریان متلاطم جلوگیری شود؛ (۹) تنظیم بیشینه و کمینه جریان سیال
- رعایت استانداردهای ساخت مانند: (۱) جوشکاری؛ (۲) رنگ زدن قطعات؛ (۳) نصب قطعات مختلف به یکدیگر؛ (۴) پوشش - دهی قطعات؛ (۵) درست انجام دادن مراحل آماده سازی قطعات برای فرایندهای مختلف مانند: صیقل کاری، چربی گیری و غیره.
- استفاده از بازدارنده ها و افزودنی ها.
- حفاظت کاتدی مناسب.
- مانیتورینگ خوردگی، بازرسی فنی و پایش وضعیت سازه.

مراجع

- [1] M. W. Rosegrant, X. Cai, and S. A. Cline, World Water and Food to 2025. Washington, D.C.: International Food Policy Research Institute, 2002.
- [2] F. Kozisek, "12. Health Risks From Drinking Demineralised Water," Nutr. Drink. Water, Pp. 148-163, 2005.
- [3] Safe Drinking-water from Desalination, World Health Organization, 2011.
- [4] A. Gohari, S. Eslamian, A. Mirchi, J. Abedi-koupaei, and A. Massah, "Water transfer as a solution to water shortage : A fix that can Backfire," J. Hydrol., Vol. 491, Pp. 23-39, 2013.
- [5] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, Fundamentals of Salt Water Desalination, elsevier, 1st ed., 2002.

- [6] A. Eslamimanesh and M. S. Hatamipour, "Economical study of a small-scale direct contact humidification-dehumidification desalination plant," *Desalination*, Vol. 250, No. 1, Pp. 203–207, 2010.
- [7] P. Taylor, M. Nair, and D. Kumar, "Water desalination and challenges : The Middle East perspective : a review Water desalination and challenges : The Middle East perspective : a," *Desalin. Water Treat.*, Vol. 51, No. October 2014, Pp. 2030–2040, 2013.
- [8] *Seawater and Brackish Water Desalination in the Middle East, North Africa and Central Asia: A review of key issues and experience in six countries (Vol. 4): Annex 4 - Jordan (English)*. Washington, D.C.: World Bank Group, December. 2004.
- [9] N. Ghaffour, S. Lattemann, T. Missimer, K. C. Ng, S. Sinha, and G. Amy, "Renewable energy-driven innovative energy-efficient desalination technologies," *Appl. Energy*, Vol. 136, Pp. 1155–1165, 2014.
- [10] P. Liang, K. Xiao, Y. Zhou, X. Zhang, and B. E. Logan, "A New Method for Water Desalination Using Microbial Desalination Cells," *environ. Sci. Thechnol*, Vol. 43, No. 18, 2009, Pp. 7148–7152.
- [11] F. El-Taib Heakal, M. A. Deyab, M. M. Osman, and A. E. Elkholy, "Performance of Centaurea cyanus aqueous extract towards corrosion mitigation of carbon steel in saline formation water," *Desalination*, Vol. 425, No. October 2017, pp. 111–122, 2018.
- [12] H. Sakai, K. Dobashi, K. Iizuka, and T. Nakazawa, "Protective effect of an α 2-adrenoceptor antagonist, midaglizole, against allergen-provoked late asthmatic responses," *J. Asthma*, Vol. 32, No. 3, 1995, Pp. 221–226.
- [13] B. Corry, "Designing Carbon Nanotube Membranes for Efficient Water Desalination," *J. Phys. Chem. B*, Vol. 112, No. 5, 2008, Pp. 1427–1434.
