



بررسی خوردگی در آلیاژ آلومینیوم- برنج دستگاه آب شیرین کن مجتمع گازی پارس جنوبی

بهروز افشاری بهمن بیگلو¹، اسماعیل جعفری^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد- خوردگی و حفاظت مواد - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز
2- استادیار گروه مهندسی مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
* شیراز، کد پستی 74731-71987، jafarias@iaushiraz.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

یکی از تجهیزات بسیار مهم برای تأمین آب شیرین در پالایشگاه‌ها، دستگاه آب شیرین کن از نوع تیوبی است. در این پژوهش علل خوردگی بر روی تیوب‌های آلیاژ آلومینیوم- برنج در دستگاه آب شیرین کن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور آنالیز شیمیایی آب ورودی برای شناسایی ترکیب آب و پراش اشعه ایکس جهت شناسایی و آنالیز رسوبات تشکیل شده بر روی تیوب‌ها انجام گرفت. همچنین نمونه‌ها به منظور بررسی ریزساختاری و تشخیص نوع خوردگی به وجود آمده، توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شدند. مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌های با و بدون رسوب، با استفاده از آزمایش پلاریزاسیون سیکنی مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این، ویژگی‌های آلیاژ بکار رفته به همراه نتایج بازرسی‌های حین ساخت و میزان انطباق آنها با استانداردهای مربوط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش‌های انجام شده، نشان داد که علت انهدام زود هنگام تیوب‌ها، خوردگی حفره‌ای در آنها بوده است که عمدتاً در زیر رسوبات کربناتی، به وقوع پیوسته است.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 خرداد 1398
پذیرش: 9 مرداد 1398
ارائه در سایت: اردیبهشت 1399

کلیدواژه‌گان:

مقاومت به خوردگی
آلیاژ آلومینیوم- برنج
خوردگی حفره‌ای
آزمایش پراش اشعه ایکس
میکروسکوپ الکترونی روبشی

Investigating the Corrosion of Aluminum – Brass Alloy in Desalination Plant of South Pars Gas Complex

Behroz Afshari Bahman Biglo, Esmaeil Jafari*

Department of Materials Science, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

* P.O.B. 74731- 71987 Shiraz, Iran, jafarias@iaushiraz.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 4 June 2019
Accepted 31 July 2019
Available May 2020

Keywords:

Corrosion Resistance
Aluminum-Brass alloy
Pitting Corrosion
X-ray diffraction analysis
Scanning electron microscopy

Abstract

The tube desalination package is one of the most important equipments for supplying water in refineries. The corrosion causes of aluminum- brass alloy tubes in desalination package were studied in this research. For this purpose, chemical analysis of water To identify the composition of water and X-ray diffraction analysis in order to identify deposits layer, which was formed on the tube surface, was performed. Also to investigate the microstructure of the metal and surface layer and identify the type of corrosion, the samples were examined by scanning electron microscopy (SEM). The pitting corrosion of the samples, with and without deposition, were evaluated. For this purpose, cyclic polarization tests were used. Furthermore, the alloy characterization and the results of inspections during construction, and in compliance with the relevant standards were investigated. The results were shown that the pitting corrosion was the main factor of tube failure which was happened under the carbonate layer

1- مقدمه

جداشده دوباره به دریا ریخته می‌شود و آب‌های مقطر ذخیره و سپس توزیع می‌شوند. معمول‌ترین روش‌های شیرین کردن آب عبارتند از: 1- روش‌های تبخیری¹ 2- روش‌های اسمز معکوس، این پالایشگاه از روش اول جهت تولید آب شیرین، استفاده می‌نماید [1].

هدف از بکارگیری سیستم آب شیرین کن از آب دریا در پالایشگاه پنجم مجتمع گازی پارس جنوبی فراهم کردن منبع آب مقطر تمیز برای نیازهای خاص و مصارف گوناگون می‌باشد. آب این واحد از آب دریا تغذیه می‌شود و فرایند آن بر اساس جدا کردن آب از نمک به صورت تقطیر می‌باشد و آب‌نمک‌های

¹ Multi Effect Desalination

Please cite this article using:

B. Afshari Bahman Biglo, E. Jafari, Investigating the Corrosion of Aluminum – Brass Alloy in Desalination Plant of South Pars Gas Complex, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 17- 25, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.SID.ir

انديس اشباع لانگليير¹⁰ (LSI) استفاده کرد [13، 14]. عواملی مانند دما، میزان انتقال گرما، غلظت سولفات کلسیم، منیزیم، سیلیسیوم و قلیابیت بر روی تشکیل رسوب، تأثیر گذراند. از طرفی زمان ماندگاری اجزای محلول نیز، در تشکیل رسوب مؤثر است [13، 14]. چیلینگار و همکارش¹¹ بیان کردند که مس و آلیاژهای آن یکی از پرکاربردترین فلزات در ساخت اجزا دستگاه‌های آب شیرین کن، بخصوص نوع تبخیری، می‌باشند. زمانی که آب ورودی به دستگاه (نظیر آب دریا) از قابلیت رسوب‌گذاری برخوردار باشد، تشکیل یک لایه رسوب، می‌تواند سبب بروز خوردگی حفره‌ای در زیر رسوب مذکور گردد. هم‌زمان با افزایش pH واکنش دیگری نیز در سطوح حرارتی انجام می‌شود که طی آن، آنیون بیکربنات (HCO_3^-) آب از دست داده و به صورت کربنات کلسیم بر سطوح حرارتی رسوب می‌کند. با توجه به شرایط و دمای کاری دستگاه آب شیرین کن که حدود 50°C می‌باشد، حلالیت کربنات کلسیم حدود 35 ppm پیش‌بینی می‌گردد [13، 14].

اکسیژن محلول، یون‌های کلرید و سولفات مهم‌ترین عوامل خورنده در آب هستند. یون‌های کربنات و بیکربنات نیز مهم‌ترین عوامل ایجاد رسوب محسوب می‌شوند. لذا روش برخورد با دو مشکل خوردگی و رسوب‌گذاری در دستگاه‌ها، کاملاً متفاوت است. یکی از روش‌های تعیین تمایل به رسوب‌گذاری اندیس اشباع لانگلییر می‌باشد که یک مقدار کیفی بوده و تنها تمایل یا عدم تمایل آب به رسوب‌گذاری را نشان می‌دهد. برای رفع این اشکال از اندیس پایداری رایزنر¹² (RSI) استفاده می‌شود. [13، 14].

اندیس پایداری استیف و دیویس (S&DSI)¹³ برای بیان رسوب‌گذاری کربنات کلسیم استفاده می‌شود. داده‌های لازم برای محاسبه همانند داده‌های لازم جهت محاسبه اندیس اشباع لانگلییر است. همچنین غلظت‌های همه یون‌های محلول ورودی یا حداقل بعضی از یون‌های اصلی (نظیر HCO_3^- ، K^+ ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و Cl^-) مورد نیاز است. محاسبه اندیس استیف و دیویس طبق استاندارد ASTM D 4582 انجام می‌گیرد و مقادیر مثبت آن نشان‌دهنده تمایل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در سیستم است [15، 16]. اندیس استیف و دیویس با رابطه (1) قابل محاسبه است.

$$S\&DSI_c = pH_c - pH_s \quad (1)$$

لگران و همکارش¹ اظهار داشتند که رسوب‌گذاری و خوردگی از جمله مهم‌ترین مشکلات دستگاه‌های در تماس با آب می‌باشد که همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [2]. در محیط‌های آبی و در دمای محیطی، محصول خوردگی که به‌طور غالب مسئول محافظت فلز در برابر محیط خورنده می‌باشد، اکسید مس² است که یک لایه محافظ چسبنده می‌باشد. یک جزء مهم از محصولات خوردگی بر روی آلیاژ برنجی که حاوی درصد کمی آلومینیوم علاوه بر مس و روی است، اکسید آلومینیوم³ می‌باشد، که به‌طور قابل توجهی مقاومت مقاومت به خوردگی بر خوردگی یا تصادمی⁴ در آب شور با سرعت بالا را افزایش می‌دهد. البته آلیاژهای آلومینیوم برنج مستعد به روی زدایی هستند مگر آنکه ممانعت یا مقاوم⁵ شده باشند. افزودن فسفر، آرسنیک یا آنتیموان (معمولاً 0/01 تا 0/02 درصد) به فلزات آدمیرالیتی، برنج آدمیرالیتی⁶، یا آلومینیوم برنج به‌طور مؤثری مقاومت بالایی در برابر روی زدایی ایجاد می‌نماید [3-5]. زمانی که آب ورودی به دستگاه (نظیر آب دریا) از قابلیت رسوب‌گذاری برخوردار باشد، تشکیل یک لایه رسوب، می‌تواند سبب بروز خوردگی حفره‌ای و انواع خوردگی‌های موضعی شود در این مورد می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط الزافین⁷ و حبیب⁸ بر روی خوردگی توام با تنش [6، 7] و همچنین ناصری پور⁹ بر روی خوردگی حفره‌ای دستگاه‌های آب شیرین کن اشاره کرد [8]. در زیر رسوب گردد. همچنین می‌توان به پژوهش‌های انجام شده توسط میلانی بر روی خوردگی سایشی در دستگاه آب شیرین کن، [9] دیاب در مورد روش‌های افزایش مقاومت به خوردگی، [10] میگه‌اد بر روی روش‌های رسوب‌زدایی و افزایش مقاومت به خوردگی [11] و سباق بر روی به‌کارگیری ممانعت کننده در دستگاه‌های آب شیرین کن اشاره کرد [12].

یکی از عوامل مهم در خوردگی در آب دریا میزان شوری آب می‌باشد. شوری آب‌های آزاد بین 32 تا 36 متغیر است. تأثیر اصلی شوری روی خوردگی، ناشی از تأثیر آن روی هدایت آب و تأثیر یون‌های کلرید روی تخریب لایه محافظ است. معمولاً به‌منظور تعیین وضعیت خوردگی یا رسوب‌گذاری آب می‌توان از

¹ Legrand, Leroy, 1990

² Cu₂O

³ Al₂O₃

⁴ Impingement Corrosion prevention

⁵ Admiralty Brass

⁷ Y. A. Alzafin, 2009

⁸ K. Habib, 2003

⁹ F. Nasirpour, 2014

¹⁰ Langelier Stability Index

¹¹ Chilingar, 2007

¹² Rizner Stability Index

¹³ Stiff & Davis Stability Index

سرویس خارج شده بود، نمونه برداری شد و عناصر شیمیایی تشکیل دهنده این رسوبات به روش طیفسنجی فلورسانس اشعه ایکس بر اساس استاندارد ASTM E1621, 2005 و با استفاده از دستگاه Thermo Scientific XRF Analyzer مدل ARL PERFORM'X با دقت یک هزارم درصد اتمی تعیین گردید که نتایج این آزمایش در جدول 3 آورده شده است. همچنین ترکیبات بلوری موجود در این رسوبات به روش الگوی پراش پرتو ایکس و با استفاده از دستگاه GNR XRD Analyzer مدل Explorer بر اساس استاندارد BS EN 13925-1:2003، تعیین شد [21, 22].

جدول 1 نتایج آنالیز آب ورودی به سر دوش های آب شیرین کن

Table 1 The Analysis result of input water into the desalination showers

مقدار اندازه گیری شده، mg/l	مقادیر طراحی mg/l	روش استاندارد	پارامترهای آزمایش شده
1541	1530	23340	منیزیم
500	460	23340	کلسیم
12150	12290	3111B	سدیم
<0/05	خیلی کم	3500-Fe-B	آهن
23751	22650	D4458	کلراید
3099	3210	D518	سولفات
112	110	2320B	بیکربنات
9/6	20	2320B	کربنات
108	-	2320B	M. Alkalinity
8	-	2320B	P. Alkalinity
43550	45560	2540C	کل مواد جامد محلول
2	92	2540D	کل مواد جامد معلق
<1	-	4500S	سولفید
<0/06	-	D515	فسفات
خیلی کم	-	D589	سیلیس
8/1	8/2	-	pH
0/15	0/18	-	مقاومت ویژه (Ω)

2-2- محاسبه اندیس رسوب گذاری استتیف و دیویس در دماهای مختلف

برای بررسی رسوب گذاری آب ورودی به دستگاه، محاسبه اندیس رسوب گذاری استتیف و دیویس طبق استاندارد ASTM D 4582 انجام شد. همچنین اندیس استتیف و دیویس برای نمونه آب های ورودی به سر دوش ها در دماهای مختلف محاسبه گردید.