- [14] A. House, T. Listons, L. Road, and R. Clayton, "Desalination for Water Supply FR / R0013," Vol. 44, No. February 2006, 2015.
- [15] Y. Al-Wazzan and F. Al-Modaf, "Seawater desalination in Kuwait using multistage flash evaporation technology historical overview," *Desalination*, Vol. 134, No. November 2000, Pp. 257–267, 2001.
- [16] E. Cardona and A. Piacentino, "Optimal design of cogeneration plants for seawater desalination," *Desalination*, Vol. 166, 2004, No. 1–3, Pp. 411–426,
- [17] C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos, "Solar assisted sea water desalination: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 19, 2013, Pp. 136 –163.
- [18] A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J. M. Wie, "Advances in seawater desalination technologies," *Desalination*, Vol. 221, No. 1–3, 2008, Pp. 47–69.
- [19] F. A. AlMarzooqi, A. A. Al Ghaferi, I. Saadat, and N. Hilal, "Application of Capacitive Deionisation in water desalination: A review," *Desalination*, Vol. 342, 2014, Pp. 3–15.
- [20] J. E. Miller, "Review of Water Resources and Desalination Technologies," *Sandia Natl. Lab. Albuquerque, NM*, Vol. 49, No. March, 2003, Pp. 200 –0800.
- [21] T. Younos , K. E. Tulou, "overview of desalination techniques," *J. Contemp. water*, No. 132, Pp. 3–10, 2005.
- [22] D. Cohen-Tanugi, L. C. Lin, and J. C. Grossman, "Multilayer Nanoporous Graphene Membranes for Water Desalination," *Nano Lett.*, Vol. 16, No. 2, 2016, Pp. 1027–1033.
- [23] S. Daer, J. Kharraz, A. Giwa, and S. W. Hasan, "Recent applications of nanomaterials in water desalination: A critical review and future opportunities," *Desalination*, Vol. 367, 2015, Pp. 37–48.
- [24] W. Ma, Y. Zhao, and L. Wang, "The pretreatment with enhanced coagulation and a UF membrane for seawater desalination with reverse osmosis," *Desalination*, Vol. 203, No. 1–3, , 2007, Pp. 256–259.
- [25] B. L. Pangarkar, M. G. Sane, and M. Guddad, "Reverse Osmosis and Membrane Distillation for Desalination of Groundwater: A Review," *ISRN Mater. Sci.*, Vol. 2011, , 2011, Pp. 1–9.
- [26] W. S. W. Lee and O. W. Oldfield, "corrosion problems caused by bromine formation in additive dosed MSF desalination plants," Vol. 44, 1983, Pp. 209–221.
- [27] S. Water, C. Corporation, and D. Plant, "Early failure of cupro-nickel condenser tubes in thermal desalination plant," Vol. 116, 1998, Pp. 135–143.
- [28] E. A. Al Sum, S. Aziz, A. Al Radif, and M. Samir, "Vapour-side corrosion of copper base condenser tubes of the MSF desalination plants of Abu Dhabi," Vol. 97, 1994, Pp. 109–119.
- [29] A. U. Malik, P. C. M. Kuty, and I. N. Andijani, "Materials performance and failure evaluation in SWCC MSF plants," *Desalination*, Vol. 97, 1994, Pp. 171–187.