2-3- آزمون خوردگی

مقاومت به خوردگی نمونه های تیوب آلومینیوم - برنج استفاده

در این رابطه pH_c ، pH سیال غلیظ می باشد که با استفاده از مقادیر کلیات و دی اکسید کربن آزاد از رابطه (2) محاسبه می شود.

$$pH_c = 0.423 \times \ln(Alk_c/CO_{2c}) \times 6.2033 \quad (2)$$

همچنین pH_s ، pH کلسیت اشباع است که با استفاده از مقادیر غلظت کلسیم و کلیات آب تغلیظ شده با رابطه (3) محاسبه می شود.

$$pH_s = pCa_c + pAlk_c + K \quad (3)$$

در نهایت با محاسبه پارامترهای فوق، اندیس استتیف و دیویس در هر دمایی بر اساس آنالیز آب قابل محاسبه است. [15, 16].

آلیاژهای مس حاوی آلومینیوم و کروم، که فیلم های سطحی روئین تشکیل می دهند، مستعد به خوردگی در اثر پیل های اختلاف دمشی¹ هستند. در این آلیاژها حفره دار شدن در محلول های حاوی کلراید، به وقوع می پیوندد. خوردگی آلیاژهای مس در آب حاوی کلراید، به شکل گیری کلرید مس نسبت داده شده است؛ که طبق واکنش (4) هیدرولیز می شود:



اگر محلول بی حرکت و ساکن باشد، pH در سطح ممکن است به 2/5 تا 4 نیز برسد [17, 18]. همان طوری که گفته شده یکی از پرکاربردترین فلزات در ساخت اجزا دستگاه های آب شیرین کن مس و آلیاژهای آن می باشند. به همین منظور در این پژوهش خوردگی این جزء از دستگاه آب شیرین کن مورد توجه قرار گرفته است.

2- مواد و روش ها

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های آب در جدول 1 آورده شده است. بررسی نتایج نشان داد که آب ورودی به سر دوش ها تا حد زیادی مشابه مقادیر پیش بینی شده در طراحی می باشد. عمده اختلاف ها مربوط به میزان عواملی نظیر کربنات ها، بی کربنات ها و کل مواد جامد معلق می باشند. بررسی های انجام شده از مدارک ساخت و بازرسی های حین ساخت نشان می دهد که تیوب های آلومینیوم برنج بر اساس استاندارد ASTM B111USN C68700 تهیه و ساخته شده اند [19, 20].

2-1- آنالیز ترکیب شیمیایی رسوبات روی سطح خارجی تیوب ها و لجن کف دستگاه آب شیرین کن

به منظور تعیین نوع رسوبات، از رسوبات روی تیوب های آلومینیوم - برنج و لجن کف دستگاه آب شیرین کنی که از

¹ Differential Aeration Cell

3-2- بررسی نتایج آنالیز پراش پرتو ایکس

نتایج به دست آمده از آنالیز ساختاری نشان می‌دهد که رسوبات شناسایی شده بر روی تیوب‌های آلومینیوم - برنج، فقط کربناتی (CaCO_3) می‌باشند. در شکل‌های 1- الف و ب نتایج آنالیز ساختاری رسوبات آورده شده است. در لجن موجود در کف دستگاه آب شیرین کن علاوه بر رسوب کربناتی CaCO_3 ترکیبات دیگری نظیر $(\text{Mg,Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4(\text{H}_2\text{O})$ ، NaCl ، $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$ و SiO_2 نیز شناسایی شدند. همچنین نتایج حاصل از آنالیز ترکیب شیمیایی رسوبات به روش طیف‌سنجی فلورسانس اشعه ایکس، بر اساس درصد وزنی عناصر و ترکیبات تشکیل دهنده آنها (به حالت اکسیدی) در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 2 مقایسه آنالیز ترکیب شیمیایی ارائه شده در اسناد بازرسی

حین ساخت برای تیوب‌های آلومینیوم - برنج با استاندارد ASTM B111

Table 2 Comparison of the chemical composition analysis presented in the inspection documents for the production of Aluminum-Brass according to ASTM B111 standard

مرجع سند بازرسی [21]	استاندارد ASTM B111 USN C68700	ترکیب شیمیایی نمونه
77/69	76-79	Cu%
0/00	Max 0/07	Pb%
0/0075	Max 0/06	Fe%
باقیمانده	باقیمانده	Zn%
2/111	1/8 - 2/5	Al%
0/047	0/02 - 0/06	As%

جدول 3 نتایج آنالیز عنصری XRF رسوبات تهیه شده از الف - رسوبات روی

تیوب‌ها و ب - لجن کف دستگاه آب شیرین کن

Table 3 The XRF Results of Elemental precipitated Analysis A. deposits on the tubes and B. bottom sludge of desalination system

نوع ترکیب	الف (رسوبات روی تیوب‌ها)	ب (لجن کف دستگاه)
Na_2O	1/32	1/314
MgO	1/195	3/624
Al_2O_3	0/307	1/15
SiO_2	0/341	4/786
P_2O_5	0/051	0/131
SO_3	1/366	0/672
CL	0/437	0/911
CaO	49/031	43/422
Fe_2O_3	0/477	0/78
Sr	0/755	0/279
K_2O	-	0/248
Cr	-	0/192
Cu	-	-
Ni	-	-
Zn	-	-
L.O.I*	44/7	42/4

شده در دستگاه آب شیرین کن و تیوب‌های نو در محیط آب دریا با استفاده از آزمایش الکتروشیمیایی به روش پلاریزاسیون سیکیلی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور انجام آزمایش، نمونه‌های به ابعاد $2 \times 2 \text{ cm}^2$ مسطح از تیوب‌های استفاده شده و تیوب‌های نو آلیاژ آلومینیوم - برنج به عنوان الکتروود کاری تهیه و سپس با مانت سرد آماده‌سازی صورت گرفت. نمونه‌ها به منظور انجام آزمون پلاریزاسیون سیکیلی در دمای 50 درجه سانتی‌گراد در شرایط ساکن در محیط آب دریای اکسیژن زدایی شده، مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمون پلاریزاسیون سیکیلی با نرخ اسکن $0/02 \text{ mV/s}$ انجام شد. در شکل 2 رفتار خوردگی آلیاژ آلومینیوم - برنج در محلول آب دریا ارائه شده است.

4-2- بررسی‌های میکروسکوپی

به منظور بررسی‌های ریزساختاری آلیاژ تیوب‌های مورد استفاده در آب شیرین کن نمونه‌هایی از مقاطع عرضی و طولی آنها تهیه شد. کلیه نمونه‌های آلومینیوم - برنج به روش الکترواچ و با استفاده از اجانت ($5 \text{ gr FeCl}_3 + 50 \text{ ml HCl} + 100 \text{ ml Water}$) و با اعمال 25 ولت پتانسیل در مدت زمان 2 دقیقه، اچ شدند. برای بررسی دقیق تر مکانیزم و مورفولوژی مناطق خورده شده و آنالیز محصولات خوردگی در نواحی مورد نظر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی به همراه آنالیزور نوع EDX آن کمک گرفته شد (شکل‌های 4 و 5) [23].

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی مدارک ساخت و بازرسی‌های حین ساخت

بررسی مدارک ساخت و بازرسی‌های حین ساخت در پالایشگاه، منطبق بودن آنالیزهای ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی آلیاژهای بکار رفته در ساخت تیوب آلومینیوم - برنج را با استانداردهای اشاره شده در طراحی، تأیید می‌نمایند. در جدول 2 ترکیب شیمیایی آلیاژ بکار رفته در دستگاه آب شیرین کن نشان داده شده است. تعیین ترکیب شیمیایی آب ورودی به دستگاه آب شیرین کن جهت مقایسه آب ورودی به سر دوش‌ها با مقادیر پیش‌بینی شده در طراحی انجام شد. بر اساس اسناد بازرسی حین ساخت، نتایج حاصله با استانداردهای فوق مقایسه گردیده‌اند. همان گونه که در جدول 2 ملاحظه می‌شود هیچ گونه عدم انطباقی مشاهده نمی‌گردد. آلیاژهای آلومینیوم - برنج بکار رفته در ساخت تیوب‌های دستگاه آب شیرین کن از نوع ممانعت شده بوده و مطابق استاندارد ساخت، در ترکیب شیمیایی خود حاوی مقداری عنصر آرسینک می‌باشد [24].

روی تیوب‌ها در دمای کاری دستگاه آب شیرین کن تشکیل لایه‌های رسوب بر روی تیوب‌ها کاملاً حتمی خواهد بود. از مهم‌ترین عوامل تخریب لایه‌های محافظ سطحی آلیاژ آلومینیوم - برنج می‌توان به تشکیل رسوب بر روی تیوب و در نتیجه آن بروز خوردگی زیر رسوبی اشاره نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود آب‌های ورودی به سر دوش‌های دستگاه آب شیرین کن در دمای کاری، از قابلیت رسوب‌گذاری نسبتاً بالایی برخوردار می‌باشند [25, 26].

جدول 4 نتایج محاسبه پارامترهای مورد نیاز جهت تعیین اندیس استیف و دیویس

Table 4 The results of required parameters for determination of the Stiff & Davis Stability Index

پارامترهای رسوب‌گذاری		مقدار
Ca _c		68656/72
ALK _c		125/3731
k	13°C	3/62445
	35°C	3/21686
	45°C	2/98948
	50°C	2/86592
	60°C	2/59906
	70°C	2/62591
87°C		1/74707
pCa _c		0/162365
pALK _c		2/625918
CO _{2c}		1/877368
pH _c		11/02452

جدول 5 نتایج محاسبه اندیس استیف و دیویس در دماهای مختلف

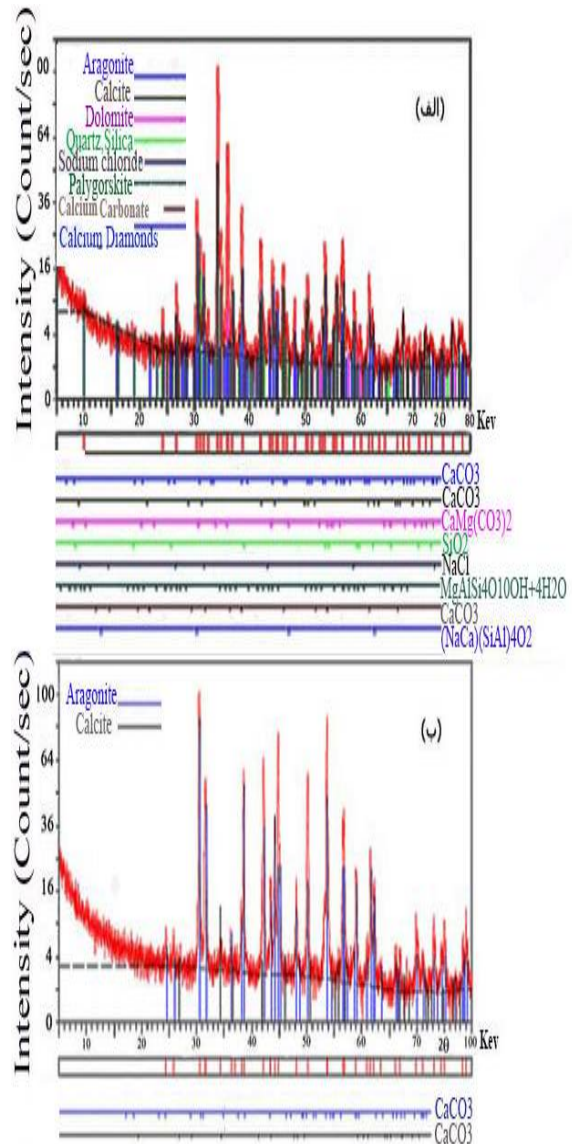
Table 5 The results of the Stiff & Davis Stability Index

اندیس DSI & S	دما (C°)
4/610893	13
5/018473	35
5/24586	45
5/36924	50
5/63628	60
5/92936	70
6/38827	87

3-4- بررسی نتایج خوردگی

در شکل 2 نمودار پلاریزاسیون سیکنی نمونه‌های تیوب آلومینیوم - برنج با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج حاصل از این نمودار در جدول 6 آمده است.