- [30] A. U. Malik, S. A. Al-Fozan, F. Al-Muaili, and M. Al-Hajri, "Frequent failures of motor shaft in seawater desalination plant: Some case studies," *J. Fail. Anal. Prev.*, Vol. 13, No. 2, 2013, Pp. 144 - 152.
- [31] B. Todd, *Desalination and Water Resources: material selection and corrosion*, Vol. II, capter: pump materials for desalination plants.
- [32] A. M. S. El Din, "Corrosion in Multi-stage Flash Evaporation Distillers," material selection and corrosion, vol. II, *Encyclopedia of Desalination and Water Resources*.
- [33] R. K. Pandey, "Failure analysis of refinery tubes of overhead condenser," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 13, No. 5, 2006, Pp. 739-746.
- [34] G. R. Tillack, V. Artemiev, and A. Naumov, "Rekonstruktion dynamischer objekteigenschaften f??r CT," *Mater. Test.*, Vol. 43, No. 6, 2001, Pp. 254-258.
- [35] P. Moore, "the atlas specialty metals technical handbook of stainless steels," No. August, 2013, Pp. 1800 - 818.
- [36] A. U. Malik and S. Al Fozan, "Localized corrosion of AISI 316L S.S in Arabian Gulf seawater," *Desalination*, Vol. 97, 1994, Pp. 199-212.
- [37] G. Fontana, *corrosion engineering*, Third. McGraw-Hill Book Company; 3rd edition (November 1, 1985).
- [38] G. S. Frankel, "Pitting Corrosion of Metals A Review of the Critical Factors," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 145, No. 6, 1998, Pp. 2186-2198.
- [39] J. M. Makar, "A preliminary analysis of failures in grey cast iron water pipes," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 7, 2000, Pp. 43-53.
- [40] A. M. Jamaluddin, A. U. Malika, I. Andijani, and S. Ahmed, "Crevice corrosion behavior of high-alloy stainless steels in a SWRO pilot plant," *Desalination*, Vol. 171, 2004, Pp. 289-298.
- [41] F. Berndt and A. Van Bennekom, "Pump shaft failures D a compendium of case studies," *Eng. Fail. Anal.*, Vol. 8, No. 2001, Pp. 135-144, 2006.
- [42] A. U. Malik and S. A. Al-Fozan, "Corrosion and materials selection in MSF desalination plants," *Corros. Rev.*, Vol. 29, No. 3-4, 2011, Pp. 153-175.
- [43] A. Schüssler and H. E. Exner, "The corrosion of nickel-aluminium bronzes in seawater-II. The corrosion mechanism in the presence of sulphide pollution," *Corros. Sci.*, vol. 34, no. 11, pp. 0-11, 1993.
- [44] K. Al-Anezi and N. Hilal, "Effect of carbon dioxide in seawater on desalination: A comprehensive review," *Sep. Purif. Rev.*, Vol. 35, No. 3, 2006, Pp. 223-247.
- [45] A. U. Malik, S. A. Al-fozan, and M. Al Romiah, "Relevance of Corrosion Research in the Material Selection for Desalination Plants 1," in *Second Scientific Symposium on Maintenance Planing and Operations*, 1993, No. January, Pp. 885-900.
- [46] A. U. Malik, M. Mobin, and I. N. Andijani, "Investigations on the Corrosion of Flash Chamber Floor Plates in a Multistage Flash Desalination Plant," *J. Fail. Anal. Prev.*, Vol. 6, No. December, 2006, Pp. 19-24.
- [47] M. Mobin and A. U. Malik, "failure of micron cartridge filter," *Mater. Perform.*, June, 2004.
- [48] M. Mobin and A. U. Malik, "Premature Failure of Repainted Epoxy on Bottom Plate of a MainFuel Oil Tank - A Case Study," *Mater. Perform.*, Vol. 2, No. February 2005, Pp. 28-31.
- [49] M. Mobin, A. U. Malik, F. Al-Muaili, and M. Al-Hajri, "Failure analysis: Investigation of the failure of a high- pressure pump motor bearing oil cooler," *Mater. Perform.*, Vol. 44, No. 8, 2005, Pp. 50-54.
- [50] N. Larché, P. Dézerville, and D. Le Flour, "Corrosion and corrosion management investigations in seawater reverse osmosis desalination plants," *Desalin. Water Treat.*, Vol. 51, No. 7-9, 2013, Pp. 1744-1761.
- [51] A. U. Malik, I. Andijani, M. Mobin, S. Al-Fozan, F. Al-Muaili, and M. Al-Hajiri, "An overview of the localized corrosion problems in seawater desalination plants — Some recent case studies," *Desalin. Water Treat.*, Vol. 20, No. 1-3, 2010, Pp. 22-34.
- [52] S. A. Al-fozan, A. U. Malik, and M. Al-hajri, "Failure Analysis of Sheared Shaft of a Brine," *Saline Water Convers. Corp.*, No. August, 2005.
- [53] T. L. P. Prakash and A. U. Malik, "Investigation on the failure of Al-Wajh multieffect desal condenser tubes," in *Secound Acquired Experience Symposium on desalination plants*, 1997, Pp. 1429-1444.

- [54] P. Taylor, A. U. Malik, S. A. Al-fozan, and F. Al-muaili, "Corrosion of heat exchanger in thermal desalination plants and current trends in material selection," Desalin. Water Treat., No. November, Pp. 1-11, 2014.
- [55] S. A. Al-fozan and A. U. Malik, "MSF evaporator materials evaluation after 20 years in service," Desalin. Water Treat., Vol. 2, No. 1-3, 2012, Pp. 345-352.