با توجه به مشاهده ترکیب SiO₂ در نتایج حاصله از آنالیز ساختاری و آنالیز عنصری نتیجه می‌شود که یکی از عوامل تخریب لایه محافظ اکسیدی بر روی تیوب‌های آلومینیوم - برنج می‌تواند ذرات سیلیس موجود در ماسه که به همراه آب وارد سیستم می‌شوند، باشد.



شکل 1 نتایج آنالیز XRD نمونه، رسوبات شناسایی شده (الف) لجن کف دستگاه آب شیرین کن (ب) رسوبات روی تیوب‌ها

Fig. 1 The XRD Results of Elemental precipitated Analysis A. deposits on the tubes and B. bottom sludge of desalination system

3-3- بررسی اندیس رسوب‌گذاری استیف و دیویس

بررسی وضعیت رسوب‌گذاری آب ورودی به دستگاه آب شیرین کن و نتایج محاسبه پارامترهای مورد نیاز در جدول 4 آورده شده است. همچنین مقادیر محاسبه شده اندیس استیف و دیویس در دماهای مختلف، در جدول 5 آورده شده است. مطابق جدول 5 به دلیل رسوب زای بودن آب اسپری شونده بر

بازه حفاظت نمونه‌ها، E_b-E_{pp} و پهنای منحنی پلاریزاسیون سیکنی، i_2-i_1 نیز تأیید کننده نقش بسیار کم لایه‌های شکل گرفته بر روی مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه‌های با رسوب نسبت به نمونه‌های جدید یا بدون رسوب می‌باشد.

همچنین مقدار دانسیته جریان خوردگی تیوپ استفاده شده و مقدار تیوپ نو با استفاده از نرم افزار NOVA محاسبه شد که مقدار دانسیته جریان برای نمونه کار شده در حدود 4×10^{-6} و برای نمونه نو 2×10^{-6} به دست آمد علاوه بر این مقدار سرعت خوردگی برای نمونه‌ها کار شده و نو نیز به ترتیب 2/98 mpy و 1/48 به دست آمد. نتایج به دست آمده همان طور که قبلاً نیز گفته شد نشان دهنده نقش ناچیز رسوبات تشکیل شده بر روی سطح نمونه در برابر خوردگی می‌باشد. یکی از عوامل مهم و تأثیر گذار بر روی شکست لایه اکسیدی محافظ بر روی آلیاژ آلومینیوم - برنج وجود ذرات ماسه در آب ورودی می‌باشد. پدیده خوردگی حفره‌ای، نیازمند شکست لایه اکسیدی محافظ موجود بر روی آلیاژ آلومینیوم - برنج می‌باشد. بر اساس نتایج حاصله از آنالیز ساختاری و عنصری، وجود ترکیب SiO_2 باعث تخریب لایه محافظ اکسیدی می‌شود. تخریب این لایه در کنار لایه رسوبی شکل گرفته نامناسب بر روی سطح تیوپ آلومینیوم - برنج می‌تواند مکان مستعد را برای ایجاد خوردگی حفره‌ای تهیه کند.

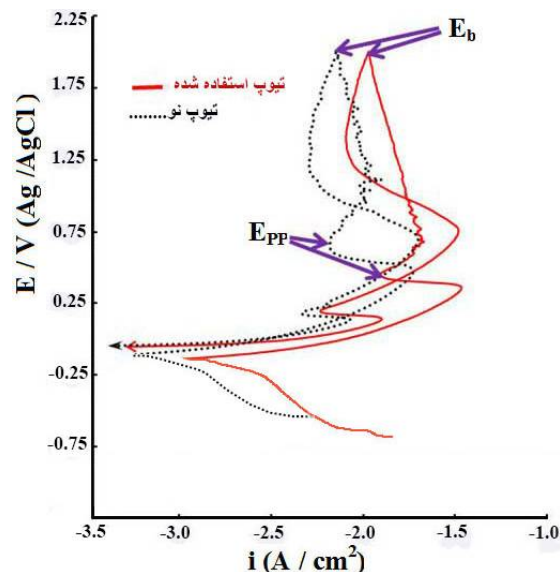
از طرف دیگر به دلیل اینکه تیوب‌های آلومینیوم - برنج در قسمت‌های درونی در تماس مستقیم با صفحه تیوب و صفحات بافلی که از جنس فولاد زنگ نزن 316L می‌باشند، احتمال خوردگی گالوانیکی نیز وجود خواهد داشت. که می‌تواند به عنوان یک عامل تشدیدکننده خوردگی حفره‌ای عمل کنند. به همین جهت این انتظار وجود خواهد داشت که با وقوع خوردگی حفره‌ای سرعت خوردگی شیاری افزایش یابد که بررسی‌های انجام شده در محیط تأیید کننده این مطلب می‌باشد.

3-5- بررسی ریزساختار

در شکل 3 ریزساختار آلیاژ آلومینیوم - برنج در بزرگنمایی و جهات مختلف نشان داده شده است. ساختار از دانه‌های فاز آلفا (α) هم‌محور به همراه دوقلوبی‌های حاصل از آنیل تشکیل شده است. همان طور که مشاهده می‌شود اندازه دانه‌ها در جهت عرضی، بزرگتر از جهت طولی می‌باشد. ریزساختارهای ملاحظه شده در شکل‌های ارائه شده، همانند ریزساختار آلیاژ آلومینیوم - برنج ذکر شده در منابع متالوگرافی این نوع آلیاژ می‌باشند [23].

3-5-1- بررسی سطوح خوردگی با میکروسکوپ نوری

بررسی‌های متالوگرافی بوسیله میکروسکوپ نوری و نیز



شکل 2 نمودار پلاریزاسیون سیکنی نمونه‌ی استفاده شده در دستگاه آب شیرین کن و تیوپ نو در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و محیط آب دریا اکسیژن زدایی شده

Fig. 2 polarization curve used and new specimen of desalination system in deoxygenated seawater at 50 °C

جدول 6 نتایج حاصل از آزمایش پلاریزاسیون سیکنی نمونه‌ی استفاده

شده در دستگاه آب شیرین کن و تیوپ نو در دمای 50 درجه سانتی‌گراد و محیط آب دریا اکسیژن زدایی شده

Table 6 The results of polarization curve used and new specimen of desalination system in deoxygenated seawater at 50 °C

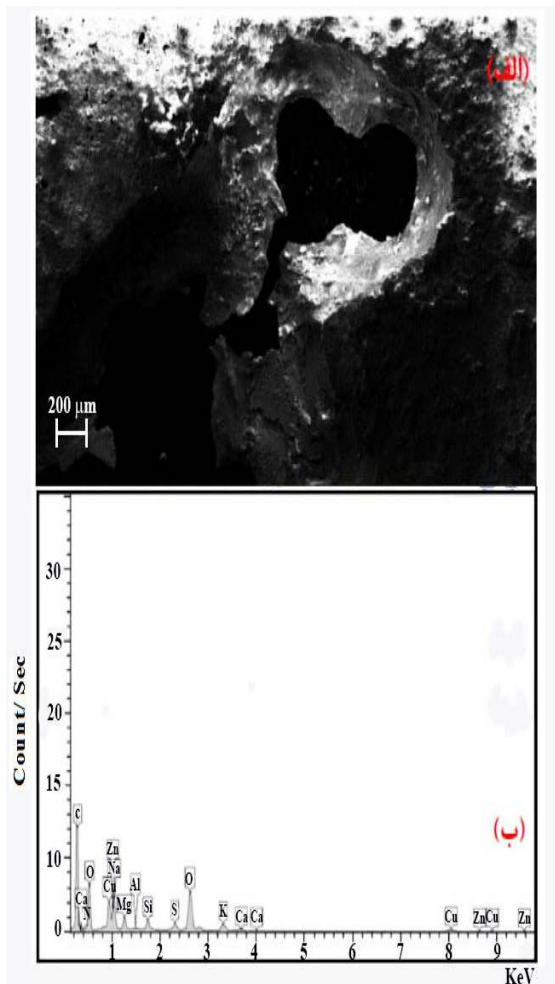
پارامتر / نمونه	E_{pp} (V)	E_b (V)	E_b-E_{pp} (V)	i_2-i_1 (A/cm ²)
نمونه کار نشده	0/65	2/10	1/35	0/4
نمونه کار شده	0/43	1/95	1/42	0/35

نتایج آزمون پلاریزاسیون سیکنی در دمای 50 °C و محیط آب دریا اکسیژن زدایی شده نشان دهنده اختلاف بسیار کم بین پتانسیل حفره دار شدن، E_b ، نمونه‌های جدید با نمونه‌های استفاده شده می‌باشد. این مطلب تأیید کننده این موضوع می‌باشد که لایه‌های تشکیل شده در اثر قرارگیری تیوپ آلومینیوم - برنج در محیط، نتوانسته است نقش محافظتی قابل توجهی بر روی تیوب‌های آلومینیوم - برنج اعمال کند. همچنین از طرف دیگر کاهش پتانسیل حفره دار شدن نمونه‌های استفاده شده نشان دهنده این مطلب می‌باشد که در زیر رسوبات تشکیل شده که عمدتاً رسوبات کربناتی می‌باشند مکان بسیار مناسبی برای پیدایش خوردگی زیر رسوبی شکل می‌گیرد که باعث کاهش مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای نمونه‌ها خواهد شد. اختلاف کم بین مقادیر به دست آمده برای

تشکیل حفره بر روی سطح خارجی تیوب‌های آلومینیوم - برنج رخ داده است. با تشکیل رسوب بر روی تیوب‌ها و ایجاد خوردگی زیر رسوبی، شرایط ترکیب شیمیایی سیال داخل حفره‌ها به سمت محیط‌های اسیدی پیش می‌رود. علاوه بر این، تغلیظ عوامل مخربی همچون یون کلراید (Cl) شرایط لازم برای ترک خوردگی ریزساختار را فراهم می‌نماید [27].

3-5-2- بررسی سطوح خوردگی با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

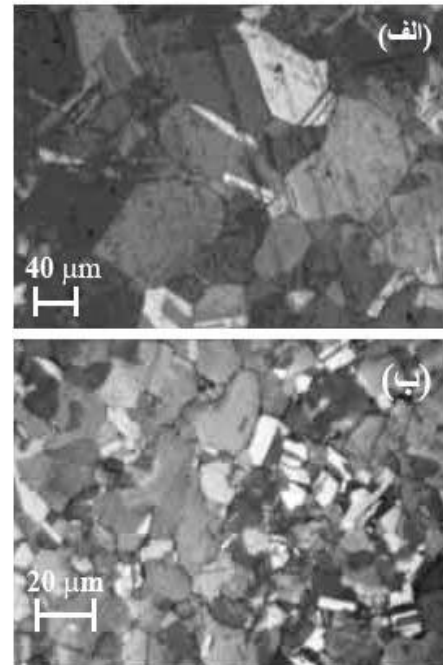
برای بررسی دقیق‌تر مورفولوژی مناطق خورده شده و آنالیز محصولات خوردگی در نواحی مورد نظر، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به همراه آنالیزور نوع EDAX کمک گرفته شد. در شکل 5 تصاویر تهیه شده از یکی از محل‌های نشستی بر روی سطح خارجی تیوب آلومینیوم - برنج نشان داده شده است.



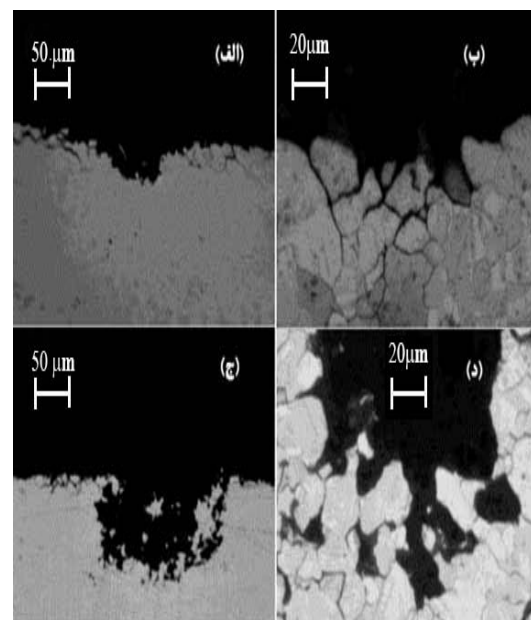
شکل 5 (الف) تصویر SEM از محل نشستی ایجاد شده بر روی سطح خارجی تیوب آلومینیوم - برنج ، (ب) آنالیز EDAX محصولات خوردگی موجود بر روی لبه نازک شدگی نشستی

Fig. 5 (a) The SEM image of the leakage created on the outer surface of the aluminum-brass tube (b) EDAX analysis of corrosion products on the leakage thinning edge

میکروسکوپ الکترونی SEM نشان می‌دهند که، عمدتاً خوردگی‌ها از زیر رسوبات آغاز شده‌اند. فرایند بروز ترک، در لایه‌های سطحی آلیاژ آلومینیوم - برنج و تشکیل حفره، به خوبی در شکل 4 نشان داده شده است.



شکل 3 ریزساختار تیوب‌های آلومینیوم - برنج (الف) - جهت عرضی، بزرگنمایی 1500 X، (ب) - جهت طولی، بزرگنمایی 800 X
Fig. 3 The Microstructure of Aluminum- Brass tube (A) Cross section, magnification 1500X, (B) Longitudinal section, magnification 800



شکل 4 فرایند تشکیل خوردگی حفره ای، (الف)، (ج) در آلیاژ آلومینیوم - برنج با بزرگنمایی 200×، (ب) و (د) بزرگنمایی 500×
Fig. 4 The pitting corrosion formation process), in aluminum- Brass alloy (a), (b), (c) magnification 200X, (d) magnification 500X

در واقع شکل مذکور نشان می‌دهد که خوردگی زیر رسوبی و

فرسایش و از بین بردن لایه‌های اکسیدی محافظ را در برخورد های اولیه افزایش می‌دهد.

- برای کاهش و جلوگیری از ادامه تخریب ناشی از بروز خوردگی بر روی تیوب‌هایی که در حال حاضر مشغول سرویس دهی در دستگاه‌های آب شیرین کن می‌باشند، استفاده از روش حفاظت کاتدی پیشنهاد می‌گردد. در این راستا می‌توان از آند فدا شونده میله‌ای، از جنس آلومینیوم در دسته تیوب‌ها استفاده نمود. برای پر کردن فضای بین تیوب‌ها با صفحه تیوب‌ها و صفحات بافلی، از واشرهای لاستیکی استفاده گردد، تا از تشدید خوردگی حفره‌ای در اثر اتصال گالوانیکی جلوگیری شود.

- کنترل عدم وجود آثار خوردگی اتمسفری بر روی تیوب‌های نو ضروری است. در واقع اولین قدم در راستای کاهش میزان خوردگی حفره‌ای در تیوب‌ها، کنترل عدم وجود آثار خوردگی اتمسفری بر روی سطوح آنها می‌باشد.

5- مراجع

- [1] E. Baruth Edward, Water Treatment Plant Design, McGraw-Hill, 5nd Ed., 1990.
- [2] L. Legrand, P. Leroy, Prevention of Corrosion and Scaling in Seawater Supply System, Ellis Horwood Limited, pp. 137-147, 1990.
- [3] M. Naira, D. Kumarb, Water desalination and challenges: The Middle East perspective, Desalination and Water Treatment, Vol. 51, pp. 1-11, 2013.
- [4] T. Hodgkiess, K.H. Al-Omari, N. Bontems. Acid cleaning of thermal desalination plant: do we need to use corrosion inhibitors?, Desalination, Vol. 183, pp.2 09-216, 2005.
- [5] NACE Corrosion Engineer's Reference Book, NACE International, 3nd Ed., 1990.
- [6] Y.A. Alzafin, A.H.I. Mourad, M. Abou Zour, O.A. Abuzeid, Stress corrosion cracking of Ni-resist ductile iron used in manufacturing brine circulating pumps of desalination plants, Engineering Failure Analysis, Vol. 16, pp.733-739, 2009.
- [7] K. Habib, O. Almatar, B. Alfeeli, Risk assessment and evaluation of materials commonly used in desalination plants subjected to stress corrosion cracking in polluted marine environment, Desalination, Vol. 153, pp. 217-221, 2003.
- [8] F. Nasirpouri, A. Mostafaei, L. Fathyunes, R. Jafari, Assessment of localized corrosion in carbon steel tube-grade AISI 1045 used in output oil-gas separator vessel of desalination unit in oil refinery industry, Engineering Failure Analysis, Vol. 40, pp. 75-88, 2014.
- [9] M. Meliani, B. G. Nasser muthanna, M. Amara, B. Mettai Hadj Inspection of internal erosion-corrosion of elbow pipe in the desalination station,

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، شروع خوردگی از سطح خارجی دیواره تیوب و به صورت شیب‌دار (V شکل) به سمت سطح داخلی می‌باشد که با نازک شدن موضع خورده شده، در نهایت دچار نشتی بخار از داخل تیوب به خارج از آن شده است. در شکل 5- ب نیز آنالیز محصولات خوردگی موجود بر روی لبه نازک شده مجاور محل نشتی، ارائه شده است. عمده عناصر یافت شده در این موضع شامل O, Cl, Cu (با میزان بالا)، Mg, Ca, Fe, S, C, Zn و تا حدودی k می‌باشد.

به دلیل وجود یون‌های خورنده و مخربی نظیر کلراید Cl^- در آب دریا و کاهش pH (که تا 2/5 نیز گزارش شده است) در زیر رسوب و همچنین ذرات ساینده‌ای همانند SiO_2 در آب ورودی، لایه‌های محافظ اکسیدی موجود بر روی تیوب‌ها مورد حمله موضعی و آسیب قرار خواهند گرفت. در مناطقی که لایه‌های اکسیدی محافظ تخریب می‌گردند، شرایط برای بروز خوردگی حفره‌ای فراهم خواهد شد.

4- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش خوردگی در آلیاژ آلومینیوم - برنج دستگاه آب شیرین کن در محیط آب دریا مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که:

- به دلیل رسوب زای بودن آب اسپری شونده بر روی تیوب‌ها در دمای کاری دستگاه آب شیرین کن و تشکیل لایه‌های رسوب بر روی تیوب‌ها، ایجاد خوردگی زیر رسوبی کاملاً حتمی خواهد بود. تحت این شرایط به دلیل وجود یون‌های خورنده و مخرب نظیر کلراید در آب دریا و کاهش pH در زیر رسوب، لایه‌های محافظ اکسیدی موجود بر روی تیوب‌ها مورد حمله موضعی و آسیب قرار خواهند گرفت. در مناطقی که لایه‌های اکسیدی محافظ تخریب می‌گردند، شرایط برای بروز خوردگی حفره‌ای فراهم خواهد شد. و خوردگی حفره‌ای به عنوان یک خوردگی غالب بر روی تیوب‌های آلیاژ آلومینیوم - برنج رخ خواهد داد که باعث تخریب تیوب‌ها شده و در نهایت باعث از کار افتادگی دستگاه آب شیرین کن می‌گردد.

- کنترل و پایش منظم و دقیق فیلترهای موجود بر سر راه آب دریای ورودی به سر دوش‌ها، جهت کاهش حداکثری ذرات ساینده ورودی نظیر SiO_2 ضروری می‌باشد.

- کنترل عدم گرفتگی دهانه نازل‌ها در دوش‌های آب مستقر در دستگاه‌های آب شیرین کن، ضروری است گرفتگی دهانه دوش‌ها، علاوه بر افزایش میزان رسوب تشکیل شونده بر روی تیوب‌ها، به دلیل افزایش سرعت آب اسپری شونده، احتمال

- [18] ASM Specialty Handbook, Copper and Copper Alloys, J. R. Davis (editor), pp. 290-352, 2001.
- [19] M. Gloede, T. Melin, A New Theoretical Approach to the Calcium Carbonate Crystallisation Process Out of Aquatic Solution and the Effect of Impurities on it, NACE International Corrosion Conference & Expo, Vol. 35, pp. 5225-5235, 2007.
- [20] American Society for Testing Materials, Standard Specification for Copper and Copper-Alloy Seamless Condenser Tubes and Ferrule Stock, 2008.
- [21] American Society for Testing Materials, Standard Guide for Elemental Analysis by Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry, 2005.
- [22] British Standard, Non-Destructive Testing. X-ray Diffraction from Polycrystalline and Amorphous Materials. General principles, 2003.
- [23] American Society for Testing Materials, Standard Practice for Microetching Metals and Alloy, 2007.
- [24] American Society for Testing Materials, Standard Specification for Copper and Copper-Alloy Seamless Condenser Tubes and Ferrule Stock, 2008.
- [25] M. Gloede, T. Melin, A New Theoretical Approach to the Calcium Carbonate Crystallisation Process Out of Aquatic Solution and the Effect of Impurities on it, NACE International Corrosion Conference & Expo, pp. 1987-2004, 2007,.
- [26] D. Feron, Corrosion Behavior and Protection of Copper and Aluminum Alloys in Seawater, European Federation of Corrosion Publication, Vol. 5, pp. 3-18, 2007.
- [27] ASM Handbook, Corrosion Materials, ASM International, pp. 269-350, 2005.
- Engineering Failure Analysis, Vol102, pp. 293-302. 2019.
- [10] M.A.Deyab, Enhancement Of corrosion resistance in MSF desalination plants during acid cleaning operation by cationic surfactant, Desalination, Vol. 456, pp 32-37, 2019.
- [11] M. A. Migahed, S. M. Rashwan, M. M. Kamel, R. E. Habib, Synthesis, characterization of polyaspartic acid-glycine adduct and evaluation of their performance as scale and corrosion inhibitor in desalination water plants, Journal of Molecular Liquids, Vol. 224, pp. 849-858, 2016.
- [12] A. M. Al-Sabagh, N. M. El Basiony, S. A. Sadeek, M. A. Migahed, Scale and corrosion inhibition performance of the newly synthesized anionic surfactant in desalination plants: Experimental, and theoretical investigations Desalination, Vol. 437, pp. 45-58, 2018.
- [13] American Society for Testing Materials, Standard Practice for Calculation and Adjustment of the Stiff and Davis Stability Index for Reverse Osmosis, 2010.
- [14] I.C. Watson, O.J. Morin, L. Henthorne, Desalting Handbook for Planners, 2003.
- [15] Z. Amjad, THE Science and Technology of Industrial Water Treatment, Taylor, Francis group, 2010.
- [16] A. Saifelnasr, M. Bakheit, K. Kamal, A. Lila, Calcium Carbonate Scale Formation, Prediction and Treatment (Case Study Gumry Oilfield-PDOC) International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy, Vol. 12, pp. 47-58, 2013.
- [17] H. Leidheiser, the Corrosion of Copper, Tin and their Alloys, John Wiley and Sons, 2nd Ed., 1971.